



République Algérienne Démocratique et populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil & Architecture



N° d'ordre : M2...../TP/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'Art (VOA).

Apport du BIM dans le cas d'infrastructures linéaires : Cas d'un projet routier

Présenté par :

▲ ADAM ALI ERDA

Soutenu le : 11/07/2021 Devant le jury de soutenance composé de :

▲ President: Pr. TAHAR KADRI

▲ Examinateur : Pr. BOUHAMOU NASREDDINE

▲ Encadrant: Dr. ZAOUI MOHAMED

Année Universitaire : 2020-2021

Dédicace

À ma chère mère et à toute ma famille

*« La folie c'est de faire toujours la même chose et de s'attendre à un résultat différent. » **Albert Einstein***

Remerciement

*Avant tout, je remercie **Allah** le tout puissant de m'avoir donné la santé et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant le **Dr Mohomed Zaoui**, professeur au département de Génie Civil à l'Université de Mostaganem pour sa disponibilité, ses conseils généraux, son aide et ses suggestions utiles par sa supervision tout au long du présent travail.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury le **Pr Tahar Kadri** et le **Pr Bouhamou Nasreddine** pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon modeste travail.*

Un grand merci à toutes les personnes qui ont contribués à ma formation

*L'honneur m'échoit enfin de citer en lettre d'or le nom de mon père **Ali Erda** et celui de mon oncle **Tahir Erda**, vous avez contribué à mon développement, qu'**Allah** vous donne des longues vies.*

Et enfin, je remercie toute ma famille pour son soutien multiforme.

Résumé

Bien que le *Building Information Modeling* (BIM) soit largement adopté et a donné de bons résultats dans le secteur du bâtiment depuis des décennies, son utilisation dans le contexte d'infrastructures linaires a mis trop de temps quant à son adoption et son application. Pour rattraper ce retard, des universitaires et industriels s'efforcent davantage d'adopter le BIM pour les infrastructures en menant des recherches scientifiques.

Ce travail explore l'implémentation du BIM dans les projets d'infrastructures en générale et dans un projet routier en particulier. Pour ce faire, le projet se concentre sur les fonctionnalités des outils BIM tels que Infracworks et Autocad Civil 3D avec une application qui gravite autour du choix de la meilleure variante d'un projet routier en vue de substituer un tronçon vulnérable aux inondations reliant la ville de sidi Belattar à la RN 90. Dans cette application, nous avons utilisé les méthodes AHP et PROMETHEE pour prendre une décision.

Mots clés: Building Information Modeling (BIM), Infrastructures, projet routier, Infracworks, Civil 3D, AHP, PROMETHEE

Abstract

Although Building Information Modeling (BIM) is widely adopted and has performed well in the building industry for decades, its use in the context of linear infrastructure has taken too long to adopt and apply. To catch up, academics and industry are making greater efforts to adopt BIM for infrastructure by conducting scientific research.

This work explores the implementation of BIM in infrastructure projects in general and in a road project in particular. To do this, the project focuses on the functionality of BIM tools such as Infracworks and Autocad Civil 3D with an application which revolves around the choice of the best variant of a road project in order to replace a section vulnerable to flooding connecting the city of sidi Belattar to the RN 90. In this application, we used the AHP and PROMETHEE methods to take a decision.

Keywords : Building Information Modeling (BIM), Infrastructures, road project, Infracworks, Civil 3D, AHP, PROMETHEE

ملخص

على الرغم من اعتماد نمذجة معلومات البناء (BIM) على نطاق واسع وأداؤها جيداً في صناعة البناء لعقود من الزمن، إلا أن استخدامها في سياق البنية التحتية الخطية استغرق وقتاً طويلاً لتبنيها وتطبيقها. للحاق بالركب، يدفع الأكاديميون والصناعة بقوة أكبر لتبني BIM للبنية التحتية من خلال البحث العلمي.

يستكشف هذا العمل تنفيذ BIM في مشاريع البنية التحتية بشكل عام ومشروع الطرق بشكل خاص. للقيام بذلك ، يركز المشروع على وظائف أدوات BIM مثل Infracad و Autocad Civil 3D مع تطبيق يدور حول اختيار أفضل خيار لمشروع الطريق من أجل استبدال قسم معرض للفيضانات يربط المدينة من سيدي بالعتري إلى RN 90. في هذا التطبيق ، استخدمنا أساليب AHP و PROMETHEE لاتخاذ قرار.

الكلمات الرئيسية: نمذجة معلومات البناء (BIM) ، البنية التحتية ، مشروع الطرق ، Infracad, Civil 3D, AHP, PROMETHEE

Liste des Sigles et abréviations

AEC : Architecture, Engineering & Construction

AHP : Analytic Hierarchy Processes

APS : Avant-Projet Sommaire

BIM : Building Information Modeling

CAD : Computer Aided Design

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CSV : Comma-Separated Values

CW 60 : Chemin de Wilaya 60

DWG : DraWinG

GPS : Global Positionning System

IFC : Industry Foundation Classes

IMX : Infrastructures Modèle Exchange

LIDAR : Light Detecting And Ranging

LOD : Level Of Detail

MINnD : Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PFE : Projet de Fin d'Etude

PIV : Point d'intersection Verticale

PROMETHEE : Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation

RN 90 : Route Nationale 90

SHP : Shapefile

SIG : Système d'Information Géographique

V2 GDEM : Global Elevation Model Version 2

XML : Extensible Markup Langage

3D : Trois Dimensions

Table des matières

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENT	II
RESUME.....	III
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	V
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES TABLEAUX	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : BUILDING INFORMATION MODELING	3
I.1 HISTORIQUE ET ORIGINE DU BIM	3
I.2 CONCEPT DU BIM	3
I.2.1 Ce qui n'est pas BIM.....	4
I.2.2 Ce qui est BIM	5
I.2.3 Les fonctions du BIM.....	7
I.2.4 La maquette numérique	8
I.2.5 Les Niveaux de maturité du BIM	9
I.2.6 Les Niveaux de détail du BIM	11
I.2.7 Les dimensions BIM	13
I.2.8 BIM et pratiques contractuelles.....	13
I.2.9 L'adoption du BIM dans le monde	14
I.3 L'INTEROPERABILITE	15
I.3.1 L'open BIM.....	15
I.3.2 Les IFC (Industry Foundation Classes).....	17
CHAPITRE II : LE BIM AU SERVICE DES INFRASTRUCTURES	17
II.1 INTRODUCTION.....	17
II.2 ETAT DE L'ART DES OUTILS BIM.....	17
II.2.1 Autodesk Infracore	18
II.2.2 Autodesk Revit.....	18
II.2.3 Autodesk Navisworks	18
II.2.4 Autodesk Recap pro	19
II.2.5 Autodesk 3DS Max Design.....	19
II.2.6 Autodesk Autocad Civil 3D	19
II.2.7 Autodesk Vehicle tracking	19
II.2.8 Géomedia Covadis	20
II.3 QUELQUES PROJETS BIM	20
II.3.1 Angleterre : « London Crossrail » :.....	21
II.3.2 Turquie : « Grand Aéroport d'Istanbul »	22
II.3.3 Le pont Heihe – Blagoveshchensk	23
II.3.4 La Pata Avenue Gap Closure et Camino Del Rio Extension	24

II.3.5 Rôles et responsabilités dans le projet BIM	25
II.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS	27
II.4.1 Les avantages	27
II.4.2 Les inconvénients d'intégration du BIM dans les projets d'infrastructure	29
II.5 INTEGRATION BIM-SIG	30
CHAPITRE III : CHOIX DE VARIANTES D'UN PROJET ROUTIER EN PHASE APS (AVANT-PROJET SOMMAIRE) AVEC INFRAWORKS	32
III.1 INTRODUCTION.....	32
III.2 CRITERES DE COMPARAISON DES VARIANTES	32
III.3 BREF APERÇU SUR LA TECHNIQUE CLASSIQUE EN APS	33
III.3.1 Photographies aériennes	33
III.3.2 Carte géologique	34
III.3.3 Carte topographique	35
III.3.4 Projection sur une carte topographique	35
III.3.5 Trimble quantm	36
III.4 LES AVANTAGES D'INFRAWORKS DANS LA PHASE D'APS	37
III.4.1 Conception des infrastructures	38
III.4.2 Normes utilisées	38
III.4.3 Tracé géométrique des routes.....	39
III.4.4 Les données dans Infracworks	42
III.4.5 Analyse de trafic.....	45
III.4.6 Analyse des Bassins versants	46
III.4.7 Estimation des débits.....	46
III.4.8 Ajout et dimensionnement des ouvrage hydrauliques.....	46
III.4.9 Terrassement et calcul des matériaux.....	47
III.4.10 Optimisation du projet 3D.....	48
III.4.11 Communication autour du projet.....	50
CHAPITRE IV : MODELISATION DES VARIANTES.....	52
IV.1 INTRODUCTION.....	52
IV.2 PRESENTATION DU PROJET	53
IV.3 CREATION DU MODELE AVEC MODEL BUILDER.....	54
IV.3.1 Les objets existants.....	55
IV.3.2 Image aérienne de la zone	56
IV.4 IDENTIFICATION DE LA ZONE DE CONVENANCE	56
IV.4.1 Palette de Thèmes de terrain	56
IV.4.2 Carte de contraintes	57
IV.5 TRACE EN PLAN	58
IV.5.1 Règles et principes de tracé en plan	58
IV.5.2 Esquisse de la route	59
IV.6 OPTIMISATION DE LA ROUTE	59
CHAPITRE V : ETUDE HYDROLOGIQUE.....	61

V.1	DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS.....	61
V.1.1	Méthodologie d'étude	61
V.2	ANALYSE DES BASSINS VERSANT.....	62
V.3	CALCUL DES DEBITS DES BASSINS VERSANTS	63
V.3.1	Méthode rationnelle.....	63
V.3.2	Calcul d'intensité.....	64
V.3.3	Estimation des coefficients de ruissellement	65
V.4	RESULTATS DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE.....	66
V.4.1	Ouvrages hydrauliques.....	67
CHAPITRE VI : ANALYSE MULTICRITERE D'AIDE A LA DECISION.....		69
VI.1	INTRODUCTION.....	69
VI.2	LE PROCESSUS D'ANALYSE HIERARCHIQUE (AHP) DE SAATY.....	69
VI.2.1	Particularités de la méthode AHP	69
VI.2.2	Les différentes étapes de la méthode AHP.....	70
VI.3	PROMETHEE II	73
VI.3.1	Avantage de l'utilisation de PROMETHEE.....	74
VI.3.2	Les étapes de la méthode.....	74
VI.4	ANALYSE ET CHOIX DE LA MEILLEURE VARIANTE	75
VI.4.1	Définition des alternatives.....	76
VI.4.2	Définition des critères	76
VI.4.3	Expérimentation numérique	77
CHAPITRE VII : L'UTILITE DE CIVIL 3D DANS L'ETUDE DETAILLEE DE LA VARIANTE CHOISIE		84
VII.1	CONCEPTION D'AUTOCAD CIVIL 3D.....	84
VII.1.1	Présentation d'Autodesk	84
VII.1.2	Evolution d'AutoCAD Civil 3D	84
VII.2	FONCTIONNALITES	85
VII.2.1	Topographie	85
VII.2.2	Analyse géospatiale et cartographie.....	86
VII.2.3	Tracés géométriques.....	86
VII.2.4	Étude hydrologique et hydraulique	95
VII.2.5	Calcul des terrassements	95
VII.2.6	Métrés et rapports.....	96
VII.2.7	Modules.....	96
VII.3	FLUX DE TRAVAIL INFRAWORKS-CIVIL 3D	98
VII.3.1	Importation du modèle dans Civil 3D.....	99
VII.3.2	Avantages d'associer les deux logiciels.....	100
CONCLUSION GENERALE		101
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		103
ANNEXES.....		A

Annexes

Annexe 1: Rapport d'optimisation de la variante 1	A
Annexe 2: Détermination de l'écart de comparaison par paire.....	H
Annexe 3:Fonction de préférence et la préférence globale	I
Annexe 4: Détermination de débits de surclassement.....	K
Annexe 5:Structure globale de Civil 3D	K

Liste des figures

<i>Chapitre I : Building Information Modeling</i>	
Figure I- 1:Champs d'action du BIM.....	8
Figure I- 2: Maquette numérique.....	9
Figure I- 3: Niveaux de maturité BM (modèle de Bew-Richards).....	11
Figure I- 4: Niveaux de détails BIM	12
Figure I- 5: Format IFC.....	17
<i>Chapitre II : Le BIM au service des infrastructures</i>	
Figure II- 1: utilisation des outils dans différentes phases d'un projet	18
Figure II- 2: Taux d'utilisation du BIM dans les infrastructures	21
Figure II- 3: Le projet Londres -Crossrail	22
Figure II- 4: Grand Aéroport d'Istanbul	23
Figure II- 5: Le pont Heihe – Blagoveshchensk.....	24
Figure II- 6: La Pata Avenue Gap Closure et Camino Del Rio Extension.....	25
Figure II- 7: Intervention du BIM	29
Figure II- 8: Intégration BIM-SIG	31
<i>Chapitres III : Choix de variantes d'un projet routier en phase APS (Avant-projet sommaire) avec Infracworks</i>	
Figure III- 1: Extrait de la carte géologique de la zone d'étude.....	34
Figure III- 2: Extrait de la carte topographique de la zone d'étude	35
Figure III- 3: Tracé routier sur une carte.....	36
Figure III- 4: Projection routière sur Trimble quantm (Quantm construction)	37
Figure III- 5: Modèle de la ville de Paris généré par Infracworks	37
Figure III- 6: fonctionnalité "créer" d'Infracworks.....	38
Figure III- 7: Tracé en plan	39
Figure III- 8: Exemple vue de profil en long.....	40
Figure III- 9: Vue de profil en travers	41
Figure III- 10: Interaction entre : profil en long, tracé en plan et profil en travers.....	42
Figure III- 11:flux d'échange d'Infracworks avec d'autre outils.....	43
Figure III- 12: Modèle numérique de terrain	44
Figure III- 13: Modèle 3D LIDAR.....	45
Figure III- 14: Evaluation aux normes de sécurité avec Vehicle tracking	46
Figure III- 15:Exemple d'illustration d'ouvrage hydraulique.....	47
Figure III- 16: Fonctionnalité de calcul des quantités.....	48
Figure III- 17: Cartographie de transport de matériaux	49
<i>Chapitre VI : Modélisation des variantes</i>	
Figure IV- 1: Méthodologie du travail	53
Figure IV- 2: Présentation de du projet de CW60.....	54
Figure IV- 3: Création d'une zone délimitée par Model Builder	55
Figure IV- 4: reconnaissance d'un bâtiment par Infracworks	56
Figure IV- 5: Palette de thème de terrain de la zone d'étude	57
Figure IV- 6: Carte de contraintes.....	58
Figure IV- 7: Esquisse de la route (illustration d'un tracé en plan)	59
Figure IV- 8 : Création d'axe par optimisation.....	60

Chapitre V : Etude hydrologique

Figure V- 1: Génération de bassins versantst..... 61
 Figure V- 2: Insertion des données hydrologiques..... 63
 Figure V- 3: Intensité-durée-fréquence 64

Chapitre VI : Analyse multicritère d'aide à la décision

Figure VI- 1: Décomposition d'un problème en structure hiérarchique 71
 Figure VI- 2: Matrice de décision 72
 Figure VI- 3: variantes projetées 76
 Figure VI- 4: structure hiérarchique pour le choix de la meilleure variante 78
 Figure VI- 5: Diagramme de poids des critères 79
 Figure VI- 6: Résultat représenté en forme de radar 81

Chapitre VII : L'utilité de civil 3D dans l'étude détaillée de la variante choisie

Figure VII- 1: Surface Topographique..... 86
 Figure VII- 2: tracé en plan importé depuis Infracworks..... 87
 Figure VII- 3: les éléments du tracé en plan 87
 Figure VII- 4: Editeur de normes de conception..... 88
 Figure VII- 5: application des normes de conception 89
 Figure VII- 6: Avertissement de non-respect des normes..... 89
 Figure VII- 7: correction des rayons en plan..... 90
 Figure VII- 8: Distance de visibilité..... 91
 Figure VII- 9: Visualisation 3D 91
 Figure VII- 10: Profil en long 92
 Figure VII- 11: Modification du profil en long..... 93
 Figure VII- 12: Eléments de profil type 94
 Figure VII- 13: Dimensionnement de l'ouverture d'un ouvrage hydraulique 95
 Figure VII- 14: Modules Civil 3D..... 96
 Figure VII- 15: Points de sondages géotechniques 97
 Figure VII- 16: Conception d'un pont 97
 Figure VII- 17: Chemin de fer..... 98
 Figure VII- 18: workflow Infracworks-Civil 3D 99
 Figure VII- 19: rubrique Infracworks dans Civil 3D 99

Liste des tableaux

Chapitre I : Building Information Modeling

Tableau I- 1: Différents standards de l'OpenBIM (buildigSMART,2018) -----16

Chapitre V : Etude hydrologique

Tableau V- 1: Caractéristiques des bassins versants 62
 Tableau V- 2: Valeurs de a et b pour différentes périodes de retour de la station de Benaira 64
 Tableau V- 3: Coefficients de ruissellement selon la nature et la morphologie du terrain 66
 Tableau V- 4: résultats de l'étude hydrologique..... 66
 Tableau V- 5: Nombre d'ouvrages hydrauliques par variante..... 67

Chapitre VI : Analyse multicritère d'aide à la décision

Tableau VI- 1: Echelle numérique de comparaison binaire (Saaty, 1980)..... 72

Tableau VI- 2: Index de cohérence aléatoire par rapport au nombre d'éléments comparé.....	73
Tableau VI- 3: Valeurs des critères pour chaque variante	77
Tableau VI- 4: Matrice de comparaison par paire.....	78
Tableau VI- 5: Détermination de poids des critères.....	79
Tableau VI- 6: Normalisation de la matrice de décision.....	80
Tableau VI- 7: Classement par ordre de priorité des variantes	81

Introduction générale

Aujourd'hui, le monde entier est bouleversé par l'avènement du numérique. Depuis plusieurs années, le développement du BIM (*Building Information Modeling*) à révolutionner le monde du bâtiment en améliorant constamment le processus de conception, de construction et de gestion des bâtiments (S. AIT-LAMALLAM, et al., 2019). Longtemps considéré comme l'outil spécifique à ce domaine, le BIM a été mis en œuvre avec un retard dans le domaine d'infrastructures. De plus, il n'y a pas eu beaucoup d'entreprises développeurs de logiciel qui se sont engagées dans la création des logiciels BIM spécifiques aux infrastructures (Maxime, 2020). L'un des fondements principaux du BIM est la collaboration et son véritable avantage se trouve dans la phase d'exécution en matière de réduction des coûts, de respect des délais et d'amélioration de la qualité (CHELBAB NASSIMA, et al., 2019).

La construction routière découle des techniques classiques que les parties prenantes du domaine ne cessent d'innover (Rakotondraïne, 2015), c'est dans cette optique que des grandes entreprises impliquées dans les travaux publics et des concepteurs de logiciels collaborent pour l'intégration du processus BIM dans les infrastructures, à l'exemple du projet MINnd qui a pour but la définition des Protocoles de travail BIM dans les projets d'infrastructures (Maxime, 2020).

En effet, un projet routier de sa planification jusqu'à sa réalisation est un travail de longue haleine, sans exclure sa gestion qui est aussi coûteuse. L'utilisation du BIM permet de réduire le travail acharné en optimisant les tâches et ainsi permettre aux ingénieurs d'avoir des nouvelles idées à mettre en place. Cependant, il y a une grande résistance au changement dans le domaine routier, cela peut se traduire par la non prise de conscience d'un bon nombre d'ingénieurs et concepteurs routiers de la puissance de ce processus de travail ou d'autres encore ne veulent pas sortir de leurs zones de confort préférant travailler avec des outils rudimentaires (Rakotondraïne, 2015) . C'est dans ce contexte que nous avons jugé nécessaire de relater les avantages du BIM dans les projets routiers, d'où le thème de ce PFE « **Apport du BIM dans le cas d'Infrastructures linéaires : Choix de variantes d'un projet routier** ».

Par comment est-ce que le BIM peut impacter les projets d'infrastructures routières ? Quels sont les principaux outils ?

Pour répondre à ces problématiques susmentionnés, nous avons ce présent projet en sept chapitres à savoir :

Le premier chapitre parle du BIM en général et le second du BIM dans les infrastructures en particulier. Le troisième chapitre présente l'importance du logiciel Autodesk InfraWorks 360 dans le choix de la meilleure variante d'une route en phase APS. Le quatrième chapitre concerne la modélisation des variantes du projet de Chemin de Wilaya 60. Le cinquième chapitre évoque l'étude hydraulique. Le sixième chapitre traite l'analyse multicritère d'aide à la décision qui a permis de choisir la meilleure variante parmi cinq alternatives. Le septième et dernier chapitre dévoile l'importance du logiciel Autodesk AutoCAD Civil 3D dans le détail de la variante choisie. Et enfin nous terminons avec une conclusion générale.

Chapitre I : Building Information Modeling

I.1 Historique et origine du BIM

Au début, le BIM est un concept qui a été développé pour la conception des bâtiments. Les premières réflexions à son sujet sont apparues dans les années 1960 et entretemps il est considéré comme étant une conception architecturale reposant sur la manipulation d'un modèle informatique regroupant des représentations géométriques et des bases de données relatives au projet. Dans les années 1970, le BDS (Database Building System) est créé, c'est le premier logiciel ayant une base de données et permettant la conception des bâtiments à partir des objets individuels à ajouter tout en permettant de visualiser le projet et l'ensemble de données des objets. Sur le même principe général, ArchiCAD a été créé en 1982 à Hongrie, et devient le tout premiers logiciel BIM compatible avec les ordinateurs portables.

Pour créer un flux de travail entre les acteurs du projet, il y'a eu l'engagement d'une réflexion aux États-Unis en 1995 qui a conduit à la création du format IFC par BuildingSMART. Ce format devient un standard servant à faciliter l'échange de données (Interopérabilité) dans le domaine du bâtiment.

Le logiciel Revit bien connu dans secteur du bâtiment est née d'ArchiCAD en 2000, on assiste alors à l'intégration de la gestion des ressources et du temps dans le BIM. Depuis ce temps, le BIM est en continuel développement.

Néanmoins, les logiciels BIM de conception routières ont paru tardivement (à partir de l'année 2005), le BIM n'est pas encore mature dans le domaine d'infrastructures routières, il reste à améliorer de nombreuses méthodes et outils (les IFC spécifiques aux infrastructures, logiciels interopérables, la collaboration...) (CEREMA, 2017).

I.2 Concept du BIM

Le mot BIM vient de l'anglais : Building Information Modeling/ Model/ Management se traduit comme « Modélisation des Informations du Bâtiment » ou « Maquette Numérique du Bâtiments ». Celui-ci s'appliquait au départ uniquement aux bâtiments mais aujourd'hui il s'étend à d'autres projets d'infrastructures. En effet le BIM n'a pas une définition unique acceptée par tout le monde (CEREMA, 2017).

Par méconnaissance, le BIM est réduit ou assimilé à un logiciel, alors qu'en réalité c'est une alliance d'une panoplie de logiciels et des plateforme collaboratives qui définit les méthodes de

travail reposant autour d'une maquette numérique contenant des modèles 3D riches en informations.

Le noyau du BIM est le processus de gestion des informations qui alimentent les différents modèles. Ce concept vise à faciliter la collaboration entre acteurs en générant plus de canaux d'échanges tant sur le partage de fichier que sur le plan communicationnel. Cela ne sert pas simplement à optimiser le projet, mais donne une vision plus généraliste en prenant en considération les problématiques des autres métiers. Le principe repose dans un premier lieu de mener des études techniques en amont dans chaque corps de métiers du projet dans le but de détecter les interférences et chercher des solutions.

Le processus BIM s'inscrit dans un projet pendant tout son cycle de vie, c'est-à-dire :

- ▲ Lors de la planification ;
- ▲ Lors de la construction ;
- ▲ Lors de la livraison ;
- ▲ Lors de l'exploitation ;
- ▲ Lors du démantèlement ou démolition (Rafael Sacks, et al., 2018)

Pour pouvoir mieux comprendre le concept BIM et effacer les fausses idées, il est important de scinder ce qui n'est pas BIM de ce qui est BIM.

I.2.1 Ce qui n'est pas BIM

Alors que le BIM est en train de gagner du terrain sur le marché de la construction, des initiatives émergent aussitôt. Ces initiatives sont des coups de pub marketing émanant des développeurs et fournisseurs qui habillent leurs logiciels en utilisant le terme « technologie BIM ».

En cassant cette fausse idée, il est plausible d'être défini comme non BIM :

- ▲ **Les solutions ne faisant pas des mises à jour automatiquement** : beaucoup de logiciels non BIM ne mettent pas automatiquement à jour les rapports et les autres vues du même projet en cours si des modifications et des révisions sont faites sur une vue particulière. Dans ce contexte l'utilisateur est obligé de mettre à jour son travail à

l'aide des commandes spécifiques, et si par malheur cette opération ne se produit pas, une partie de son travail présentera des erreurs et des incohérences ;

- ✦ **Le BIM n'est pas un seul logiciel :** Infracore, Navisworks, Revit, ArchiCAD, Civil 3D, Tekla ne sont pas le BIM, ils sont des outils de conception BIM. C'est comme s'il revenait à dire que « CAD » est « AutoCAD ». Par exemple les gens qui utilisent Revit disent que leurs projets ont été réalisés avec le BIM alors qu'en réalité non. Pour pallier à cela, il faut utiliser le processus complet pour profiter d'un maximum d'avantages au lieu d'utiliser le « BIM solitaire » ;
- ✦ **Le BIM ne peut pas être défini comme une base de données unique ou un modèle de bâtiment :** En fait c'est un ensemble de modèles et des bases de données qui sont interconnectés créant des relations entre eux et permettant de partager et d'extraire des informations ;
- ✦ **Tout ce qui est en 3D n'est pas absolument synonyme de BIM :** Les solutions servant uniquement à modéliser et visualiser en graphique 3D des modèles d'infrastructures à l'aide d'objets n'ayant pas d'autres informations que leurs propres géométries ne sont pas des solutions BIM ;
- ✦ **Des solutions qui utilisent de multiples références 2D (dessin ou document) émulent des modèles tridimensionnels :** Ces types de logiciels ne permettent pas l'extraction automatique de quantités, n'effectuent pas de mises à jour automatiques, ni même permettent d'effectuer des simulations et des analyses.
- ✦ **Le BIM ne remplace pas les humains :** Le BIM est synonyme de travail intelligemment fait, de formation, d'état d'esprit qui réduit le travail acharné et banal ;
- ✦ Les logiciels ou solutions 3D n'agissant pas en tant que des gestionnaires de bases de données intégrés ne peuvent pas être des BIM (Kymmell, 2008).

I.2.2 Ce qui est BIM

Si les CAO ne sont pas des BIM, alors qu'est-ce que le BIM ? comme mentionné dans la partie précédente, il n'y a pas encore une définition unique du BIM consentie par tout le monde. Ceci résulte du fait que même les pionniers (les fournisseurs de logiciels BIM et les organismes) le définissent chacun selon sa vision.

L'institut National Américain des sciences du Bâtiments/Construction (NIBS) l'a défini comme « une représentation calculable des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'une installation et de ses informations de projet/cycle de vie associées à l'aide de normes industrielles ouvertes pour éclairer la prise de décision commerciale afin de réaliser une meilleure valeur », l'institut National Américain d'Architecture (AIA) le définit comme « l'utilisation, la réutilisation et l'échange d'informations avec une technologie intégrée basée sur des modèles 3D-2D, dont les documents électroniques ne sont qu'un seul composant ». Tandis que les développeurs de logiciels comme Autodesk, ArchiCAD et Bentley le décrivent comme : « un référentiel unique comprenant à la fois des documents graphiques - dessins - et des documents non graphiques - spécifications, calendriers et autres données » (ArchiCAD) ; « Une modélisation de l'aspect graphique et non graphique de l'ensemble du cycle de vie du bâtiment dans un système de gestion de base de données fédéré » (Bentley) ; ou encore « Une méthodologie de conception et de documentation du bâtiment caractérisée par la création et l'utilisation d'informations calculables coordonnées et cohérentes en interne sur un projet de construction en conception et en construction » (Autodesk).

En d'autres mots, le BIM est une combinaison d'outils, de bases de données, de modèles 3D et de processus de travail. Ce qui veut dire le BIM commence par un modèle d'une structure de bâtiment ou autre infrastructure 3D qui est beaucoup plus qu'une simple visualisation des textures et de la géométrie ajoutées au modèle, un véritable modèle BIM équivaut à des sections réelles d'un ouvrage de génie civil utilisées pour créer cet ouvrage. Un prototype composé des éléments virtuels des éléments physiques de l'ouvrage permet de simuler et de comprendre le comportement de l'ouvrage en question de commencer à le réaliser. Une base de données est créée à base de ces modèles, une base de données plus qu'architecturales et d'ingénierie car, elle génère des données qui ne peuvent pas être représentées en 3D, des informations sur la planification, la coordination, la main-d'œuvre nécessaire, tout ce qui peut jouer sur le calendrier, les informations sur le coût à un moment donné. Ces informations sont utilisables tout au long du cycle de vie de l'ouvrage, ce qui permettrait bien évidemment la réduction du coût la réduction du coût d'exploitation.

La modélisation des informations est un processus dynamique, les caractéristiques des composants d'un BIM (informations et modèles 3D de projet) évoluent avec le développement du projet. Mener un changement majeur dans la nature du projet c'est entraîner à la fois des

modèles 3D et des informations liées. Cela interpelle à donner d'importance au processus, plutôt que le modèle lui-même (Kymmell, 2008).

I.2.3 Les fonctions du BIM

Le BIM peut effectuer plusieurs tâches parmi lesquelles (figure 1) :

a- Collecte des données

- ✦ Le BIM collecte des informations structurées et à jour par et pour tous les intervenants et ce à toutes les phases d'un projet ;
- ✦ Les données sont centralisées dans une bibliothèque commune dynamique ;
- ✦ Évite les doublons d'informations. (CHELBAB NASSIMA, et al., 2019)

b- Génération des données

- ✦ Génération d'informations sur le projet de manière aisée, sur différents supports (schémas, rapports, tableaux, planning, plans...) et avec des données à jour ;
- ✦ Représentation du projet de façon détaillée ou schématisée pour les membres du projet ou pour des membres extérieurs (futurs utilisateurs, riverains...) ; (CHELBAB NASSIMA, et al., 2019)

c- Analyse des données

- ✦ Le BIM analyse et détecte les incohérences des modèles créés par les intervenants (incohérences physiques, planning, ...)
- ✦ Aide au processus de décision tout en favorisant l'anticipation (programmation, gestion des actifs, maintenance, choix techniques, finances...)
- ✦ Valide les besoins et l'atteinte des objectifs à toutes les phases du projet ; (CHELBAB NASSIMA, et al., 2019)

d- Communication des données

Le processus BIM permet de partager les données et commentaires entre les intervenants d'un projet et mettre à jour le modèle dynamique en temps réel. (CHELBAB NASSIMA, et al., 2019)

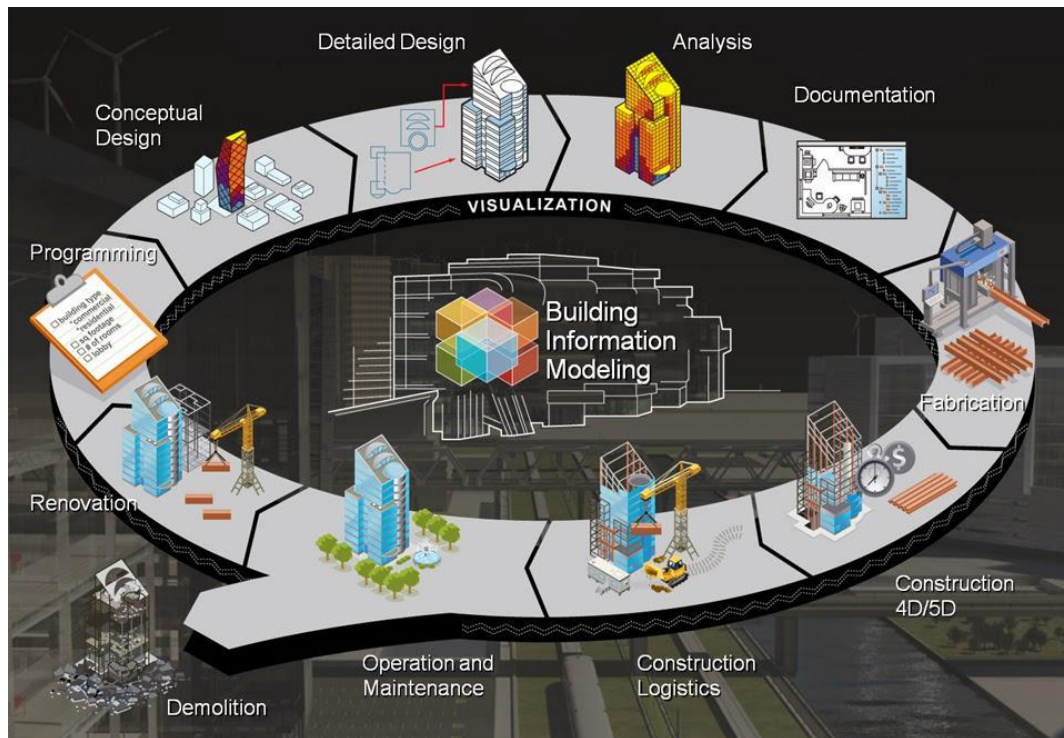


Figure I- 1: Champs d'action du BIM

Source : (CHELBAB NASSIMA, et al., 2019)

I.2.4 La maquette numérique

Le principe est le même que la réalisation de la maquette physique, mais elle a plus de particularité. La maquette numérique (figure ci-dessous) est réalisée à l'aide d'un ou plusieurs logiciels, elle n'est pas matérielle. Appelée aussi maquette virtuelle, elle est en trois dimensions avec des informations qui permettront de construire l'ouvrage. En effet, la simulation, la diffusion, le déplacement et la duplication de la maquette numérique sont faciles. En revanche, le BIM fait plus des opérations que la maquette numérique qui, n'est visible qu'au travers d'un écran (PERNET-MUGNIER, 2018).

Afin d'utiliser une maquette numérique BIM, les bâtiments, routes, ponts et autres objets existants doivent être créés. Ces objets sont modélisés soit à partir des fichiers existants à condition que ceux-ci soient à jour, soit à partir des relevés des états des objets en question.

La construction de la maquette numérique peut se faire de différentes manières, elle dépend des outils et données de base utilisées.

Les fichiers des objets archivés ne sont pas toujours à jour ou complètement inexistant à cela s'ajoute le problème de perte d'informations lors du transfert. D'où l'importance de levés de l'existant et la création de maquette numérique paramétrique (PERNET-MUGNIER, 2018).

Le scan laser terrestre est utilisé pour créer des maquettes numériques. C'est une technique répandue pour modéliser les bâtiments et autres objets existants, elle est aussi utilisée dans le domaine de la documentation du patrimoine. Le scanner laser terrestre fait en effet les levés en capturant l'existant avec une précision importante par le balayage laser terrestre. La technologie LIDAR est beaucoup plus utilisée pour le scan laser terrestre (PERNET-MUGNIER, 2018).



Figure I- 2: Maquette numérique

Source : (Benoauziz, 2020)

I.2.5 Les Niveaux de maturité du BIM

Les niveaux de maturité sont les différents niveaux d'organisation du BIM allant de 0 à 3 selon son utilisation lors du projet. Ces niveaux sont des étapes vers le travail collaboratif en allant des utilisations très ponctuelles à l'intégration totale, c'est-à-dire de la planche à dessin à l'ordinateur vers le numérique.

- ★ **BIM Niveau 0** : Dans sa forme la plus simple, ce niveau signifie effectivement aucune collaboration. Il est basé sur la conception et distribution CAO 2D de base par impression papier ou électronique ;

- ▲ **BIM Niveau 1** : « BIM en isolation », c'est le plus utilisé par les entreprises, il s'agit d'un mélange CAO 2D pour la rédaction de la documentation d'approbation statutaire et des informations de production et 3D pour les travaux de conception avec des données structurées selon certaines normes (numérotation de plans, géolocalisation, présentation, etc.). Les normes BS 1192 : 2007 gèrent les CAO. Chaque acteur travaille sur ses propres parties du projet séparément, il n'y a pas de partage de modèles entre les acteurs du projet. Le partage électronique de données est assuré par un environnement de données communs (CDE), souvent géré par l'entreprise contractante ;
- ▲ **BIM Niveau 2** : C'est l'attente ultime du secteur de la construction. A ce niveau, l'échange des fichiers est obligatoire. Pour ce faire, les maquettes 3D doivent être créées sous un « Common file format » tels que les IFC, et ensuite les fichiers sont regroupés pour créer la maquette générale. Depuis Avril 2016, le Royaume -Uni a rendu obligatoire pour certains marchés publics d'aller vers le BIM de niveau 2 selon le principe de collaboration ;
- ▲ **BIM Niveau 3** : « intégration complète ». C'est le niveau le plus avancé même s'il est encore un peu utopique, les entreprises en avant-garde dans le domaine du BIM s'activent pour la mise en œuvre de ses principes. Un modèle unique dont tous les acteurs ont accès durant toute la vie de l'infrastructure (de sa conception à sa réalisation, de son exploitation jusqu'à sa démolition) sera créé. En fait la modélisation ne se fait pas sur des logiciels en disparates nécessitant des conversions, mais elle se fait sur des plateformes collaboratives en ligne appelées des « web based services » où tous les logiciels BIM connus sont connectés. On l'appelle souvent « IBIM « Integrated Building Information Modeling » (BIM Intégré) (Rafael Sacks, et al., 2018).

La figure ci-dessous est un modèle de Bew-Richards illustrant les quatre niveaux de maturité BIM adopté au Royaume Uni. Au niveau 3 le modèle est unique, stocké dans un serveur centralisé, accessible à chaque intervenant et durant le cycle de vie de l'ouvrage (CEREMA, 2017).

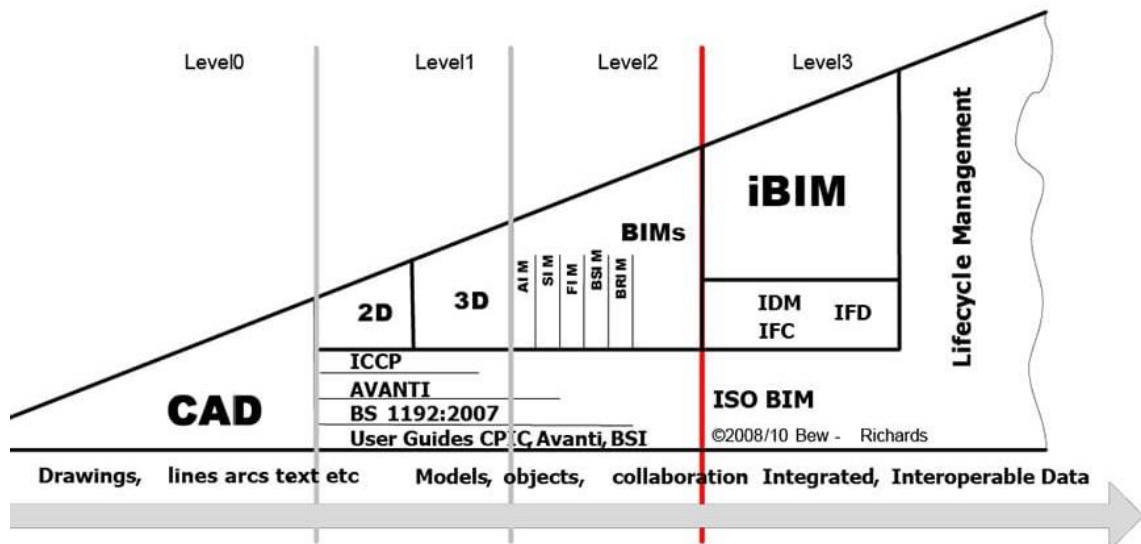


Figure I- 3: Niveaux de maturité BM (modèle de Bew-Richards)

I.2.6 Les Niveaux de détail du BIM

Le niveau de détail du BIM appelé en anglais « Level of detail or developpement » (LOD). C'est une norme d'industrie qui renseigne sur les informations de la maquette numérique selon la phase d'un projet.

Il y a cinq niveaux ou options de LOD allant de 100 à 500.

- ▲ **LOD 100 (Esquisse) :** L'élément de modèle peut être représenté graphiquement dans le modèle avec un symbole ou une autre représentation générique. Les informations relatives à l'élément de modèle peuvent être dérivées d'autres éléments de modèle. Toute information dérivée des éléments LOD 100 doit être considérée comme approximative ;
- ▲ **LOD 200 (Conception Schématique) :** L'élément de modèle est représenté graphiquement dans le modèle sous la forme d'un système, d'un objet ou d'un assemblage générique avec des quantités, une taille, une forme, un emplacement et une orientation approximatives. Toute information dérivée des éléments LOD 200 doit être considérée comme approximative ;
- ▲ **LOD 300 (Conception Détaillée) :** L'élément de modèle est représenté graphiquement dans le modèle en tant que système, objet ou assemblage spécifique en termes de quantité, taille, forme, emplacement et orientation. Des informations non graphiques peuvent également être jointes à l'élément de modèle. L'origine du projet est définie et l'élément est localisé avec précision par rapport à l'origine du projet ;

- ▲ **LOD 350 (Documentation de la construction)** : 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 (Fabrication et assemblage)** : L'élément de modèle est représenté graphiquement dans le modèle comme un système, un objet ou un assemblage spécifique en termes de taille, forme, emplacement, quantité et orientation avec des informations de détail, de fabrication, d'assemblage et d'installation. Des informations non graphiques peuvent également être jointes à l'élément de modèle ;
- ▲ **LOD 500 (Tel que construit)** : le modèle est une représentation vérifiée sur le terrain en termes de taille, de forme, d'emplacement, de quantité et d'orientation. Des informations non graphiques peuvent également être jointes aux éléments du modèle (Rafael Sacks, et al., 2018).

La figure I-4, suivante est une illustration d'une route sous différents niveaux de détail BIM

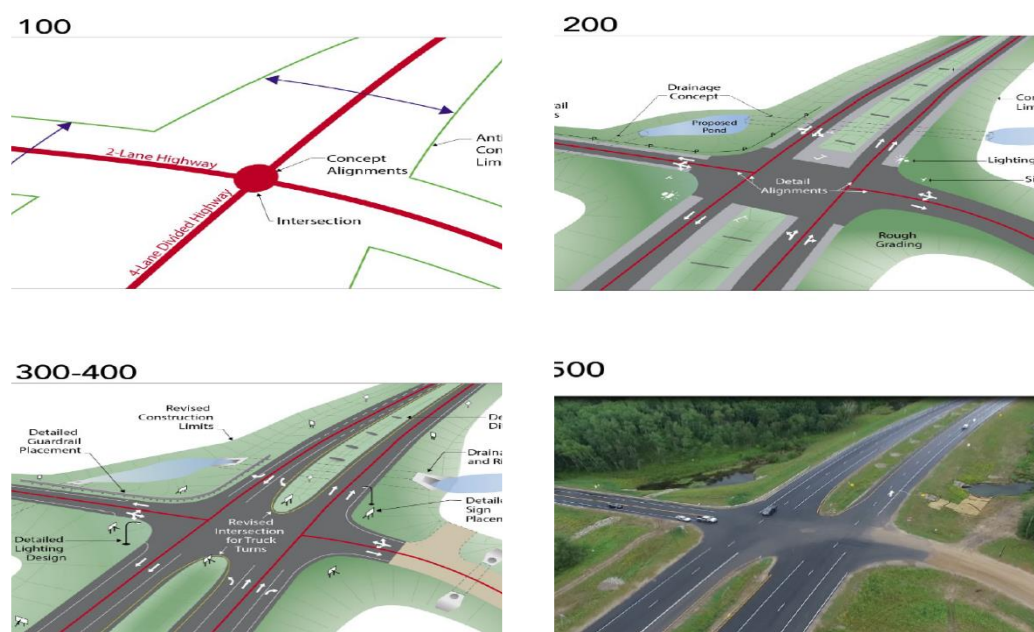


Figure I- 4: Niveaux de détails BIM

Source : (Chris Trbojevich, et al., 2019)

I.2.7 Les dimensions BIM

En plus de niveaux, le BIM ne se limite pas au 3D, elle peut prendre d'autres dimensions et chacune traite une thématique.

- **3D** : appelé BIM classique, il se concentre autour d'un modèle d'objet à 3D géométriques (X-Y-Z). Le BIM 3D permet de visualiser, détecter les l'interface, calculer les quantités, etc. ;
- **4D** : permet d'ajouter le facteur « temps » au 3D, de planifier les (travaux, logistique, facturation...). Cela permettra aux acteurs d'un projet de visualiser et mener leurs actions dans le temps ;
- **5D** : Ajoute la donnée « coût ». Il fait la liaison des éléments entre le BIM 4D et le coût. Ainsi, il estime, simule et actualise le coût en temps réel ;
- **6D** : traite les questions de développement durable et de l'environnement par exemple les analyses énergétiques (analyse des émissions de carbone) ;
- **7D** : Traite la liaison des éléments du projet pour la maintenance et l'exploitation de l'ouvrage pendant toute sa durée de vie. C'est l'ouvrage sous forme numérique reçu par le propriétaire à la fin de la construction ;
- On parle aussi de **BIM XD** ou **8D** pour la sécurité : plans d'urgence intégrés et prévention des problèmes de sécurité (Rafael Sacks, et al., 2018).

I.2.8 BIM et pratiques contractuelles

Le recours au BIM pour la réalisation des projets d'infrastructures au détriment des pratiques contractuelles traditionnelles des marchés a modifié ces dernières. Il faut donc trouver des solutions juridiques permettant la conciliation entre le BIM et les contraintes de la construction.

Pour ce faire, trois documents d'appui sont nécessaires :

- La convention BIM ;
- Le cahier des charges BIM ;
- La charte BIM.

a- La convention BIM

Le plan d'exécution ou la convention BIM est un document contractuel établi par les acteurs d'un projet dont le BIM manager doit s'appuyer pour accompagner le processus de collaboration de la maquette numérique au sein de laquelle tous les acteurs sont appelés à apporter leurs contributions à la maquette numérique.

La convention doit être précise sur les choix des formats des fichiers, les bibliothèques d'objets, le processus BIM, le rôle et responsabilités de chacun des intervenants et les exigences.

b- Le cahier des charges BIM

Le cahier des charges BIM est un document du maître d'ouvrage qui précise les exigences et les objectifs des acteurs successifs du projet. Il inclue aussi les attentes de la charte BIM du maître d'ouvrage.

c- La charte BIM

La charte BIM est un document qui définit les exigences et les objectifs à court, moyen et long terme d'un patrimoine. C'est l'équivalent d'un business plan. Ce document contient l'objectif global, les échéances de la création de la maquette, le budget mis en œuvre pour l'acquisition du BIM, les intervenants dans le processus BIM.

I.2.9 L'adoption du BIM dans le monde

Prenant conscience des atouts qu'offre le BIM à l'industrie de la construction, Plusieurs pays ont rendu l'adoption de la maquette numérique BIM obligatoire. Les pays qui se sont investis tôt dans le BIM disposent aujourd'hui des infrastructures et des savoir-faire capables d'optimiser les coûts et le temps et améliorer les projets.

Voyons l'adoption du BIM dans quelques principaux pays :

- ✦ **Royaume-Uni** : C'est le leader mondial dans l'adoption du BIM. Dans sa politique d'adoption du BIM, depuis avril 2016, les projets financés par le gouvernement Britannique doivent atteindre le niveau 2 du BIM. D'après des rapports établis, 20% des entreprises du secteur l'ont adoptées avec succès et il y a eu une augmentation de 12% depuis 2017 ;
- ✦ **France** : Dans sa feuille de route de digitalisation du secteur BTP, la France avait initié en 2014 un projet de construction de 500000 logements en utilisant le BIM. Un fond de

20 millions d'euros est alloué pour booster l'adoption du BIM. C'est une initiative qui vise à atteindre la durabilité, réduire les coûts et respecter l'environnement ;

- ♣ **Etats-Unis** : Pour toute candidature aux marchés publics, les services généraux d'administration GSA (General Services Administration) ont formulé le programme BIM à toutes les entreprises de construction et ce depuis 2003. Environ 72% des entreprises de BTP y compris les universités domiciliées aux Etats-Unis adopteraient le BIM ;
- ♣ **Allemagne** : Un défi majeur : le gouvernement joue un rôle important pour la promotion du BIM. En 2016, l'Allemagne a initié un projet pilote BIM dans le secteur du transport en numérisant des projets. Mais il semble que l'accent est mis sur les bâtiments pour la mise en œuvre du BIM à grande échelle dans tous les projets d'infrastructure prévue en 2020. Rappelons aussi que l'adoption a été lente à cause de mauvaise communication des autorités dudit pays ;
- ♣ **Chine** : le BIM n'est pas encore mandaté en Chine, mais le gouvernement encourage vivement son adoption. Ainsi son adoption a considérablement augmenté depuis 2016. Les professionnels de l'AEC ont atteint des niveaux élevés du BIM pour réaliser des grands projets. De par son immensité, la Chine gagnera plus en adoptant le BIM. (BIM Community)

I.3 L'interopérabilité

D'après Wikipédia, « l'interopérabilité ou l'interfonctionnement en informatique est la capacité que possède un système informatique à fonctionner avec d'autres produits ou systèmes informatiques, existants ou futurs, sans restriction d'accès ou de mise en œuvre ». Il y a deux voies d'échanges de données : les formats natifs où le **close BIM** et les formats non-propriétaires où les IFC (**open BIM**).

I.3.1 L'open BIM

L'open BIM est une technologie qui rend possible la mise en place d'un flux de collaboration sur des projets d'ingénierie, d'architecture, et de construction, de façon ouverte et coordonnée en utilisant des standards.

Le British Standard Institution (BSI) a défini cinq normes de base pour déployer le BIM dans le secteur de l'infrastructure. Ces normes sont toujours en développement. (S. AIT-LAMALLAM, et al., 2019)

Le tableau ci-dessous montre les cinq standards de base de l'OpenBIM, qui assure chacun une fonction particulière et certifiée pour une dimension internationale.

Tableau I- 1: Différents standards de l'OpenBIM (buildigSMART,2018)

Nom	Standard	Utilité
IFC : Industry Foundation Classes	ISO 16739	Permet l'échange de données et des informations.Format qui permet d'échanger les modèles dans leurs intégralité
IFD : International Framework for Dictionaries	ISO 12006-3	Cadre structurel pour la création de bibliothèque d'éléments de propriété. L'universalité de la description et de son organisation permet de s'affranchir des barrières linguistiques et de lier différentes bases de données.
IDM : Information Delivery Manual	ISO 29481-1 ISO 29481-2	Définit une méthodologie d'échange d'informations entre les différentes parties
MVD : Model View Definition	BuildingSMART MVD	Associé au format échange IFC, il permet de définir les éléments à faire apparaître sur le modèle en fonction de l'approche souhaitée.
BCF : BIM collaboration Format	BuildingSMART BCF	Format qui permet l'échange de remarques ou de demande de modifications à propos d'un projet.

I.3.2 Les IFC (Industry Foundation Classes)

Définition et origine des IFC

Les IFC sont un format de fichiers open source, garantissant l'interopérabilité entre les logiciels de maquette numérique (BIM & BTP, 2021).

L'aventure des IFC a commencé en 1995 aux Etats-Unis d'Amérique. Pour une amélioration de la communication entre les logiciels de conception, plusieurs entreprises du secteur du bâtiment ont engagé des réflexions pendant plusieurs années afin d'ouvrir des canaux d'échange entre les outils utilisés par les professionnels de la construction (architectes, ingénieurs, bureaux d'étude, entreprises, maîtres d'ouvrages). D'où la naissance de l'organisme l'IAI (International Alliance for Interoperability) devenu par la suite **BuildingSMART** (BIM & BTP, 2021). Actuellement, il existe plus de huit cent classes d'objets comme :

- ▲ **IfcWindow** : pour les fenêtres ;
- ▲ **IfcWall** : pour les murs ;
- ▲ **IfcSlab** : Pour les dalles ;
- ▲ **IfcBeam** : Pour les poutres. (Benoauziz, 2020)



Figure I- 5: Format IFC

Source : (BIM & BTP, 2021)

Conclusion

Cette partie est une familiarisation avec le BIM en général de son historique, au concept, ses différents niveaux, son adoption dans le monde.

La partie qui s'annonce est celle de BIM dans les infrastructures qui consiste à présenter ses avantages.

Chapitre II : Le BIM au service des infrastructures

II.1 Introduction

L'utilisation du concept BIM dans les infrastructures routières aide à mieux exploiter les informations et les données des projets afin d'optimiser leurs conceptions et d'accélérer le processus de validation pour construire des routes plus efficaces, intelligentes et durables.

Le BIM rend rationnel la planification et la conception par le biais de la création d'un flux de travail connecté et intelligent. Cela permet la durabilité, la productivité, et la rentabilité des ouvrages et projets d'infrastructures routières. (Benoauziz, 2020)

II.2 Etat de l'art des outils BIM

Pour mieux comprendre l'apport du BIM dans le domaine des infrastructures routières, il est intéressant d'avoir une idée générale sur les questions suivantes : Quels sont les principaux outils existants ? où et quand les utiliser ?

Outre les logiciels, il existe d'autres outils tels que :

- ✦ Les visionneuses BIM permettent la visualisation du projet pendant les différentes phases aux intervenant. Les visionneuses BIM gratuites telles que TeklaBIM Sight, Solibri, BIM Vision qui ont des fonctionnalités supplémentaires permettant de sélectionner des objets par corps de métiers ou par classes d'objets. Les casques 3D de réalité virtuelle font partie de visionneuses (Benoauziz, 2020).
- ✦ Les plateformes collaboratives facilitent la collaboration entre les intervenants en permettant le stockage, le partage et l'interaction sur les différentes données. Ces outils sont entre autres BIM+, Autodesk BIM360, TrimbleConnect. (Benoauziz, 2020)

Autodesk est le leader mondial de la création des logiciels CAO et DAO. Il développe une suite de logiciels répondant aux besoins du domaine du Bâtiment et travaux publics. Notre analyse se porte sur ceux qui sont dédiés aux voies et ouvrages d'art tels que Infracore, Revit, Navisworks, Recap pro, Dynamo, 3DS Max Design, Civil 3D, Autodesk utility Design, Géomedia Covadis, etc. (Maxime, 2020).

La figure II.1, ci-dessous montre l'utilisation de quelques outils BIM dans différentes phases d'un projet routier.

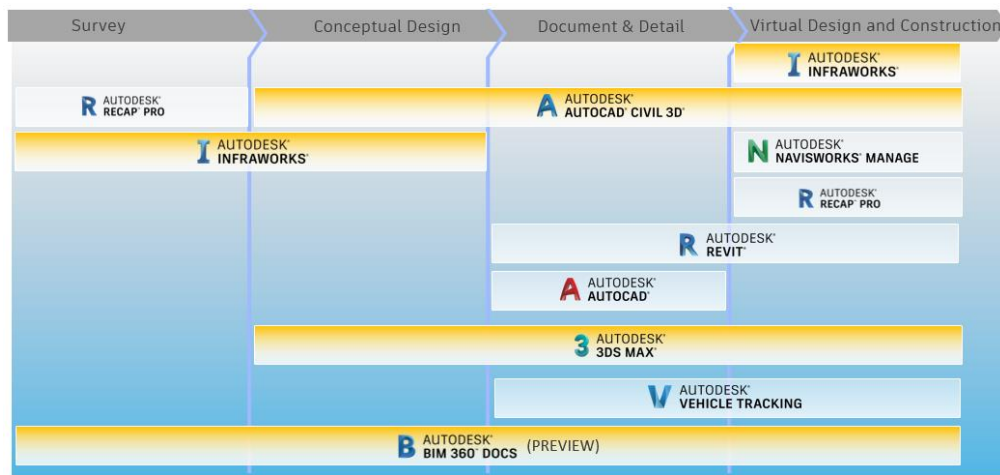


Figure II- 1: utilisation des outils dans différentes phases d'un projet

Source :(Autodesk)

II.2.1 Autodesk Infracworks

Autodesk Infracworks est un logiciel de conception et de planification utilisé par les ingénieurs et les architectes pour modéliser l'environnement du projet réel à partir de photos aériennes et des données topographiques (Rakotondraïne, 2015). On peut créer rapidement des variantes avec Infracworks dans un même modèle. Les informations du modèle peuvent être affichées, gérées, analysées et partagées. Ainsi les décisions prises sont mieux informées et on peut obtenir l'approbation des parties prenantes. La variante choisie sera exportée vers Civil 3D pour une étude détaillée.

II.2.2 Autodesk Revit

Autodesk Revit est un logiciel de modélisation BIM, on peut exporter les ponts conceptuels et structures de tunnels d'Infracworks vers Autodesk revit pour les détailler. Les informations des bâtiments, des réseaux électriques et d'assainissement peuvent être importées depuis revit dans Infracworks. Revit utilise une communication bidirectionnelle qui permet d'afficher automatiquement dans Infracworks les modifications des objets apportés dans revit et vice-versa (Autodesk, 2021).

II.2.3 Autodesk Navisworks

Autodesk Navisworks est un outils puissants de collaboration interdisciplinaire et de révision de projets. Il est utilisé par les professionnels de l'architecture, de l'ingénierie et de la

construction (AEC). Il n'a pas pour rôle de créer des modèles mais de combiner tous les travaux d'un chantier fait partiellement par les parties prenantes pour en faire un seul modèle afin de mieux gérer. Ensuite fait des analyses et détecte les conflits entre les modèles des différentes disciplines du projet. Navisworks fait des simulations 4D et 5D (Maxime, 2020).

II.2.4 Autodesk Recap pro

Autodesk Recap pro est un logiciel de numérisation 3D permettant la récupération des données obtenues à partir de la photogrammétrie ou de la numérisation laser pour créer des nuages de points ou des maillages. Ces dernières peuvent être exploitées par les logiciels de modélisation pour une prise en charge du processus de collaboration BIM basée sur conception réaliste

II.2.5 Autodesk 3DS Max Design

C'est un logiciel de modélisation en 3D, d'animation et de rendu. Il permet de concevoir des images de synthèse de qualité professionnelle avec des scènes époustouflantes basées sur la réalité virtuelle pour visualiser les conceptions (Damassets, 2017). Ainsi l'outil Civil View de 3DS Max permet l'importation des modèles de projet final depuis Civil 3D pour communiquer d'une manière plus efficace le rendu d'un projet aux maîtres d'ouvrage et aux bailleurs (Rakotondraïne, 2015).

II.2.6 Autodesk Autocad Civil 3D

C'est un logiciel conçu pour optimiser la conception des infrastructures et fournir toute la documentation nécessaire de construction (Damassets, 2017).

Civil 3D est une plateforme d'ingénierie sur un modèle dynamique à trois dimensions. Il inclut l'application géospatiale Map 3D pour un accès aux bases des données SIG (HADI, 2013), des modules tels que pont, rail, géotechnique, analyse des rivières.

II.2.7 Autodesk Vehicle tracking

C'est un logiciel de conception rapide et dynamique des parkings et des giratoires en 3D. Vehicle tracking fait d'abord des analyses de contrôle des gabarits des véhicules (voitures, camions, tramways, avions) permettant la simulation des épures de giration (Damassets, 2017).

II.2.8 Géomedia Covadis

Géomedia est une entreprise française, développeur de logiciels (Covadis et autopiste) destinés aux entreprises et aux bureaux d'études en infrastructure. Covadis est utilisé dans le domaine de la topographie et les projets linéaires (Maxime, 2020).

Il est partenaire d'Autodesk et son logiciel Covadis est un outils BIM utilisé dans les pays francophones

II.3 Quelques projets BIM

Le BIM a connu un essor mondial formidable ces dernières années. Des projets pharaoniques aux travaux standards, plusieurs infrastructures fixes comme linéaires ont été réalisés par le biais du BIM.

Le BIM a fait ses preuves dans le domaine d'infrastructure de transport notamment le secteur ferroviaire, aéroportuaire et routier. Le taux d'utilisation et le degré de mise en œuvre du BIM varie en fonction de ces secteurs, c'est dans ce cadre qu'une étude internationale a été menée dans plusieurs pays du monde par l'organisme d'étude internationale, le Dodge Data & Analytics en 2017. Selon le rapport de cette étude, le BIM est utilisé principalement en France, en Allemagne, au Royaume-Uni et aux Etats-Unis dans les secteurs des :

Ouvrages d'art (ponts et tunnels) avec un taux de 75 %, routes et autoroutes avec un taux de 62 %, infrastructures aéroportuaires avec un taux de 49 %, voies ferres et transport en commun avec un taux de 45 %, autres infrastructures avec un taux de 49 %. (La figure II-2, ci-dessous est une représentation sous forme de graphique de ces taux). (Benoauziz, 2020).

Faisons immersion dans quelques mégaprojets d'infrastructure de transport.

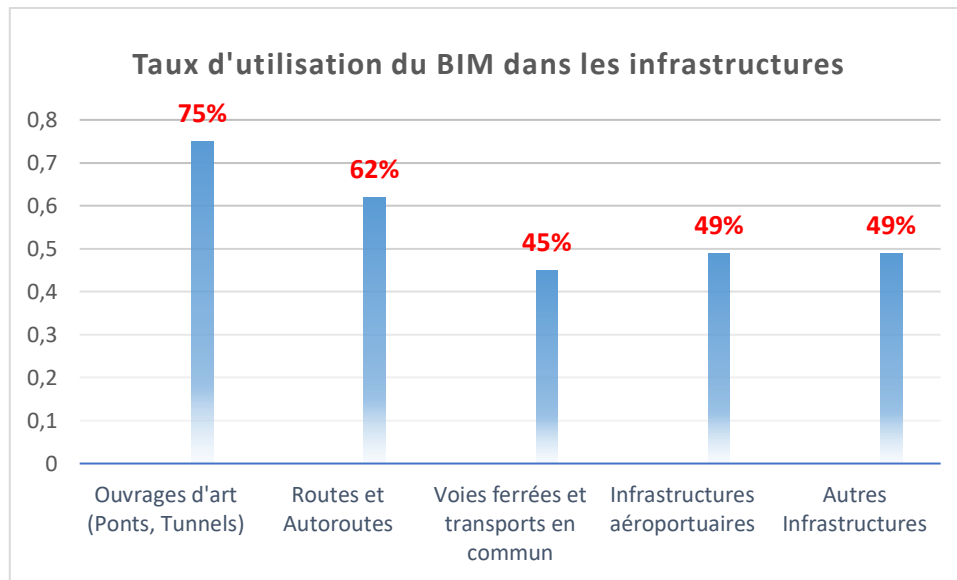


Figure II- 2: Taux d'utilisation du BIM dans les infrastructures

II.3.1 Angleterre : « London Crossrail » :

Crossrail est un projet gigantesque de chemin de fer long de 118 km et traverse Londres, Berkshire ainsi que, Buckinghamshire et Essex illustré dans la figure II-3, qui sera mis en service en 2022. Son coût total est estimé à 18,25 milliards de livres sterling.

En 2008 lors du démarrage du projet, les acteurs n'ont opté pour le BIM du fait qu'en ce temps le « BIM n'était pas trop mature », mais par la suite le BIM est devenu une partie intégrante du projet. Dans ce projet la technologie BIM de Bentley est utilisée pour gérer les bases de données, assurer la collaboration et optimiser le temps (BIM Community).



Figure II- 3: Le projet Londres -Crossrail

Source : (BIM Community)

II.3.2 Turquie : « Grand Aéroport d'Istanbul »

Actuellement le plus grand projet aéroportuaire au monde, le grand aéroport d'Istanbul a été livré en Octobre 2018, montré dans la figure II-4. Il a 6 pistes à son actif, prend en charge 3500 décollages et atterrissages par jour, dessert 350 destinations dans le monde, accueille 200 millions de passagers par an. Son coût total est estimé à 12 milliards de dollars.

L'entreprise IGA (Istanbul Grand Airport) a été créée en 2013 spécialement pour construire et exploiter l'aéroport pendant 25 ans. Une exploitation dont la grande partie du bénéfice servira à rembourser les bailleurs de fond et entreprises qui ont contribué à la construction dudit aéroport.

Le projet s'est démarqué par l'utilisation d'outils BIM d'une manière coordonnée sur la plateforme Autodesk 360 avec l'utilisation des iPads. A part la modélisation, ils ont généré le plus grand modèle 4D au monde afin de suivre l'avancement des travaux en temps réel. Les dimensions 6D et 7D sont aussi intégrées pour assurer sa durabilité.

Parmi 162 candidats de 30 pays du monde entier, le projet de Grand Aéroport d'Istanbul a été sélectionné finaliste dans la catégorie grande infrastructure des Autodesk 2016 AEC Excellence Awards (BIM Community).



Figure II- 4: Grand Aéroport d'Istanbul

Source : (BIM Community)

II.3.3 Le pont Heihe – Blagoveshchensk

Reliant la chine (Heihe) à la Russie (Blagoveshchensk), ce pont exposé dans la figure II-5,est un franchissement du fleuve Amur. Sa longueur est de 19,9 km avec un coût total estimé à 358 millions de dollars. La construction a débuté en 2016 pour une livraison prévue en octobre 2019. L'entreprise Long Jian Road & Bridge Co, Ltd est chargée de la mise en œuvre des travaux de construction. La gestion de l'exploitation sera assurée par une coentreprise pendant 25 ans qui percevra des péages pour rembourser les prêts de construction.

En effet la suite de logiciel d'AEC ProjecWise de Bentley contenant des logiciels tels que AECOsim Building Designer, LumenRT, MicroStation, Descartes, Navigator, RM Bridge, OpenBridge Modeler, OpenRoads, ProSteel et ProStructures sont utilisé pour concevoir et modéliser un projet collaboratif, assurer la gestion et la construction et le partage de données.

L'équipe a modélisé une maquette commune 5D BIM dont les données sont stockées dans MicroStation, modélisé les paramètres 3D du pont par OpenBridge. RM Bridge est utilisé pour la précision de la superstructure et l'analyse par éléments finis pour la simulation des fondations sur pieux, de la poutre principale et d'autres structures afin d'optimiser la résistance, la rigidité et la stabilité structurelle. Et ainsi chaque outil utilisé a contribué à réaliser des tâches importantes.

« La solution logicielle complète de Bentley a fourni les capacités de gestion et de collaboration qui nous ont permis d'augmenter l'efficacité du projet de 25%, tout en relevant les défis d'ingénierie rencontrés dans un environnement de construction complexe. » : les objectifs sont atteints en termes de qualité, de coût, de collaboration et de délai. (BIM Community).



Figure II- 5: Le pont Heihe – Blagoveshchensk

Source : (BIM Community)

II.3.4 La Pata Avenue Gap Closure et Camino Del Rio Extension

Le projet dénommé La Pata Avenue Gap Closure et Camino Del Rio Extension est un projet routier dans le comté d'orange de Californie, dont le coût est de 72,2 millions de dollars. Cette route entre les villes de San Clemente et San Juan Capistrano est construite sur un terrain vallonné (voir la figure II-6 ci-dessous). Elle comble le fossé entre deux segments de routes existants, crée une liaison entre les deux villes. Elle améliore ainsi l'accès local aux communautés résidentielles, aux écoles, etc...

L'entreprise Huitt-zollars, Inc, chargée de la réalisation de ce projet a utilisé les solutions Autodesk qui lui ont permis de réduire considérablement le coût du projet et communiquer efficacement les plans de conception avec les parties prenantes. Les logiciels utilisés sont Infracore et Civil 3D.

« La capacité d'étudier autant de conceptions alternatives en si peu de temps a permis d'économiser environ 10 millions de dollars sur ce projet. Ces économies de coûts ont été

rendues possibles grâce à l'aide de Civil 3D ». Scott Reed, P.E Associate Huitt-Zollars, Inc (Autodesk, 2014).



Figure II- 6: La Pata Avenue Gap Closure et Camino Del Rio Extension

Source : (Autodesk, 2014)

II.3.5 Rôles et responsabilités dans le projet BIM

L'envergure du projet détermine la structure des responsabilités et rôles d'un projet. Tous les rôles ne sont pas nécessaires pour tous les projets. Néanmoins, le BIM Manager doit toujours y être car il est le principal coordinateur dans un projet BIM. Afin de faciliter la collaboration entre les acteurs, assurer l'interopérabilité entre les outils utilisés sur le projet, mettre à jour les modèles et détecter les conflits, Des coordinateurs de modèles BIM supplémentaires peuvent intervenir.

Voici quelques exemples de haut niveau de rôles et de responsabilités BIM (Chris Trboyevich, et al., 2019).

d- Maître d'ouvrage

- ▲ Mandate à toute l'équipe du projet le plan d'exécution BIM ;
- ▲ Participe dans les activités de collaboration ;
- ▲ Promeut la collaboration et accélère le calendrier par une prise de décision plus rapidement ;

- ▲ Ouvert d'esprit et flexible dans la gestion des problèmes pouvant survenir dans le processus BIM (Chris Trboyevich, et al., 2019).

e- Gestionnaire de projet et de contrôle de qualité

- ▲ Promeut la collaboration ;
- ▲ Participe aux rencontres de collaboration BIM ;
- ▲ Travaille avec le responsable de contrôle de projet et le gestionnaire de projet pour maintenir l'équipe sur la bonne voie ;
- ▲ Aide le maître d'ouvrage et le gestionnaire BIM à s'assurer que le plan d'exécution BIM est suivi (Chris Trboyevich, et al., 2019).

f- Responsable de contrôle de projets

- ▲ Travaille avec le gestionnaire BIM et les concepteurs pour la planification de la collaboration et le transfert des fichiers ;
- ▲ Travaille avec le maître d'ouvrage et le gestionnaire de projet pour le maintien des relations et calendrier BIM (Chris Trboyevich, et al., 2019).

g- Gestionnaire BIM

- ▲ Gère les responsables pour maintenir l'intégrité du modèle et coordonner la collaboration ;
- ▲ Assemble les modèles pour créer un modèle unique ;
- ▲ Travaille avec le responsable de contrôle pour que l'équipe reste sur la bonne voie ;
- ▲ Travaille avec les responsables de conception pour s'assurer que le plan d'exécution BIM est suivi ;
- ▲ Assure la sauvegarde du modèle (Chris Trboyevich, et al., 2019).

h- Responsable de la conception disciplinaire BIM

- ▲ Participent à la détection des conflits ;
- ▲ Résolvent les conflits de conception ;
- ▲ Travaillent avec le gestionnaire BIM pour un modèle à jour (Chris Trboyevich, et al., 2019).

II.4 Avantages et inconvénients

II.4.1 Les avantages

Le BIM est une méthode, un concept de travail intelligente autour de données partagées avec des outils adéquats, permettant la prise de décision tout au long du cycle de vie.

Les avantages de cette méthode de travail sont de plusieurs ordres pour tous les acteurs et dans toutes les phases d'un projet.

- ✦ Grâce à la réalité virtuelle de la maquette, le BIM change la perception et donc la façon de faire les choses des architectes, ingénieurs, maitres d'ouvrages, et entrepreneurs. Il améliore la collaboration, anticipe les erreurs ;
- ✦ Une communication efficace sur des plateformes facilitant la collaboration et le partage accru de données du projet sur un modèle 3D paramétrique. Cela permet d'éviter les incongruités ;
- ✦ Avec le BIM, il est possible de réaliser des routes intelligentes, respecter l'environnement, réduire le coût de construction ;
- ✦ Des délais sont plus précis et un planning de travail maîtrisé par des mises à jour dynamiques. Ainsi la logistique est optimisée : l'évolution de la construction est fixée en fonction du temps et en fonction de matériaux de construction dans chaque phase ;
- ✦ Une conception de qualité supérieure avec des simulation des performances énergétiques et environnementales du projet ;
- ✦ Le BIM permet une transparence absolue entre les parties prenantes et les clients du projet ;
- ✦ Le BIM aide à faire des chantiers de construction plus sûrs en améliorant la sécurité de la construction, en repérant les dangers et en évitant les risques physiques par la visualisation et la planification de la logistique du chantier à l'avance ;
- ✦ Le propriétaire du projet pourra mieux gérer l'exploitation de son ouvrage grâce à la disponibilité du projet sous forme numériques contenant les données de construction, d'hypothèses et de la maintenance ;

- ▲ Les coûts sont mieux gérés et l'écart entre les coûts projetés initialement et les coûts finaux est minime. Cela est possible grâce aux outils d'analyse qui détectent et corrigent précocement les erreurs et les points de conflits entre les modèles du projet et la possibilité d'anticiper le déroulement des phases de construction. Le type BIM choisi permet de calculer le coût et l'adapter en temps réel (Salvatore Antonio Biancardo, et al., 2020).

La figure II-7 ci-dessous illustre le niveau de travail requis pour un projet routier typique depuis sa phase préliminaire jusqu'à sa phase d'exploitation.

La ligne en bleu représente la capacité de l'ingénieur à changer le coût et la performance du projet durant son cycle de vie ; elle est à son maximum pendant sa phase préliminaire et décroît progressivement lorsque le projet progresse jusqu'à sa phase d'exploitation.

La ligne rouge indique le coût engendré par la modification du projet. Lorsque le projet est modifié durant la phase préliminaire ; le coût est bas et croît lorsque le projet avance.

La ligne noire représente l'effort de l'ingénieur avec la méthode traditionnelle. Sur la figure, on voit que l'ingénieur dépense le plus d'effort et de ressources dans la phase de la création de dessins d'exécution alors que dans cette phase la capacité à changer le coût et la performance est en baisse. Cela représente un gros problème de la méthode traditionnelle. Certes on peut faire des changements itératifs pour l'optimisation du projet, mais en pratique il est coûteux comme indiqué avec la ligne rouge qui croît.

On voit dans cette figure que le point où l'effort de l'ingénieur est maximum coïncide avec un point dans le projet où sa capacité à changer le coût du projet décline.

La ligne verte indique l'effort de l'ingénieur en utilisant le BIM. L'ingénieur fait plus d'effort dans la phase de projet détaillé. C'est là où le BIM devient plus intéressant. En effet, dans cette phase, la capacité de l'ingénieur à changer le coût et la performance du projet est grande et le coût engendré par la modification du projet est bas (Rakotondraïne, 2015).

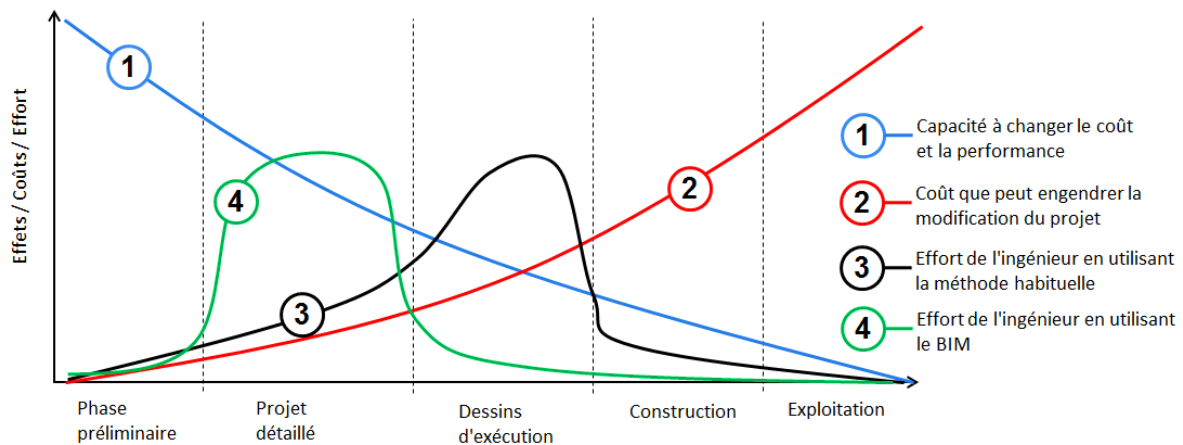


Figure II- 7: Intervention du BIM

Source : (Rakotondraïne, 2015)

II.4.2 Les inconvénients d'intégration du BIM dans les projets d'infrastructure

Le BIM à son état actuel est contraint d'offrir plus de possibilités aux projets routiers. Ceci est dû à la complexité, à la nature des projets d'infrastructure routière et aussi au retard du BIM dans le secteur d'infrastructure de transport comme détaillé ci-dessous :

- Contrairement aux bâtiments, les projets d'infrastructures routières s'étalent linéairement sur de vastes échelles : Ce qui engendre plus de contraintes, la charge de données à manipuler est lourde ;
- L'exigence d'intervention de SIG pour la référence spatiale, l'attribut de données, et la relation topologique ;
- Malgré le développement des 'kits pays' par les fournisseurs de logiciels, il n'existe pas certains gabarits d'infrastructures routières ;
- Le développement des normes actuelles sont beaucoup plus axées sur les bâtiments que sur les projets d'infrastructures, donc il y a la non prise en considération des certaines spécificités de projets routiers ;
- La manque de compatibilité de topologie d'objets entre certains logiciels de conception routière engendre des erreurs qui affecteront le projet ;

- ♣ Le coût exorbitant du passage au BIM : l'achat des outils BIM et la formation du personnel sont des facteurs clés. Mais cela reste un surcoût si l'on n'a pas une vision sur le long terme ;
- ♣ Pertes des données dû au problèmes d'interopérabilités (manque de standards BIM pour les routes) ; (S. AIT-LAMALLAM, et al., 2019)

II.5 Intégration BIM-SIG

Jadis, le Système d'Information Géographique (SIG) et la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) étaient comme de l'eau et du pétrole pour les professionnels respectifs. Le premier a été un puissant outil d'analyse spatiale raster et vecteur, tandis que la deuxième était précise dans les dessins d'objets mais confinée à un rôle plutôt moins intelligent (Chris Trbojevich, et al., 2019).

Les développeurs de logiciels CAO comme Autodesk et Bentley et celui de SIG ESRI ont réussi à créer des interconnexions entre la plateforme SIG et CAO/BIM. Et ils collaborent pour l'amélioration de l'interopérabilité entre leurs plateformes dans le dessein de créer un « jumeau numérique » en vue de réaliser des projets dans leurs contextes, faisant ainsi de la construction efficace en créant des aménagements intelligents (Redshift, 2018).

En effet, il serait moins judicieux de parler de BIM sans faire mention de SIG surtout dans le domaine d'infrastructures routières, comme illustré dans la figure II-8. Ils sont sous deux dimensions différentes, mais complémentaires. « Le BIM alimente le SIG et le SIG informe le BIM » : le SIG est associé à la planification et gestion des thématiques (transports, réseaux, réglementation, environnement, topographie, démographie, économie, ...) et le BIM prend en charge la conception et la construction des infrastructures (réseaux ferroviaires, ponts, les routes, bâtiments, etc...). Pour l'échange des données entre les deux systèmes il y a des formats de fichiers normalisés (CityGML, IFC, ...) (acroma, 2019).

L'utilisation des données SIG dans les projets d'infrastructures routières aide à les mettre dans leur contexte, faire des simulations de trafic, de mobilité, d'inondation, etc.

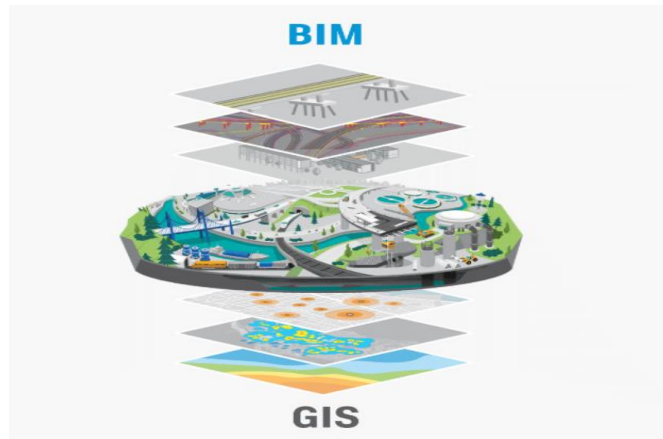


Figure II- 8: Intégration BIM-SIG

Source : (Benoauziz, 2020)

Conclusion

Cette partie du travail nous a permis de savoir les outils BIM, les avantages de l'adoption du BIM dans les infrastructures routières et aussi quelques inconvénients.

La partie suivante consiste à énumérer les atouts qu'offre le logiciel Infracore dans le choix de variantes d'un projet routier en phase APS.

Chapitre III : Choix de variantes d'un projet routier en phase APS (Avant-projet sommaire) avec Infracworks

III.1 Introduction

Il s'agit de projeter en phase préliminaire plusieurs axes de routes et choisir la meilleure variante. Pour y parvenir, les projeteurs doivent analyser les variantes sur une étude comparative multicritère. En d'autres termes l'APS définit : l'emprise du projet routier, l'impact sur l'environnement et le coût du projet dans le dessin de choisir la solution optimale. Une solution qui respecte les normes techniques et environnementales avec un coût raisonnable sur le plan de la faisabilité d'une part et d'une vision à long terme (développement durable) du projet d'autre part. (Ounadjela Chérifa, et al., 2017).

Infracworks est un outil utilisé dans le domaine de travaux publics et semble avoir des atouts dans le choix de variantes d'un projet routier. Nous allons détailler dans les lignes qui suivent en quoi cet outil est-il important en phase APS.

III.2 Critères de comparaison des variantes

Le choix de critères de comparaison est une étape importante. Ils sont choisis selon les besoins et exigences du maître d'ouvrage, les sensibilités de la zone d'étude. Une étude technico-économique sera menée pour chaque variante. Et sera sanctionnée par des rapport détaillés qui définissent les caractéristiques. (Ounadjela Chérifa, et al., 2017).

Les critères serviront à comparer les variantes sur une base d'analyse judicieuse et opter pour une meilleure variante.

Les critères peuvent être :

- ▲ **Distance avec les Cours d'eau** : la présence des cours d'eau est un sérieux problème pour les routes lors des réalisations comme lors de l'exploitation. En effet il y a un grand risque de pollution des eaux lors de la réalisation, risque d'inondation de la route, nécessité de réaliser des ouvrages (Ce qui reviendrait à dépenser des sommes colossales sur les ouvrages) ;

- ▲ **Coûts du projet** : c'est l'un des facteurs le plus important dans un projet. Donc il y a lieu d'estimer et prendre en compte le coût pour chaque variante dans la phase préliminaire malgré l'insuffisance des données.
- ▲ **Relief** : se concentrer sur les terrains favorables à la construction de la route pour éviter les mouvements des terres (déblais-remblais) et pour offrir aux usagers le confort et la sécurité.
- ▲ **Géologie du terrain** : identifier les obstacles pouvant défavoriser la construction de la route ;
- ▲ **Expropriation des parcelles** : chercher la nature juridique de terre et éviter au maximum les habitations les terrains agricoles, etc... ;
- ▲ **Faune et flore** : l'influence de la route sur chaque arbre abattu et les animaux dans leur écosystème doit être pris en compte pour préserver la nature ;
- ▲ **Interférence avec les routes existantes** : il est crucial d'identifier toutes les routes qui interfèrent avec notre axe afin de prévoir des aménagements au points des intersections, l'influence qu'aura le trafic et aussi prendre des dispositions nécessaires pour ne pas gêner le trafic à la phase de réalisation ;
- ▲ **Nombre d'ouvrages** : éviter les dépressions des terrains et les passages d'eau pour réduire le nombre d'ouvrages (Ounadjela Chérifa, et al., 2017).

III.3 Bref aperçu sur la Technique classique en APS

Elle consiste à élaborer divers scénarios (variantes) d'aménagement basés sur la combinaison des cartes établies à des échelles 1/50000^{ème} ; 1/25000^{ème}. Cela se fait manuellement ou avec les CAO ou/et les logiciels de SIG.

III.3.1 Photographies aériennes

Des photographies aériennes sont utilisées pour montrer les caractéristiques visibles du sol, telles que les falaises, les marécages et les traversées de cours d'eau appropriés. Images stéréoscopiques, si disponibles, sont une aide idéale pour localiser les emplacements appropriés pour la route. Cependant, bien que les photographies aériennes montrent les caractéristiques du sol dans leurs positions relatives, elles ne permettent pas la détermination des zones ou des distances à moins que des mesures d'étalonnage ne soient prises. (Washington Cousins, 2021).

III.3.2 Carte géologique

C'est une représentation plane de la géologie des terrains qui apparait à la surface représentée. Les terrains sont représentés par des couleurs selon leur âge pour les roches sédimentaires et selon leur nature pour les roches cristallines.

Il y a une abstraction des sols sur les cartes géologiques (il existe à cet effet des cartes pédologiques), mais les formations superficielles pouvant avoir un intérêt géologique sont représentées (dépôts de sédiments abandonnés par un cours d'eau...). La figure III-1, montre un extrait de la carte géologique au 1/50000 de la zone d'étude.

Une carte géologique doit avoir des indications suivantes :

- ▲ L'inclinaison des couches sédimentaires ou pendage qui est indiqué par un signe conventionnel ;
 - ▲ Les failles ou les chevauchements qui sont indiqués par un trait plus épais ;
 - ▲ L'emplacement des carrières ;
 - ▲ Les caractères des diverses formations sédimentaires, leur épaisseur, leur contenu en fossiles ;
 - ▲ Toutes les remarques sur la disposition et l'interprétation des accidents tectoniques.
- (Washington Cousins, 2021)

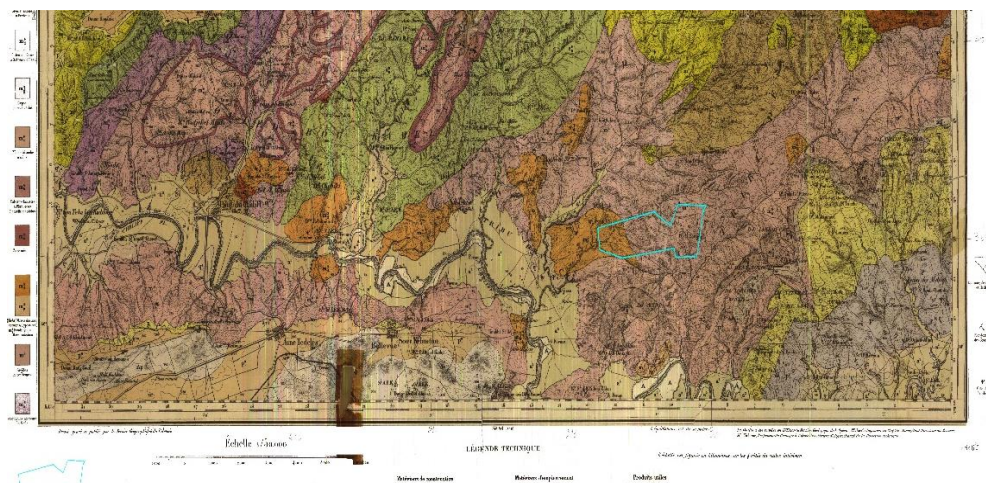


Figure III- 1: Extrait de la carte géologique de la zone d'étude

sols instables, etc...). Repérer et marquer également les éléments qui favoriseront la construction de la route. Ceux-ci peuvent être marqués comme points de contrôle possibles (points par lesquels la route doit passer) : Pentes latérales raisonnables, Traversées de cours d'eau souhaitables elles passent dans les lignes de crête, zones adaptées à la construction de lacets, Points de départ et d'arrivée (carrefours et atterrissages).

Après une inspection sur le terrain de la zone, on peut se faire une idée claire sur la projection de l'axe reliant un point A à un point B, la ligne de route sur la carte peut être retravaillée soit au bureau ou sur le terrain. Une attention particulière doit être accordée pour s'assurer que la route est située dans des zones favorables, et non dans des zones trop chères économiquement. (Fao), la figure III-3 montre un exemple de tracé routier sur carte en courbe de niveau.

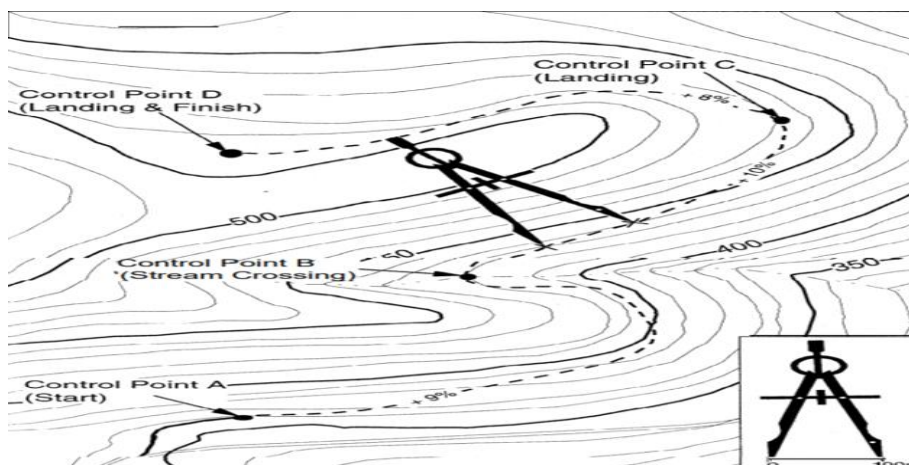


Figure III- 3: Tracé routier sur une carte

Source : (washington courses, 2021)

III.3.5 Trimble quantm

Trimble quantm est un logiciel utilisé dans conception des alignements routiers et ferroviaires (figure ci-dessous) pour l'étude faisabilité. Grâce à l'immensité de données qu'il gère lors des opérations lancées, l'outil donne de bons résultats mais cela le rend fastidieux. Trimble quantm prend en charge des données et des contraintes puis génère une liste des alignement prioritaires optimisés parmi lesquels on peut choisir en les analysant (Wikipédia). La figure III-4, relate la projection de variante routière sur Trimble quantm.

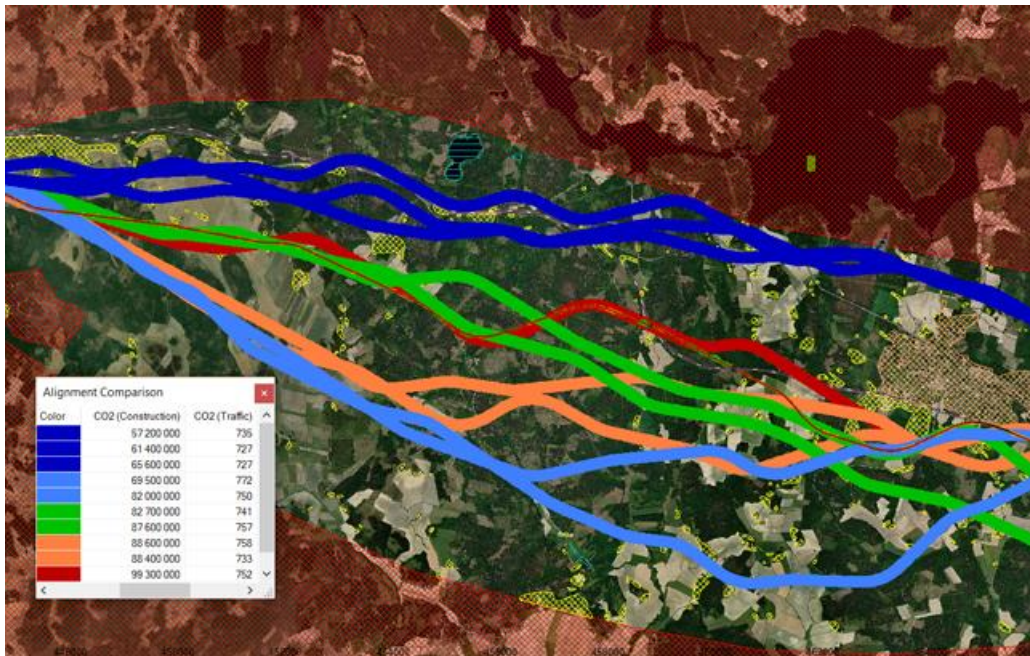


Figure III- 4: Projection routière sur Trimble quantm (Quantm construction)

III.4 Les avantages d'Infracworks dans la phase d'APS

Le logiciel Infracworks est un outil des Travaux Publics qui gère plus efficacement les projets de grandes envergures. Avec son interface intuitive et son environnement 3D réaliste riche en données provenant de plusieurs sources, il aide les concepteurs à modéliser facilement et rapidement leur idée. La figure III-5 ci-dessous est un modèle de la ville de Paris



Figure III- 5: Modèle de la ville de Paris généré par Infracworks

Source : (Autodesk)

III.4.1 Conception des infrastructures

La conception des infrastructures dans leur environnement est le fondement du logiciel comme son nom l'indique. Les routes, les viaducs, les ponts, les réseaux d'alimentation en eau ou énergie, les systèmes de télécommunication et de sécurité, les voies ferrées, les mobiliers urbains peuvent être conçus au sein d'un même modèle. Les objets personnalisés ou non existants dans Infracore peuvent être modélisés sur les logiciels BIM, par exemple les détails des éléments des ponts sont modélisés dans Revit. Leur importation dans Infracore est simple grâce à l'interopérabilité qui existe entre ces logiciels. La figure III-6 montre quelques fonctionnalités d'Infracore.

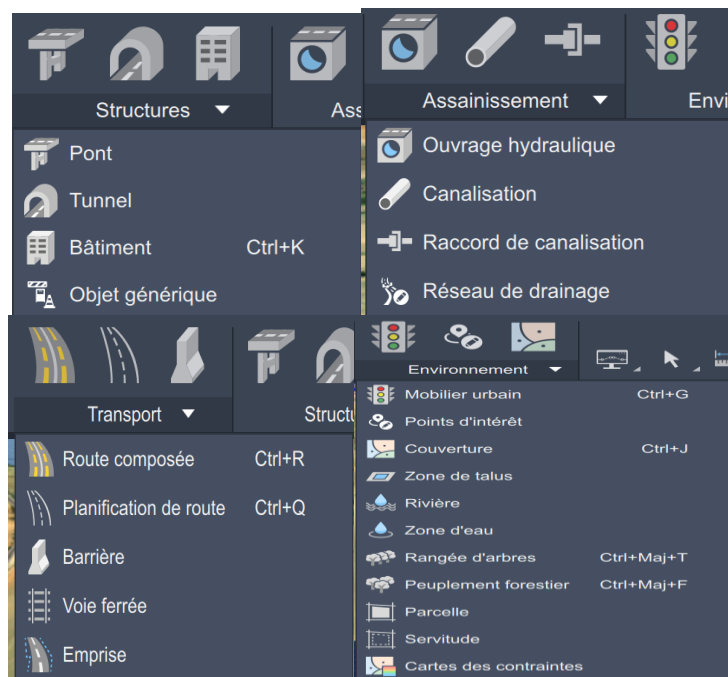


Figure III- 6: fonctionnalité "créer" d'Infracore

III.4.2 Normes utilisées

Les normes de conception de route utilisées par Infracore sont : les normes anglaises Design Manual for Road and Bridges (DMRB) et American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2011, mais donne la possibilité de modifier la géométrie d'une route. Il suffit de travailler avec les valeurs limites (maximale ou minimale) imposées par les normes B40 ou autres.

III.4.3 Tracé géométrique des routes

a- Trace en plan

Caractérisé par des lignes droites, des raccordements progressifs et des courbes ou clothoïdes, le tracé en plan a une conception régit par les règles de confort et de sécurité. (Rakotondraïne, 2015).

Le logiciel Infracworks comporte deux types de route :

- ✦ **Les routes composées** : On peut configurer la géométrie (verticale et horizontale), simuler le trafic, faire l'optimisation, analyser la visibilité ;
- ✦ **Les routes de planification** : Sont générées par défaut par le Model Builder (routes existantes), ou créées à partir de l'outil planification de route ou encore importées. Elles sont convertibles en route à composante. La figure III-7 illustre à titre d'exemple un tracé en plan sur Infracworks par l'utilisation de Model Builder.

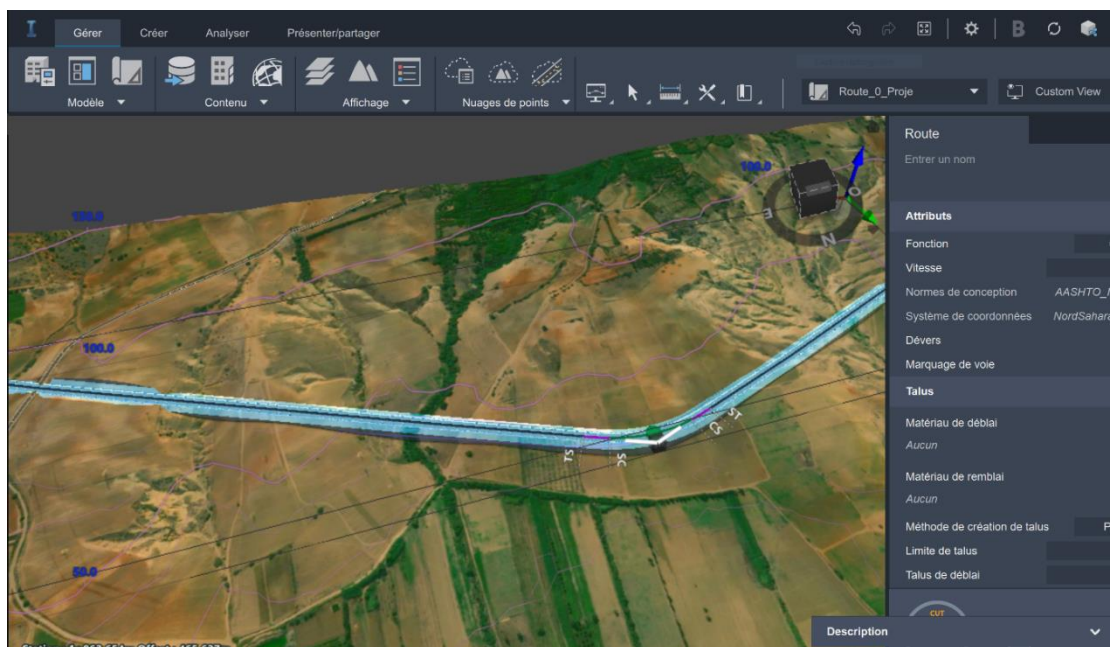


Figure III- 7: Tracé en plan

b- Profil en long

Le profil en long représente la coupe longitudinale de la route. On peut voir les déclivités, modifier la géométrie horizontale en courbe (parabolique symétrique, parabolique asymétrique, circulaire). La figure III-8 divulgue un exemple de profil en long. La vue de profil en long est gérée par des calques :

- ▲ Sol existant : c'est la ligne du terrain naturel ;
- ▲ Géométrie horizontale : affiche ligne du dessin de profil en long, et toutes les abscisses curvilignes ;
- ▲ Structures : les ponts et les tunnels ;
- ▲ Jonctions : affiche les intersections et les carrefours des routes ;
- ▲ Drainage : affiche les ouvrages hydrauliques et tous les réseaux de drainage créés au long de la route.



Figure III- 8: Exemple vue de profil en long

c- Profil en travers

Chaque coupe transversale de la route donne les informations sur la largeur des voies, les devers, la surface de remblais, la surface de déblais, les talus et les accotements, les éléments d'assainissement. La figure III-9 relate un exemple de profil en travers.

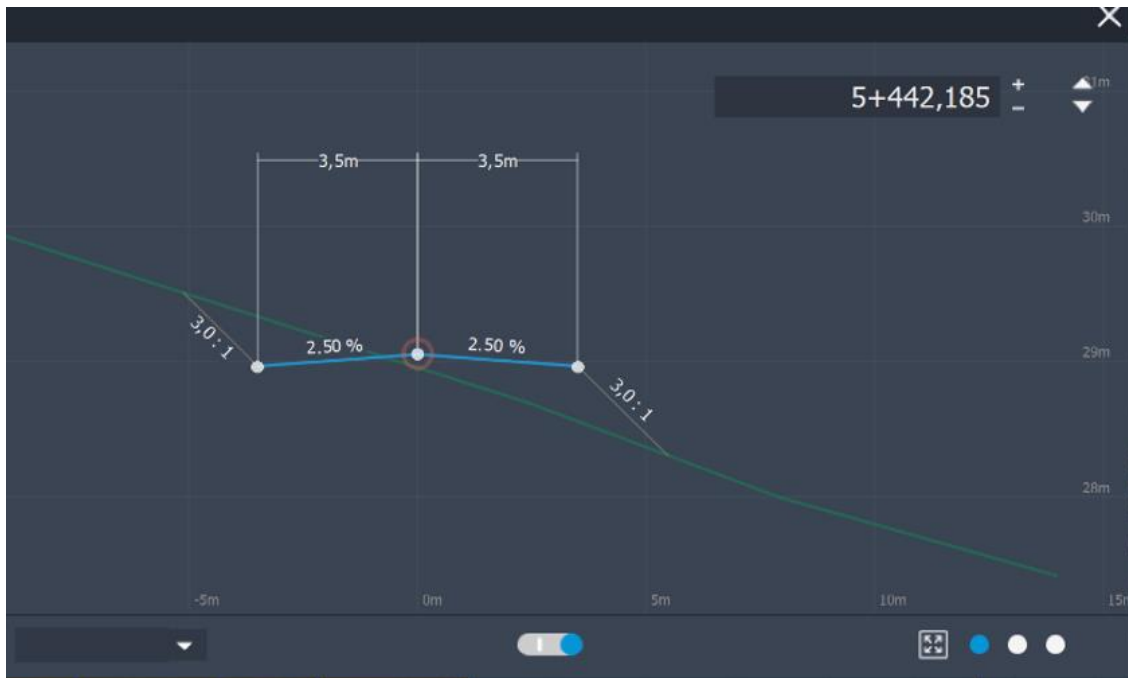


Figure III- 9: Vue de profil en travers

En activant le repérage on peut voir l'interaction qui existe entre la route en question, le profil en long et le profil en travers, comme l'illustre la figure III-10. En déplaçant la barre orange sur le profil en long, elle se met instantanément en mouvement sur le tracé en plan et ainsi on appréhende les caractéristiques du profil en travers en chaque point.

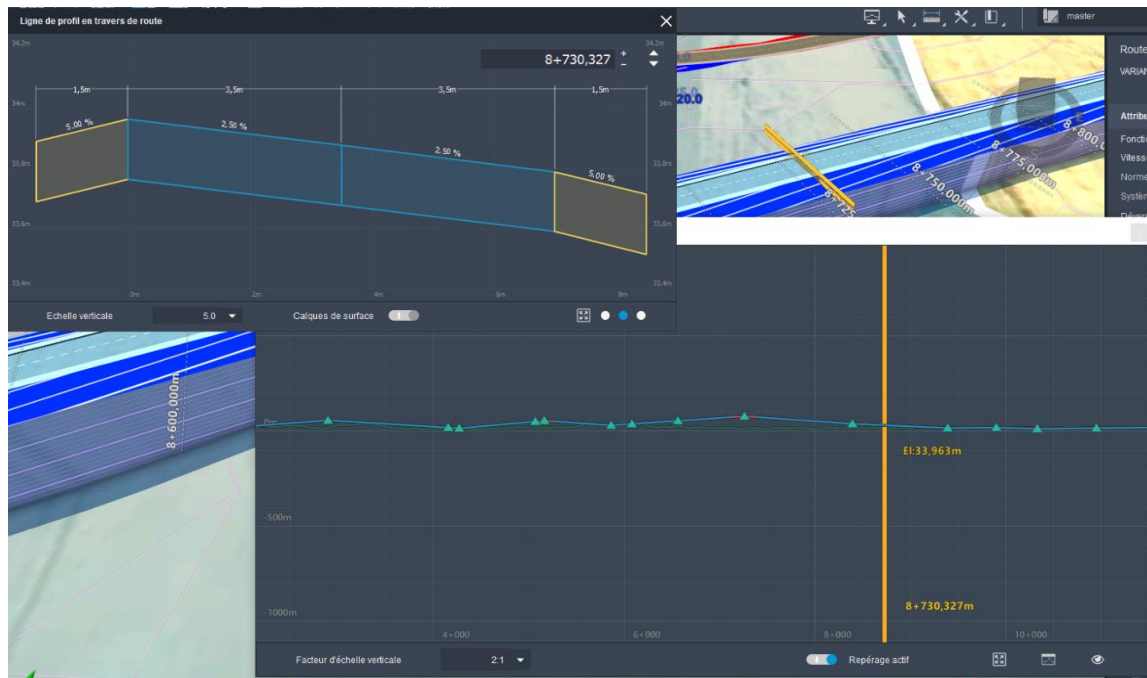


Figure III- 10: Interaction entre : profil en long, tracé en plan et profil en travers

III.4.4 Les données dans Infracworks

a- Les données importées

On peut importer divers types de données dans Infracworks, car il supporte plusieurs formats de fichiers (figure III-11 ci-dessous), d'ailleurs c'est ce qui le rend si puissant dans la conception préliminaire. Certaines données sont payantes et d'autres sont open sources. Celles qui n'ont pas des attributs peuvent être configurées dans Infracworks. Avec le partenariat entre Autodesk et ESRI, Infracworks et ArcGIS sont connectés. Cela dit, l'utilisateur d'Infracworks a accès aux informations géographiques disponibles dans ESRI. Les données importées peuvent être : les images aériennes ou satellitaires, les données de terrain de surface ou topographiques, les routes, les bâtiments, le mobilier urbain, les zones de couverture, les ponts, les parcelles, etc.

- Les modèles d'objets 2D et 3D créés à partir de SketchUp, 3ds Max, Navisworks, Revit sont importés sous les formats de fichiers .3ds, .dae, .obj, .fbx, .rvt, .skp et rfa ;
- Les données SIG vectorielles (contiennent des métadonnées) et raster sont importées en format .xml, .html, .landXML, .shp, .dem, etc.

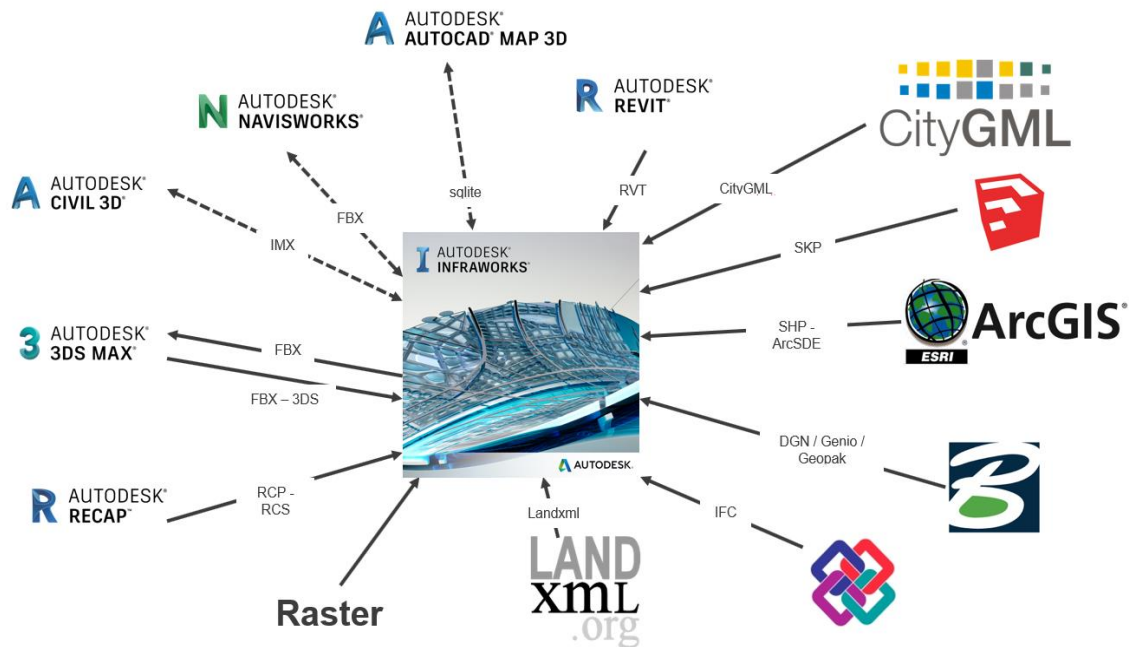


Figure III- 11: flux d'échange d'Infracworks avec d'autres outils

Source: (Autodesk, 2021)

b- Model Builder

Si on veut créer un nouveau projet dans Infracworks, il faut disposer de ses propres données. Sinon, Model Builder peut chercher à partir du cloud les données de la zone spécifiée et générer automatiquement un modèle réaliste. (Autodesk, 2021)

III.4.4.2.1 Les objets existants

Les routes, voies ferrées, les étendues d'eau et les Bâtiments (avec des hauteurs importantes) sont créés d'une manière réaliste dans le modèle à partir des jeux de données d'OpenStreetMap. (Autodesk, 2021)

III.4.4.2.2 Image aérienne de la zone

Des images satellites de Microsoft® Bing Maps sont drapées sur le terrain du modèle avec une résolution au sol réglable de 0,2986 m/pixel à 78271,5170 m/pixel. (Autodesk, 2021)

III.4.4.2.3 Elévation

Les données de terrain global sont disponibles dans les MNT de 10 et 30 mètres en fonction de l'emplacement géographique de la zone d'intérêt. Les données de terrain pour les Etats-Unis et

les territoires associés utilisent les MNT de 10 mètres USGS de la National Elevation Dataset (NED). Dans une latitude allant de -60° à $+60^{\circ}$, les données disponibles dans les MNT de 30 mètres SRTMGL1 (figure III-12 ci-dessous) sont utilisées. Dans une latitude allant de $+60^{\circ}$ à $+83^{\circ}$, les données disponibles dans les MNT de 30 mètres v2 ASTER GDEM sont utilisées. (Civil Made in France).

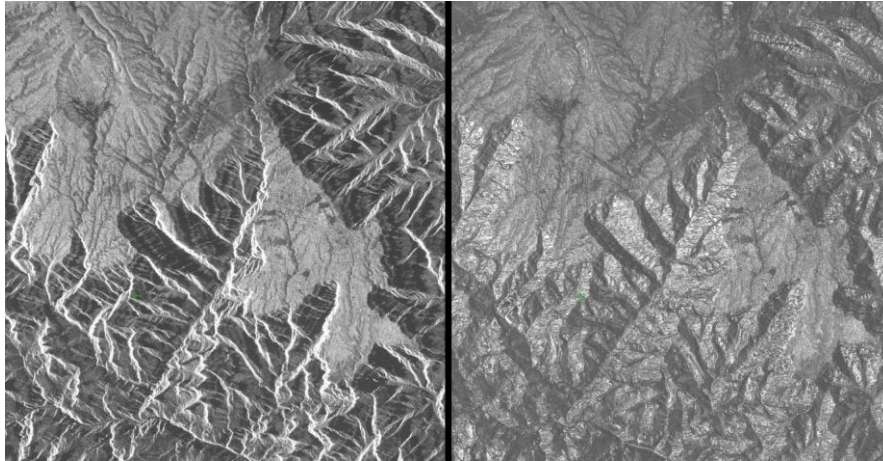


Figure III- 12: Modèle numérique de terrain

Source: (The Alaska Satellite Facility)

Les MNT de haute résolution utilisée détermine les attributs du terrain tels que les élévations, les pente et l'aspect à n'importe quel endroit. Il est important de vérifier la résolution, avec un MNT de mauvaise résolution, la topographie sera mal représentée. Il est conseillé d'intégrer à la phase détaillée des données topographiques levées à partir des méthodes classiques (station totale, GPS) ou en utilisant la technologie du système laser (LIDAR), aéroporté par des drones équipés des cameras sophistiquées (photogrammétrie). Ce MNT ne peut remplacer un levé topographique. Néanmoins si la résolution est bonne il reste une aubaine dans la phase préliminaire du moment qu'il est gratuit et couvre l'ensemble du secteur d'étude.

La figure III-13, ci-dessous représente un modèle 3D fournit par LIDAR.

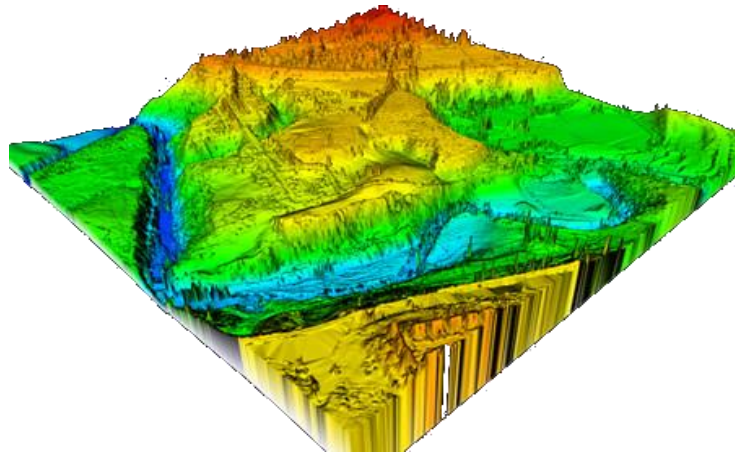


Figure III- 13: Modèle 3D LIDAR

Source : (Laanisto, 2019)

III.4.5 Analyse de trafic

L'analyse de trafic joue un rôle primordial dans les projets routiers et plus précisément dans les zones urbaines. Malgré qu'il existe des techniques de comptage par des organismes, il n'est pas évident de visualiser ou de calculer l'effet qu'engendrera un nouveau développement sur le trafic. Avec le plugin du logiciel d'Autodesk Vehicle Tracking (suivi des véhicules) dans Infracore on peut analyser et simuler le trafic et la mobilité des piétons. Cette analyse facilite le choix d'aménagement des carrefours (giratoire, passage dénivelé, carrefour commandé par feux tricolores, etc.) et des parkings (Autodesk). La figure III-14 montre à titre illustratif l'évaluation aux normes de sécurité avec Vehicle tracking.

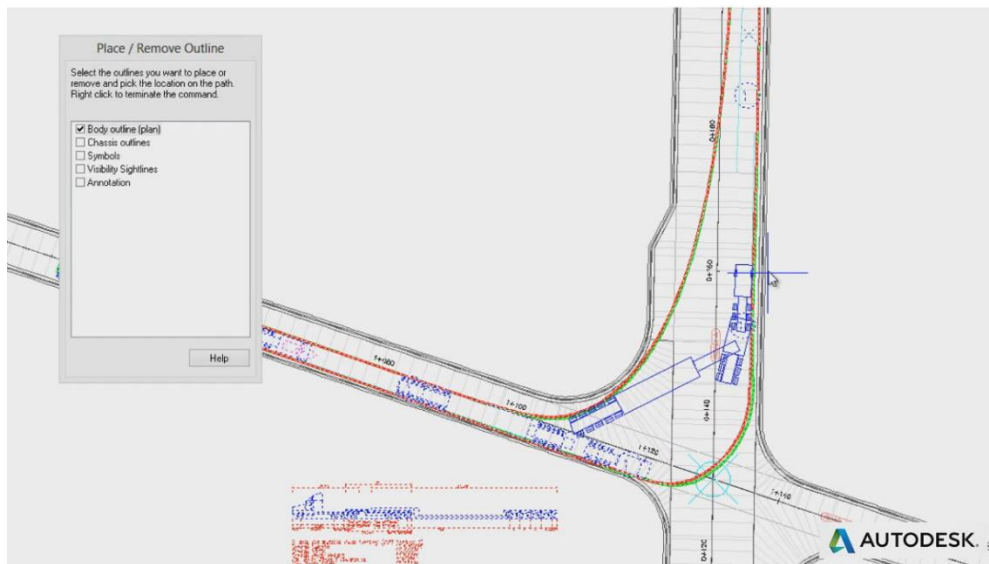


Figure III- 14: Evaluation aux normes de sécurité avec Vehicle tracking

Source : (Autodesk)

III.4.6 Analyse des Bassins versants

Le logiciel intercepte et analyse tous les bassins versants croisant une route composée sélectionnée ou à partir d'un seul point bas du terrain. Chaque bassin est caractérisé par un ID, son aire, la longueur du canal de drainage, et la pente du canal.

Cette opération est capitale dans le processus d'étude d'une route, dans l'étude hydrologique et hydraulique (Benoauziz, 2020).

III.4.7 Estimation des débits

Une fois les bassins versant analysés, Infracworks nous permet de calculer directement soit par la méthode rationnelle, ou par la méthode de régression ou encore par une méthode définie par l'utilisateur (Benoauziz, 2020).

III.4.8 Ajout et dimensionnement des ouvrage hydrauliques

Avec l'analyse des bassins versants, Infracworks détectent les flux d'écoulement des eaux. A leur tour les flux sont exploités par le logiciel pour placer les ouvrages hydrauliques aux points les plus bas de la route lorsqu'on les ajoute (Benoauziz, 2020).

Le dimensionnement se fait en fonction du débit calculé (automatique). Il y a la possibilité de :

- ▲ Modifier le type d'ouvrages : avec ouverture d'évacuation, la forme, les matériaux ;
- ▲ Modifier la longueur, le positionnement ou la taille de l'ouvrage en tirant sur l'ouvrage directement dans la boîte de dialogue de dimensionnement.

Dans la figure III-15 ci-dessous, l'image à gauche montre la boîte de dialogue pour le dimensionnement des ouvrages hydraulique et celle à droite leur ajout.

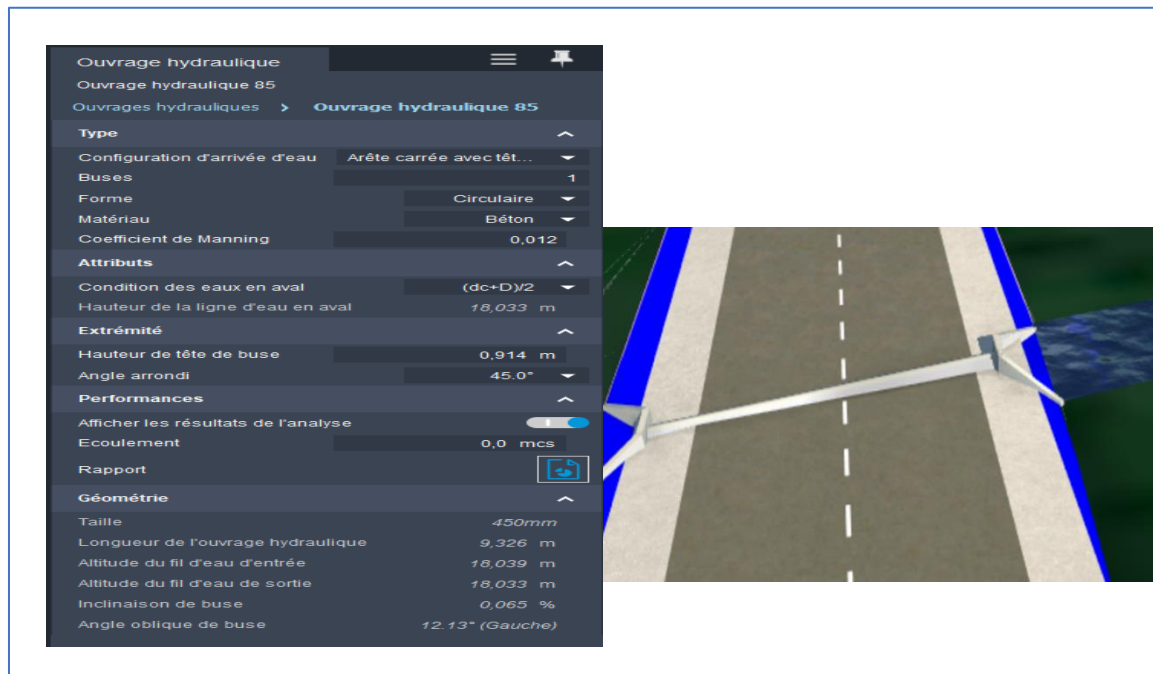


Figure III- 15:Exemple d'illustration d'ouvrage hydraulique

III.4.9 Terrassement et calcul des matériaux

La fonction quantité montrée dans la figure III-16 ci-dessous, fait le calcul et affiche les quantités de terrassement (déblais, remblais, net), elle fait aussi le calcul de quantité des matériaux du composant de la route et des ouvrages d'art ou d'autres objets accessoires. Elle permet d'inclure ou d'exclure des valeurs de terrassement pour certaines sections de routes. Une fois le calcul est fait, on peut générer un rapport en format CSV sur les détails du terrassement (Autodesk, 2021).

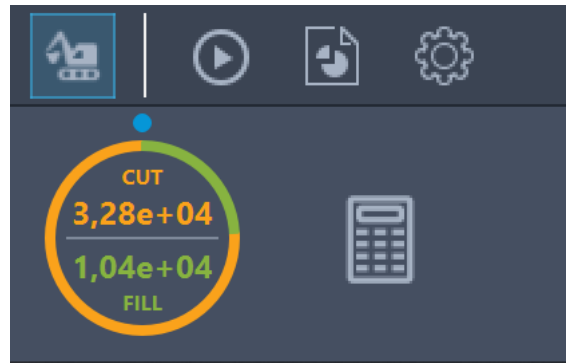


Figure III- 16: Fonctionnalité de calcul des quantités

III.4.10 Optimisation du projet 3D

L'optimisation du projet 3D a le même rôle que celle du profil en long. Selon Autodesk, Cette opération est une méthode automatisée pour les planificateurs des routes qui souhaitent trouver un alignement optimal pour tout chemin de transport dégagé capable de laisser passer un véhicule. L'entrée du procédé peut inclure, mais sans s'y limiter, des données de terrain, des points de départ et d'arrivée du chemin, des contraintes de conception, des données d'informations géographiques telles que des routes, des voies ferrées, des bâtiments, les préférences de l'utilisateur et le classement (poids). Elle nécessite également des intrants de coûts qui peuvent inclure les coûts de terrassement, les coûts de construction, les coûts du terrain, les coûts environnementaux, etc. La méthode recherche alors un tracé qui tente de minimiser les coûts, ou toute combinaison de coûts, tout en respectant les contraintes données. Elle peut être soumise à : (Autodesk, 2021):

a- Zone de convenance du projet

La création d'une carte de contraintes colorées aide à mieux identifier les zones à faible impact environnemental. Un gradient de coût est illustré par un coût élevé avec une couleur de départ vers un coût faible avec une couleur d'arrivée. Plus le projet converge vers une contrainte, plus le coût s'élève.

Tout terrain ayant des caractéristiques ne favorisant pas à la construction de la route est une zone de coût. Ces zones sont considérées comme zones d'évitement. Et elles sont soit esquissées directement ou soit importées dans Infracore sous forme des couvertures polygonales géolocalisées provenant des cartes numérisées avec un outil SIG.

La carte de contraintes est paramétrée par des calques d'objets existants ou créés dans le modèle : les étendues d'eau, les bâtiments, les parcelles, les forêts, les intersections, les flux d'écoulement des eaux, etc... (Autodesk, 2021)

b- Les points d'intersection verticales

Les PIV sont ajoutés selon leur fréquence et espacement. Une fréquence faible des PIV permet de réduire le nombre de PIV, ce qui permettra d'obtenir une route lisse avec plus de terrassement. Par contre pour une fréquence élevée ajoute plus de PIV, ce qui permettra d'obtenir une route qui épouse le terrain naturel avec moins de terrassement (Autodesk, 2021).

c- La vitesse de conception

Pour des conditions de sécurité et de confort, l'optimisation est conditionnée par une vitesse de conception (vitesse de base) en fonction de laquelle les rayons en plan et les rayons verticaux seront dans les normes (Autodesk, 2021).

d- Talus

- ▲ Le talus maximal : C'est la déclivité maximale, représentée sous forme de pourcentage, Cette valeur s'applique aux talus positifs et négatifs. Par exemple, si cette valeur est 7%, le talus ne doit pas dépasser +7% ou -7% ;
- ▲ Talus de drainage : C'est la tangente minimale requis pour drainer les eaux à partir de la route, il est aussi exprimé en pourcentage ;
- ▲ Modalité de définition de la pente des talus de déblai et de remblai (dévers) de bord de route (Autodesk, 2021).

e- Transport de matériaux

Les emplacements et capacités des zones d'emprunt et de déchets qui se trouvent dans la zone du projet sont une opportunité à exploiter, comme illustré dans la figure III-17. Alors le logiciel les prend en compte dans ses calculs s'ils sont identifiés (Autodesk, 2021).

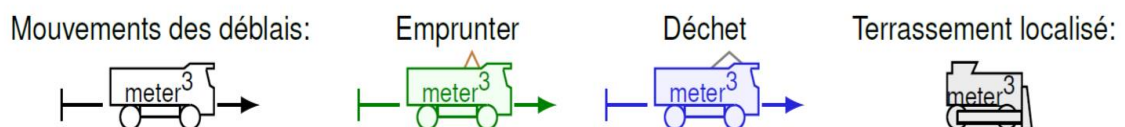


Figure III- 17: Cartographie de transport de matériaux

Les fonctions quantité et optimisation du projet 3D font les pré-estimations du projet. Ainsi nous pouvons faire plusieurs scénarios et les comparer suivant leurs coûts et les impacts environnementaux.

III.4.11 Communication autour du projet

En raison du nombre de spécialisations nécessaires au bon déroulement des travaux, le travail d'équipe peut être assez compliqué et il le sera davantage avec un manque de communication entre les différentes parties prenantes du projet. Les conséquences sont d'ordre : de dépense de beaucoup d'argent, le projet peut prendre plus de temps que nécessaire pour être livré, les erreurs de conceptions. C'est pourquoi Infraworks est le meilleur outil permettant aux acteurs impliqués dans le projet (maitre d'ouvrage, administrateurs, architectes, ingénieurs, fournisseurs, techniciens) de collaborer sur le modèle pour un projet plus optimal (Autodesk, 2021).

a- Gestion de documents

Les documents sont stockés localement ou dans le cloud. Ainsi ils sont accessibles aux collaborateurs. Dans le cloud, les documents sont enregistrés sur l'outil BIM360 documents management. Pour accéder, un compte BIM360 est nécessaire. BIM360 documents management donne un stockage gratuit et une accessibilité aux fichiers du projet aux collaborateurs avec l'aval des administrateurs. Cela réduit la bureaucratie et enfin toutes les parties intéressées peuvent ajouter et extraire des informations de la plateforme, en fonction de leurs besoins n'importe où et quand (Autodesk, 2021).

b- Partage du modèle en ligne

Le projet entier peut être partager en ligne grâce à un navigateur web et les fonctionnalités d'Infraworks. Les collaborateurs peuvent commenter, modifier et approuver le projet. Ainsi, les décisions prises, en particulier lors de la planification et de la conception, se révèlent beaucoup plus affirmées. De plus, en cas d'ajustement du projet, les retombés sont mineurs. Comme les informations sont traitées en temps réel, elles sont toutes mises à jour en même temps, empêchant quiconque de travailler avec des informations qui n'ont plus de valeur. En

revanche ce processus d'automatisation représente, au final, une plus grande économie de temps et d'argent dans les planifications et l'exécution du projet. Et cette économie permet de suivre l'intégralité du planning, y compris la date de livraison, évitant ainsi plusieurs problèmes. Et ce temps gagné peut-être présenter comme une opportunité de tester de nouvelles solutions, avant de les mettre en pratique (Autodesk, 2021).

Conclusion

Le logiciel Infracore est un excellent outil de choix de variantes d'un projet routier comparé à la technique classique basée sur des cartes et les SIG. En bref, on peut concevoir et modifier les voies dans un environnement réaliste, les analyser, les simuler, et faire un devis estimatif du projet. Tous cela dans un temps insignifiant, avec une économie des ressources et une communication bien éclairée.

La partie qui suit sera celle de l'application d'Infracore pour une conception préliminaire et le choix de la meilleure variante. On ne pourra pas aborder toutes les fonctions du logiciel, car ça sera plus long.

Chapitre IV : Modélisation des variantes

IV.1 Introduction

Méthode

La méthode adoptée consiste déterminer des tracés de la route avec la fonction d'optimisation d'Infraworks 360 en quelques étapes avec l'ajout des paramètres dans chaque étape. C'est le même projet (Chemin de Wilaya 60) développé dans (Zaoui, et al., 2020) par un processus de conception basé sur les outils SIG, c'est-à-dire sans recours à l'outil BIM. Le logiciel donne plusieurs informations sur une route. Quelques caractéristiques jugées principales seront utilisées comme critères pour comparer les tracés.

Par manque de données issues des études géomorphologiques du site du projet, la reconnaissance est assurée par Infraworks. Cet outil BIM dispose d'une base de données intégrées aux SIG, avec des images satellitaires permettant d'analyser directement sur sa plateforme.

La phase détaillée ne sera pas appliquée comme il le faut, car pour ce faire, des informations socioéconomiques, les données de trafics, les données géotechniques et des données topographiques réelles sont nécessaires. L'étude détaillée doit se faire sur un logiciel avec une grande capacité de précision (Civil 3D), car ce travail sur Infraworks ne donne que l'emplacement le plus approprié de l'axe de la route.

La figure IV-1 ci-dessous divulgue la structure de la méthode de travail.

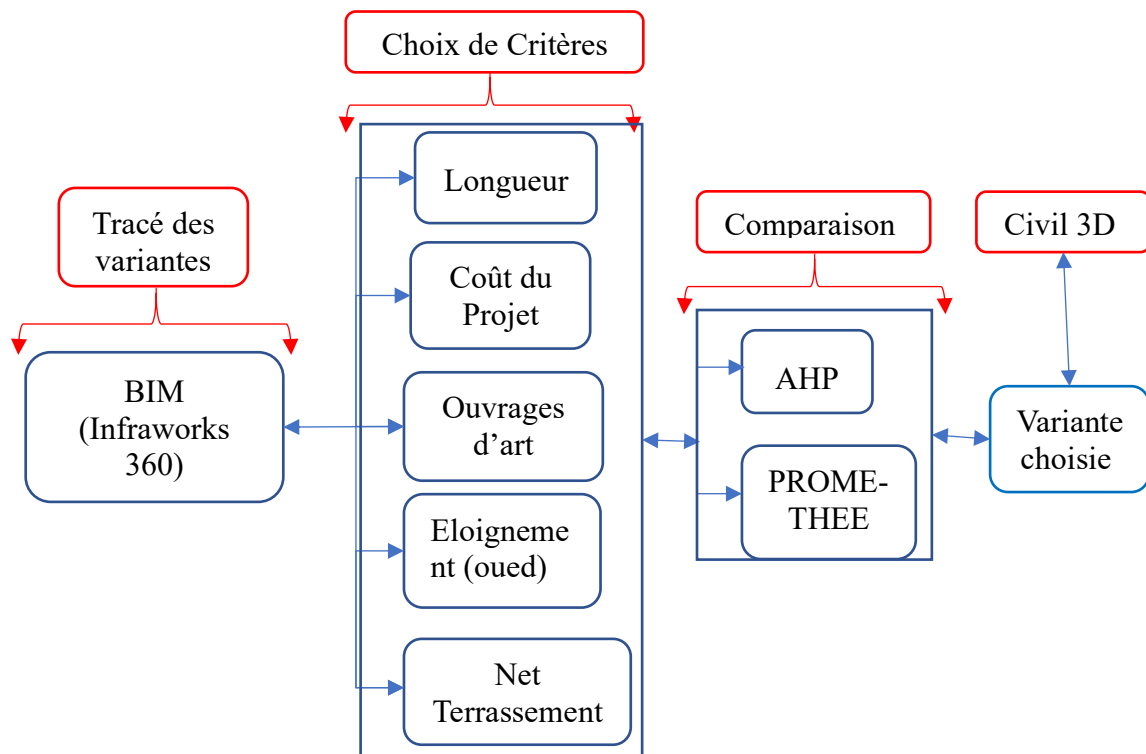


Figure IV- 1: Méthodologie du travail

IV.2 Présentation du projet

Ce projet est une alternative au tronçon du chemin de Wilaya numéro 60 qui lie la commune de Sidi Belattar à la route nationale numéro 90 (RN 90). En effet cette section de la route d'environ 12 Km longeant l'Oued Cheliff est devenue vulnérable aux inondations et donc à risque.

Le projet est situé à l'Ouest de l'Algérie dans la Wilaya de Mostaganem, plus précisément la région de Sidi Belattar qui est situé entre 36°01'36 de la latitude Nord et 0°16'10 de la longitude Est. La zone fait une superficie de 8800 hectares (figure 2). D'après le recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2014, la population est estimée à 6794 habitants. La zone d'étude est limitée au Sud par l'Oued Cheliff, au Nord par le barrage de Kerrada et une forêt, l'Ouest par la commune de Sidi Belattar, et à l'Est par la RN 90.

Faisant partie des monts Dahra, le relief est caractérisé par une pénélaine ondulée. C'est une zone semi-aride dominée par une végétation de forêt clairsemée et des champs de culture. Le climat est sec et chaud, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 360 mm par an. Le principal réseau hydrographique est l'Oued Chélif. (Zaoui, et al., 2020). La figure IV-2 dévoile la géolocalisation de la zone d'étude.

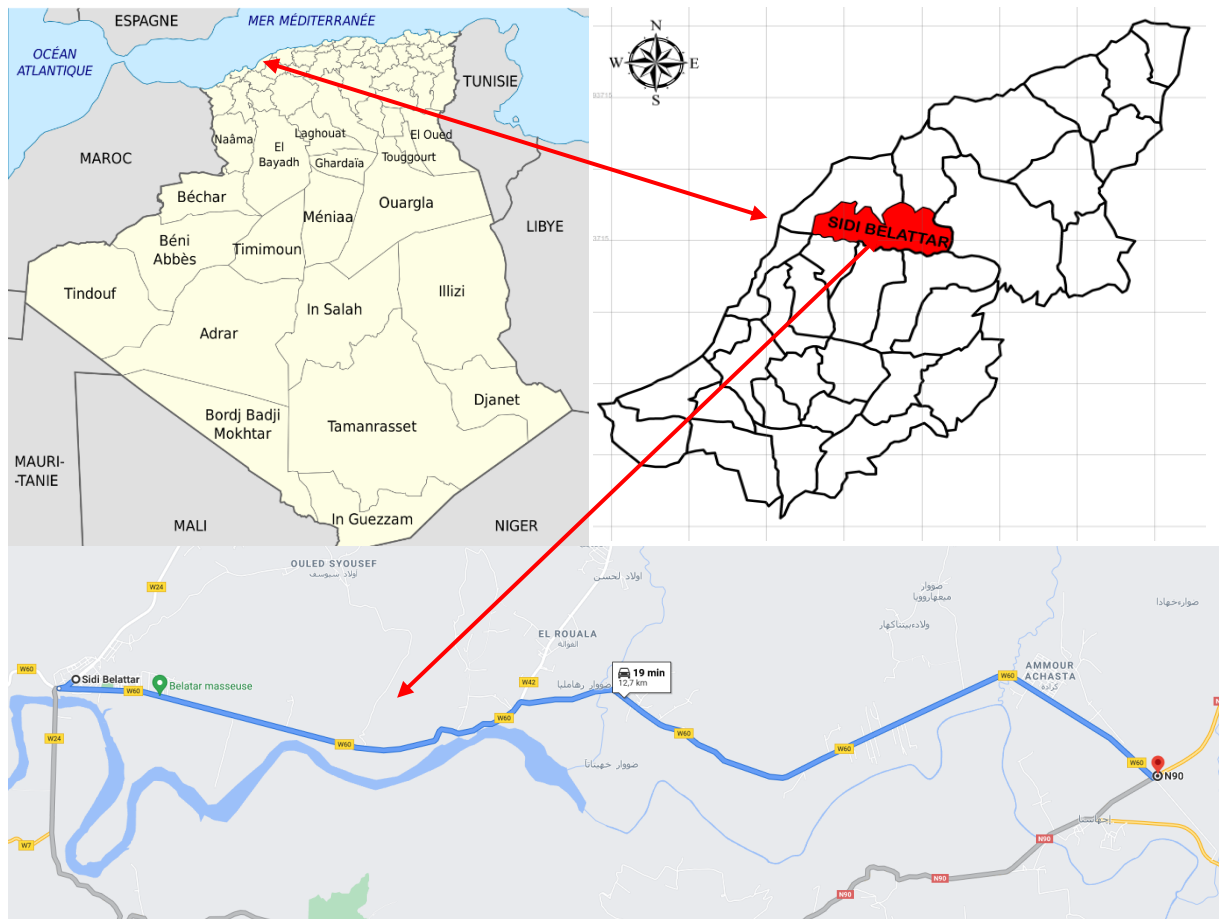



Figure IV- 2: Présentation de du projet de CW60

IV.3 Création du modèle avec Model Builder

Sur Infracore, il y a deux manières de créer un modèle : manuellement ou soit avec le modèle intelligent Builder. Comme nous n'avons pas des données, on utilise Model Builder pour notre projet. En effet le 'Model Builder' permet de créer rapidement et facilement des terrains réalistes en 3D à partir d'une zone d'intérêt spécifiée.

- La première des choses consiste à se connecter sur Infracore avec son identifiant Autodesk ;
- Sur la page d'accueil d'Infracore, cliquer sur Model Builder ;
- Aller sur la zone d'intérêt, entrer le nom de la localité la plus proche ;
- Créer une zone délimitée : le logiciel ne nous permet pas d'aller au-delà de 200 km² de zone de sélection ;

- ✦ Choisir un système de coordonnées approprié à la zone. Cela est incontournable pour le traitement d'Infraworks mais aussi pour l'interopérabilité avec les autres logiciels BIM. Nous avons Nordsahara1959.UTM-31N pour notre zone d'étude ;
- ✦ Nommer le projet ensuite cliquer sur créer un modèle ;

Une fois créé, Infraworks prend quelques minutes et nous envoie une notification par courrier électronique à l'adresse e-mail associée à notre compte Autodesk apparaîtra sur la page d'accueil d'Infraworks sous l'icône  (dans le cloud à télécharger).

- ✦ Cliquez sur la miniature pour télécharger la mosaïque ;
- ✦ Enregistrer dans l'ordinateur ou dans un projet BIM 360 document Management (pour la collaboration) et le modèle s'ouvrira dans Infraworks (Autodesk, 2021).

La délimitation de la zone d'étude utilisée dans le processus d'étude des variantes est illustrée à la figure IV-3.

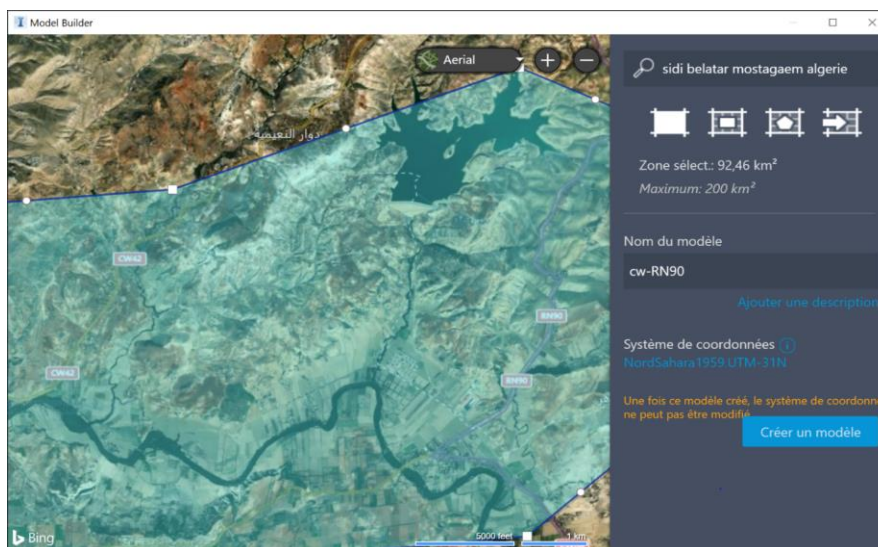


Figure IV- 3: Création d'une zone délimitée par Model Builder

IV.3.1 Les objets existants

Dans notre zone, le logiciel a reconnu comme objet paramétrique, les routes, l'oued Chéiff, le barrage de Kerrada, un bâtiment comme dévoilés sur la figure IV- 4. Ces objets peuvent être redimensionnés ou supprimés carrément.

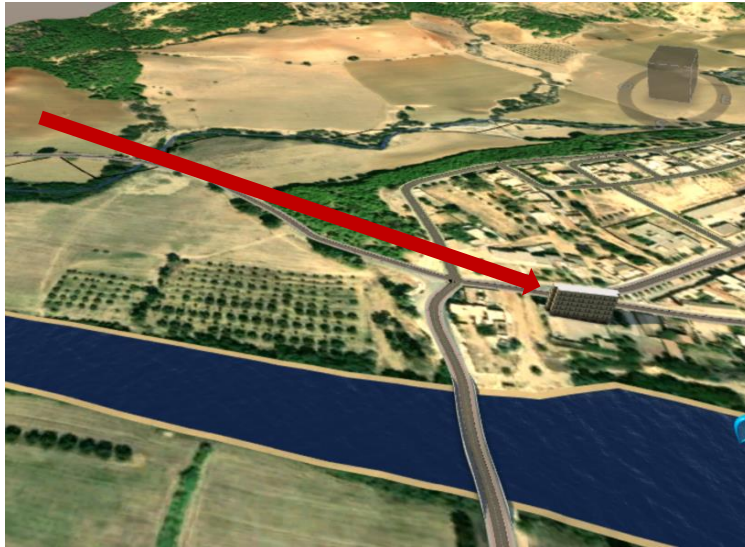


Figure IV- 4: reconnaissance d'un bâtiment par Infracore

IV.3.2 Image aérienne de la zone

L'image aérienne a une résolution au sol réglable de 0,2986 m/pixel à 78271,5170 m/pixel. C'est un ensemble de plusieurs images satellitaires fournies par Microsoft® Bing Maps qui est drapé sur le modèle.

IV.4 Identification de la zone de convenance

Il s'agit de déterminer un site de projet approprié qui prend en compte les facteurs de coût non contraignants que nous allons les définir.

IV.4.1 Palette de Thèmes de terrain

Le modèle représentant la zone d'étude est caractérisé par un terrain accidenté avec des altitudes allant jusqu'à 200 m et des zones inondables. Grâce aux thèmes de terrain nous avons identifié l'emprise des variantes de la route. La palette de thèmes de terrain de la zone d'étude est exposée dans la figure IV-5 ci-après.

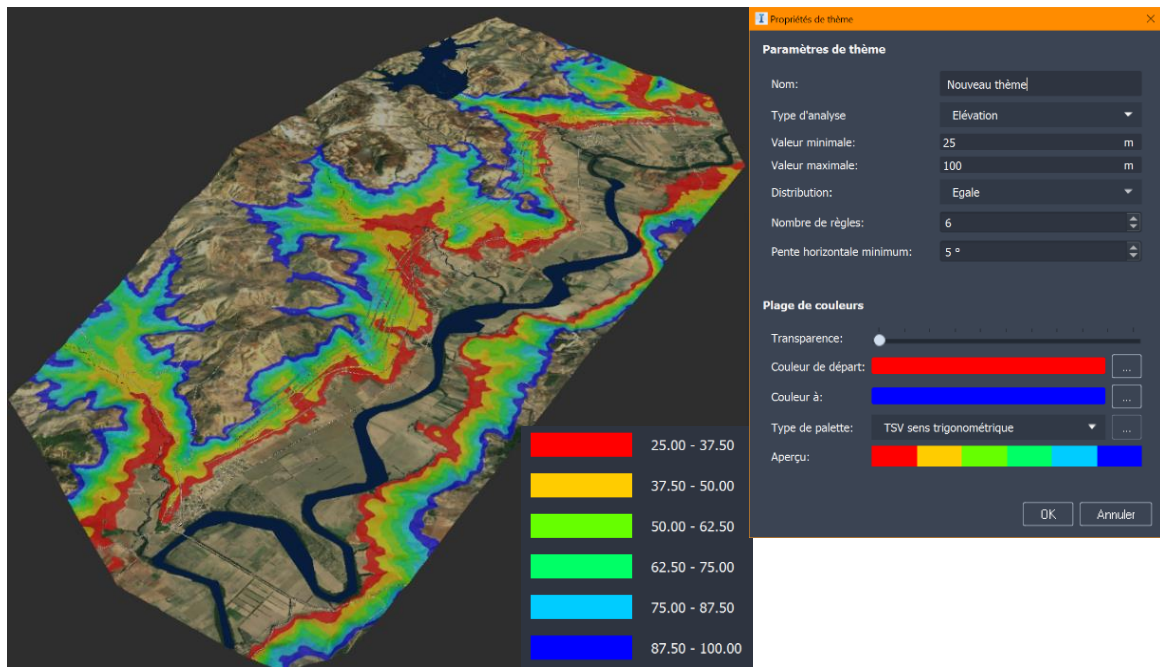


Figure IV- 5: Palette de thème de terrain de la zone d'étude

IV.4.2 Carte de contraintes

Nous ne possédons pas assez de données pour rendre le modèle pertinent, néanmoins une carte de contrainte est créée en fonction d'un bâtiment dans la commune de Sidi Belattar, l'Oued Chélif, le barrage de Kerrada, les flux d'écoulement des eaux et quelques parcelles esquissées.

La figure IV-6 : relate la carte de contraintes :

Pour créer ⇒ aller dans créer ⇒ environnement ⇒ carte de contrainte ⇒ créer une carte de contraintes ⇒ ajouter un calque ⇒ sélection des objets ⇒ ok ⇒ appliquer ⇒ activer la carte.

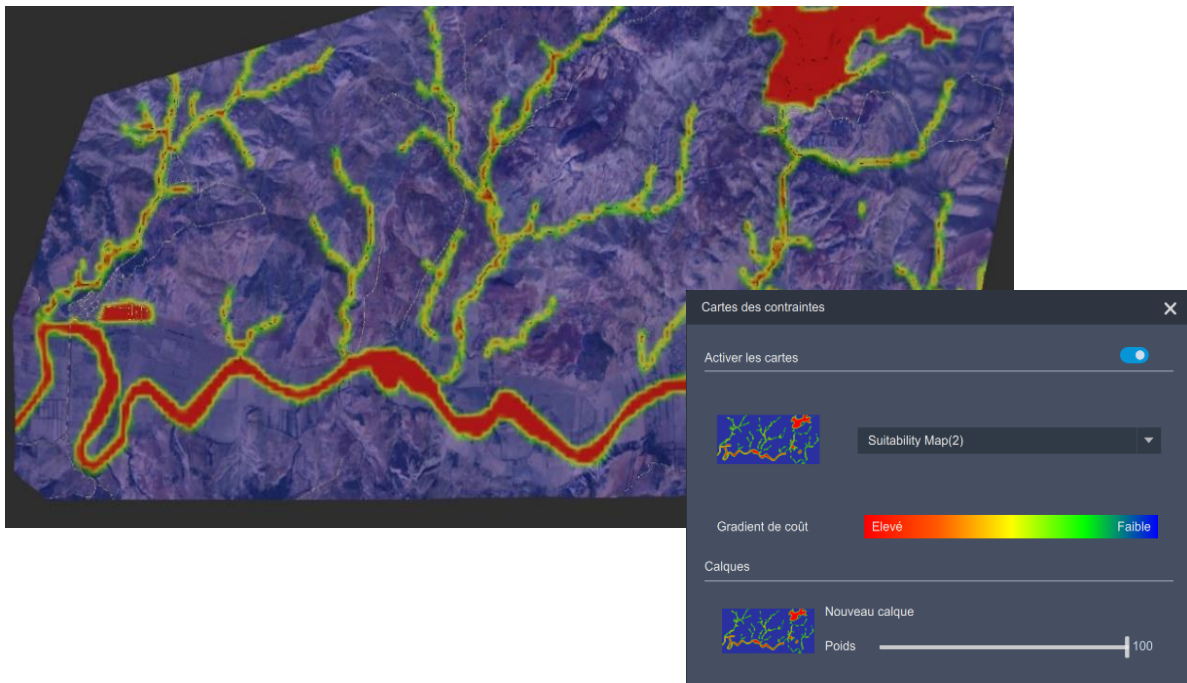


Figure IV- 6: Carte de contraintes

IV.5 Tracé en plan

IV.5.1 Règles et principes de tracé en plan

D'après les normes B40, nous pouvons citer quelques règles à respecter dans le tracé en plan :

- ▲ L'adaptation du tracé au terrain naturel pour qu'il n'y ait pas de terrassement important et donc un grand mouvement de terres ;
- ▲ Raccorder le nouveau tracé au réseau existant ;
- ▲ Eviter les terrains instables ainsi que les terrains agricoles et les propriétés privées ;
- ▲ Eviter les franchissements des oueds pour éliminer la réalisation des ouvrages d'art ;
- ▲ Ne pas placer les courbes aux entrées des ouvrages d'art (problèmes de visibilité) ;
- ▲ Ne pas se faire succéder immédiatement deux courbes de rayons différents ;
- ▲ Il faut séparer les courbes successives par des parties droites, la longueur minimale de cette partie est de $L_a = 5V_r$ (V_r vitesse de référence en m/s) ; (IV.1)
- ▲ Il est recommandé que les parties droites (les alignements) d'un tracé représentent entre 40 à 60% ;

- ▲ Éviter les trop longues lignes qui peut engendrer la monotonie relâchant la vigilance des conducteurs, et d'éviter aussi l'éblouissement dû aux phares pendant la nuit. (Djelfa, 2016).

IV.5.2 Esquisse de la route

En se référant aux thèmes de terrain pour suivre les courbes de niveau et la carte de contraintes pour mieux contourner ces dernières, l'outil route de planification dans Infracore nous a servi à esquisser plus facilement le premier axe. La figure IV-7 expose l'esquisse de la route :

Pour créer, aller sur créer ⇒ planification de route ⇒ sélectionner un style de tracé ⇒ commencer à dessiner.

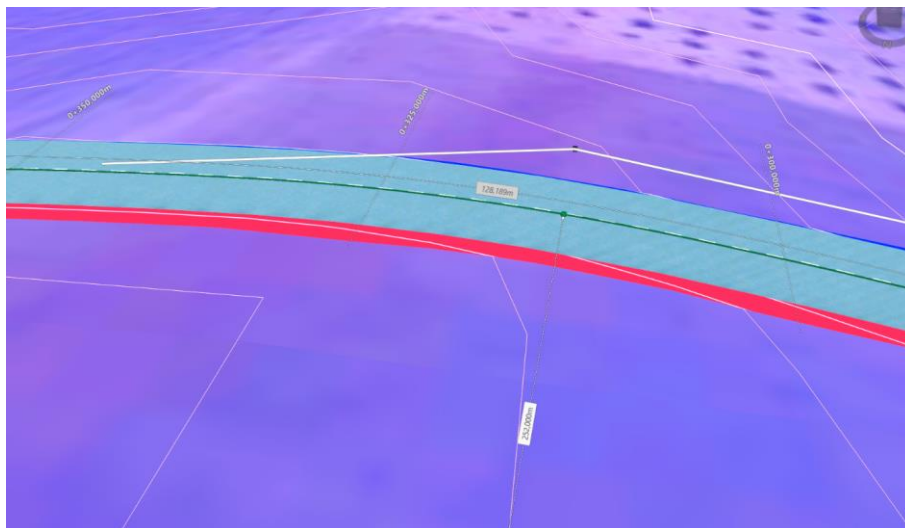


Figure IV- 7: Esquisse de la route (illustration d'un tracé en plan)

IV.6 Optimisation de la route

Le but de cette optimisation est d'avoir plusieurs variantes à partir de l'axe créée. Le logiciel suit les mêmes principes avec plus de précision. La figure IV-8 montre la manière d'en créer un axe par optimisation.

Pour optimiser, on a procédé comme suit : analyse ⇒ transport ⇒ optimisation du projet 3D

- ▲ Modélisation en fonction de la vitesse de 60 km/h ;
- ▲ Utilisation des ponts au-dessus de la hauteur maximale de remblai de 4m ;
- ▲ Talus de bord de la route : limite de talus (10 m) ;

- ▲ Rayon minimal satisfaisant la vitesse : 150 m ;
- ▲ Déclivité maximale : 6,67% ;
- ▲ Inclusion de la carte de contrainte ;
- ▲ Création des zones d'évitement : si une variante est créée, on ajoute des couvertures supplémentaires pour éviter que les variantes aient les mêmes caractéristiques
- ▲ Ajout des points d'intersection pour les contournements comme montré sur la figure ci-après

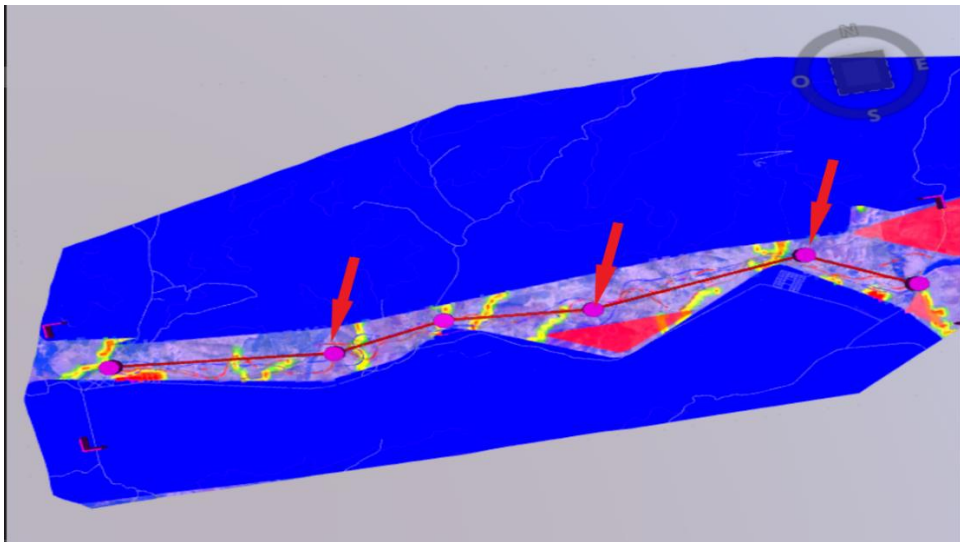


Figure IV- 8 : Création d'axe par optimisation

Conclusion

Dans cette partie nous avons créé un modèle réaliste de notre zone d'étude sur l'outil Infracore auquel nous avons projeté les variantes. La partie suivante gravite autour de l'étude hydrologique.

Chapitre V : Etude hydrologique

Une étude hydrologique consiste à identifier, analyser et calculer tous les bassins versants de la zone d'étude afin de déterminer les débits et les hydrogrammes des crues du projet et des crues historiques. (egis, 2017).

V.1 Délimitation des bassins versants

V.1.1 Méthodologie d'étude

En sélectionnant la route existante (convertit en route à composante) qui longe l'Oued Chélif, Infracore a généré quinze bassins versants avec chacun caractérisé par une surface, l'emplacement des flux d'écoulement, la longueur du flux de l'écoulement, la pente du canal.

Le débit à l'aide de l'une des méthodes intégrées. Il est préférable d'utiliser la palette thèmes de terrain pour identifier les altitudes les plus bas, cela permet d'identifier tous les bassins versants. La figure V-1 montre la façon de générer les bassins versant : Pour créer, aller sur analyse ⇒ assainissement ⇒ bassin versant ⇒ ok ⇒ paramétrer ⇒ sélectionner la route.

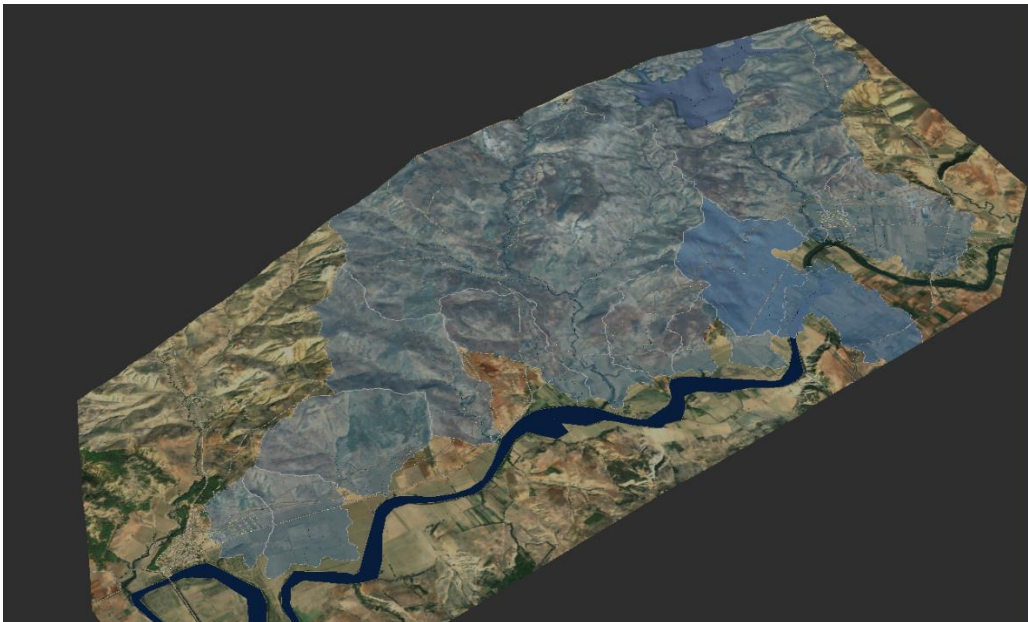


Figure V- 1: Génération de bassins versants

V.2 Analyse des bassins versant

En cliquant sur chaque bassin versant, on obtient ses caractéristiques montrées dans le tableau ci-dessous qui nous permettrons de calculer les débits. Les caractéristiques des bassins versants sont illustrés dans le tableau V-1 ci-après.

Tableau V- 1: Caractéristiques des bassins versants

Numéro du bassin versant	Surface du bassin (km ²)	Longueur du canal(m)	Pente du canal (%)
1	14,85	7781,8	1,78
2	17,68	7446,1	1,99
3	4,93	3443,3	0,14
4	4,86	3358,6	0,15
5	3,23	3478,8	3,02
6	3,01	1956,2	0,16
7	3,05	1890	0,09
8	2,32	1157,4	2,31
9	1,68	2264,5	1,11
10	0,35	56,60	0,00
11	0,55	116,60	0,06
12	11,19	612,50	0,00
13	0,31	181,40	2,47
14	0,59	56,60	0,00
15	1,62	2101,10	1,19

V.3 Calcul des débits des bassins versants

Les débits des bassins versants s'appuient sur des données pluviométriques et sont calculés par plusieurs méthodes à savoir : La formule rationnelle, la formule de Burkli-Ziegler, la formule de Mallet-Gauthier, Formule de Fuller II. Le choix d'une formule est proportionnel aux données caractéristiques des bassins versants (Benoauziz, 2020).

V.3.1 Méthode rationnelle

Cette méthode permet d'estimer le débit maximum (de pointe) à l'exutoire soumis à une précipitation (Rafik, 2016). Elle est intégrée dans Infracworks, simple à appliquer, prend en compte la nature, la morphologie et la pente du sol, l'intensité de la pluie. La figure V-3 montre l'insertion des données hydrologiques.

$$Q_t = \frac{C_r \times i_t \times A}{3,6} \quad (\text{V.1})$$

Avec :

- ▲ Q_t : Débit en m^3/s correspondant à une période T ;
- ▲ T : période de retour pour laquelle le débit est calculé ;
- ▲ C_r : coefficient de ruissellement ;
- ▲ i_t : intensité de pluie correspondant à la période de retour T en mm/h ;
- ▲ A : surface du bassin versant en Km^2 (Benoauziz, 2020).

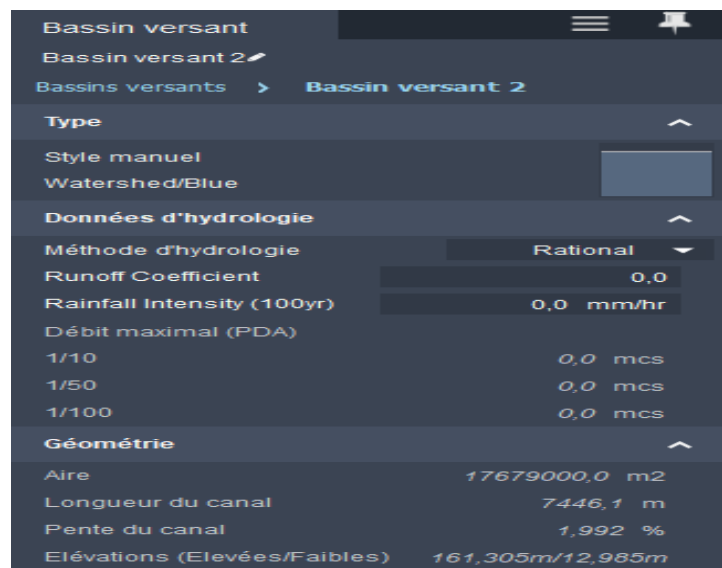


Figure V- 2: Insertion des données hydrologiques

V.3.2 Calcul d'intensité

C'est la quantité de pluie tombée pendant une durée sur une surface donnée. La figure V-4 expose les courbes intensité-durée-fréquence.

$$\text{Formule de Montana : } i_t = a_t \times t^{-b} t_c \quad (\text{V.2})$$

Avec :

- ▲ i_t = Intensité de pluie pour un temps de concentration en mm/h ;
- ▲ t_c = Temps de concentration en mn ;
- ▲ a et b varient d'une région géographique à une autre et dépendent de la période de retour T ;
- ▲ La période de retour découle d'une analyse de plusieurs facteurs ;

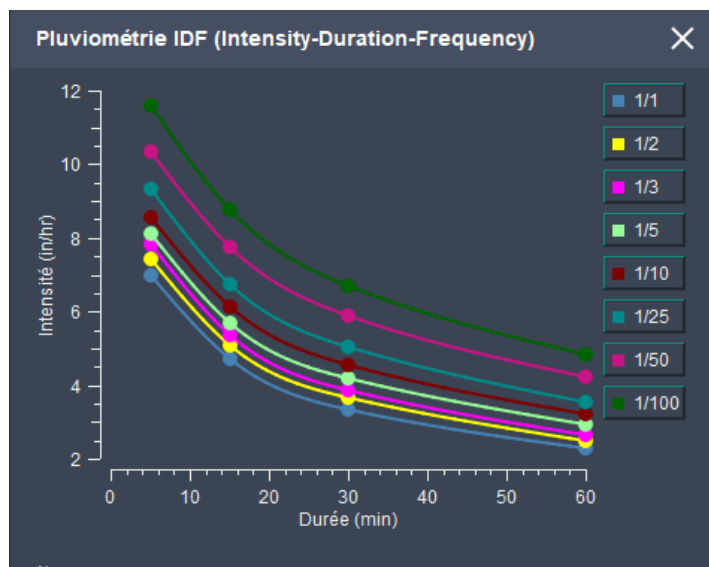


Figure V- 3: Intensité-durée-fréquence

Les valeurs de (a et b) sont prises pour la station météorologique de Benaira (tableau V-2).

La raison de ce choix est que cette station se trouve dans la même région géographique que notre zone d'étude et donc la pluviométrie est presque la même.

Ces valeurs sont déterminées par les lois semi-empiriques avec les données pluviométriques.

Tableau V- 2: Valeurs de a et b pour différentes périodes de retour de la station de Benaira

Source : (Ghulamallah, 2013)

Temps de retour		100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans	2 ans
Coefficients de la formule de Montana	a	15,25	13,62	11,86	10,47	8,98	6,66
	b	0,71	0,71	0,71	0,7	0,69	0,67

La Période de retour à prendre dans les calculs doit faire l'objet d'une étude en incluant le coût d'investissement du projet, la durée de vie de l'ouvrage, l'impact de l'ouvrage sur la biodiversité, le risque de débordement des eaux pour les usagers, etc.... ;

Selon SETRA (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements) et les normes Algériennes B40, il est recommandé d'adopter une période de retour de 100 ans pour les ouvrages d'arts. (Benoauziz, 2020).

Temps de concentration :

Le temps de concentration d'une particule d'eau est le temps que met cette dernière entre le point le plus reculé du bassin versant et l'exutoire. (Rafik, 2016).

$$\text{Formule de Kirpich } t_c = \frac{(L/\sqrt{P})^{0,77}}{52} \quad (\text{V.3})$$

Avec :

- ▲ t_c : temps de concentration en min
- ▲ L : longueur du drain en m
- ▲ P : Pente en m/m (Benoauziz, 2020)

V.3.3 Estimation des coefficients de ruissellement

Les coefficients de ruissellement sont des valeurs estimées, car les bassins versant occupent des terrains hétérogènes. Les coefficients de ruissellement dépendent des caractéristiques du terrain qu'occupe le bassin versant. On peut obtenir un coefficient en superposant le modèle de terrain sur l'image de Google Earth ou avec une carte d'occupation de sol insérée sur civil 3D ou encore importée sur comme zone de couverture sur Infracworks.

Pour un bassin versant ayant plusieurs surfaces différentes, le coefficient de ruissellement équivalent est calculé comme suit :

$$C_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times A_i}{A} \quad (V.4)$$

Où C_i est le coefficient de ruissellement de la surface A_i et A représentant la surface totale du bassin versant (Lycée Adolphe CHERIOUX).

Le tableau V-3 ci-dessous contient quelques coefficients de ruissellement selon la nature et la morphologie du terrain.

Tableau V- 3: Coefficients de ruissellement selon la nature et la morphologie du terrain

Source : (Benoauziz, 2020)

Couverture végétale	Morphologie	Pente (%)	Terrain argileux ou limoneux
Culture	Presque plat	0-5	0,5
	Ondulé	5-10	0,6
	Montagneux	>10	0,72
		>30	0,8

V.4 Résultats de l'étude hydrologique

Une fois les intensités de pluies et coefficients déterminés, on peut mettre leurs valeurs dans Infracworks pour avoir les débits de points de l'eau relaté dans le tableau V-4 ci-après.

Tableau V- 4: résultats de l'étude hydrologique

Numéro du bassin versant	tc(min)	i(t) (mm/h)	Qt(m3/s)
1	89,969	0,6250	1,882
2	83,206	0,6606	2,368
3	127,010	0,4893	0,489
4	122,948	0,5007	0,338
5	39,459	1,1220	0,735
6	77,928	0,6921	0,116
7	97,509	0,5903	0,100

8	18,751	1,9029	0,737
9	41,675	1,0793	0,302
10	0,000	0,000	0,000
11	12,812	2,4938	0,076
12	0,000	0,000	0,000
13	4,385	5,3392	0,091
14	0,000	0,000	0,000
15	38,349	1,1450	0,155

V.4.1 Ouvrages hydrauliques

Il y a plusieurs manières de concevoir les structures de drainage d'eau dans Infracore. Pour générer automatiquement les réseaux de drainage

Sélectionner la route à composante ⇒ clic droit ⇒ drainage ⇒ ajouter les ouvrages hydrauliques. Dans le tableau V-5 ci-dessous, se trouve le nombre des ouvrages hydrauliques par Variantes.

Tableau V- 5: Nombre d'ouvrages hydrauliques par variante

Variantes	Nombre d'ouvrages hydrauliques
V1	14
V2	12
V3	11
V4	6
V5	9

Conclusion

L'étude hydrologique est une étape importante pour l'étude d'avant-projet d'une route.

Les débits calculés sont utilisés comme base de l'étude hydraulique pour dimensionner les ouvrages. Les ouvrages hydrauliques sont pris en compte dans l'estimation du projet.

La partie suivante relate l'analyse multicritère d'aide à la décision.

Chapitre VI : Analyse multicritère d'aide à la décision

VI.1 Introduction

L'analyse multicritère est une méthodologie de travail qui aide à prendre des décisions en analysant des actions potentielle ou variantes sur la base de plusieurs critères/facteurs (Cherif, 2015). L'aide multicritère à la décision est un nouveau monde d'approches, de concepts, de modèles et de méthodes qui a pour but d'aider le gestionnaire ou le décideur à faire la description, l'évaluation, l'arrangement, le choix ou le rejet d'un ensemble d'actions, pouvant être menées sur des alternatives, des projets ou des produits. Cette analyse est basée sur une évaluation par des scores (notes), d'intensité de préférence, de valeurs, et cela se fait en fonction d'un ensemble de critères choisis judicieusement. Les critères peuvent représenter plusieurs aspects tels que : les objectifs, les buts les fonctions d'utilité, les valeurs de préférence, les cibles ou les degrés d'aspiration (Boumedyen, 2017).

Dans cette partie on présentera les notions fondamentales des méthode choisies et les appliquer au projet.

VI.2 Le processus d'analyse hiérarchique (AHP) de Saaty

Processus d'analyse hiérarchique, en anglais, « Analytic Hierarchy Process (AHP) » présenté par Saaty (1980), est un outil puissant, multicritère d'aide à la décision dans des cas complexes. La méthode AHP aide à l'établissement des priorités afin de prendre la meilleure décision. Elle procède à réduire les problèmes complexes à une série de comparaison binaire, ensuite synthétiser les résultats. Cela aide à capturer les aspects objectifs et subjectifs d'une décision. De plus, réduit la partialité dans un processus de prise de décision grâce à l'intégration d'une technique de vérification de la consistance des évaluations du décideur (Cherif, 2015).

VI.2.1 Particularités de la méthode AHP

Les raisons de la popularité de la méthode AHP sont :

- ✦ Unités de mesures : Qualitatives et quantitatives, valeurs relatives ou absolues pour établir de priorités ;
- ✦ Structure hiérarchique : Trie des éléments d'un système dans différents niveaux et dans de groupes à caractéristiques similaires ;

-
- ▲ Interdépendance : Permet de considérer l'interdépendance des éléments d'un système sans insister dans le raisonnement linéaire
 - ▲ Consistance : Permet de garder une consistance logique des jugements utilisés pour déterminer les priorités
 - ▲ Synthèse : Permet d'obtenir une appréciation générale de la désirabilité de chaque alternative
 - ▲ Identification des priorités : Permet de considérer la priorité relative de chaque critère pour ainsi obtenir la meilleure alternative selon les objectifs identifiés
 - ▲ Unicité : Sa flexibilité permet son utilisation dans un éventail varié de problèmes non structurés. (Cherif, 2015)

VI.2.2 Les différentes étapes de la méthode AHP

a- Décomposer le problème en une structure hiérarchique

La première étape consiste à structurer le problème de décision dans une arborescence hiérarchique de problèmes, des critères, des sous-Critères et des alternatifs.

La figure VI-1 ci-dessous présente l'organigramme de décomposition d'un problème en une structure hiérarchique.

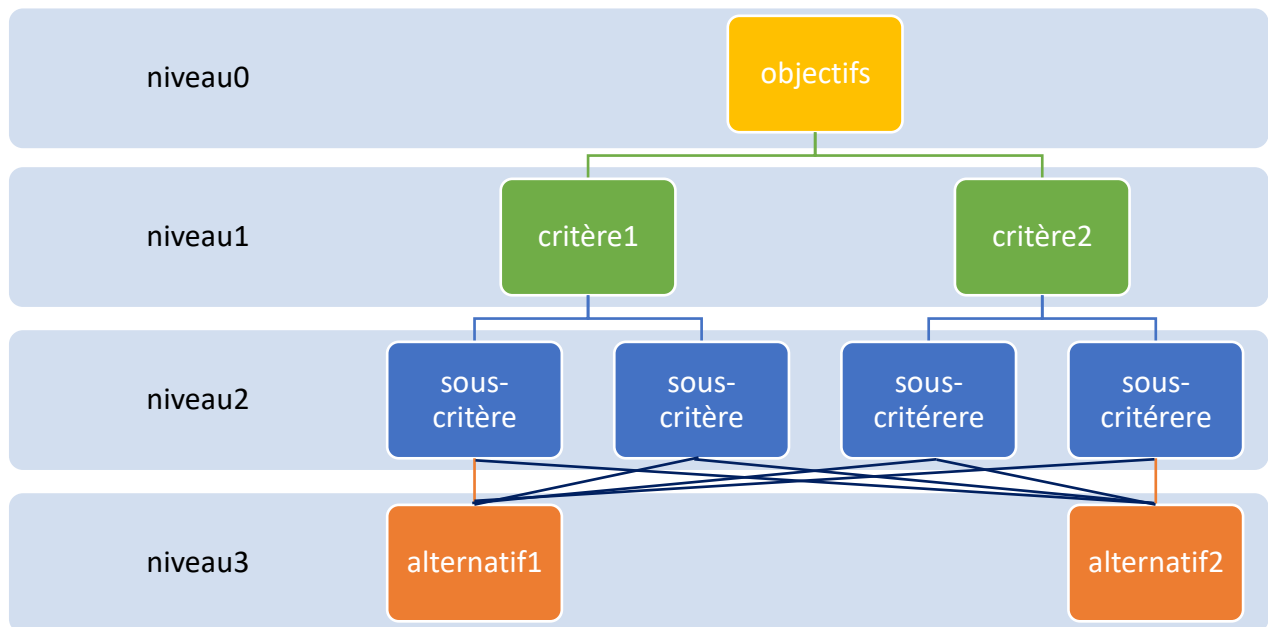


Figure VI- 1: Décomposition d'un problème en structure hiérarchique

b- Effectuer les combinaisons binaires niveau par niveau

C'est la deuxième étape qui consiste à :

- ▲ Comparer l'importance relative de tous les éléments appartenant à un même niveau de la hiérarchie pris deux par deux, par rapport à l'élément du niveau immédiatement supérieur.
- ▲ Configurer une matrice carrée ($k \times k$), formée par les évaluations des rapports, des poids, k étant le nombre d'éléments comparés. On obtient cette façon : $a_{ij} = 1/a_{ji}$ avec $a_{ij} = 1$ et $a_{ji} = 1/a_{ij}$ (valeurs réciproque) (HADJADJ Nour El Houda, et al., 2018).

La comparaison conduit à obtention de la matrice de décisions (figure VI-2 ci-dessous) suivantes :

$$A = [a_{ij}] = \begin{matrix} & 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ & \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ & a_{12} & \dots & \dots & a_{(n-1)n} \\ & \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \frac{1}{a_{(n-1)n}} & 1 \end{matrix} \quad (\text{VI.1})$$

Figure VI- 2: Matrice de décision

Source : (HADJADJ Nour El Houda, et al., 2018)

La matrice de comparaison par paire est créée à l'aide d'une échelle d'importance appelée échelle de Saaty (tableau VI-1 ci-dessous).

Tableau VI- 1: Echelle numérique de comparaison binaire (Saaty, 1980)

Degré d'importance	Définition	Explication
1	Importance égale	Les deux critères contribuent identiquement à l'objectif
3	Faible importance de l'un sur l'autre	L'expérience et le jugement favorisent légèrement un critère sur l'autre
5	Importance essentielle ou forte	L'expérience et le jugement favorisent fortement un critère sur l'autre
7	Importance démontrée	Un critère est fortement favorisé et sa prépondérance est démontrée
9	Importance absolue	Il est évident qu'un critère doit être favorisé au maximum
2 ;4 ;6 ;8	Intermédiaire	Le compromis est nécessaire entre les deux appréciations afin d'affiner le jugement
Inverses de ci-dessus non nul	Si l'activité i a l'un des nombres différents de zéro ci-dessus qui lui est attribué par rapport à l'activité j, alors j prend la valeur réciproque par rapport à i.	

c- Définition des poids des critères pour chaque alternative

Construire une matrice de décision pour chaque élément passe par les étapes suivantes :

1. Calculer la somme par colonne
2. Diviser chaque valeur dans la colonne par la somme des valeurs.

Les poids sont donnés en calculant la moyenne de chacune des lignes et calculer la cohérence du résultat par : $CR = \frac{CI}{RI}$ (VI.2)

RI : Index de cohérence aléatoire dépendant du nombre de critères (tableau VI-2 ci-dessous).

Tableau VI- 2: Index de cohérence aléatoire par rapport au nombre d'éléments comparé

Source : (Zaoui, et al., 2020)

Nombre de Critères comparés	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0,58	0,90	1,11	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

CI : indice de cohérence $CI = \frac{\lambda_{Max}-n}{n-1}$ (VI.3)

Où λ_{Max} est une valeur moyenne calculée à partir de la matrice de jugement et n représente le nombre des éléments comparés. Pour qu'il y ait une bonne consistance, (Saaty, 1980) propose une cohérence du résultat (CR) inférieure à 0,1 soit 10 %. Tout de même le CR dépend du domaine de métier (Zaoui, et al., 2020).

d- Synthétiser les priorités

- ▲ Une fois que les priorités locales pour tous les critères figurant dans la hiérarchie ont été déterminés, AHP calcule un score d'évaluation global attaché à chacune des solutions alternatives identifiées ;
- ▲ On obtient alors un vecteur $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ qui indique l'impact du critère i sur chacune des alternatives (HADJADJ Nour El Houda, et al., 2018).

VI.3 PROMETHEE II

PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation) est une méthode d'analyse multicritère d'aide à la décision élaborée par Jean Pierre Brans en 1982 (Brans J.P, 1982). Elle sert à résoudre un problème complexe ayant divers critères qui peuvent être quantitatifs ou qualitatifs par rapport à des alternatives (Boumedyen, 2017).

Nous utiliserons la méthode PROMETHEE II qui fait un rangement complet (Complete Ranking) pour rendre les variantes comparables entre elles.

VI.3.1 Avantage de l'utilisation de PROMETHEE

La méthode Prométhée est parmi les méthodes les plus utilisées dans la catégorie des méthodes de surclassement. Ceci est dû à un certain nombre d'avantages offerts par ces méthodes.

- ▲ L'introduction de six fonctions de préférence différentes dans un seul et même processus ; il s'agit d'une extension de critère mais de façon bien formalisée.
- ▲ Cette méthode est parvenue à intégrer de façon simple les développements récents dans la modélisation des préférences.
- ▲ Prométhée, quoique dépourvue d'une base mathématique, a essayé de combler ce manque en procédant par la systématisation de la fonction de préférence. En effet, le décideur, ayant à choisir la forme de sa préférence parmi six formes, se sentirait plutôt rassuré
- ▲ La simplicité de Prométhée la place sur une bonne position pour être utilisée si on cherche à ranger des actions potentielles et que le décideur ne trouve pas beaucoup de peine à déterminer les poids des critères. Bien souvent cette méthode est sujette à des modifications ou des extensions (Boumedyen, 2017).

VI.3.2 Les étapes de la méthode

Etape1 : détermination des critères ($j = 1, \dots, k$) et l'ensemble des variantes possibles dans le problème de décision,

Etape2 : détermination poids de W_j de chaque critère, en tel sorte que :

$$\sum_{j=1}^k W_j = 1 \quad (\text{VI.4})$$

Etape3 : normalisation de la matrice de décision :

Pour les critères bénéfiques

$$R_{ij} = \frac{[x_{ij} - \text{Min}(x_{ij})]}{[\text{Max}(x_{ij}) - \text{Min}(x_{ij})]} \quad (\text{VI.5})$$

Pour les critères de coût

$$R_{ij} = \frac{[\text{Max}(x_{ij}) - x_{ij}]}{[\text{Max}(x_{ij}) - \text{Min}(x_{ij})]} \quad (\text{VI.6})$$

x_{ij} : valeur d'évaluation, $i=1, \dots, n$: ordre de variante et $j=1, \dots, m$: nombres de critères.

Etape 4: détermination de l'écart par comparaison par paires.

$$d_j(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \mathbf{g}(\mathbf{a}) - \mathbf{g}(\mathbf{b}) \quad (\text{VI.7})$$

$d_j(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ désigne la différence entre l'évaluation de \mathbf{a} et \mathbf{b} sur chaque critère.

Etape 5: définition de la fonction de préférence.

$$P_j(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = F_j[d_j(\mathbf{a}, \mathbf{b})] \quad (\text{VI.8})$$

$P_j(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ désigne la fonction de la différence entre l'évaluation de la variante \mathbf{a} par rapport à la variante \mathbf{b} sur chaque critère dans un degré allant de 0 à 1

Etape 6: détermination de l'indice de préférence multicritères.

$$\pi(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sum_{j=1}^k P_j(\mathbf{a}, \mathbf{b}) W_j \quad (\text{VI.9})$$

Etape 7: détermination des débits de surclassement positifs et négatifs.

$$\text{Débit de sur-classement positif : } \Phi^+(\mathbf{a}) = \frac{1}{n-1} \sum_{\mathbf{x} \in A} \pi(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \quad (\text{VI.10})$$

$$\text{Débit de sur-classement négatif : } \Phi^-(\mathbf{a}) = \frac{1}{n-1} \sum_{\mathbf{x} \in A} \pi(\mathbf{x}, \mathbf{a}) \quad (\text{VI.11})$$

Etape 8: calcul des valeurs de débit net et classer en conséquence

$$\Phi(\mathbf{a}) = \Phi^+(\mathbf{a}) - \Phi^-(\mathbf{a}) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k \sum_{\mathbf{x} \in A} [P_j(\mathbf{a}, \mathbf{x}) - P_j(\mathbf{x}, \mathbf{a}) W_j] \quad (\text{VI.12})$$

(Boumedyen, 2017)

VI.4 Analyse et choix de la meilleure variante

Dans cette partie les variantes seront analysées et comparées avec les outils d'analyse multicritères d'aide à la décision AHP et PROMETHEE afin de choisir la meilleure d'entre elle qui remplacera l'ancienne route (CW60) devenue vulnérable aux inondations. Les critères de variantes sont déterminés grâce au logiciel Infracore.

VI.4.1 Définition des alternatives

Comme montré sur la figure VI-3 ci-dessous, Cinq (5) variantes (V1 ; V2 ; V3 ; V4 ; V5) sont retenues pour être analysées. En effet l'importance des caractéristiques varie d'une variante à une autre.

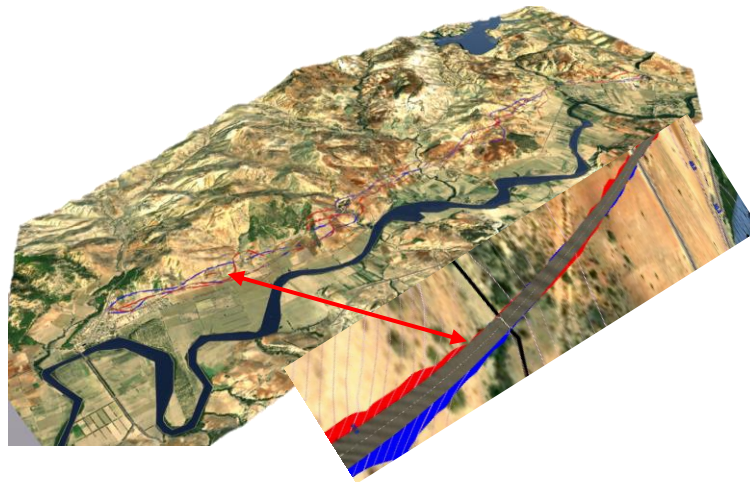


Figure VI- 3: variantes projetées

VI.4.2 Définition des critères

- ▲ Critère 1 (C1) : La longueur de la variante en mètre (m) ;
- ▲ Critère 2 (C2) : Eloignement de la zone inondable (Oued Chélif) en mètre (m). Nous avons pris les distances minimales entre la rivière et les variantes sur Infracore avec la fonctionnalité « mesurer ». Il est préférable de garder une distance importante de la rivière pour la durabilité de la route et éviter d'éventuel inondations sur cette dernière ;
- ▲ Critère 3 (C3) : Nombre d'ouvrages d'art, un facteur important dans un projet routier ;
- ▲ Critère 4 (C4) : coût total du projet en dinars Algériens (DA) : c'est une estimation du projet ;
- ▲ Critère 5 (C5) : net terrassement : c'est la différence entre déblais cumulé et remblai cumulé en mètre cube (m³).

Les critères 1 ;3 ;4 ;5 sont des critères des non bénéfiques ils sont à minimiser alors que 2 est à maximiser ;

Le tableau IV-3 récapitule les valeurs des critères pour cinq variantes extraites à partir d'Infraworks.

Tableau VI- 3: Valeurs des critères pour chaque variante

Critères	C1(m)	C2(m)	C3(u)	C4(MDA)	C5(m3)
V1	12964,04	325,00	8,00	1363,26	161869,75
V2	12305,09	460,00	8,00	1513,84	350578,48
V3	13339,72	314,00	6,00	1435,36	168485,90
V4	13211,31	569,00	9,00	1762,76	362123,02
V5	12857,29	297,00	5,00	1507,12	254295,41
Max	13339,72	569,00	9,00	1762,76	362123,02
Min	12305,09	297,00	5,00	1363,26	161869,75

VI.4.3 Expérimentation numérique

a- Décomposition du problème en une structure hiérarchique

Pour le choix d'une alternative optimale, nous avons décomposé le problème sous la structure hiérarchique suivante :

Ci-dessous la figure IV-4, relate la structure hiérarchique pour le choix de la meilleure variante.

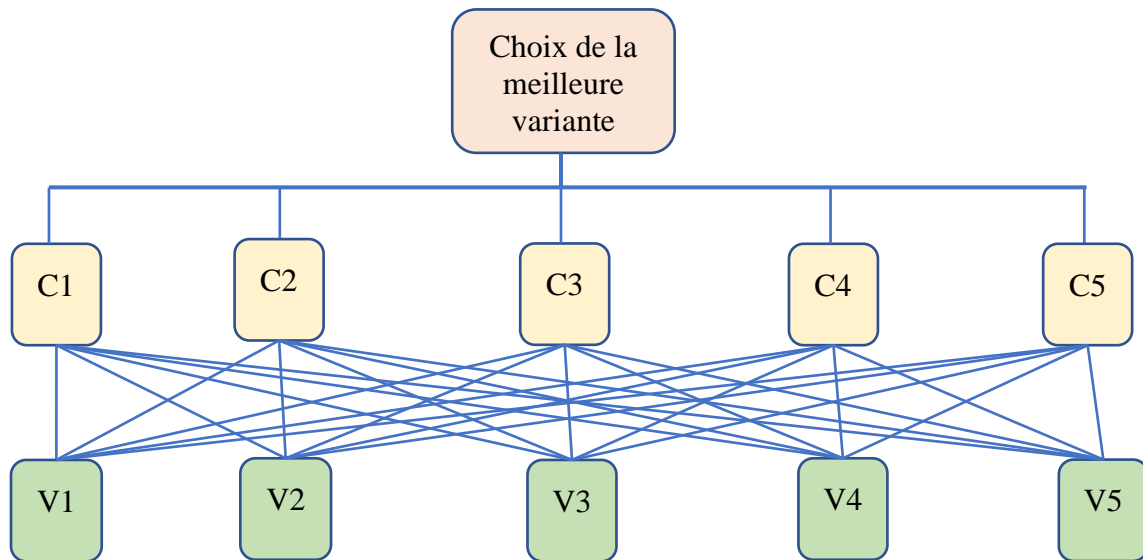


Figure VI- 4: structure hiérarchique pour le choix de la meilleure variante

b- Effectuer les combinaisons binaires niveau par niveau

La matrice de comparaison par paire illustrée dans le tableau VI-4 pour le choix d'une meilleure variante, est obtenue en jugeant l'importance de chaque critère par rapport à sa paire. Les valeurs de jugement de critères ont été obtenues en transformant les évaluations de l'échelle de Saaty.

Tableau VI- 4: Matrice de comparaison par paire

Critères	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	3	1/2	2	1
C2	1/3	1	1/3	1/7	1/4
C3	2	3	1	1/2	2
C4	1/2	7	2	1	2
C5	1	4	1/2	1/2	1
Somme	4,833	18	4,3333	3,842	6,25

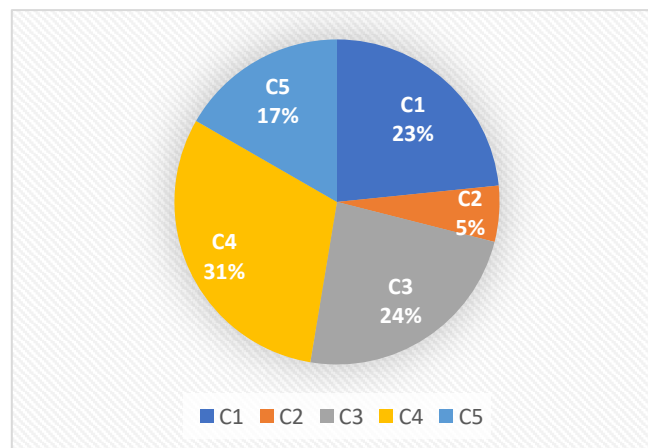
Pour obtenir les poids (tableau VI-5), on a normalisé la matrice : la somme de chaque colonne est calculée et la valeur de chaque case est divisée par la somme de sa colonne.

Et en suite on fait la somme de chaque ligne pour avoir le poids du critère et on la divise par le nombre de critère.

Tableau VI- 5: Détermination de poids des critères

critères	C1	C2	C3	C4	C5	Poids	λ
C1	0,2069	0,16667	0,11538	0,52045	0,16	0,23388	5,5582
C2	0,06897	0,05556	0,07692	0,03717	0,04	0,05572	5,3501
C3	0,41379	0,16667	0,23077	0,05204	0,32	0,23665	5,3529
C4	0,10345	0,38889	0,46154	0,26022	0,32	0,30682	5,2832
C5	0,2069	0,22222	0,11538	0,13011	0,16	0,16692	5,3644
Somme	1	1	1	1	1	1	

La matrice de comparaison par paire est normalisée de tels sorte que la somme des poids des critères est égale à 1 soit 100%. On voit dans le tableau IV-5 que le coût du projet est plus important avec un poids d'environ 31% et le nombre d'ouvrage est le moins important avec un poids d'environ 5%, le digramme des critères est illustré dans le (tableau VI-5) ci-après.



Pour donner une crédibilité à l'évaluation des critères, le calcul de la cohérence de résultat est nécessaire. Cela détecte aussi les défauts de calcul.

Figure VI- 5: Diagramme de poids des critères

Si $CR < 0,1$: le résultat est cohérent, sinon on doit réviser les jugements et reprendre les calculs.

On a $n = 5$ alors $RI=1,11$; $\lambda_{\max}=5,381$

$CI=0,09544$

$CR = 0,08598$ soit 8 % inférieur à 0,1 soit 10% d'où la validité de la cohérence de comparaison.

Par conséquent, nous pouvons utiliser ces poids comme des pondérations du problème.

c- Calcul des priorité globales et la décision

Les poids des critères déterminés par la méthode AHP sont pondérés sur la méthode PROMETHEE pour déterminer les priorités globales.

Tableau VI- 6: Normalisation de la matrice de décision

	C1(m)	C2(m)	C3	C4(MDA)	C5(m3)
V1	0,3631	0,1029	0,2500	1,0000	1,0000
V2	1,0000	0,5993	0,2500	0,6231	0,0576
V3	0,0000	0,0625	0,7500	0,8195	0,9670
V4	0,1241	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
V5	0,4663	0,0000	1,0000	0,6399	0,5385

La normalisation de la matrice de décision dévoilée dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** a permis d'uniformiser les critères des variantes. Cette opération donne la valeur 1 pour le couple variante/critère s'il est meilleur et 0 s'il est le dernier.

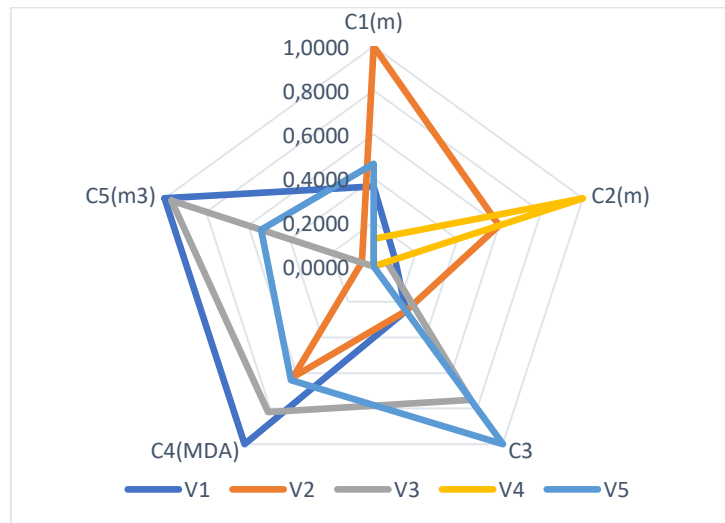


Figure VI- 6: Résultat représenté en forme de radar

La normalisation de la matrice de décision représentée sous forme de radar exprimée figure VI- 6 indique : les variantes convergent vers les critères qu'elles priment (avantageux), au cas contraire elles divergent.

On voit sur la figure que la variante 4 (en jaune) n'est importante que sur l'éloignement de l'oued (C2).

Tableau VI- 7: Classement par ordre de priorité des variantes

	Φ^+	Φ^-	Φ^{net}	Rang
V1	0,3213	0,10931	0,2120	1
V2	0,2659	0,17771	0,0881	4
V3	0,2923	0,15724	0,1351	3
V4	0,0523	0,44079	-0,3885	5
V5	0,3089	0,10747	0,2014	2

Le classement par ordre de priorité des variantes est exprimé dans le tableau VI-7 est le classement complet. La différence entre le flux positif et le flux négatif donne le flux net, le flux net varie de -0,3885 à 0,2120

Avant d'arriver à cette étape, on a passé par Le calcul de :

- ▲ La différence d'évaluation de chaque alternative par rapport aux autres alternatives (annexe 2) ;
- ▲ La fonction de préférence et la préférence globale (annexe 3) ;
- ▲ Débits de surclassement (annexe 4).

d- Résultats et discussions

Le calcul des poids par AHP a relevé que le facteur le plus important est le coût du projet (31%) suivit par le nombre d'ouvrage (24%), la longueur de la route (23%), net terrassement (17%) et enfin l'éloignement de l'oued (5%). Ces résultats sont consistants ($CR = 8\% < 10\%$). En temps normal l'éloignement devrait avoir un poids plus élevé par rapport aux autres critères, mais sachant le problème d'inondation, les variantes ont été tracées les plus loin possible de l'oued et avec l'élimination des terrains de basse altitude. Les autres critères sont priorisés pour la sélection d'une alternative optimale.

Par la méthode PROMETHE II, la variante 1 a été classée meilleure avec un score de 0,212. Dans le tableau de normalisation de matrice de décision, la variante 1 prime sur le coût total du projet (facteur le plus important en termes de poids) par rapport aux autres variantes. Elle est suivie de la variante 5 (meilleure sur le nombre d'ouvrage), variante 3 ;2 et 4.

Les détails de la variante 1 sont présentés dans le rapport (annexe 1).

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'une part de connaître les méthodes multicritères d'aide à la décision (AHP et PROMETHEE) et d'autre part leurs applications qui s'est soldée par le choix d'une variante. Les outils informatiques tels que Visual PROMETHEE et Expert-Choice 2000 facilitent les tâches mais nous avons préféré le calcul manuel.

Grâce au logiciel Infracore nous avons pu tracer des variantes, ensuite sélectionné Cinq critères. Par la combinaison AHP-PROMETHEE, les variantes sont classées par ordre de

priorité en passant par la détermination de poids des critères. Ainsi la variante 1 est classée première et la variante 5 classée deuxième.

Chapitre VII : L'utilité de Civil 3D dans l'étude détaillée de la variante choisie

VII.1 Conception d'AutoCAD Civil 3D

VII.1.1 Présentation d'Autodesk

Situé à San Rafael en Californie aux Etats-Unis, Autodesk est une multinationale américaine qui conçoit des logiciels d'architecture, de l'ingénierie et d'audiovisuel. La société est fondée en 1982 par John Walker (coconcepteur de la première version d'Autocad). Elle développe plusieurs logiciels dans divers secteurs, mais il est célèbre pour son produit Autocad. Son chiffre d'affaires est de 2057 millions USD en 2018 (Wikipédia).

Les produits d'Autodesk ont servi à réaliser plusieurs ouvrages à travers le monde par exemple, l'usine Tesla Electric cars, le One World Trade Center (Freedom Tower).

Autodesk s'est engagé à donner plus d'opportunité à découvrir ses produits en proposant des versions d'évaluation (limitées). Il est aussi très actif dans le domaine de l'éducation dont il autorise les étudiants et enseignants à utiliser ses produits gratuitement pendant une année renouvelable. Et il facilite l'apprentissage des logiciels à travers des plateformes comme Autodesk Community, des panels dans plusieurs régions du monde qui développent du contenu nécessaire, offre des cours en ligne, des certificats de formation.

Infraworks et Civil 3D sont un exemple typique des logiciels développés par Autodesk pour les projets d'infrastructures linéaires (Rakotondraine, 2015).

VII.1.2 Evolution d'AutoCAD Civil 3D

Le prototype de Civil 3D est créé en 2005 (version d'essai). C'était une alternative d'AutoCAD Land Desktop utilisé pour le terrassement en voirie et réseaux divers.

C'est en 2006 que sa première version a été mise sur le marché et devint le tout premier logiciel BIM d'infrastructures linéaires. Civil 3D est alors utilisé par les ingénieurs, urbanistes, dessinateurs, géomètres pour réaliser divers travaux.

Autodesk prend en compte les recommandations et aussi les avis des utilisateurs, c'est pourquoi chaque année depuis sa date de création, il y a la parution d'une nouvelle version améliorée de

Civil 3D. la version sort toujours en avance de quelques mois avant l'année. Par exemple Civil 3D 2022 est mis sur le marché en mi-2021. De 2005 à 2021 il y a eu environ vingt-trois versions (Rakotondraïne, 2015).

VII.2 Fonctionnalités

Civil 3D offre une meilleure façon et un processus intégré pour créer un modèle numérique coordonné et cohérent afin de concevoir, analyser, visualiser, documenter et construire les projets de génie civil.

L'organigramme (annexe 5) représente la structure globale d'AutoCAD Civil 3D.

VII.2.1 Topographie

Pour concevoir une route sur Civil 3D, il faut impérativement de données topographiques avant de commencer. Civil 3D à une fonctionnalité topographique entièrement intégrée. Dans les versions récentes du logiciel, il y a plusieurs manières d'importer les données topographiques : on peut importer une surface depuis Infracore, générer un MNT en entrant les coordonnées (X, Y, Z), à partir de station Total, GPS, Google Earth, Recap pro, LIDAR, etc...

Donc on peut disposer d'un environnement de travail plus cohérent pour diverses tâches. Les données topographiques peuvent être ajustée aux moindres carrés, modifiées leurs observations. On peut créer des figures et des surfaces de topographie, créer des sommets de topographie de manière interactive, etc... (Autodesk, 2013).

La figure VII-1 ci-dessous est une surface topographique sous forme de contours et triangles :

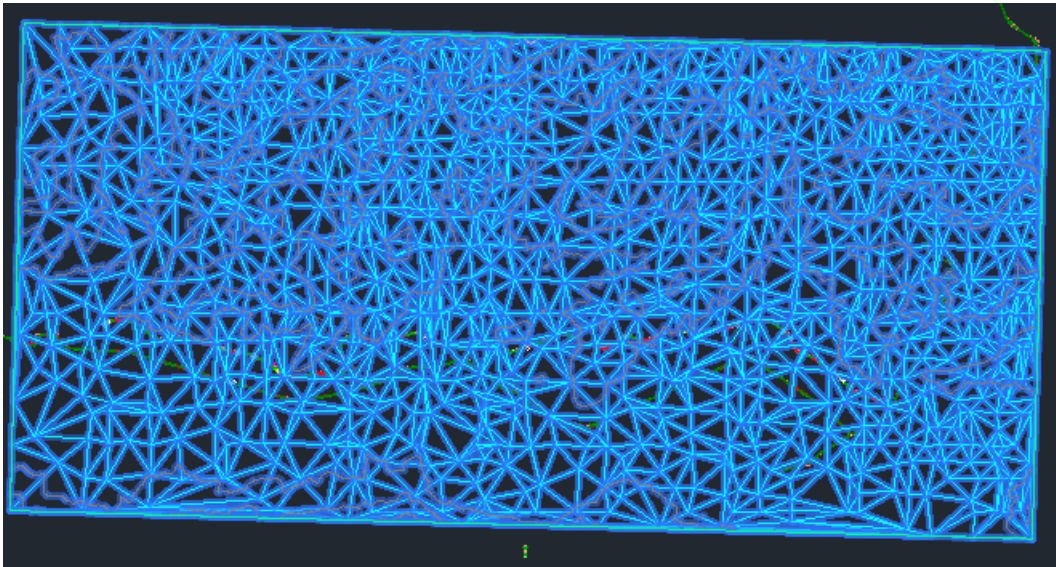


Figure VII- 1: Surface Topographique

VII.2.2 Analyse géospatiale et cartographie

La fonction SIG de Civil 3D lui donne la capacité de faire des analyses géospatiales et la création des cartes pour appuyer le flux de travail. Elle rend possible l'analyse des relations spatiales entre les différents objets d'un dessin. On peut créer ou extraire des nouvelles informations en superposant des topologies, créer des zones tampons pour placer localiser des entités. Les informations géographiques accessibles au public peuvent être utilisées pour sélectionner des sites propices et mieux comprendre les contraintes de conception. On peut générer des cartographies robustes pouvant répondre aux exigences de la conception durable. On peut échanger des données avec des logiciels SIG et bases de données (ArcGIS, MapInfo, Oracle, SQL, etc...) (Autodesk, 2013).

VII.2.3 Tracés géométriques

a- Tracé en plan

Pour le tracé, il faut créer une ligne d'axe mais dans notre cas cette étape n'est pas nécessaire car l'axe est déjà créé dans Infraworks.

La figure VII-2 ci-dessous illustre le modèle importé depuis Infraworks, la surface du MNT est représentée sous forme de points

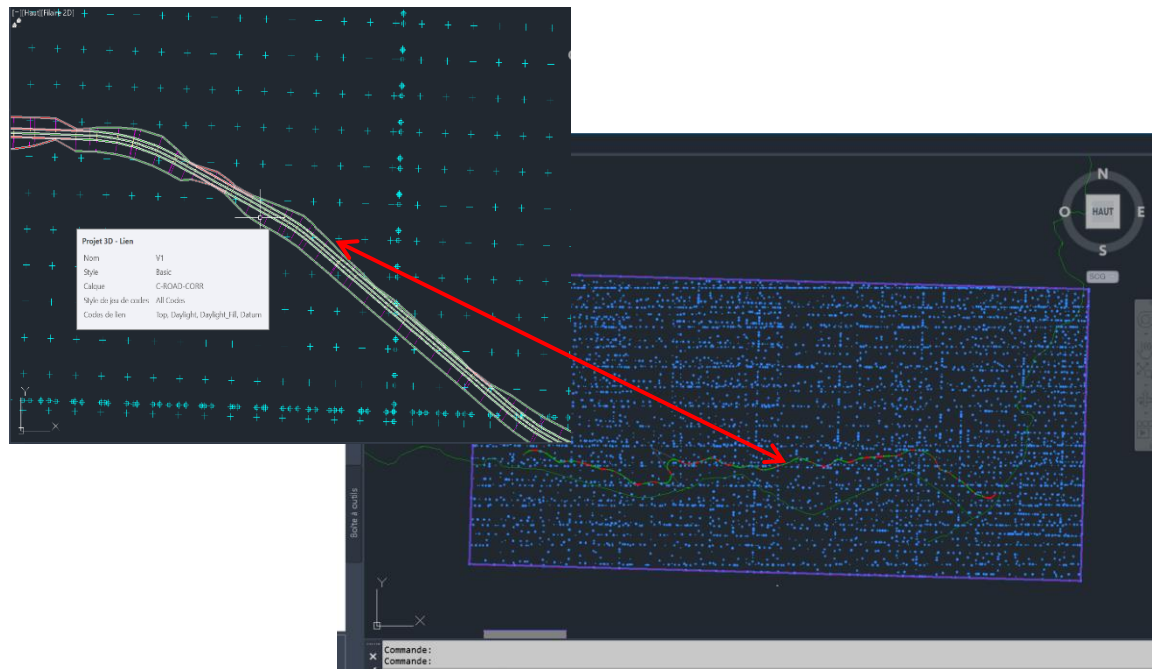


Figure VII- 2: tracé en plan importé depuis Infraworks

Comme nous avons évoqué les règles du tracé en plan dans le chapitre d'application d'Infraworks avant de procéder au tracé, le tracé en plan doit respecter plusieurs règles

Le tracé par optimisation est fait avec une vitesse de 60 Km/h (normes AASHTO 2011), Civil 3D utilise les mêmes normes et la topographie n'a pas changé donc il n'est pas nécessaire de corriger l'axe de la route si on veut travailler avec les mêmes normes.

Tracé en plan selon les normes B40

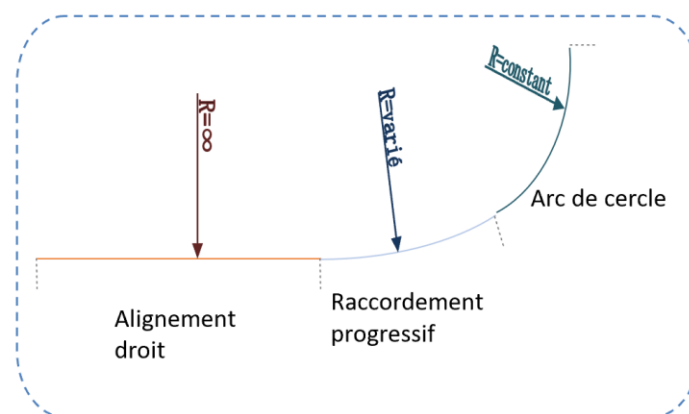


Figure VII- 3: les éléments du tracé en plan

Les B40 préconise les alignements droits et les arcs de cercles doivent être raccorder par des clothoïdes (raccordements progressifs) pour éviter un changement brusque (figure VIII-3 ci-dessus).

Nous avons appliqué les normes B40 pour une route de catégorie 4 ; environnement E3 ($V_r = 60$ Km/h).

Son rayon minimal absolu régit par la formule : $RH_{min} = \frac{v_r^2}{127(ft+dmax)}$ (VII.1) est **115 m** où $ft = 0,18$ (coefficient de frottement transversal), $V_r = 60$ Km/h (vitesse de référence), $dmax = 8\%$ (devers maximal en courbe).

On crée les normes avec la fonction l'éditeur de normes de conception « Designe Criteria Editor » (figure VII-4 ci-dessous).

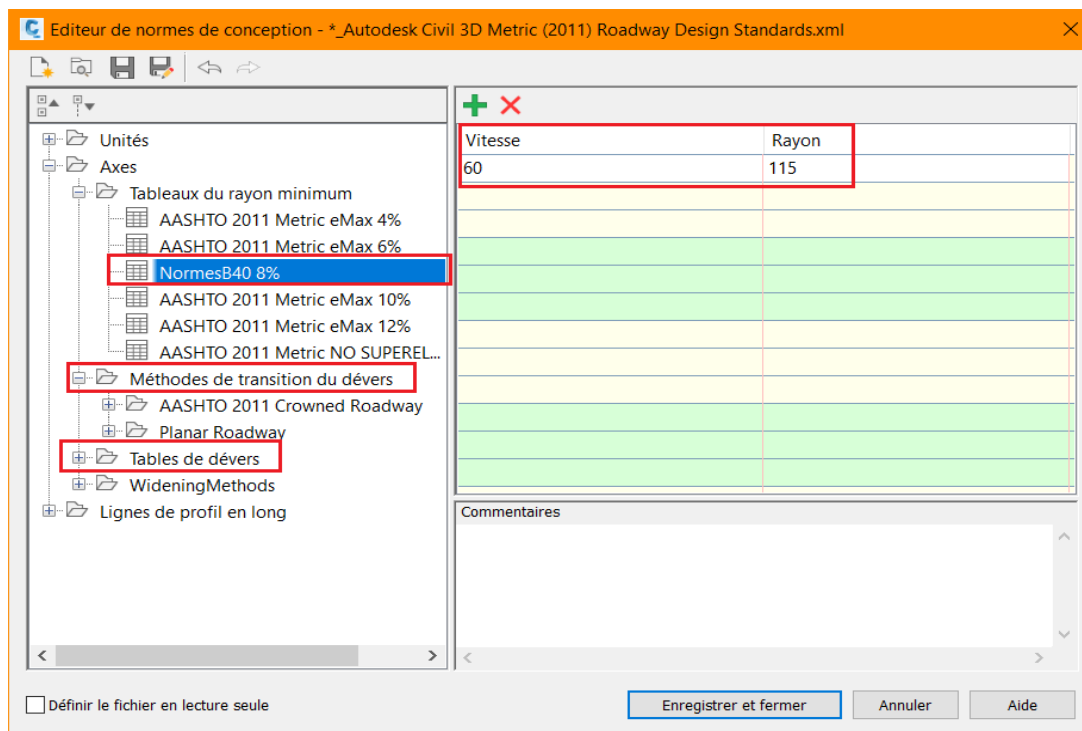


Figure VII- 4: Editeur de normes de conception

En définissant la méthode de transition de devers, plus le rayon s'agrandit, moins le devers diminue jusqu'à atteindre le rayon minimal non déversés ($RHnd = 650$ m) où la route conserve un profil en toit. Le devers minimum est le même pour les deux voies de circulation mais de sens contraire $dmin = (3\% ; -3\%)$ jusqu'à dans les alignements. $RHnd = \frac{v_r^2}{127(f' - dmin)}$ (VII.2)

Pour appliquer les normes, on sélectionne l'axe de la route/propriété de l'axe/normes de conception ; on importe les normes créées et on applique sans oublier de définir la vitesse de conception (figure VII-5 ci-dessous).

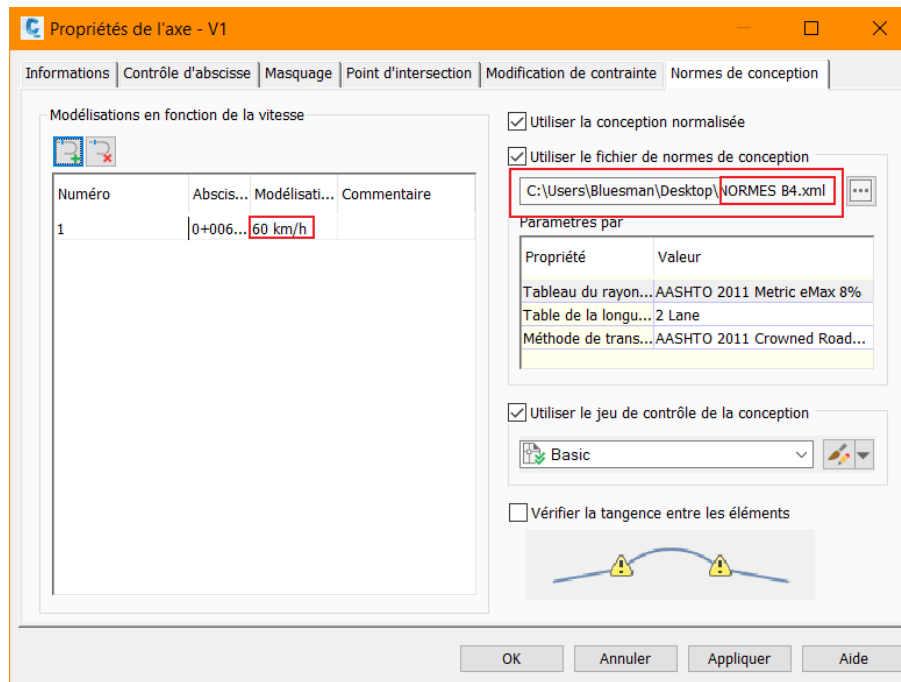


Figure VII- 5: application des normes de conception

Une fois appliqué, le logiciel avertit directement si les alignements droits et les courbes ne respectant pas les normes de conception (figure VII-6 ci-dessous).



Figure VII- 6: Avertissement de non-respect des normes

Pour voir tous les avertissements en même temps et corriger, on sélectionne l'axe/éditeur de géométrie/vue de la grille de l'axe (figure VII-7 ci-dessous).

Il suffit de changer dans tous les avertissements par des valeurs de rayon souhaitées en cliquant sur les rayons.

The screenshot displays the Civil 3D software interface. On the left, a table lists the axis data with columns for N° (number), Type (Type), Modélisation en fonction de (Modeling as a function of), Verrouiller L... (Lock L...), Rayon minimum (Minimum radius), Rayon (Radius), and Degré de courbure (Degree of curvature). The table shows a list of axis segments, with the second row (N° 2) highlighted in red, indicating a warning for a radius of 100.000m. The right side of the interface shows the 'Outils de création de l'axe - V1' (Axis creation tools - V1) panel, which includes various tools for creating and editing the axis geometry. The 3D view at the bottom right shows the road geometry with various warning icons overlaid on the curves.

N°	Type	Modélisation en fonction de	Verrouiller L...	Rayon minimum	Rayon	Degré de courbure
1	Ligne	60 km/h	🔒			
2	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	100.000m	1
3	Ligne	60 km/h	🔒			
4	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	199.945m	
5	Ligne	60 km/h	🔒			
6	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	153.574m	
7	Ligne	60 km/h	🔒			
8	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	243.039m	
9	Ligne	60 km/h	🔒			
10	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	244.865m	
11	Ligne	60 km/h	🔒			
12	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	198.728m	
13	Ligne	60 km/h	🔒			
14	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	201.707m	
15	Ligne	60 km/h	🔒			
16	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	353.086m	
17	Ligne	60 km/h	🔒			
18	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	234.935m	
19	Ligne	60 km/h	🔒			
20	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	197.089m	
21	Ligne	60 km/h	🔒			
22	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	311.749m	
23	Ligne	60 km/h	🔒			
24	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	284.488m	
25	Ligne	60 km/h	🔒			
26	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	177.953m	
27	Ligne	60 km/h	🔒			
28	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	164.177m	
29	Ligne	60 km/h	🔒			
30	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	162.474m	
31	Ligne	60 km/h	🔒			
32	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	165.954m	
33	Ligne	60 km/h	🔒			
34	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	275.635m	
35	Ligne	60 km/h	🔒			
36	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	153.331m	
37	Ligne	60 km/h	🔒			
38	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	456.025m	
39	Ligne	60 km/h	🔒			
40	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	130.000m	
41	Ligne	60 km/h	🔒			
42	Courbe	60 km/h	🔒	115.000m	312.022m	
43	Ligne	60 km/h	🔒			

Figure VII- 7: correction des rayons en plan

Il y a la possibilité d'analyser la vue à intervalles réguliers tout au long du projet. Cela fait le calcul de la distance de visibilité de la route (figure VII-8) pour vérifier que le projet respecte le minimum requis de distances de viabilité des normes utilisée (Autodesk)

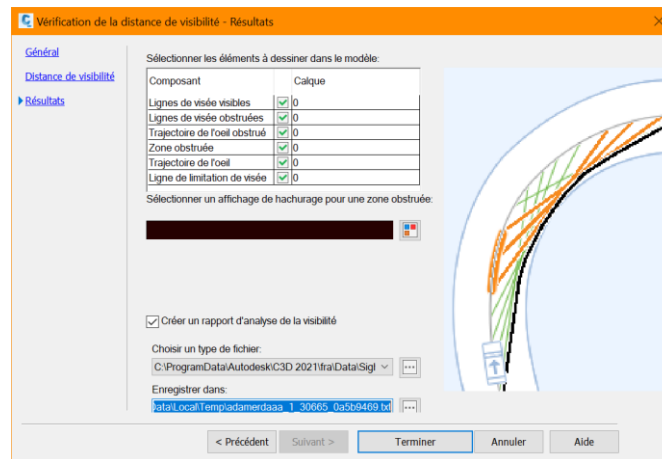


Figure VII- 8: Distance de visibilité

A cela s'ajoute la visualisation du projet 3D qui permet l'affichage du projet 3D dans un modèle le long de la route. Lorsque la commande est lancée, le logiciel demande de sélectionner la trajectoire sur laquelle une simulation de véhicule qui se déplace en mode 3D se fait. On peut varier les paramètres telles que la vitesse, la hauteur d'œil, la hauteur cible. La visualisation 3D est illustrée dans la figure VII-9. Cela permet de vérifier la visibilité, visualise en contexte, voir le talus, etc.. (Autodesk)

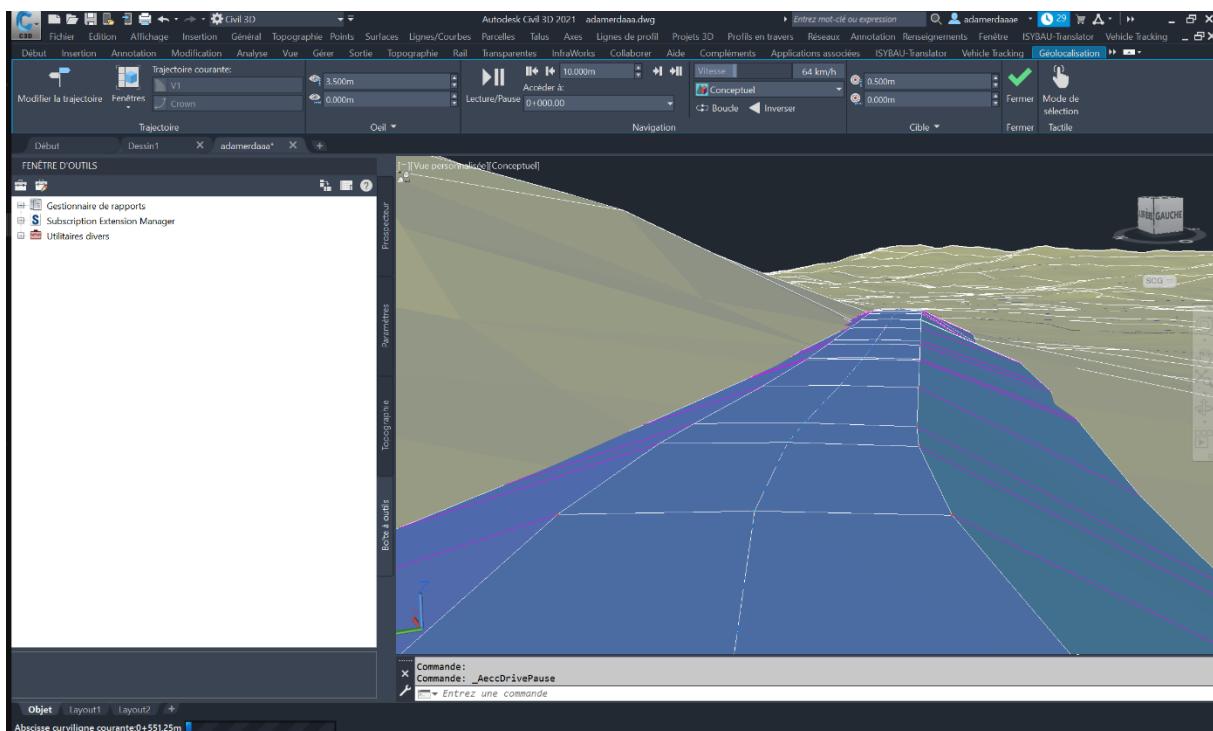


Figure VII- 9: Visualisation 3D

b- Profil en long

Il y a le profil en long du terrain naturel qui représente la topographie du terrain et le dessin du profil en long qui représente la coupe verticale de l'axe de la route.

Le profil en long de la route doit respecter les normes de sécurité de confort. Les lignes droites en rampes et pentes sont raccordées par des courbes paraboliques ou circulaires.

D'après les normes B40, pour une route de catégorie avec une vitesse de 60 Km/h doit avoir un rayon minimal en angle rentrant de 1100 m et 1300 m en angle saillant, cependant pour assurer les distances de sécurité minimales (d'arrêt et de visibilité), il est préférable de majorer les rayons (5000 m).

Pour assurer l'écoulement des eaux pluviales, il faut une pente minimum de 0,5% pour les lignes droites, La déclivité maximale est de 8%.

Pour créer, il suffit d'aller sur début \Rightarrow ligne profil en long \Rightarrow choisir l'axe \Rightarrow créer un dessin de profil en long (Rakotondraïne, 2015).

La figure VII-10 suivante est un profil en long du PK0+000 m au PK2+000 m créée à partir de l'axe de la route.

Les surfaces en rouge représentent le déblai et celles en vert le remblai.

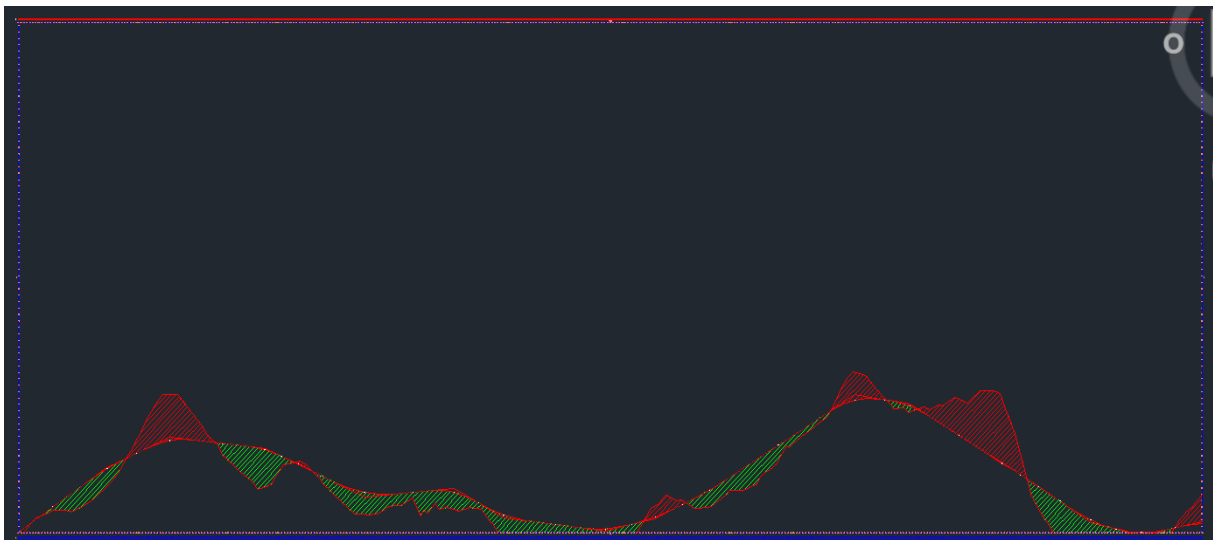


Figure VII- 10: Profil en long

Le profil en long peut être corrigé soit graphiquement en sélectionnant la ligne du projet ensuite tirer les points d'encrage (triangle en bleu). Soit numériquement en entrant les valeurs de déclivité avec l'éditeur de géométrie (Rakotondraïne, 2015).

La figure VII-11 ci-dessous représente la modification de la géométrie (profil en long) graphiquement.

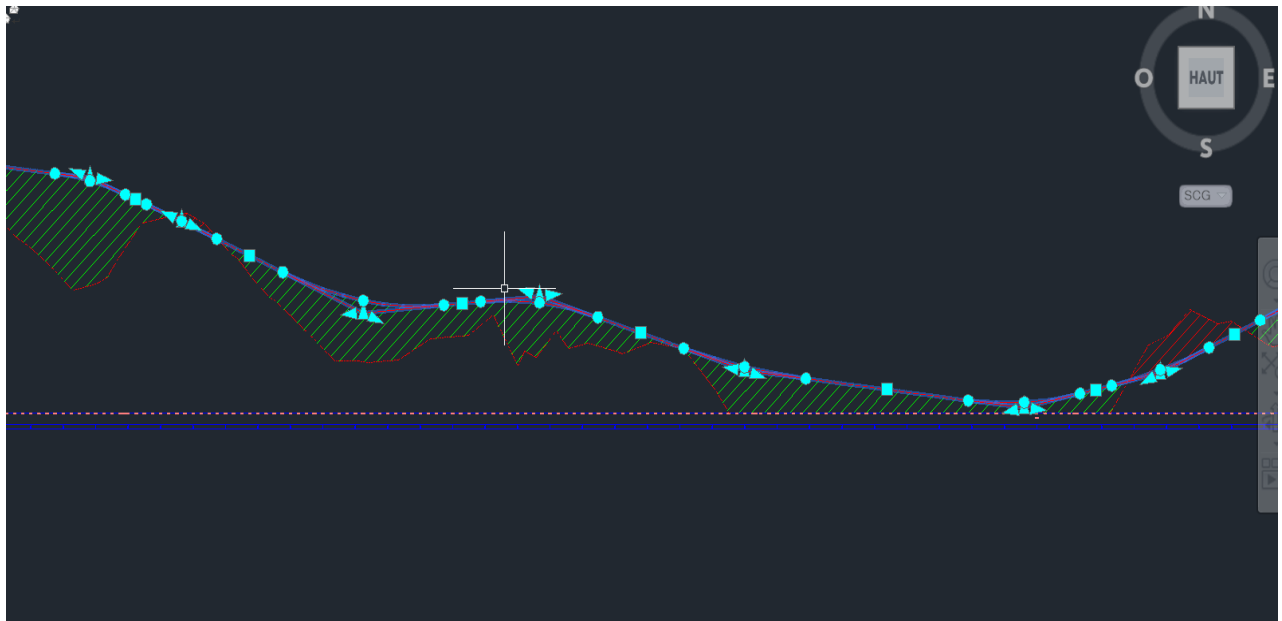


Figure VII- 11: Modification du profil en long

c- Profil en travers

Les profils en travers représentent les coupes verticales perpendiculaires à l'axe de la route. Ils sont indispensables à toute étude de tracé routier, c'est à partir de profils en travers que l'assiette, l'emprise et les terrains à acquérir sont déterminés. Les cubatures sont calculées à partir des profils en travers. (Benoauziz, 2020)

Profil en travers type

Le projet d'une route a plusieurs profils en travers, pour spécifier leurs dimensions, il y a lieu d'établir des profil unique « profil en travers type ».

Un profil en travers type lui aussi désigne une coupe transversale d'une chaussée. Il indique les composantes de la routes (les voies de circulation les bordures, les accotements, les trottoirs,). (Benoauziz, 2020)

Civil 3D inclut de catalogues de conception de profilé pour customiser la structure de base des projets 3D.

Le sous-assemblage est nécessaire pour créer le profil type d'une route, cela permettra aussi de calculer les matériaux. Il est possible d'ajouter de profil type comme les voies de circulation, les accotements, les bordures, des pentes de talus à un axe pour créer le profil type et former le profil en travers d'un projet 3D (Autodesk).

Le catalogue se trouve dans le menu palette d'outils.

Par exemple dans le sous-assemblage voies/devers/extérieur (figure ci-dessous), on peut dimensionner des sous-couches (couche de forme, couche de base, couche de revêtement, couche de roulement).

Le dimensionnement se fait en cliquant sur le sous-assemblage. Les éléments de profil type sont illustrés dans la figure VII-12 ci-après.

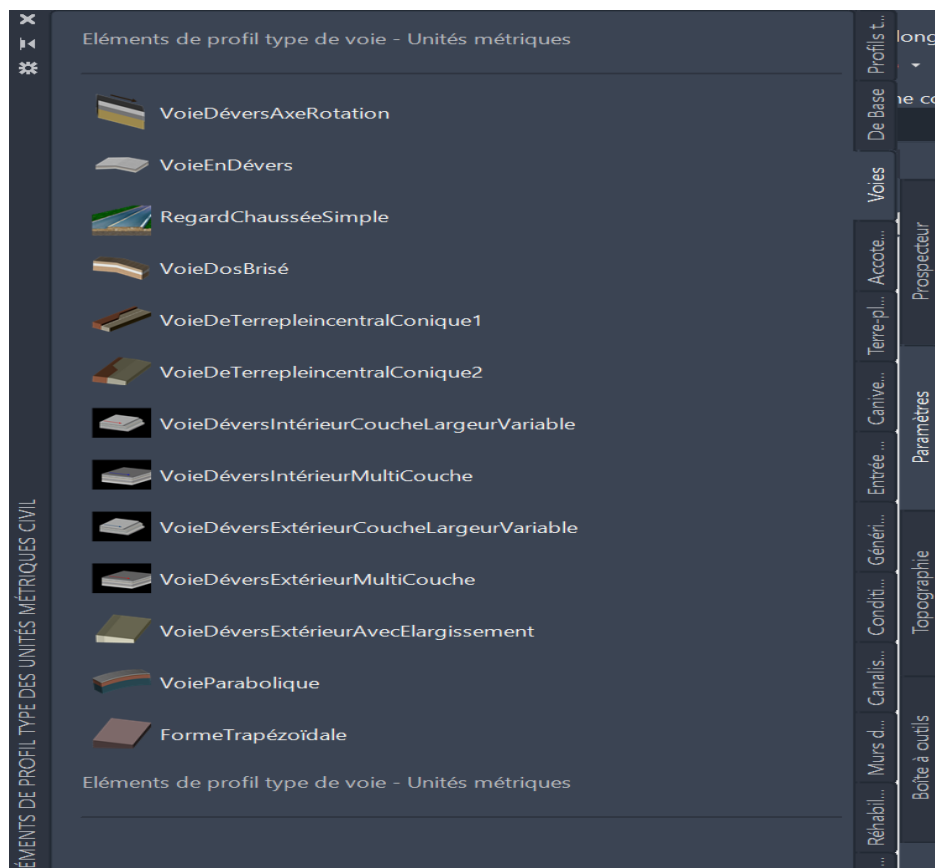


Figure VII- 12: Eléments de profil type

VII.2.4 Étude hydrologique et hydraulique

a- Calcul des débits

Civil 3D inclut des modules permettant le dimensionnement des bassins versants, le calcul de débits de bassins versant par différentes méthodes. Pour cela, il faut disposer des données pluviométriques (Autodesk).

b- Dimensionnement de fossés et buses

Civil 3D permet également la vérification des débits passant par les fossés et les buses ou dalot. Il permet de calculer les pertes de charges et affiche la ligne piézométrique sur le profil en long (Rakotondraïne, 2015). La figure VII 13 expose la manière de dimensionner l'ouverture d'un ouvrage hydraulique

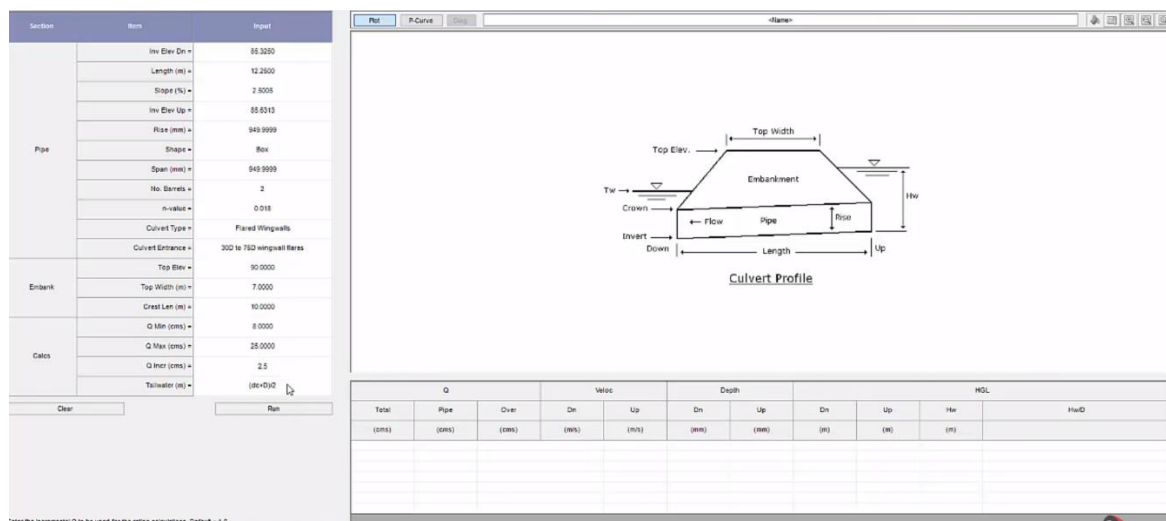


Figure VII- 13: Dimensionnement de l'ouverture d'un ouvrage hydraulique

VII.2.5 Calcul des terrassements

Civil 3D permet de calculer plus rapidement les volumes de terre entre les surfaces existantes et proposer à l'aide de la méthode volume ou moyenne de surfaces. Il génère des diagrammes de transport de masse qui permettront d'analyser l'équilibre de la distance les remblais et les déblais, la quantité des matériaux à déplacer, vers quelle direction les déplacer et l'identification de site de d'emprunts et des décharges (Autodesk, 2013).

VII.2.6 Métrés et rapports

Le métré est réalisé à partir des plans de la route (enrobés, bordure, les objets accessoires), du terrassement. Les rapports sont flexibles et extensibles, en temps réel. Vu qu'ils sont tirés du modèle, ils sont à jour automatiquement avec les modifications apportées à la route. Donc on peut avoir à tout moment des rapports sur la route et les exporter vers Excel pour dénombrer les objets, voir les quantités, vérifier la géométrie, etc... (Autodesk, 2013).

VII.2.7 Modules

Les modules d'extension (plug-ins) sont des fonctions complémentaires qui se greffent sur Civil 3D pour le rendre plus dynamique. Ils ne sont pas des fonctionnalités propres de Civil 3D, mais plutôt des logiciels à part entière ou des extensions. Certains modules servent à échanger des données avec d'autres logiciels, d'autres sont conçus spécifiquement pour certaines zones géographiques (Civil Made in France). La figure VII-14 montre les modules de civil 3D.

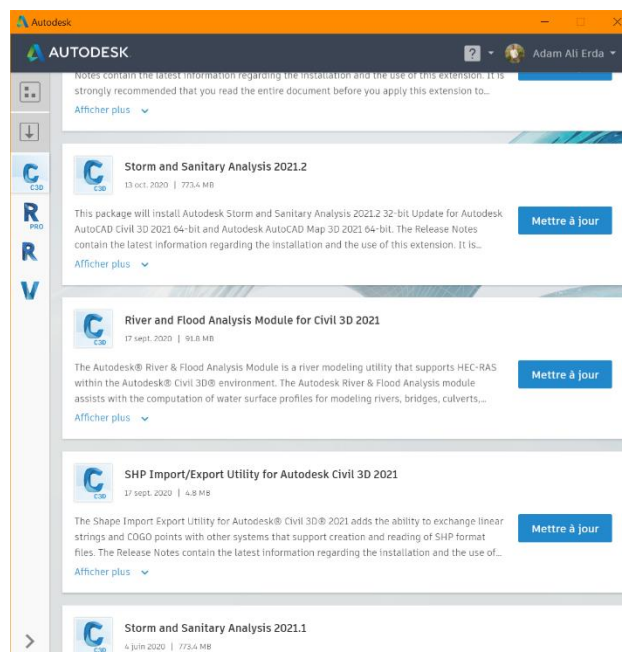


Figure VII- 14: Modules Civil 3D

a- Module géotechnique

Le module permet d'interpréter des données géotechniques pour la modélisation des sondages et des limites de couches géologiques (Civil Made in France).

Dans la figure VII-15 ci-dessous, montre les tubes représentant les points de sondages et les couches géologiques du terrain sont représentées en couleurs différentes suivant leur nature (Rakotondraïne, 2015).

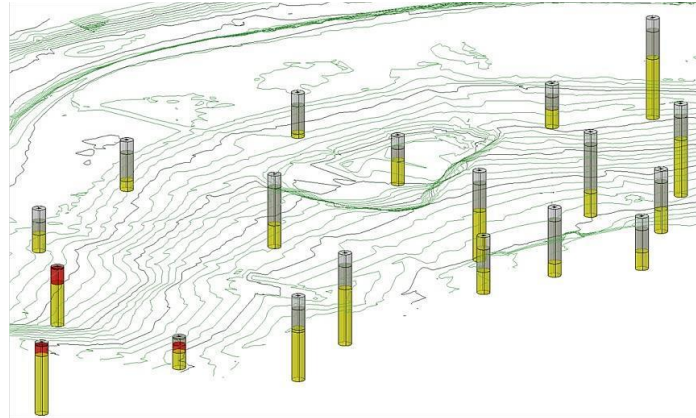


Figure VII- 15: Points de sondages géotechniques

Source : (Rakotondraïne, 2015)

b- Module d'analyse de rivières et d'inondations

Permet de Simuler les écoulements de surface sur HEC-RAS «*Hydrologic Engineering Centers River Analysis System* (Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique) » et prévoit le inondation (Civil Made in France).

c- Module Pont

Le module Pont de Civil 3D permet de créer plusieurs modèles de pont en cohérence avec la géométrie du terrain naturel et l'axe de la route. Il contient des ponts béton armé, pont mixte, en béton précontraint, pont dalle, pont à poutre en caisson (Rakotondraïne, 2015). La figure VII-16 dévoile la manière de concevoir un pont.

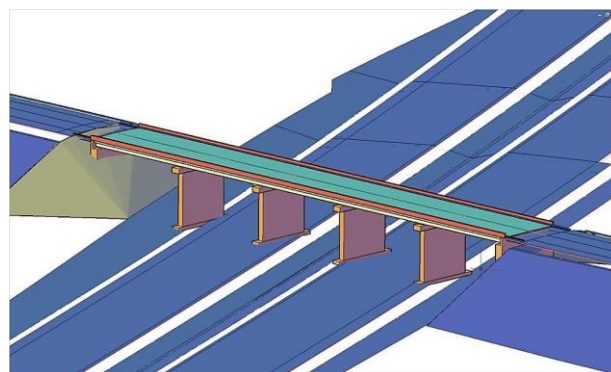


Figure VII- 16: Conception d'un pont

Source : (Rakotondraïne, 2015).

d- Module rail

Comme illustrer dans la figure VII-17, le module permet de créer des voies ferrées, facilite la disposition des aiguillages, des branchements ou les appareils de la voie en utilisant des catalogues (Rakotondraïne, 2015).

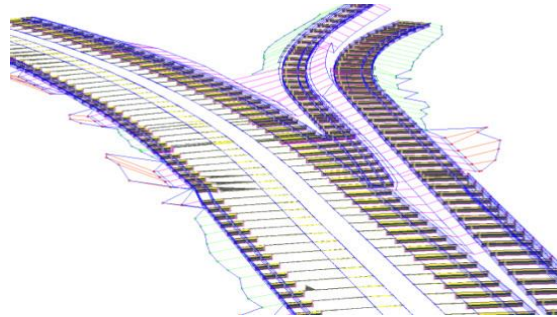


Figure VII- 17: Chemin de fer

Source : (Autodesk)

VII.3 Flux de travail Infracworks-civil 3D

La figure VII-18 ci-dessous illustre le processus d'échange de données (workflow) entre Infracworks et Civil 3D. La variante créée choisie en phase APS dans Infracworks est importée en format SQLITE dans Civil 3D pour améliorer sa géométrie, dimensionner les ouvrages et générer des rapports.

Pour rappel Infracworks est non seulement nécessaire dans la phase APS, mais elle inclut des fonctionnalités utiles pour la phase détaillée. Etant donné qu'il a une vue plus réaliste de l'environnement, le modèle sera retransféré vers Infracworks en format DWG/IMX/LandXML une fois la route est optimisée pour réaliser les tâches suivantes :

- ▲ Analyse la distance de visibilité ;
- ▲ Simulation et animation de mobilité ;
- ▲ Simulation de trafic et animation ;
- ▲ Simulation des inondations.

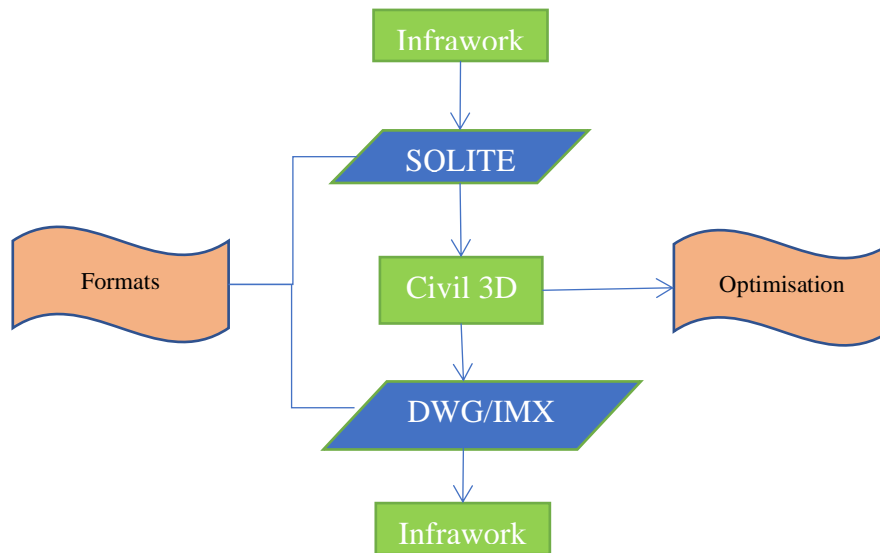


Figure VII- 18: workflow Infraworks-Civil 3D

VII.3.1 Importation du modèle dans Civil 3D

Il y a plusieurs manières pour importer des données dans Civil 3D depuis Infraworks. Mais en suivant l'itération de la figure VII-9 ci-dessus, on procède comme suit :

Voir le nom du modèle d'Infraworks à exporter et localiser son emplacement dans l'ordinateur
 ⇒ vérifier le système de coordonnées ⇒ fermer Infraworks ⇒ ouvrir Civil 3D ⇒ aller dans la rubrique Infraworks ⇒ ouvrir modèle.

Une boîte de commande s'ouvre où il faut choisir le modèle, définir le système de coordonnées. On a la possibilité de définir délimiter la zone et les objets à importer.

La figure VII-9 ci-dessous représente la rubrique Infraworks dans Civil 3D.

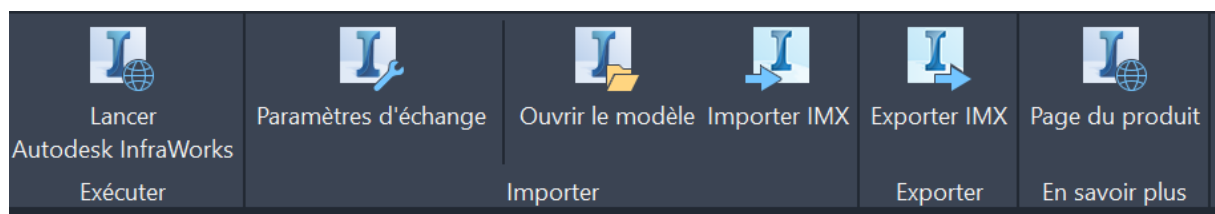


Figure VII- 19:rubrique Infraworks dans Civil 3D

VII.3.2 Avantages d'associer les deux logiciels

Infraworks 360 et Civil 3D forment un duo dynamique, une association très puissante pour concevoir des projets routiers respectant les normes. Les deux logiciels travaillent dans un flux efficace sans perte de données.

Les avantages majeurs de ce duo sont :

- ▲ Conception en contexte ;
- ▲ Workflows avancés ;
- ▲ Économies de temps ;
- ▲ Résultats du projet améliorés ;
- ▲ Amélioration des communications (Autodesk, 2017).

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de se familiariser avec l'outil Autocad Civil 3D et son importance pour détailler un projet routier. Grâce à ces fonctionnalités, Civil 3D est un outil dynamique qui s'intègre dans presque toutes les tâches de conception d'une route.

L'un des avantages pour le concepteur d'associer Infraworks et Civil 3D est le gain de temps, car la route importée Infraworks permet d'éviter de faire plusieurs tâches dans civil 3D.

Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'études est beaucoup plus un travail de recherche qui nous a permis de connaître les avantages du BIM pour les projets d'infrastructures routières et découvrir les principaux outils, on s'est focalisé plus précisément sur les fonctionnalités d'Infraworks et de Civil 3D.

Puisque la documentation de la conception et de la construction sont liées dynamiquement, le temps requis pour évaluer davantage d'alternatives, exécuter des modifications de la conception et produire une documentation de construction est considérablement réduit. Alors le BIM a pour avantages immédiats la meilleure conception et l'efficacité des projets routiers et autoroutiers. Cela permet aussi le respect de délais de livraison. Outre l'efficacité et la productivité, le BIM facilite l'optimisation des infrastructures routières en incluant l'analyse, la simulation et la visualisation lors du processus de conception.

Nous avons modélisé cinq variantes dans un contexte réel, par la suite nous avons choisi cinq critères et enfin procédé par la méthode AHP et la méthode PROMETHEE qui ont conduit à choix de la variante 1. Cette variante est envoyée avec la même topographie vers Civil 3D pour être détaillée.

La modélisation par optimisation et la création d'un modèle réaliste par le Model Builder dans Infraworks et l'analyse multicritères d'aide à la décision ont montré l'intérêt d'opter pour processus BIM dans l'étude d'un tracé routier.

Il est important de comprendre que le logiciel Infraworks n'est ni un outil de conception avancée pour les projets routiers, ni un outil SIG, mais il a un atout d'être hybride. Le logiciel Trimble quantm utilisé dans l'étude des tracés routiers est laborieux, néanmoins pour réaliser des études plus approfondies sur une route, Infraworks reste la meilleure option. Parce qu'il est

interopérable avec Civil 3D et peut être utilisé après la phase détaillée pour la présentation du projet aux différents acteurs concernés.

La phase avant-projet détaillée reste énormément des choses à faire. A cet effet, les données topographiques réelles sont capitales pour corriger la géométrie de la route dimensionner les ouvrages et faire la simulation des inondations pour voir si cette variante choisie risquerait d'être inondée.

Références Bibliographiques

acroma Le blog francophone consacré aux technologies ESRI. convergence BIM-SIG [En ligne]. - 2019. – (consulté le 28 Mai 2021). - <https://www.arcorama.fr/2019/04/a-propos-de-convergence-bim-sig.html>.

Autodesk Autocad Civil 3D brochure [En ligne] // <https://pdf.archiexpo.com/pdf/autodesk/autocad-civil-3d-2013-brochure/1773-136715.html>. - 2013. - (consulté le 12 Juin 2021).

Autodesk Autodesk [En ligne]. (consulté le 13 Juin 2021). - www.autodesk.com.

Autodesk Autodesk Customer Success Story : Designing out, cost Huitt-Zollars uses AutoCAD Civil 3D to help significantly reduce the cost of a road project in Southern California [Rapport]. - 2014.

Autodesk autodesk [En ligne] // [autodesk](https://help.autodesk.com/view/INFMDR/FRA/?guid=GUID-3187F97E-6654-4D04-B919-8CC7B450D120). – (consulté le 30 mars 2021). <https://help.autodesk.com/view/INFMDR/FRA/?guid=GUID-3187F97E-6654-4D04-B919-8CC7B450D120>.

Autodesk Cinq bonnes raisons d’associer les produits Autodesk AutoCAD Civil 3D et InfraWorks 360 pour une Conception améliorée [En ligne]. - 2017. – (consulté le 13 Juin 2021). <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/emea/docs/acad-civil-infraworks-360.pdf>.

Benoauziz Fatima Ezzahra Le développement du flux de travail BIM pour les projets d’infrastructure, cas d’étude d’un échangeur sur l’autoroute en service N 5 Rabat-Port Tanger Med [Rapport]. - 2020.

BIM & BTP Qu’est ce que le format IFC ? [En ligne]. - 2021. – (consulté le 29 Mai 2021). - <https://bimbtp.com/conception/quest-ce-que-le-format-ifc/>.

BIM Community Case studies, Real stories from real BIM people [En ligne]. – (consulté le 02 Juin 2021). - <https://www.bimcommunity.com/experiences/main?>.

Boumedyen Taibi La méthode PROMETHEE comme outil d'aide à la décision multicritère [Revue] // Revue Algérienne d’Economie et de Management. - 2017. - N° 09-Janvier 2017.

CEREMA Le BIM pour les infrastructures-Etat des lieux et problématique [Rapport]. - [s.l.] : Septembre, 2017.

CHELBAB NASSIMA et RAHMOUNI AMINA Mémoire de fin d'étude: L'interopérabilité entre la maquette numérique et les dimensions du processus BIM. [Rapport]. - 2019.

Cherif Bekhtari M. Les méthodes multi-critères pour analyser les aptitudes des terres agricoles : le cas du blé tendre en Languedoc-Roussillon, analysé avec la méthode AHP [En ligne]. - Septembre 2015. - <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2184.7122/1> (consulté le 22/04/2021).

Chris Trbojevich [et al.] Life-Cycle Civil Integrated Management (CIM), Advancements in Preliminary Design BIM for Infrastructure [Revue]. - [s.l.] : Minnesota Department of Transportation

Office of Research & Innovation 395 John Ireland Boulevard, MS 330 St. Paul, Minnesota 55155-1899, 2019.

Civil Made in France [En ligne]. (consulté le 23 Mai 2021). <https://civilfrance.typepad.com>.

Damassets Avantages du BIM dans le Génie Civil. Aider les ingénieurs à augmenter leurs productivité grâce au BIM [En ligne]. - 2017. (consulté le 26 Mai 2021). <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/products/bim-360/civil-engineering-ebook-benefits-of-bim-fr-V2.pdf>.

Djelfa Université de Tracé en plan [En ligne]. - 2016. – (consulté le 16 juin 2021). <http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1132/CHAPITRE%204%20trac%C3%A9%20en%20plan.pdf?sequence=5&isAllowed=y>.

egis Etude hydraulique de la variante de tracé en zone inondable du Girou. Projet d'achèvement de la mise à 2X2 voies de la liason Castres-Toulouse par la mise en concession [Rapport]. - 2017.

Fao Comment faire des études préliminaires à partir de cartes topographiques [En ligne].(consulté le 08 avril 2021). http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6707f/x6707f11.htm.

Ghalamallah Laribi Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention de magister en sciences agronomiques: étude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant et de son influence sur le regime des eaux-cas du bassin versant du oued allala (Ténès-Chlef) [Rapport]. - 2013.

HADI ABIDI MOHAMED EL Manuel d'apprentissage d'Autocad Civil 3D [Rapport]. - 2013.

HADJADJ Nour El Houda et ABDI Khaoula Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Industriel : Investigation autour de la localisation optimale des stations d'épuration : cas du groupement urbain de Tlemcen. [Rapport]. - 2018.

Kymmell Willem Building information modeling: planning and managing construction projects with 4D CAD and simulations [Livre]. : McGraw Hill Professional, 2008.

Laanisto [En ligne] // EcolChange. - 06 Mars 2019. (consulté le 08 Mars 2021). <https://ecolchange.wordpress.com/2019/03/06/ecolchange-seminar-andras-zlinszky-about-lidar-mapping-of-habitats-biodiversity-and-ecosystem-services/>.

Lycée Adolphe CHERIOUX Caractéristiques des bassins versants [En ligne]. - http://lycee-cherieux.fr/Mooc/reseaux_humides/dimensionnement/~gen/dimensionnement.publi/auroraW/co/dimensionnement_18.html (consulte le 08/05/2021).

Maxime Arnaud L'apport du développement d'outils BIM au sein des projets d'infrastructures [Rapport]. Sciences del'ingénieur[physics].dumas-02437121, 2020.

Ounadjela Chérifa et Hariz Samah Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en génie civil : Approche méthodologique pour l'étude d'un projet rotier-cas du dedoublement de la route nationale 92 reliant Saida à El Hassasna sur un linéaire de 4km (soutenu le 14/06/2017) [Rapport].

PERNET-MUGNIER Rémi Mémoire de Fin d'Études : Utilisation de la modélisation 3D en maîtrise d'oeuvre dans le domaine du paysage (soutenu le 27 Septembre 2018) [Rapport].

Rafael Sacks [et al.] BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers.third edition [Rapport]. - New Jersey, canada : John Wiley & Sons, Inc. 2018.

Rafik GHODBANE Modélisation d'un réseau d'assainissement et contribution a sa gestion à l'aide d'un système d'information géographique. Étude de la ville de Boutaleb.Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de magister. (soutenu le 21 juin 2016)[Livre].

Rakotondraïne Arôna Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master titre d'ingénieur en bâtiment et travaux publics implementation du logiciel autocad civil 3D dans l'infrastructure routiere (soutenu le 11 juillet 2015) [Rapport].

Redshift BIM et SIG : l'alliance qui transformera la conception et la construction d'infrastructures [En ligne] // Redshift. - 2018. – (consulté le 27 Mai 2021). - <https://redshift.autodesk.fr/integration-sig-bim/>.

S. AIT-LAMALLAM [et al.] Vers l'extension du Building Information Modeling aux projets d'infrastructures routières : Cas d'étude d'un échangeur autoroutier au Maroc [Revue] // Revue Mrocaïne des science Agronomiques et Vétérinaires. - 2019. - 7(4). - pp. 609-617.

Salvatore Antonio Biancardo [et al.] BIM-Based Design for Road Infrastructure:A Critical Focus on Modeling Guardrails and Retaining Walls [Revue]. - 2020. - Infrastructures 2020, 5, 59; doi:10.3390/infrastructures5070059.

The Alaska Satellite Facility ALOS PALSAR. Radiometric Terrain Correction [En ligne] // EARTHDATA. – (consulté le 08 Mars 2021). - <https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/>.

TOLMER Charles-Edouard Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie concourante pour la mise en oeuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines : Prise en compte des interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets.- 07 Novembre 2016.

washington couses Chapter 6: laying out the roadline [En ligne].(consulté le 07 Mars 2021) sur http://courses.washington.edu/esrm468/468%20Class%20material/01%20week/Road_Loc_pegging_N_Z_PC.pdf.

Wikipédia [En ligne]. – (consulté le 18 juin 2021). <https://fr.wikipedia.org>

Wind Yoram et Saaty Thomas L. Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process. Management Science 26 (7) 641-658 [En ligne] // Informs pub online. - 07 juillet 1980. <https://doi.org/10.1287/mnsc.26.7.641> (consulté le 20/04/2021).

Zaoui Mohamed [et al.] Selection of the best alternative for a road project to replace a section in a flood-prone area using GIS and AMC tools [Revue] // Journal of materials and engineering structures. - 16 April 2020.

Annexes

Annexe 1: Rapport d'optimisation de la variante 1

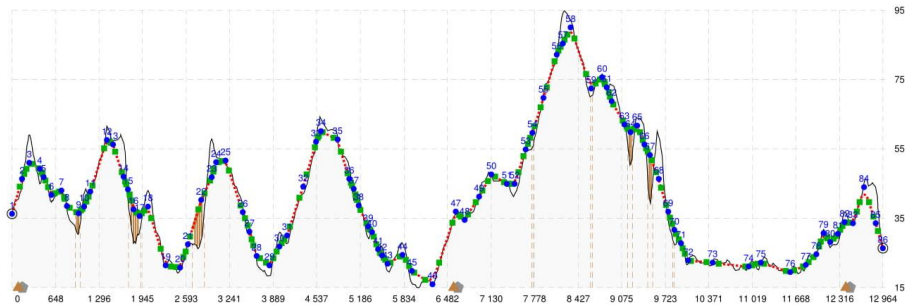


Rapport d'optimisation du projet 3D

ID de la voie: V2022A04405478, Date: 07/05/2021



— Alignement final; — Alignement de début; ● PI; ○ Fixe; ● PC/PT; ■ Zone d'évitement; ● Fosse d'évacuation; ▲ Zone d'emprunt;



--- Ligne de profil en long de route; T Pont; ● PIV; ○ Fixe; ■ Départ/fin de la courbe; ● Fosse d'évacuation; ▲ Zone d'emprunt; Echelle d'élévation 51,8 : 1

1. INFORMATIONS SUR L'AXE

Unité linéaire:	meter	Rayon minimal:	148,13
Modélisation en fonction de la vitesse:	60	Dévers minimal:	4,00 %
Largeur de bande:	13,60	Nombre de PI et de courbes:	45

2. INFORMATIONS DE LIGNE DE PROFIL EN LONG

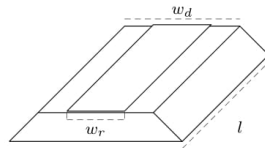
Coût total du projet:	10 239 307 \$	Nombre de PIV:	86
Unité linéaire:	meter	Talus maximal:	6,67 %
Modélisation en fonction de la vitesse:	60	Talus de drainage requis:	0,00 %
Longueur:	12 964,04	Espacement minimal des PIV:	37,50

3. INFORMATIONS DE CONSTRUCTION

Coût total de construction: ¹	8 694 068 \$	Hauteur maximale de remblai avant le pont:	4,00
Nombre de ponts:	8	Profondeur de déblai maximale avant le tunnel:	N/A
Nombre de tunnels :	0	Distance de la tabulation:	25,00
Nombre de soutènements :	0		

¹Les coûts de construction sont calculés pour chaque tabulation, à l'aide d'un assemblage ou style sélectionné, et une distance de tabulation pour la longueur d'une sous-section de construction. Les calculs de coûts pour les différents ensembles sont décrits ci-dessous. Le coût total de la construction est la somme des coûts de sous-section.

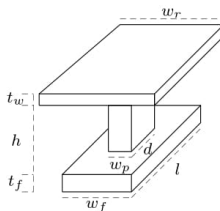
3.1. **Informations sur la structure de route.** Les coûts de construction d'une sous-section de tabulation avec une structure de route est l fois le coût de la route par unité linéaire.



l : Distance de la tabulation
 w_r : Largeur de la route
 w_d : Largeur du référentiel

Coût de la route par meter linéaire: ²	447,79 \$	Pente de talus d'entrée en terre en déblai:	0,33
Largeur de la route: ³	7,20	Pente de talus d'entrée en terre en remblai:	0,33
Largeur du référentiel:	7,20		

3.2. **Informations sur la structure de pont.** Le coût de construction d'une sous-section de tabulation avec un ensemble de pont correspond à la somme du coût de la route, de la poutrelle et du pylône, si un pylône est placé dans cette section. Le coût de la route est l fois le coût de la route par unité linéaire. Le coût de la poutrelle est le volume $V_b = w_r \cdot t_w$ fois le coût de la poutrelle par unité cubique. Le coût du pylône est le volume $V_p = l \cdot w_f \cdot t_f + d \cdot w_p \cdot h$ fois le coût du pylône par unité cubique.



l : Distance de la tabulation
 w_r : Largeur de la route
 t_w : Epaisseur du mur
 h : Hauteur du pylône
 w_p : Largeur du pylône
 d : Profondeur du pylône
 w_f : Largeur de la semelle
 t_f : Epaisseur de la semelle

Coût de la route par meter linéaire: ⁴	447,79 \$	Profondeur du chapeau:	2,50
Coût initial fixe du pont:	250 000,00 \$	Nombre de colonnes:	1
Coût de fondation sur pile et de chapeau:	77 184,00 \$	Largeur de colonne:	2,00
Coût de pile par unité linéaire meter:	2 513,27 \$	Espacement des colonnes:	6,00
Coût de poutre par unité linéaire meter:	1 386,00 \$	Largeur des fondations:	7,20
Largeur du tablier:	7,20	Longueur des fondations:	5,60
Nombre de poutres:	2	Profondeur des fondations:	1,50
Hauteur du chapeau:	2,00	Hauteur des fondations au-dessus du sol:	0,25

4. INFORMATIONS DE TERRASSEMENT

Coût total de terrassement:	1 545 239 \$	Longueur maxi. de la coupe:	648,20
Nombre de coupes de terrassement:	20	Nombre de fosses d'évacuation:	3
Nombre de sous-coupes de terrassement:	538	Nombre de zones d'emprunt:	3
Nombre de strates:	1	Largeur de bande:	13,60

4.1. **Terrassement pour cartographier le calque 1.**

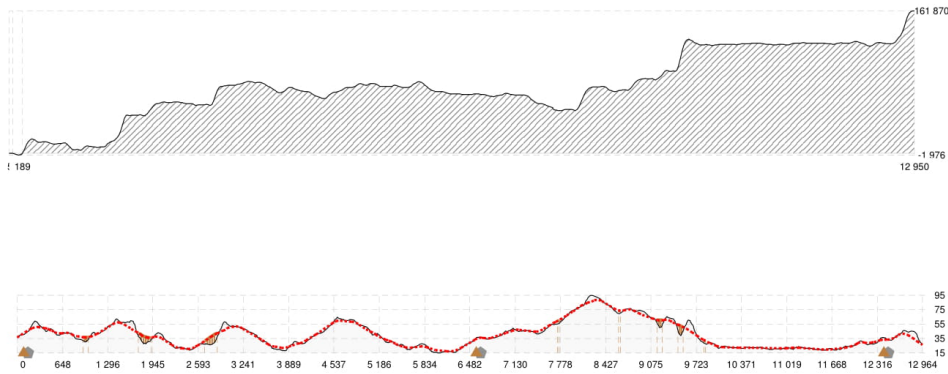
Déblai cum.:	84 042,64	Coût d'excavation:	3,06 \$
Remblai cum.:	84 042,64	Coût de la charge:	1,87 \$
Volume net:	0,00	Coût de transport de déblais (par km):	2,40 \$
Unité de volume:	cubique meter	Coût de l'endiguement:	4,41 \$
Nom de calque:		Coût de l'évacuation:	,98 \$
Facteur de réutilisation:	1,00	Coût de l'emprunt:	2,75 \$

²Le coût de la route par unité linéaire est $w_r \cdot (0.3 \cdot C + 0.7 \cdot A) + D + S + L + G$, où C est le coût du revêtement en béton par unité carrée, A est le coût du revêtement de l'asphalte par unité au carré, D est le coût de drainage, S de connexion, L d'éclairage et G de signalisation par unité linéaire.

³La largeur de la route est le nombre de voies routières multiplié par la largeur d'une voie routière. Elle n'inclut pas la largeur des terre-pleins centraux, trottoirs, etc.

⁴Le coût de la route par unité linéaire est $w_r \cdot C + D + S + L + G$, où C est le coût du revêtement en béton par unité carrée, D est le coût de drainage, S de connexion, L d'éclairage et G de signalisation par unité linéaire.

4.1.1. Diagramme de masse pour cartographier le calque 1.

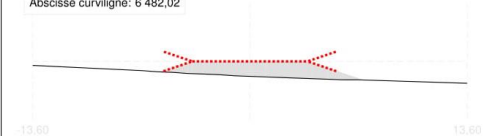
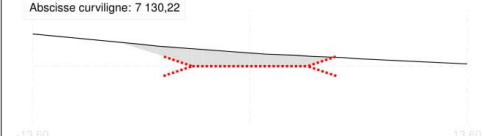
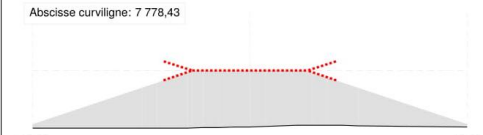
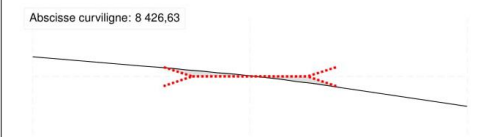
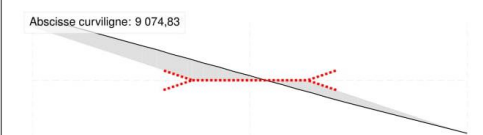
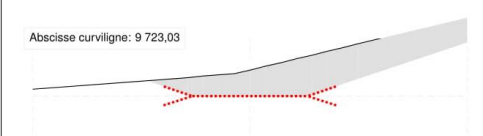
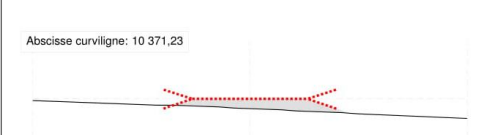


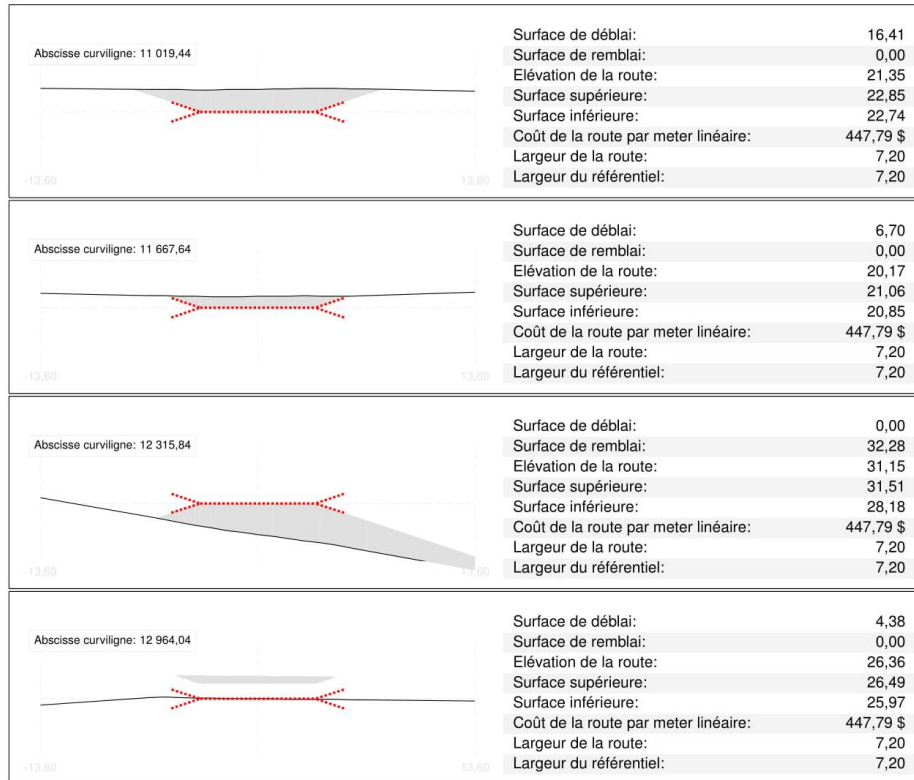
4.1.2. Schéma de transport de déblais pour cartographier le calque 1.



<p>Abscisse curviligne: 0,00</p>	<p>Surface de déblai: 0,30 Surface de remblai: 0,24 Élévation de la route: 36,14 Surface supérieure: 36,83 Surface inférieure: 35,96 Coût de la route par meter linéaire: 447,79 \$ Largeur de la route: 7,20 Largeur du référentiel: 7,20</p>
<p>Abscisse curviligne: 648,20</p>	<p>Surface de déblai: 0,00 Surface de remblai: 10,24 Élévation de la route: 42,16 Surface supérieure: 45,19 Surface inférieure: 40,44 Coût de la route par meter linéaire: 447,79 \$ Largeur de la route: 7,20 Largeur du référentiel: 7,20</p>
<p>Abscisse curviligne: 1 296,40</p>	<p>Surface de déblai: 22,38 Surface de remblai: 0,00 Élévation de la route: 50,43 Surface supérieure: 54,76 Surface inférieure: 49,67 Coût de la route par meter linéaire: 447,79 \$ Largeur de la route: 7,20 Largeur du référentiel: 7,20</p>

<p>Abscisse curviligne: 1 944,61</p>	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>9,83</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>36,61</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>36,68</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>35,21</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	0,00	Surface de remblai:	9,83	Élévation de la route:	36,61	Surface supérieure:	36,68	Surface inférieure:	35,21	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	0,00																
Surface de remblai:	9,83																
Élévation de la route:	36,61																
Surface supérieure:	36,68																
Surface inférieure:	35,21																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 2 592,81</p>	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>0,20</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>25,94</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>26,11</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>25,96</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	0,20	Surface de remblai:	0,00	Élévation de la route:	25,94	Surface supérieure:	26,11	Surface inférieure:	25,96	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	0,20																
Surface de remblai:	0,00																
Élévation de la route:	25,94																
Surface supérieure:	26,11																
Surface inférieure:	25,96																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 3 241,01</p>	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>16,61</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>48,05</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>51,41</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>48,00</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	16,61	Surface de remblai:	0,00	Élévation de la route:	48,05	Surface supérieure:	51,41	Surface inférieure:	48,00	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	16,61																
Surface de remblai:	0,00																
Élévation de la route:	48,05																
Surface supérieure:	51,41																
Surface inférieure:	48,00																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 3 889,21</p>	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>0,65</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>0,93</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>23,38</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>24,03</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>22,60</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	0,65	Surface de remblai:	0,93	Élévation de la route:	23,38	Surface supérieure:	24,03	Surface inférieure:	22,60	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	0,65																
Surface de remblai:	0,93																
Élévation de la route:	23,38																
Surface supérieure:	24,03																
Surface inférieure:	22,60																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 4 537,41</p>	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>33,87</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>57,24</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>62,68</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>56,73</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	33,87	Surface de remblai:	0,00	Élévation de la route:	57,24	Surface supérieure:	62,68	Surface inférieure:	56,73	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	33,87																
Surface de remblai:	0,00																
Élévation de la route:	57,24																
Surface supérieure:	62,68																
Surface inférieure:	56,73																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 5 185,62</p>	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>33,33</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>37,49</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>41,58</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>38,44</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	33,33	Surface de remblai:	0,00	Élévation de la route:	37,49	Surface supérieure:	41,58	Surface inférieure:	38,44	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	33,33																
Surface de remblai:	0,00																
Élévation de la route:	37,49																
Surface supérieure:	41,58																
Surface inférieure:	38,44																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 5 833,82</p>	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>51,68</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>23,63</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>26,95</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>26,62</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	51,68	Surface de remblai:	0,00	Élévation de la route:	23,63	Surface supérieure:	26,95	Surface inférieure:	26,62	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	51,68																
Surface de remblai:	0,00																
Élévation de la route:	23,63																
Surface supérieure:	26,95																
Surface inférieure:	26,62																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																

<p>Abscisse curviligne: 6 482,02</p> 	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>9,35</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>29,52</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>29,28</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>28,35</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	0,00	Surface de remblai:	9,35	Élévation de la route:	29,52	Surface supérieure:	29,28	Surface inférieure:	28,35	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	0,00																
Surface de remblai:	9,35																
Élévation de la route:	29,52																
Surface supérieure:	29,28																
Surface inférieure:	28,35																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 7 130,22</p> 	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>9,07</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>46,83</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>48,87</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>47,32</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	9,07	Surface de remblai:	0,00	Élévation de la route:	46,83	Surface supérieure:	48,87	Surface inférieure:	47,32	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	9,07																
Surface de remblai:	0,00																
Élévation de la route:	46,83																
Surface supérieure:	48,87																
Surface inférieure:	47,32																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 7 778,43</p> 	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>62,49</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>61,41</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>58,00</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>57,80</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	0,00	Surface de remblai:	62,49	Élévation de la route:	61,41	Surface supérieure:	58,00	Surface inférieure:	57,80	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	0,00																
Surface de remblai:	62,49																
Élévation de la route:	61,41																
Surface supérieure:	58,00																
Surface inférieure:	57,80																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 8 426,63</p> 	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>1,11</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>1,03</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>83,32</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>84,55</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>82,46</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	1,11	Surface de remblai:	1,03	Élévation de la route:	83,32	Surface supérieure:	84,55	Surface inférieure:	82,46	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	1,11																
Surface de remblai:	1,03																
Élévation de la route:	83,32																
Surface supérieure:	84,55																
Surface inférieure:	82,46																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 9 074,83</p> 	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>13,01</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>4,68</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>63,44</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>67,49</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>61,86</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	13,01	Surface de remblai:	4,68	Élévation de la route:	63,44	Surface supérieure:	67,49	Surface inférieure:	61,86	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	13,01																
Surface de remblai:	4,68																
Élévation de la route:	63,44																
Surface supérieure:	67,49																
Surface inférieure:	61,86																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 9 723,03</p> 	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>34,25</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>39,63</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>42,89</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>40,04</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	34,25	Surface de remblai:	0,00	Élévation de la route:	39,63	Surface supérieure:	42,89	Surface inférieure:	40,04	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	34,25																
Surface de remblai:	0,00																
Élévation de la route:	39,63																
Surface supérieure:	42,89																
Surface inférieure:	40,04																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																
<p>Abscisse curviligne: 10 371,23</p> 	<table border="0"> <tr><td>Surface de déblai:</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Surface de remblai:</td><td>5,65</td></tr> <tr><td>Élévation de la route:</td><td>22,21</td></tr> <tr><td>Surface supérieure:</td><td>22,12</td></tr> <tr><td>Surface inférieure:</td><td>21,30</td></tr> <tr><td>Coût de la route par meter linéaire:</td><td>447,79 \$</td></tr> <tr><td>Largeur de la route:</td><td>7,20</td></tr> <tr><td>Largeur du référentiel:</td><td>7,20</td></tr> </table>	Surface de déblai:	0,00	Surface de remblai:	5,65	Élévation de la route:	22,21	Surface supérieure:	22,12	Surface inférieure:	21,30	Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$	Largeur de la route:	7,20	Largeur du référentiel:	7,20
Surface de déblai:	0,00																
Surface de remblai:	5,65																
Élévation de la route:	22,21																
Surface supérieure:	22,12																
Surface inférieure:	21,30																
Coût de la route par meter linéaire:	447,79 \$																
Largeur de la route:	7,20																
Largeur du référentiel:	7,20																



5. RAPPORT SUR LES VOLUMES

Abscisse curviligne:	Surface de déblai: (m ²)	Vol déblai: (m ³)	Surface de remblai: (m ²)	Vol. remblai (m ³)	Déblai cum.: (m ³)	Remblai cum.: (m ³)	Net Cum.: (m ³)
0,00	0,30	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
648,20	0,00	19 820,91	10,24	9 251,93	19 820,91	9 251,93	10 568,98
1 296,40	22,38	9 112,85	0,00	12 814,71	28 933,76	22 066,64	6 867,12
1 944,61	0,00	38 176,17	9,83	2 245,75	67 109,94	24 312,38	42 797,55
2 592,81	0,20	16 817,44	0,00	3 143,69	83 927,37	27 456,07	56 471,30
3 241,01	16,61	24 627,20	0,00	3 661,28	108 554,57	31 117,35	77 437,22
3 889,21	0,65	5 009,97	0,93	13 588,48	113 564,55	44 705,84	68 858,71
4 537,41	33,87	6 981,97	0,00	13 649,10	120 546,51	58 354,94	62 191,58
5 185,62	33,33	19 118,32	0,00	2 295,45	139 664,83	60 650,38	79 014,45
5 833,82	51,68	7 999,51	0,00	7 231,60	147 664,34	67 881,99	79 782,35
6 482,02	0,00	1 780,97	9,35	14 417,17	149 445,31	82 299,16	67 146,15
7 130,22	9,07	4 704,26	0,00	3 823,57	154 149,58	86 122,73	68 026,85
7 778,43	0,00	507,17	62,49	16 563,09	154 656,75	102 685,82	51 970,93
8 426,63	1,11	28 395,35	1,03	4 767,93	183 052,10	107 453,76	75 598,34
9 074,83	13,01	15 539,48	4,68	6 602,30	198 591,58	114 056,06	84 535,52
9 723,03	34,25	49 859,32	0,00	5 198,84	248 450,90	119 254,90	129 196,00
10 371,23	0,00	2 854,68	5,65	8 279,81	251 305,58	127 534,70	123 770,87
11 019,44	16,41	2 379,98	0,00	2 380,44	253 685,56	129 915,14	123 770,42
11 667,64	6,70	3 309,87	0,00	1 685,84	256 995,43	131 600,98	125 394,45
12 315,84	0,00	3 703,53	32,28	7 146,93	260 698,96	138 747,91	121 951,04
12 964,04	0,06	41 722,05	0,06	1 803,34	302 421,00	140 551,25	161 869,75

6. INFORMATIONS SUR LA SURFACE

Nom:	N/A	Unité planaire:	meter
Largeur de surface:	1 215	Résolution horizontale:	10,00
Hauteur de surface:	316	Résolution verticale:	10,00
Système de coordonnées:	UTM84-31N	Unité d'élévation:	meter
Coin SO (long., lat.):	253 488,424349, 3 988 516,319340	Élévation minimale:	3,37
Coin NE (long., lat.):	265 638,424349, 3 991 676,319340	Élévation maximale:	199,73

7. LISTE DES PI/COURBES

PI	Longitude	Latitude	Rayon	PI	Longitude	Latitude	Rayon
*1	254	3 990	0,00	24	260	3 990	225,88
2	103,946679 254	582,209723 3 990	227,54	25	116,238088 260	234,443791 3 990	347,33
3	197,005471 254	662,527537 3 990	199,95	26	528,603956 260	376,350817 3 990	317,15
4	478,215061 254	653,858424 3 990	153,57	27	729,579516 260	502,816015 3 990	221,38
5	635,775627 254	577,221374 3 990	243,04	*28	902,016796 261	424,300851 3 990	598,59
6	923,490868 255	359,510757 3 990	244,86	29	190,845857 261	308,113953 3 990	326,30
7	255,842931 255	413,817701 3 990	198,73	30	417,403681 261	206,613374 3 990	153,95
8	839,884478 255	253,444658 3 990	201,71	31	657,991035 261	456,750621 3 990	208,38
9	950,764611 256	196,179032 3 990	353,09	32	956,441691 262	358,142623 3 990	203,99
10	157,199776 256	200,356239 3 990	234,93	33	177,301566 262	459,593400 3 990	401,67
11	432,864041 256	073,445340 3 989	197,09	34	746,143003 262	514,733987 3 990	338,80
12	566,118737 256	980,705866 3 989	311,75	35	999,095006 263	529,580742 3 990	311,97
*13	766,073304 257	808,525270 3 989	284,49	36	122,777415 263	521,112728 3 990	183,32
14	193,204899 257	903,840159 3 989	177,95	*37	411,713254 263	670,520737 3 990	255,30
15	878,016056 257	787,906331 3 990	164,18	38	790,885806 264	632,065573 3 990	204,63
16	160,891677 257	724,675626 3 990	162,47	39	021,151517 264	471,062172 3 990	294,34
17	998,075873 258	321,606381 3 990	165,95	40	143,335478 264	185,244845 3 990	192,29
18	211,252472 258	334,250906 3 990	275,64	41	373,246104 264	130,428986 3 989	206,93
19	639,376751 258	504,274729 3 990	153,33	42	531,910443 264	994,160845 3 989	335,95
*20	894,468604 259	340,378315 3 990	456,02	43	701,183219 264	897,388522 3 989	356,94
21	095,677969 259	300,620517 3 990	200,50	44	999,708973 265	614,983636 3 989	181,60
22	353,524871 259	235,061927 3 990	312,02	*45	376,400811 265	478,875586 3 989	0,00
23	567,357930 259	317,410420 3 990	315,05		512,911375	604,476983	
	851,651720	171,462316					

8. LISTE DES PIV

PIV	Abscisse curviligne	Élévation	Longueur de la courbe	PIV	Abscisse curviligne	Élévation	Longueur de la courbe
*1	0,00	36,14	0,00	44	5 816,77	24,40	85,50
2	150,51	46,18	65,56	45	5 950,18	19,77	80,28
3	256,19	50,94	78,59	46	6 256,86	16,03	202,92
4	416,49	49,11	43,36	47	6 603,38	36,79	102,26
5	472,84	46,72	43,36	48	6 735,18	34,39	103,20
6	584,91	41,61	99,26	49	6 954,73	41,11	98,90

PIV	Abscisse curviligne	Élévation	Longueur de la courbe
7	736,23	42,92	72,08
8	819,97	38,41	75,36
9	992,26	36,34	69,10
10	1 076,16	38,25	60,10
11	1 167,36	42,59	59,04
12	1 412,51	57,48	83,55
13	1 505,84	56,10	66,68
14	1 661,40	46,81	46,00
15	1 723,62	43,29	46,00
16	1 811,32	37,56	77,21
17	1 897,11	35,64	77,21
18	2 023,63	38,23	103,52
19	2 286,61	21,34	151,20
20	2 499,97	20,72	106,37
21	2 618,16	27,36	71,18
22	2 819,28	40,25	85,52
23	2 969,31	46,77	49,51
24	3 039,33	51,00	63,01
25	3 182,13	51,47	97,94
26	3 435,79	36,76	63,64
27	3 537,22	31,05	63,64
28	3 642,31	24,05	94,47
29	3 834,86	21,30	111,06
30	3 976,74	26,73	72,60
31	4 098,07	30,01	83,84
32	4 332,79	43,99	106,24
33	4 528,88	56,91	47,97
34	4 595,47	59,92	59,93
35	4 845,93	57,60	109,60
36	5 022,24	46,27	47,05
37	5 086,80	43,33	47,05
38	5 162,12	38,53	51,89
39	5 297,81	32,49	45,17
40	5 358,18	30,95	45,17
41	5 448,74	25,93	52,65
42	5 509,11	24,29	45,17
43	5 592,22	21,80	74,80

PIV	Abscisse curviligne	Élévation	Longueur de la courbe
50	7 134,51	47,53	107,16
51	7 361,48	44,80	73,17
52	7 484,07	44,80	110,33
53	7 645,94	54,71	63,53
54	7 747,11	59,51	63,53
55	7 912,63	69,55	92,48
56	8 105,64	82,00	58,51
57	8 195,66	85,14	58,51
58	8 315,68	89,74	106,86
59	8 618,07	72,25	143,70
60	8 782,41	75,49	66,19
61	8 855,95	72,51	50,81
62	8 928,86	68,50	51,01
63	9 118,96	61,91	59,44
64	9 211,06	59,62	82,89
65	9 303,23	61,57	80,30
66	9 413,74	56,11	54,17
67	9 494,12	53,06	54,17
68	9 624,73	46,18	76,77
69	9 765,23	36,82	58,57
70	9 855,38	31,65	58,57
71	9 955,46	27,69	63,03
72	10 062,95	22,75	88,18
73	10 430,76	22,11	183,51
74	10 966,29	21,03	98,64
75	11 145,48	22,12	98,64
76	11 583,63	19,43	122,84
77	11 816,60	21,47	87,76
78	11 971,63	24,54	81,33
79	12 084,02	30,61	88,35
80	12 182,18	28,03	87,23
81	12 298,59	30,53	59,52
82	12 390,87	33,74	61,66
83	12 515,89	33,50	112,52
84	12 686,01	43,82	143,11
85	12 857,43	33,48	65,97
*86	12 964,04	26,36	0,00

9. STRUCTURES DE PONT (8)

Pont	Début	Fin	Longueur	Piles
1	937,50	1 012,50	75,00	2
2	1 737,50	1 912,50	175,00	4
3	2 687,50	2 862,50	175,00	4
4	7 737,50	7 762,50	25,00	0

Pont	Début	Fin	Longueur	Piles
5	8 612,50	8 637,50	25,00	0
6	9 162,50	9 237,50	75,00	2
7	9 462,50	9 537,50	75,00	2
8	9 837,50	9 862,50	25,00	0

10. RAPPEL DES MENTIONS LÉGALES

Toutes les données et tous les fichiers de données contenus dans les résultats de l'optimisation du projet 3D sont créés lors de l'utilisation du service d'optimisation de projet 3D d'InfraWorks et sont soumis au contrat de licence d'Autodesk InfraWorks et aux conditions d'utilisation d'Autodesk 360 que vous avez acceptés avant d'utiliser l'optimisation du projet 3D.

Critères \ Variantes	C1	C2	C3	C4	C5
V1-V2	-0,6369	-0,4963	0	0,3769	0,942350305
V1-V3	0,3631	0,0404	-0,5	0,1805	0,033038911
V1-V4	0,239	-0,8971	0,25	1	1
V1-V5	-0,1032	0,1029	-0,75	0,3601	0,461543824
V2-V1	0,6369	0,4963	0	-0,3769	-0,942350305
V2-V3	1	0,5368	-0,5	-0,1964	-0,909311394
V2-V4	0,8759	-0,4007	0,25	0,6231	0,057649695
V2-V5	0,5337	0,5993	-0,75	-0,0168	-0,480806481
V3-V1	-0,3631	-0,0404	0,5	-0,1805	-0,033038911
V3-V2	-1	-0,5368	0,5	0,1964	0,909311394
V3-V4	-0,1241	-0,9375	0,75	0,8195	0,966961089
V3-V5	-0,4663	0,0625	-0,25	0,1796	0,428504913
V4-V1	-0,239	0,8971	-0,25	-1	-1
V4-V2	-0,8759	0,4007	-0,25	-0,6231	-0,057649695
V4-V3	0,1241	0,9375	-0,75	-0,8195	-0,966961089
V4-V5	-0,3422	1	-1	-0,6399	-0,538456176
V5-V1	0,1032	-0,1029	0,75	-0,3601	-0,461543824
V5-V2	-0,5337	-0,5993	0,75	0,0168	0,480806481
V5-V3	0,4663	-0,0625	0,25	-0,1796	-0,428504913
V5-V4	0,3422	-1	1	0,6399	0,538456176

Annexe 3: Fonction de préférence et la préférence globale

Poids	0,2339	0,05572	0,2367	0,3068	0,1669
--------------	---------------	----------------	---------------	---------------	---------------

Critères	C1	C2	C3	C4	C5	Somme
Variantes						
<i>VI-V2</i>	0	0	0	0,11565	0,1573	0,27295
<i>VI-V3</i>	0,08492	0,002254	0	0,05537	0,00551	0,14806
<i>VI-V4</i>	0,0559	0	0,05916	0,30682	0,16692	0,58880
<i>VI-V5</i>	0	0,005736	0	0,11049	0,07704	0,19327
<i>V2-V1</i>	0,14896	0,027657	0	0	0	0,17661
<i>V2-V3</i>	0,23388	0,029911	0	0	0	0,26379
<i>V2-V4</i>	0,20485	0	0,05916	0,19117	0,00962	0,46481
<i>V2-V5</i>	0,12483	0,033393	0	0	0	0,15822
<i>V3-V1</i>	0	0	0,11833	0	0	0,11833
<i>V3-V2</i>	0	0	0,11833	0,06027	0,15178	0,33038
<i>V3-V4</i>	0	0	0,17749	0,25145	0,16141	0,59035
<i>V3-V5</i>	0	0,003483	0	0,05511	0,07153	0,13012
<i>V4-V1</i>	0	0,049988	0	0	0	0,04999
<i>V4-V2</i>	0	0,02233	0	0	0	0,02233
<i>V4-V3</i>	0,02903	0,052241	0	0	0	0,08127
<i>V4-V5</i>	0	0,055724	0	0	0	0,05572
<i>V5-V1</i>	0,02413	0	0,17749	0	0	0,20162
<i>V5-V2</i>	0	0	0,17749	0,00516	0,08026	0,26291
<i>V5-V3</i>	0,10905	0	0,05916	0	0	0,16822
<i>V5-V4</i>	0,08003	0	0,23665	0,19633	0,08988	0,60289

Annexe 4: Détermination de débits de surclassement

	V1	V2	V3	V4	V5	Somme	Flux(+)
V1	-	0,2729	0,1481	0,5888	0,1933	1,2031	0,3008
V2	0,1766	-	0,2638	0,4648	0,1582	1,0634	0,2659
V3	0,1183	0,3304	-	0,5903	0,1301	1,1692	0,2923
V4	0,0500	0,0223	0,0813	-	0,0557	0,2093	0,0523
V5	0,2016	0,2629	0,1682	0,6029	-	1,2356	0,3089
Somme	0,5465	0,8886	0,6613	2,2469	0,5373		
Flux (-)	0,1093	0,1777	0,1323	0,4494	0,1075		

Annexe 5: Structure globale de Civil 3D

Source : (Rakotondraïne, 2015)

