



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد بن باديس
Université Abdelhamid ibn Badis
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
نيابة عمادة الكلية المكلفة بما بعد التدرج والبحث العلمي والعلاقات الخارجية
Vice-Décanat Chargé de la Poste Graduation de la Recherche Scientifique et des Relations Extérieures



Thèse

Pour l'obtention du titre de Docteur en Travaux Publics

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Voies et ouvrages d'art

Apport des nouvelles technologies (BIM, SIG et AMAD) dans le contexte d'infrastructures linéaires: Cas d'un projet routier

Présentée et soutenue publiquement par :

HADJAR Manal Ikram

Devant le jury composé de:

Président	Prof. MEBROUKI Abdelkader	Université de Mostaganem
Examineurs	Prof. HADJI Lazreg	Université de Tiaret
	Prof. BOUHAMOU Nasreddine	Centre Universitaire El-Bayadh
	Dr. ZELMAT Yassine	Université de Mostaganem
Directeur de Thèse	Dr. ZAOUI Mohamed	Université de Mostaganem
Co-directeur de Thèse	Prof. KADRI Tahar	Université de Mostaganem

Année universitaire : 2025 -2026

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, le Clément et le Miséricordieux, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche. Sans Sa volonté et Sa bénédiction, rien n'aurait été possible.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrants, Mr. ZAOUI Mohamed, Mr. KADRI Tahar et Mr. BENSOUA Mohamed, pour leur accompagnement, leurs conseils éclairés, leur rigueur scientifique et leur disponibilité tout au long de la réalisation de cette thèse.

J'exprime également ma sincère reconnaissance à Mr. DRAICHE Kada pour son soutien constant. Cette étude n'aurait pas été possible sans son aide précieuse et son appui bienveillant.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury Pr. BOUHAMOU Nasreddine, Pr. HADJI Lazreg et Mr. ZELMAT Yassine, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail. Je les remercie pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de cette thèse, pour leurs remarques constructives et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches. Leurs observations ont grandement contribué à enrichir la qualité de cette thèse.

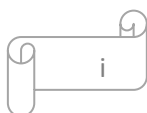
Je tiens à exprimer ma reconnaissance la plus profonde à mes parents, source de tout amour et de tout courage.

À ma chère mère SALIHA, pour sa tendresse, ses sacrifices et ses prières inlassables, qui m'ont portée et soutenue à chaque étape de mon parcours. Et à la mémoire de mon père M'HAMED, qu'Allah accueille en Sa miséricorde, dont le rêve, la sagesse et la fierté m'ont toujours accompagnée et inspirée.

Mes remerciements s'adressent également à mes frères, Abdelmadjid Karim et Mohamed Mounir pour leur compréhension et leur soutien indéfectible.

Enfin, j'exprime toute ma gratitude à mes collègues et amis pour leur aide précieuse, leurs échanges constructifs, leur bonne humeur et les moments de partage qui ont rendu cette aventure scientifique et humaine si enrichissante.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette thèse, je dis du fond du cœur : Merci infiniment.



ملخص

يُعدّ تطوير وتحديث البنية التحتية للنقل تحديًا رئيسيًا لتحقيق التنمية الإقليمية والمستدامة. وفي هذا السياق، تقترح هذه الأطروحة منهجًا متكاملًا يجمع بين نمذجة معلومات البناء وأساليب التحليل متعدّد المعايير بهدف تحسين عملية اختيار بدائل مسارات الطرق خلال مرحلة الدراسة التمهيديّة للمشروع. الهدف الرئيسي هو إثبات أن التكامل بين النمذجة الرقمية ثلاثية الأبعاد والتحليل متعدّد المعايير يُحسّن جودة، واتساق، ومنطقية عملية اتخاذ القرار في مشاريع الطرق.

تعتمد المنهجية المقترحة على النمذجة ثلاثية الأبعاد لعدة بدائل باستخدام برنامج Autodesk InfraWorks، تليها عملية التقييم وفق معايير تقنية واقتصادية وبيئية باستخدام طرق Topsis، Electre III، Vikor مع ترجيح المعايير بواسطة نظام توزيع العوامل. وقد تم تطبيق هذا النهج على دراسة حالة واقعية تتعلق بإعادة تصميم مقطع طريقي مهّد بالفيضانات يربط بين سيدي بلعطار والطريق الوطني رقم 90 في الجزائر، مما أتاح تحديد البديل رقم 3 كأفضل حلّ ممكن. بعد ذلك، تم تطوير هذا البديل باستخدام برنامج Autodesk Civil 3D للتحقق من مطابقة المواصفات الهندسية وجدوى التنفيذ.

تؤكد النتائج أن الجمع بين نمذجة معلومات البناء وأساليب التحليل متعدّد المعايير يُحسّن من الدقّة والشفافية والتعاون بين الأطراف المعنية ويعزّز استدامة القرارات. كما يوفر هذا الإطار المتكامل أساسًا منهجيًا فعّالًا وقابلًا للتطبيق في تصميم الطرق الحديثة، مما يمهد الطريق نحو هندسة أكثر ذكاءً وتكاملًا واستدامة.

الكلمات المفتاحية: نمذجة معلومات البناء، التحليل متعدّد المعايير في دعم اتخاذ القرار، Topsis، Electre III، Vikor، البنى التحتية للطرق، InfraWorks، Civil 3D.

Résumé

Le développement et la modernisation des infrastructures routières constituent un enjeu majeur pour le développement territorial et durable. Dans ce contexte, cette thèse propose une approche intégrée combinant la Modélisation d'Information des Bâtiments et les méthodes multicritères d'aide à la décision afin d'optimiser le choix des variantes de tracé routier lors de la phase d'avant-projet sommaire. L'objectif principal est de démontrer que la synergie entre la modélisation numérique 3D et l'analyse multicritère permet d'améliorer la qualité, la cohérence et la rationalité du processus décisionnel dans les projets routiers.

La méthodologie repose sur la modélisation tridimensionnelle de plusieurs variantes à l'aide d'Autodesk InfraWorks, puis sur leur évaluation selon des critères techniques, économiques et environnementaux à l'aide des méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR, pondérées par le Système de Répartition des Facteurs. L'application de cette approche à un cas réel de renouvellement du tracé d'un tronçon routier vulnérable aux inondations, reliant Sidi Belattar à la Route Nationale 90 en Algérie, a permis d'identifier la variante 3 comme solution optimale. Cette variante a ensuite été développée sous Autodesk Civil 3D pour validation technique, confirmant sa conformité géométrique et sa faisabilité.

Les résultats confirment que la combinaison de la modélisation des informations du bâtiment et des méthodes multicritères d'aide à la décision améliore la précision, la transparence, la collaboration entre les acteurs et la durabilité des décisions. Elle offre un cadre méthodologique efficace et reproductible pour la conception routière moderne, ouvrant la voie à une ingénierie plus intelligente, intégrée et durable.

Mots clés : BIM, AMAD, TOPSIS, ELECTRE III, VIKOR, Infrastructures routières, InfraWorks, Civil 3D.

Abstract

The development and modernization of road infrastructures represent a major challenge for territorial and sustainable development. In this context, this thesis proposes an integrated approach combining Building Information Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis methods to optimize the selection of road alignment alternatives during the preliminary design phase. The main objective is to demonstrate that the synergy between 3D digital modeling and multi-criteria analysis improves the quality, consistency, and rationality of the decision-making process in road projects.

The proposed methodology is based on the three-dimensional modeling of several alternatives using Autodesk InfraWorks, followed by their evaluation according to technical, economic, and environmental criteria using TOPSIS, ELECTRE III, and VIKOR methods, weighted by the Factor Distribution System. The application of this approach to a real case study involving the renewal of a flood-prone road section linking Sidi Belattar to National Road 90 in Algeria made it possible to identify alternative 3 as the optimal solution. This alternative was then developed in Autodesk Civil 3D for technical validation, confirming its geometric compliance and feasibility.

The results confirm that combining Building Information Modeling with Multi-Criteria Decision Analysis methods enhances accuracy, transparency, stakeholder collaboration, and the sustainability of decisions. This integrated framework provides an efficient and reproducible methodological basis for modern road design, paving the way for more intelligent, collaborative, and sustainable engineering practice.

Keywords: BIM, AMAD, TOPSIS, ELECTRE III, VIKOR, Road Infrastructure, InfraWorks, Civil 3D.

Table des matières

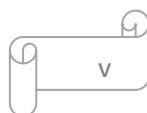
Remerciements	i
ملخص /Résumé /Abstract	ii
Table des matières	v
Liste des symboles et des acronymes	ix
Liste des Figures	xi
Liste des Tables	xii
INTRODUCTION GENERALE	2

Chapitre I: Building Information Modeling

I.1. INTRODUCTION	6
I.2. DEFINITIONS ET CONCEPTS DU BIM	6
I.2.1. Qu'est-ce que le BIM et la maquette numérique ?.....	6
I.2.2. Historique.....	7
I.2.3. Les Niveaux de maturité du BIM.....	7
I.2.4. Les Dimensions du BIM.....	8
I.2.5. Standards et interopérabilité dans le BIM	10
I.2.6. L'adoption et Mondialisation du BIM	11
I.3. TECHNOLOGIES ET OUTILS BIM.....	14
I.3.1. Outils BIM dans les projets routiers.....	15
I.3.1.1. Avantages des outils BIM pour Projets routiers	16
I.3.1.2. Avantages des outils BIM pour Ouvrages d'art ou bâtiments	16
I.3.1.3. Avantages des outils BIM pour Coordination et gestion.....	17
I.4. BIM DANS LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT	17
I.4.1. Processus de mise en œuvre du BIM dans les infrastructures routières.....	17
I.4.1.1. Phase Avant-Projet Sommaire (APS).....	18
I.4.1.2. Phase de conception détaillée (APD).....	19
I.4.1.3. Phase de construction.....	19
I.4.1.4. Phase d'exploitation et maintenance.....	20
I.4.2. Collaboration et communication dans le BIM	20
I.5. CONCLUSION	21

Chapitre II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

II.1. INTRODUCTION	24
II.2. GÉNÉRALITÉS SUR L'AIDE MULTICRITÉRE A LA DÉCISION	25



II.2.1. Définition sur l'AMAD et concepts fondamentaux	25
II.2.2. Historique et évolution des méthodes multicritères	25
II.2.3. Domaines d'application.....	26
II.2.3.1. Transport et mobilité.....	26
II.2.3.2. Environnement et développement durable.....	27
II.2.3.3. Gestion de projets et ingénierie	27
II.3. CLASSIFICATION DES MÉTHODES MULTICRITÈRES	27
II.3.1. Méthodes de surclassement	29
II.3.2. Méthodes de synthèse en une fonction unique	29
II.3.3. Méthodes interactives et hybrides.....	30
II.4. INTEGRATION DES METHODES TOPSIS, ELECTRE III ET VIKOR DANS LES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES.....	30
II.5. COMPARAISON ENTRE TOPSIS, ELECTRE III ET VIKOR.....	32
II.5.1. Différences conceptuelles et méthodologiques.....	32
II.5.2. Forces et limites de chaque approche.....	32
II.5.3. Critères de choix d'une méthode adaptée.....	33
II.5.4. Perspectives d'intégration et robustesse des approches hybrides	33
II.6. CONCLUSION	34

Chapitre III: Coordination du BIM et AMAD pour le choix de la variante routière

III.1. INTRODUCTION.....	36
III.2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	37
III.2.1. Localisation géographique	37
III.2.2. Contexte physique et environnemental	38
III.2.3. Contraintes et enjeux du projet routier.....	38
III.3. INTEGRATION DU BIM DANS LA PHASE D'AVANT-PROJET SOMMAIRE ROUTIER	39
III.3.1. Limites de la cartographie 2D et apport de la 3D	39
III.3.2. Présentation d'InfraWorks comme outil BIM	40
III.3.3. Planification des variantes routières dans InfraWorks.....	41
III.3.3.1. Importation et préparation des données du site.....	41
III.3.3.2. Définition des tracés routiers	42
III.3.3.3. Paramétrage des caractéristiques routières	42
III.3.3.4. Simulation et planification comparative.....	43
III.3.4. Extraction des données techniques, économiques et environnementales.....	44
III.4. MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE POUR LA SELECTION DE LA VARIANTE OPTIMALE	44
III.5. METHODES MULTICRITERES D'AIDE A LA DECISION D'ÉVALUATION	45

III.5.1. Application de la méthode TOPSIS	46
III.5.2. Application de la méthode ELECTRE III	48
III.5.3. Application de la méthode VIKOR.....	50
III.6. DEFINITION ET PONDERATION DES CRITERES D'EVALUATION PAR SRF	52
III.6.1. Présentation générale de l'outil SRF	52
III.6.2. Identification des critères de performance et construction de la matrice de décision	52
III.6.3. Étapes de la procédure de pondération des critères par SRF	53
III.7. CONCLUSION.....	56

Chapitre IV: Analyse, discussion et validation des résultats

IV. INTRODUCTION.....	58
IV.2. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES RESULTATS OBTENUS	58
IV.2.1. Récapitulatif des pondérations et critères.....	58
IV.2.2. Résultats des classements obtenus	60
IV.2.2.1. Résultats de la méthode TOPSIS.....	61
IV.2.2.2. Résultats de la méthode ELECTRE III.....	62
IV.2.2.3. Résultats de la méthode VIKOR	64
IV.3. DISCUSSION COMPARATIVE DES RESULTATS	65
IV.3.1. Concordance entre les classements	65
IV.3.2. Interprétation des écarts observés	65
IV.3.3. Analyse de sensibilité.....	66
IV.4. VALIDATION DE LA VARIANTE OPTIMALE PAR LE BIM.....	67
IV.4.1. Visualisation et simulation sous InfraWorks	68
IV.4.2. Vérification géométrique et environnementale.....	69
IV.5. DISCUSSION GENERALE	70
IV.6. CONCLUSION	71

Chapitre V: Avant-projet détaillé par BIM de la variante optimale

V.1. INTRODUCTION	74
V.2. PRESENTATION GENERALE DE LA VARIANTE OPTIMALE.....	74
V.3. LEVE TOPOGRAPHIQUE ET MODELISATION DU TERRAIN	75
V.3.1. Importation des points topographiques et création du MNT	76
V.3.2. Vérification et nettoyage de la surface du terrain	78
V.4. ETUDE DU TRACE EN PLAN SOUS CIVIL 3D	78
V.4.1. Importation du modèle 3D d'InfraWorks vers Civil 3D.....	79
V.4.2. Vérification et ajustement du tracé en plan sous Civil 3D	80

V.4.3. Vérification des rayons et conformité aux normes routières	81
V.5. ETUDE DU PROFIL EN LONG SOUS CIVIL 3D.....	82
V.5.1. Elaboration du profil en long et conception de la ligne de projet	82
V.5.2. Analyse et vérification des déclivités maximales.....	83
V.6. ETUDE DU PROFIL EN TRAVERS SOUS CIVIL 3D	84
V.6.1. Définition et modélisation du profil en travers type	85
V.6.2. Génération automatique des profils en travers.....	86
V.6.3. Calcul des volumes de déblais et de remblais sous civil 3D	88
V.6.4. Évaluation des surfaces et volumes des couches d'assise	90
V.7. SYNTHÈSE DES RESULTATS BIM	91
V.8. CONCLUSION	92
CONCLUSION GENERALE	93
BIBLIOGRAPHIE	95

Liste des symboles et des acronymes

BIM : Building Information Modeling (Modélisation des Informations du Bâtiment)
BDS : Building Description System (Système de description des bâtiments)
IFC : Industry Foundation Classes
CDE : Environnement Commun de Données
COBie: Construction-Operations Building Information Exchange
GSA: General Services Administration (Administration des services généraux)
NBIMS: National BIM Standard (Norme nationale BIM)
MEP: Mechanical, Electrical and Plumbing (mécanique, électricité et plomberie)
BEP: BIM Execution Plan (Plan d'Exécution BIM)
VRD : Voiries et Réseaux Divers
CAO : Conception Assistée par Ordinateur
AMAD : Analyse Multicritère d'Aide à la Décision
AHP: Analytic Hierarchy Process
ANP: Analytic Network Process
TOPSIS: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
PROMETHEE: Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
ELECTRE: ELimination Et Choix Traduisant la REalité
VIKOR: VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje
MAUT: Multi-Attribute Utility Theory
WSM: Weighted Sum Model
APS : Avant-Projet Sommaire
APD : Avant-Projet Détaillé
 X_{ij} : Valeur de l'alternative i selon le critère j
 W_j : Poids de chaque critère
 r_{ij} : Valeur normalisée de l'alternative i selon le critère j
 A^+ : Solution idéale positive
 A^- : Solution idéale négative
 E_i^+ : Distance Euclidienne de l'alternative i par rapport à la solution idéale positive
 E_i^- : Distance Euclidienne de l'alternative i par rapport à la solution idéale négative
 S_i^* : Proximité relative de l'alternative i par rapport à la solution idéale
 C_{ab} : Indice de concordance entre les alternatives a et b

D_{ab} : Indice de discordance entre les alternatives a et b

\bar{C} : Seuil de préférence (ou de concordance)

\bar{D} : Seuil d'indifférence (ou de discordance)

m : Nombre total d'alternatives

S_i : Score de satisfaction global pour l'alternative i

R_i : Mesure du regret maximal pour l'alternative i

S^* : Meilleure valeur de satisfaction globale

S^- : Pire valeur de satisfaction globale

R^* : Plus faible valeur de regret (le moins de regrets)

R^- : Plus forte valeur de regret (le plus grand regret)

U : Coefficient de stratégie (paramètre de pondération)

Q_i : Score de compromis pour l'alternative i

SRF: Outil de Système de Répartition des Facteurs

SIG: Systèmes d'Information Géographique

MNT: Modèle Numérique de Terrain

IMX: InfraWorks Model Exchange

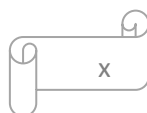
UTM: Universal Transverse Mercator

WGS84: World Geodetic System 1984

TN: Terrain Naturel

LP: Ligne de Projet

PK: Point Kilométrique



Listes des Figures

Figure I. 1: Évolution des niveaux de maturité du BIM.....	8
Figure I. 2: Évolution des dimensions du BIM.....	10
Figure I. 3: Les parties prenantes d'un projet routier.....	21
Figure II. 1: Complémentarité des méthodes pour le choix des tracés routiers.....	32
Figure III. 1: Localisation de la région d'étude en Algérie.....	38
Figure III. 2: Inondation de la route en janvier 2017 étudiée (Zaoui et al., 2020).....	39
Figure III. 3: Tracé des variantes sur une carte topographique (2D).....	40
Figure III. 4: Représentation des variantes par l'outil InfraWorks.....	41
Figure III. 5: Représentation du système de coordonnées du projet.....	42
Figure III. 6: Visualisation en 3D d'un ouvrage d'art dans l'environnement InfraWorks.....	43
Figure III. 7: Caractéristiques d'une variante de route.....	43
Figure III. 8: Aperçu de la méthodologie du processus.....	45
Figure III. 9: Organigramme des sous-étapes des trois méthodes appliquées.....	46
Figure III. 10: Interface du logiciel SRF.....	52
Figure III. 11: Saisie les informations de chaque critère.....	54
Figure III. 12: Identification des acteurs.....	54
Figure III. 13: Saisie du rang à chaque critère.....	54
Figure III. 14: Saisie des cartes blanches.....	55
Figure III. 15: Poids relative de chaque critère par SRF.....	55
Figure IV. 1: Histogramme des poids relatifs des critères.....	60
Figure IV. 2: Histogramme du classement des critères par rang.....	60
Figure IV. 3: Planification des variantes par l'outil InfraWorks.....	61
Figure IV. 4: Critères selon leur importance relative parmi les variantes proposées.....	61
Figure IV. 5: Classement des huit alternatives selon leur coefficient de proximité.....	62
Figure IV. 6: Classement des huit variantes selon la valeur nette supérieure.....	64
Figure IV. 7: Classement des huit alternatives en fonction du score de compromis.....	65
Figure IV. 8: Visualisation dynamique de la variante optimale du tracé routier.....	69
Figure V. 1: Polygone sur la zone d'étude par google Earth.....	76
Figure V. 2: Levé topographique de la zone d'étude par ArcGIS.....	77
Figure V. 3: Levé topographique importé au civil 3D.....	78
Figure V. 4: Importation du modèle 3D complet depuis InfraWorks vers Civil 3D.....	80
Figure V. 5: Conservation de la variante optimale après filtrage des tracés alternatifs dans Civil 3D.....	81
Figure V. 6: Partie du profil en long de la variante optimale choisie (Variante 3).....	83
Figure V. 7: Profil en travers type modélisé sous Autodesk Civil 3D, intégrant la structure complète de la chaussée.....	86
Figure V. 8: Profil en travers type en remblai de la variante 3 au PK 0+025 m.....	87
Figure V. 9: Profil en travers type en déblai de la variante 3 au PK 10+600 m.....	87
Figure V. 10: Profil en travers type en déblai de la variante 3 au PK 0+025 m.....	88
Figure V. 11: Profil en travers type en déblai de la variante 3 au PK 10+600 m.....	89

Listes des Tableaux

Tableau II. 1: Classification et Caractéristiques des familles de méthodes multicritères	28
Tableau III. 1: Matrice d'entrée pour les critères de performance routière	53
Tableau IV. 1: Poids relative des critères d'évaluation	59
Tableau IV. 2: Matrice d'intervalle de concordance	63
Tableau IV. 3: Matrice d'intervalle de discordance	63
Tableau IV. 4: Des poids différents pour chaque scénario	67
Tableau IV. 5: Classement des variantes à l'aide des trois méthodes précédentes	68
Tableau IV. 6: Caractéristiques de la variante optimale	70
Tableau V. 1: Paramètres géométriques et descriptifs de la variante optimale (Variante 3)....	84
Tableau V. 2: Volumes et surfaces des déblais et remblais de la variante au PK 0+025 m	89
Tableau V. 3: Volumes et surfaces des déblais et remblais de la variante au PK 10+600 m ...	90
Tableau V. 4: Surfaces et volumes des couches de la structure de chaussée au PK 0+025 m.	90
Tableau V. 5: Surfaces et volumes des couches de la structure de chaussée au PK 10+600 m	90

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement et la modernisation des infrastructures de transport constituent aujourd'hui un enjeu majeur pour le développement territorial, économique et social. Les projets routiers, en particulier, représentent un élément essentiel de la mobilité et de la connectivité, mais leur conception et leur mise en œuvre demeurent des processus complexes impliquant une multiplicité d'acteurs, de contraintes et de critères à considérer. Les méthodes traditionnelles de conception, reposant principalement sur des représentations bidimensionnelles et des échanges d'informations fragmentés, montrent leurs limites en matière de coordination, de précision et d'efficacité. Ces approches entraînent souvent des erreurs de conception, des incohérences entre les phases du projet et une difficulté à assurer une vision globale et intégrée du processus de conception et de gestion des infrastructures (**Ait-Lamallam et al., 2019**).

Dans ce contexte, l'émergence du Building Information Modeling (BIM) a profondément transformé les pratiques de conception et de gestion des projets d'ingénierie. Le BIM se définit comme un processus collaboratif basé sur une maquette numérique tridimensionnelle intelligente, intégrant l'ensemble des informations géométriques, techniques, économiques et environnementales du projet tout au long de son cycle de vie (**Kang, 2025**). Son adoption dans le domaine des infrastructures routières permet de combler les lacunes des méthodes traditionnelles, de réduire les erreurs de conception, de consolider la collaboration entre les différents intervenants et de faciliter l'échange et la mise à jour des données (**Olivatto et al., 2024**). Ainsi, le BIM offre une approche intégrée favorisant la cohérence et la continuité entre les différentes phases d'un projet, depuis la conception initiale jusqu'à la maintenance et l'exploitation (**Biancardo et al., 2020**).

La phase d'avant-projet sommaire (APS) occupe une place essentielle dans la planification d'un projet routier, puisqu'elle détermine le choix de la variante de tracé à retenir. Ce choix est souvent complexe, car il doit tenir compte de nombreux critères parfois contradictoires tels que le coût, la sécurité, les impacts environnementaux, la faisabilité technique ou encore les performances géométriques. La revue de la littérature révèle que la plupart des études réalisées dans ce domaine s'appuient encore sur l'utilisation de documents cartographiques bidimensionnels et sur des approches analytiques limitées, ne permettant pas d'exploiter pleinement les capacités offertes par les outils numériques modernes. Dans cette optique, la présente recherche propose une approche novatrice intégrant le BIM et les méthodes multicritères d'aide à la décision (AMAD) afin d'améliorer la qualité et la rationalité du processus de sélection de la variante optimale d'un tracé routier (**D'Amico et al., 2023**).

L'objectif principal de ce travail est de démontrer que la combinaison du BIM et des méthodes multicritères constitue une démarche efficace pour appuyer la prise de décision dans les projets d'infrastructures routières. Le BIM est utilisé pour modéliser, simuler et comparer plusieurs variantes de tracé dans un environnement numérique tridimensionnel réaliste, tandis que les méthodes multicritères permettent d'évaluer ces variantes selon un ensemble de critères techniques, économiques et environnementaux. Cette approche intégrée a été appliquée à un tronçon routier vulnérable aux inondations reliant Sidi Belattar à la RN 90, nécessitant un renouvellement de son tracé. Huit variantes ont été générées et modélisées à l'aide de l'outil BIM Autodesk InfraWorks, puis évaluées à l'aide des méthodes multicritères TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR. Les résultats ont montré une forte convergence entre les classements

INTRODUCTION GÉNÉRALE

obtenus, préconisant l'alternative 2 comme solution optimale pour remplacer le tronçon vulnérable. Par la suite, cette variante a été développée dans la phase d'Avant-Projet Détaillé (APD) sous Autodesk Civil 3D, afin de vérifier la conformité géométrique du tracé, d'analyser les profils en long et en travers et d'estimer les volumes de déblais et remblais, confirmant ainsi la pertinence technique du choix effectué.

La thèse est structurée en cinq chapitres complémentaires. Le premier chapitre est consacré à la présentation du Building Information Modeling (BIM). Il en expose les fondements conceptuels, l'évolution historique, les niveaux de maturité et les différentes dimensions. Ce chapitre aborde également les standards, les questions d'interopérabilité, ainsi que les outils et technologies associés, notamment leur application dans les infrastructures de transport. Une attention particulière est portée aux outils InfraWorks et Civil 3D, qui jouent un rôle central dans la mise en œuvre du BIM dans les projets routiers.

Le deuxième chapitre présente les bases théoriques de l'Aide Multicritère à la Décision (AMAD). Il décrit les principaux concepts, les classifications des méthodes multicritères, ainsi que leurs domaines d'application dans les secteurs du transport, de l'environnement et de la gestion de projets. Ce chapitre analyse en détail les méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR (Biswas et al., 2023 ; Charlotte et al., 2005), en mettant en évidence leurs différences conceptuelles, leurs avantages, leurs limites et les critères de choix d'une méthode adaptée à un contexte décisionnel spécifique, comme celui des projets routiers.

Le troisième chapitre constitue le cœur méthodologique de la recherche. Il présente la coordination entre le BIM et les méthodes AMAD dans le processus de choix de la variante optimale (Suk-Joo, 2023). Après la présentation de la zone d'étude et du contexte du projet routier, la méthodologie intégrée est développée en plusieurs étapes : modélisation des variantes sous InfraWorks, extraction des données techniques, économiques et environnementales, pondération des critères à l'aide de l'outil SRF (Système de Répartition des Facteurs), et évaluation multicritère par les méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR. Ce chapitre illustre concrètement comment l'intégration du BIM et de l'analyse multicritère peut soutenir la décision de manière plus objective et transparente.

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse, la discussion et la validation des résultats. Il présente les classements obtenus par les différentes méthodes multicritères, analyse les convergences et divergences observées et discute la sensibilité des résultats aux variations des poids et des critères. Ce chapitre inclut également la validation de la variante optimale à travers la visualisation et la simulation dans l'environnement BIM, confirmant la cohérence du choix par des vérifications géométriques et environnementales.

Enfin, le cinquième chapitre présente l'Avant-Projet Détaillé (APD) de la variante retenue, développé sous Autodesk Civil 3D. Il décrit les étapes de la modélisation topographique, la conception du tracé en plan, l'élaboration du profil en long et la modélisation des profils en travers. Les calculs de volumes de déblais et remblais, ainsi que la vérification des normes routières, permettent de valider la faisabilité technique du tracé choisi et de démontrer la continuité du processus BIM jusqu'à la phase de conception détaillée.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En somme, cette recherche contribue à la mise en place d'un cadre méthodologique intégré BIM-AMAD pour la sélection des variantes routières. Elle montre que la synergie entre la modélisation numérique 3D, la collaboration interdisciplinaire et l'analyse multicritère permet d'améliorer la qualité, la fiabilité et la durabilité des décisions dans les projets d'infrastructures de transport. L'approche proposée ouvre ainsi la voie à une ingénierie routière plus intelligente, transparente et performante, adaptée aux exigences du développement durable et à l'évolution des pratiques numériques dans le domaine de la conception des infrastructures.

**CHAPITRE I: BUILDING
INFORMATION MODELING
(BIM)**

CHAPITRE I: Building Information Modeling

I.1. INTRODUCTION

La transition numérique propulse l'industrie de la construction vers une transformation radicale, stimulée par l'émergence de technologies innovantes. Parmi elles, le Building Information Modeling (BIM) s'affirme depuis plusieurs années comme une avancée majeure, bouleversant les méthodes traditionnelles. Ce nouveau paradigme numérique optimise considérablement la conception, la réalisation et la gestion des ouvrages, en instaurant une approche intégrée, collaborative et plus performante à chaque phase du cycle de vie des projets (**Bouziani et al., 2021**).

Si les premières applications du BIM se sont développées principalement dans le domaine du bâtiment, son extension progressive aux infrastructures linéaires, et notamment aux réseaux routiers et de transport, révèle toute son importance stratégique. Dans ce contexte, le BIM ne constitue pas seulement une innovation technologique, mais un cadre organisationnel et méthodologique qui transforme en profondeur la manière de concevoir, planifier, construire et exploiter les ouvrages (**Alsofiani, 2024**).

Ce chapitre s'attache à présenter les fondements du BIM en retraçant son émergence, ses évolutions et ses différentes définitions. Il examine ensuite ses niveaux de maturité, ses dimensions, ainsi que les principaux standards et pratiques internationales qui en régissent l'usage. Enfin, une attention particulière est portée à son application au domaine des infrastructures routières, afin de mettre en lumière son rôle central dans l'accompagnement des analyses multicritères développées ultérieurement dans ce travail.

I.2. DEFINITIONS ET CONCEPTS DU BIM

I.2.1. Qu'est-ce que le BIM et la maquette numérique ?

Que signifie l'acronyme BIM ? Le terme BIM signifie Building Information Modeling, également appelé « Modélisation des Informations du Bâtiment » en français, désigne une méthode numérique initialement développée pour la construction de bâtiments. Toutefois, son utilisation s'élargit progressivement vers d'autres genres de projets d'infrastructures, témoignant de sa flexibilité et de son potentiel d'adaptation (**CEREMA, 2017**). Le Building Information Modeling, également connu sous le nom de Modélisation des Informations du Bâtiment, représente à la fois une approche collaborative de travail et un processus technologique permettant de générer, gérer et exploiter des représentations numériques fiables d'un ouvrage tout au long de son cycle de vie. Le BIM dépasse la simple modélisation géométrique: il intègre des données alphanumériques (techniques, fonctionnelles, économiques, environnementales, etc.) liées aux objets de la maquette (**RGRA, 2017**).

La maquette numérique, quant à elle, constitue l'élément central de ce processus. Elle se définit comme une représentation virtuelle 3D de l'ouvrage, enrichie d'informations structurées et interopérables. Contrairement aux plans 2D traditionnels, la maquette numérique permet de visualiser et de simuler le projet de manière plus réaliste, d'anticiper les conflits et de faciliter la prise de décision.

CHAPITRE I: Building Information Modeling

Ainsi, le BIM correspond au processus collaboratif et méthodologique, tandis que la maquette numérique en est l'outil principal de représentation et de gestion des données.

I.2.2. Historique

L'histoire du BIM (Building Information Modeling) trouve ses racines dans les années 1960, lorsque Douglas Engelbart et Charles Eastman ont développé les premières idées de modélisation numérique du bâtiment. En 1970, Eastman propose le Building Description System (BDS), qui introduit le concept d'un modèle numérique unique intégrant toutes les informations du projet. Les années 1980 et 1990 voient l'essor de la CAO 3D (conception assistée par ordinateur), avec des logiciels comme AutoCAD (1982) et ArchiCAD (1984), ce dernier étant pionnier dans l'intégration d'un « modèle virtuel de bâtiment ». Durant cette période, le format IFC (Industry Foundation Classes), créé par l'International Alliance for Interopérabilité, facilite l'échange standardisé de données entre différentes plateformes. Le concept de « BIM » se diffuse largement au début des années 2000, en grande partie sous l'impulsion d'Autodesk (UNECE, 2021). Il est décrit comme une démarche collaborative visant à administrer l'ensemble du cycle de vie d'une construction à partir d'un modèle numérique centralisé. Dans les années 2010, l'adoption massive du BIM a été remarquable, encouragée par des normes internationales telles que l'ISO 16739 et l'ISO 19650, ainsi que par des initiatives gouvernementales, comme l'imposition du BIM pour les marchés publics au Royaume-Uni dès 2016. Depuis 2020, le BIM se connecte à l'intelligence artificielle, à la réalité augmentée, aux jumeaux numériques et s'étend à toutes les infrastructures, dans une logique d'OpenBIM et de gestion durable des ouvrages.

I.2.3. Les Niveaux de maturité du BIM

L'évolution de l'utilisation du Building Information Modeling est généralement décrite à travers des niveaux de maturité, reflétant le degré d'intégration, de collaboration et de gestion de l'information au sein d'un projet. Ces niveaux peuvent être résumés comme suit :

➤ Niveau 0 : CAO conventionnelle

L'usage du BIM, à ce stade, se limite à la conception assistée par ordinateur (CAO) en deux dimensions (2D), principalement destinée à la production de dessins techniques tels que les plans, les coupes et les élévations. Les échanges d'informations entre les divers acteurs du projet s'effectuent sous forme de documents papier ou de fichiers électroniques non structurés, ce qui restreint la fluidité et la traçabilité des données. Il n'existe pas de véritable collaboration entre les parties prenantes, chaque intervenant travaillant de manière isolée, sans intégration ni coordination effective.

➤ Niveau 1 : Modélisation partielle et structuration des données

Actuellement, l'introduction progressive de la modélisation 3D est effectuée pour certaines représentations, tandis que la 2D reste le principal support documentaire. Mise en place d'un environnement commun de données (CDE) destiné à centraliser et partager les fichiers du projet. Chaque discipline élabore et gère son propre modèle, sans véritable intégration interdisciplinaire.

➤ Niveau 2 : BIM collaboratif

CHAPITRE I: Building Information Modeling

À ce stade, l'utilisation de modèles 3D intelligents qui combinent des données géométriques et sémantiques, est désormais systématique. Les modèles sont partagés et coordonnés au moyen de formats interopérables tels que l'IFC, facilitant l'échange et la compréhension des données entre les divers intervenants. Une véritable collaboration s'instaure entre les parties prenantes du projet, notamment les architectes, les ingénieurs, les maîtres d'ouvrage et les entreprises. Le BIM de niveau 2 constitue aujourd'hui une exigence dans plusieurs marchés publics, en particulier au Royaume-Uni et dans véritables pays européens.

➤ Niveau 3 : BIM intégré (IBIM)

Ce niveau marque le passage à un modèle centralisé et unique, accessible en direct par toutes les parties concernées du projet. Il offre une administration totalement intégrée du cycle de vie du projet, incluant la conception, la construction, l'exploitation et l'entretien. L'interopérabilité est renforcée grâce à l'utilisation de plateformes collaboratives basées sur le cloud, favorisant un échange de données continu et sécurisé.

Le BIM intégré s'inscrit également dans la vision du jumeau numérique, offrant une continuité numérique totale du projet et constituant un support stratégique pour l'optimisation de la performance, la durabilité et la gestion à long terme des infrastructures.

La Figure I. 1 illustre l'évolution progressive des niveaux de maturité du BIM, depuis la CAO 2D (Niveau 0) jusqu'à l'IBIM intégré (Niveau 3), traduisant une montée en collaboration et en intégration tout au long du cycle de vie du projet.

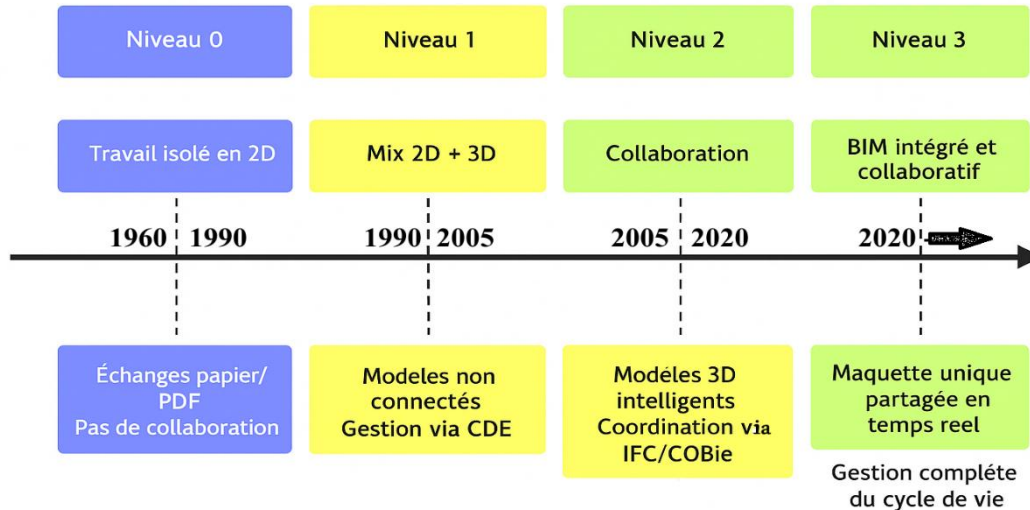


Figure I. 1: Évolution des niveaux de maturité du BIM

I.2.4. Les Dimensions du BIM

Au-delà des niveaux de maturité, le BIM est également décliné en dimensions correspondant à l'enrichissement progressif du modèle numérique par des informations supplémentaires, couvrant ainsi plusieurs aspects du cycle de vie d'un projet comme illustre dans la Figure I. 2. Ces dimensions sont généralement décrites comme suit :

CHAPITRE I: Building Information Modeling

➤ 3D : Modélisation géométrique

La modélisation 3D correspond à la représentation tridimensionnelle de l'ouvrage, permettant de reproduire fidèlement sa forme et ses caractéristiques visuelles. Elle englobe essentiellement des données géométriques et spatiales, indispensables pour établir avec exactitude les dimensions, les volumes et la localisation des divers composants du projet. L'utilisation du modèle 3D favorise une meilleure visualisation du projet et constitue un outil efficace pour la détection des conflits, en identifiant en amont les interférences entre les composants.

➤ 4D : Planification (temps)

La modélisation 4D introduit la dimension temporelle au modèle 3D, en y intégrant les données liées à la planification du projet. Elle consiste à associer les éléments du modèle numérique au calendrier des travaux, afin de relier chaque composant aux différentes phases de réalisation. Cette approche permet de simuler les séquences de construction et d'anticiper leur enchaînement, ce qui facilite l'optimisation de la planification et améliore la coordination entre les acteurs.

➤ 5D : Estimation et gestion des coûts

La modélisation 5D correspond à l'intégration des données économiques dans le modèle numérique, en plus des aspects géométriques et temporels. Elle offre la possibilité de réaliser des prévisions budgétaires dynamiques et de surveiller l'évolution des coûts en direct, en tenant compte des décisions de conception ou des changements apportés au projet. Grâce à cette dimension, les acteurs disposent d'un outil d'aide à la décision qui facilite l'analyse de la rentabilité et l'optimisation financière du projet.

➤ 6D : Durabilité et performance

La modélisation 6D intègre au modèle numérique les informations relatives à la durabilité, à l'efficacité énergétique et à l'impact environnemental de l'ouvrage. Elle permet d'analyser les performances énergétiques et d'évaluer différents scénarios de conception durable, afin de favoriser des choix respectueux de l'environnement. Cette dimension constitue également un support essentiel pour l'obtention de certifications environnementales telles que HQE, LEED ou BREEAM.

➤ 7D : Exploitation et maintenance

Le modèle 7D confère au BIM le rôle d'une base de données complète pour la gestion et le suivi du patrimoine bâti, en regroupant des informations précises sur les équipements, les matériaux, les plannings de maintenance et les interventions à venir. Cette dimension facilite la transition entre l'étape de construction et celle d'exploitation, garantissant une continuité des données pertinentes pendant toute la durée de vie du projet.

➤ 8D : Sécurité

La modélisation 8D intègre l'aspect relatif à la santé et à la sécurité des usagers ainsi que des équipes travaillant sur le site. Elle améliore le modèle BIM en intégrant des informations relatives aux risques éventuels, aux normes légales et aux mesures préventives à mettre en œuvre. Grâce à cette dimension, il devient possible de planifier les procédures de sécurité, d'anticiper les situations dangereuses et de renforcer la protection des personnes tout au long du cycle de vie de l'ouvrage.

CHAPITRE I: Building Information Modeling

➤ 9D : Gestion du cycle de vie et déconstruction.

La modélisation 9D intègre au modèle BIM des informations permettant la traçabilité complète des matériaux et des composants utilisés dans l'ouvrage. Elle simplifie le processus de recyclage, de réemploi et de démantèlement du bâtiment en fin de vie, en fournissant des informations précises sur le type et la quantité des composants. Cet aspect aide à favoriser une authentique économie circulaire dans le domaine de la construction, en mettant en valeur les ressources déjà existantes. Elle offre aussi la possibilité de minimiser l'empreinte écologique du projet en prévoyant la réutilisation des composants dès la phase de design.

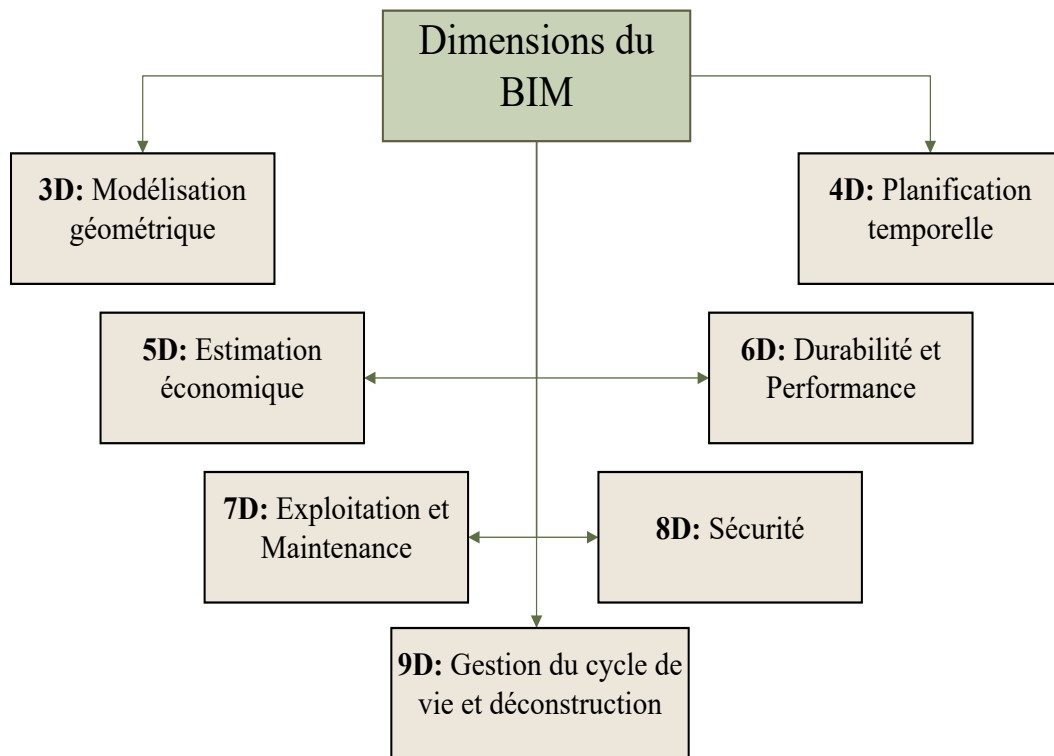


Figure I. 2: Évolution des dimensions du BIM

I.2.5. Standards et interopérabilité dans le BIM

L'un des fondements du Building Information Modeling (BIM) repose sur la capacité des acteurs et des logiciels à échanger des informations de manière cohérente et pérenne tout au long du cycle de vie d'un projet. Dans le cas des infrastructures routières, cette question est particulièrement cruciale, car la conception et la réalisation impliquent une diversité de métiers: géomètres, ingénieurs routiers, urbanistes, architectes, entreprises de construction ou encore gestionnaires d'ouvrages, chacun mobilisant ses propres outils numériques. Sans mécanisme commun de structuration des données, la continuité et la fiabilité des échanges seraient rapidement compromises (Arayici & Aouad, 2010).

Pour surmonter cette difficulté, des standards ouverts ont été élaborés afin d'assurer une communication claire et une interopérabilité effective entre les différentes plateformes. Parmi eux, deux formats occupent une place centrale :

CHAPITRE I: Building Information Modeling

❖ IFC (Industry Foundation Classes):

Ce standard international, défini par l'organisme buildingSMART et reconnu par l'ISO, offre un langage neutre acceptant de décrire et de transmettre les objets numériques indépendamment des logiciels utilisés. Dans le contexte routier, il ne se limite pas à la géométrie des éléments (tracé, structure de chaussée, ouvrages d'art, etc.), mais intègre également leurs caractéristiques fonctionnelles et techniques. L'IFC constitue ainsi un support essentiel pour assurer la continuité numérique entre les étapes d'étude, de construction et d'exploitation, tout en garantissant la conservation des données à long terme.

❖ COBie (Construction-Operations Building Information Exchange):

Ce standard est davantage orienté vers la gestion des informations liées aux équipements et aux actifs. Il propose une structuration des données permettant d'alimenter efficacement les processus d'exploitation et de maintenance. Dans le cadre d'un projet routier, il permet de structurer et de transférer efficacement les informations relatives aux matériaux utilisés, aux dispositifs de sécurité, aux réseaux intégrés à la chaussée ainsi qu'aux ouvrages annexes, tout en limitant le recours aux supports papier et aux bases de données non organisées.

En intégrant ces standards à la maquette numérique, le BIM favorise non seulement la collaboration entre les différents intervenants, mais aussi la traçabilité, la fiabilité et la durabilité des informations. Leur intégration représente désormais un préalable essentiel au déploiement réussi du BIM dans les projets d'infrastructures de transport, où la complexité des processus et la longévité des ouvrages imposent une gestion des données à la fois rigoureuse et interopérable.

I.2.6. L'adoption et Mondialisation du BIM

Le Modèle d'information du bâtiment (BIM) est aujourd'hui reconnu comme une norme internationale incontournable dans les processus de conception, de construction et de gestion des bâtiments et des infrastructures. Plus qu'un simple outil technologique, il s'agit d'une approche collaborative intégrée qui facilite la centralisation et le partage des données tout au long du cycle de vie d'un projet. L'adoption extensive du BIM reflète l'ambition des entités publiques et privées de réinventer les méthodes professionnelles et d'encourager une interopérabilité plus poussée entre les divers acteurs du domaine. On peut observer l'adoption du BIM à l'échelle mondiale dans divers pays, dont (Talha et al., 2022) :

➤ Royaume-Uni

Le Royaume-Uni a été le premier pays à mettre en place une politique claire en matière de BIM. Votre formation s'est basée sur des données allant jusqu'à octobre 2023. Depuis 2016, l'application du BIM de niveau 2 est imposée pour tous les projets qui bénéficient d'un financement public. Ce choix stratégique a permis de positionner le Royaume-Uni comme un leader mondial dans le domaine et a inspiré de nombreux autres pays européens.

➤ Allemagne

En Allemagne, le BIM a été introduit progressivement dans les marchés publics à partir de 2017 pour les projets de grande envergure. Depuis 2020, son utilisation est imposée pour tous les contrats de construction liés au gouvernement fédéral.

CHAPITRE I: Building Information Modeling

➤ **Espagne**

L'Espagne a imposé la fonction du BIM pour certains marchés publics de construction à compter de 2018, et pour les projets d'infrastructure dès 2019, en accord avec les directives de l'Union européenne.

➤ **Italie**

L'Italie a instauré en 2019 une obligation d'utiliser le BIM pour les marchés publics d'un montant supérieur à 100 millions d'euros, avec une feuille de route prévoyant une généralisation progressive à d'autres types de projets.

➤ **France**

Le « Plan BIM 2022 » a été lancé par la France en 2017 dans le but de promouvoir l'adoption du BIM dans le secteur de la construction. Même s'il n'y a pas de loi universelle imposée, ce projet a fortement encouragé l'adoption du BIM, notamment pour les projets publics et les gros programmes immobiliers.

➤ **Suisse**

L'essor du BIM a été accéléré à partir de 2016 suite à la fondation de "Bauen digital Schweiz". Depuis 2021, l'OFROU a rendu obligatoire son usage pour plusieurs projets d'infrastructure. Sans un mandat national universel, la Suisse progresse néanmoins vers une normalisation graduelle par le biais d'initiatives publiques et privées.

➤ **Corée du Sud**

Depuis 2016, l'emploi du BIM est imposé pour les grands projets publics de grande envergure en Corée du Sud. Le pays a aussi instauré ses propres standards nationaux (KBIMS) afin d'uniformiser les pratiques.

➤ **Japon**

En 2023, le Japon a instauré une réglementation imposant l'utilisation du BIM dans les projets de travaux publics. Cette mise en œuvre se correspond dans une démarche nationale visant à moderniser le domaine de la construction.

➤ **Chine**

En Chine, l'encouragement du BIM a pris un tournant significatif en 2016, surtout pour les grands projets d'infrastructure et urbains tels que les aéroports, les gares et les gratte-ciels. Même si son utilisation n'est pas encore rendue obligatoire au niveau universel, elle est vivement recommandée par l'État.

➤ **Pays nordiques (Finlande, Norvège, Suède, Danemark)**

L'approche du BIM est pionnière dans les pays nordiques. Depuis la fin des années 2000, la Finlande applique des normes fondées sur l'IFC. Au cours des années 2010, la Norvège, la Suède et le Danemark ont aussi mis en place progressivement le BIM pour leurs projets publics.

CHAPITRE I: Building Information Modeling

➤ États-Unis

L'origine du BIM aux États-Unis remonte aux années 1970, quand des chercheurs comme Charles Eastman ont établi les fondements conceptuels de la modélisation numérique dans le domaine de la construction. Toutefois, c'est seulement durant les années 1990, avec l'essor des logiciels spécialisés et la publication en 1997 de la première version du format international IFC, que son utilisation a réellement commencé à s'imposer dans la pratique. Sa diffusion s'est ensuite accélérée dans les années 2000, sous l'impulsion de la General Services Administration (GSA) et du US Army Corps of Engineer, qui en ont rendu l'usage obligatoire dans leurs projets. En 2010, le Wisconsin a été le premier État à mettre en place l'obligation du BIM pour les marchés publics au-delà de certains montants financiers. Bien qu'aucune loi fédérale n'ait instauré son obligation à l'échelle nationale, le BIM est aujourd'hui largement répandu dans les pratiques professionnelles, soutenu par des standards tels que le NBIMS (National BIM Standard).

➤ Canada

Au Canada, l'adoption du BIM se fait principalement au niveau provincial. Certaines administrations, notamment au Québec et en Alberta, ont instauré dès 2018 l'obligation de recourir au BIM pour les projets publics.

➤ Brésil

Le Brésil a lancé en 2018 sa stratégie nationale pour la diffusion du BIM, appelée Estratègia BIM BR. Le but est d'imposer l'usage du BIM dans les projets publics fédéraux selon une mise en œuvre graduelle, avec une adoption complète envisagée pour 2028.

➤ Chili

Le Chili figure parmi les nations d'Amérique latine les plus avancées. Depuis 2019, le gouvernement a instauré depuis 2019 une stratégie nationale dénommée Plan BIM Chile, visant à rendre obligatoire l'utilisation du BIM dans les projets publics d'ici 2025.

➤ Australie

L'Australie a opté pour une mise en œuvre progressive du BIM. Depuis 2016, des États comme le Queensland et la Nouvelle-Galles du Sud imposent la fonction du BIM pour les projets de grande envergure financés par des fonds publics.

➤ Inde

En Inde, bien que l'adoption du BIM soit encore disparate, elle a connu une forte progression depuis les années 2010, surtout pour les grands projets urbains et d'infrastructures. Le gouvernement encourage son adoption à travers des initiatives telles que la Mission Villes Intelligentes. Même en l'absence d'une obligation légale nationale, de plus en plus d'entités publiques et privées commencent à l'incorporer graduellement dans leurs initiatives.

➤ Emirats arabes unis

CHAPITRE I: Building Information Modeling

Depuis 2014, Dubaï a imposé l'utilisation du BIM pour les grands projets et les constructions dépassant une superficie spécifiée. Cette demande a rapidement été étendue à d'autres types de projets dans les Émirats arabes unis.

➤ **Arabie saoudite**

Dans le contexte de sa stratégie Vision 2030, l'Arabie saoudite a mis en place le BIM pour les projets publics et les mégaprojets urbains stratégiques à partir de 2018, sans imposer une obligation stricte au niveau national, mais en offrant une incitation significative.

➤ **Qatar**

Le BIM a été largement mis en œuvre pour les projets associés à la Coupe du Monde 2022 (stades, infrastructures de transport et d'hébergement). Le gouvernement soutient particulièrement l'adoption dans le cadre des projets d'infrastructures publics.

➤ **Afrique du Sud**

En Afrique, c'est l'Afrique du Sud qui a fait le plus de progrès en matière d'adoption du BIM. Depuis le début des années 2010, de nombreux projets d'infrastructure de grande envergure (dans les domaines du transport, des stades et des édifices publics) incorporent la technologie BIM. Même s'il n'y a pas encore d'exigence nationale, les grandes entreprises de construction et d'ingénierie recommandent vivement son adoption.

I.3. TECHNOLOGIES ET OUTILS BIM

Les outils de modélisation BIM constituent le cœur opérationnel de l'approche numérique dans la gestion des projets de construction. Ils permettent de modéliser, visualiser et analyser efficacement les éléments d'un projet, tout en facilitant la coordination entre les différents acteurs. Certains logiciels se sont ainsi imposés comme des références inévitables.

Dans le domaine de la modélisation architecturale, Autodesk Revit occupe une place centrale dans le processus BIM. Il offre la possibilité de créer une maquette numérique intégrant simultanément les dimensions architecturales, structurelles et techniques (MEP). Sa force principale réside dans la modélisation paramétrique : chaque élément inséré (murs, planchers, ouvertures, réseaux) est intelligent et porteur de données. Cette spécificité permet de générer automatiquement plans, coupes, nomenclatures et quantitatifs. Revit s'avère ainsi particulièrement adapté aux projets pluridisciplinaires nécessitant une forte coordination entre intervenants.

En parallèle, Graphisoft ArchiCAD constitue une alternative largement répandue dans le milieu architectural. Il se distingue par son ergonomie et sa compatibilité avec les standards ouverts, notamment l'IFC, ce qui en fait un outil privilégié pour les architectes évoluant dans des environnements collaboratifs multi-logiciels (Schrayen et al., 2012). De son côté, Allplan Architecture adopte une approche plus technique, orientée vers la précision des détails constructifs et la production documentaire.

Concernant la modélisation des structures, plusieurs solutions se démarquent. Tekla Structures (Trimble) est considéré comme la référence mondiale pour la modélisation des charpentes

CHAPITRE I: Building Information Modeling

métalliques et des ouvrages en béton armé, grâce à la précision de ses assemblages et à son intégration avec les processus de préfabrication. Revit Structure, intégré dans la suite Revit, se distingue par son aptitude à communiquer avec les autres domaines du projet. Advance Steel (Autodesk), qui se concentre sur l'acier, est couramment employé pour la conception précise et la fabrication de structures métalliques. Finalement, Robot Structural Analysis offre la possibilité d'effectuer des analyses sophistiquées et des calculs de dimensionnement, tout en s'incorporant dans le flux de données BIM.

I.3.1. Outils BIM dans les projets routiers

L'intégration des outils BIM dans le domaine des infrastructures routières s'impose aujourd'hui comme un levier stratégique pour la conception, la gestion et la maintenance des projets contemporains. Ces technologies s'articulent autour de la maquette numérique, véritable socle du projet, qui centralise et organise l'ensemble des informations. Elle permet la production de représentations précises et intégrées, assurant ainsi une maîtrise renforcée de l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage.

Dans un premier temps, les logiciels de modélisation tels qu'Autodesk Civil 3D, InfraWorks ou Bentley OpenRoads Designer se distinguent par leur capacité à représenter avec rigueur la géométrie des tracés, les profils en long et en travers, auxquels s'ajoutent les différentes composantes fonctionnelles telles que la signalisation ou les dispositifs d'aménagement. La modélisation 3D ne se limite pas à fournir une représentation précise du projet, elle permet aussi de repérer tôt les incohérences et favorise la communication entre différentes disciplines (**Berdiglyjov & Popa, 2019**).

Par ailleurs, les outils d'analyse du trafic tels que VISSIM et SYNCHRO apportent une dimension prospective à la planification des projets routiers. Ils permettent en effet de simuler les flux de circulation, d'évaluer la capacité des infrastructures et d'anticiper les risques liés à la congestion. Leur apport est déterminant dans l'optimisation géométrique des carrefours, ainsi que dans le perfectionnement de la sécurité et de la fluidité du trafic.

La gestion collaborative des projets s'appuie sur des plateformes spécialisées, parmi lesquelles on peut citer Autodesk Navisworks, BIM 360 ou encore Bentley ProjectWise. Ces outils contribuent à organiser la planification, à assurer le suivi et à faciliter la coordination entre les différentes phases du projet. Par ailleurs, la centralisation des données, combinée à leur interopérabilité, renforce la synergie entre disciplines, réduit les risques d'erreurs et contribue à une meilleure maîtrise des délais ainsi que des coûts. Dans ce cadre, l'usage de standards ouverts tels que IFC et COBie s'avère essentiel pour assurer un échange fiable des données entre logiciels hétérogènes et garantir la continuité numérique tout au long du projet.

Enfin, dans les phases de coordination et de contrôle qualité, des solutions comme Navisworks et Solibri Model Checker se révèlent indispensables. Elles permettent de regrouper plusieurs modèles disciplinaires, d'identifier les éventuels conflits et d'améliorer la coordination avant même la phase de construction. De plus, les évolutions récentes ou l'intégration BIM-SIG (InfraWorks + ArcGIS), ouvrent la voie vers des jumeaux numériques capables d'accompagner non seulement la construction mais aussi l'exploitation et la maintenance des réseaux routiers.

CHAPITRE I: Building Information Modeling

Ainsi, l'adoption conjointe de ces outils BIM favorise l'émergence d'un écosystème numérique intégré, capable d'accompagner efficacement chaque étape du cycle de vie des infrastructures routières. Cette approche constitue un atout majeur pour répondre aux exigences croissantes de précision, de durabilité et d'efficacité dans la conception et la gestion des réseaux routiers.

I.3.1.1. Avantages des outils BIM pour Projets routiers

❖ InfraWorks :

- Permet de concevoir dans un contexte territorial réel (données SIG, topographie, imagerie satellite).
- Idéal pour comparer plusieurs variantes d'aménagement rapidement.
- Avantage principal : visualisation stratégique à grande échelle, facilitant les décisions en phase préliminaire.

❖ Autodesk Civil 3D :

- Conçu pour les infrastructures linéaires (routes, canalisations, réseaux divers).
- Génère des profils, tracés et volumes de terrassement avec un haut niveau de précision.
- Avantage principal : optimisation des variantes de tracés et estimation fiable des volumes de travaux.

I.3.1.2. Avantages des outils BIM pour Ouvrages d'art ou bâtiments

❖ Revit :

- Modélisation paramétrique qui permet d'ajuster automatiquement tous les éléments liés lors d'une modification (plans, coupes, nomenclatures).
- Grande précision dans la représentation architecturale, structurelle et MEP (mécanique, électricité, plomberie).
- Avantage principal : centralisation des disciplines dans une seule maquette intégrée, limitant les incohérences.

❖ ArchiCAD :

- Logiciel orienté architectes, plus intuitif que Revit pour la conception créative.
- Favorise une approche ouverte avec le standard IFC (interopérabilité).
- Avantage principal : liberté de conception alliée à une compatibilité forte avec d'autres outils BIM.

❖ Tekla Structures :

- Spécialisé dans la représentation numérique des structures métalliques et en béton armé.
- Excellence dans la conception détaillée des structures composées d'acier et de béton armé.

CHAPITRE I: Building Information Modeling

- Gestion précise des assemblages, ferrailages et plans d'exécution.
- Avantage principal : fiabilité dans la fabrication et la préfabrication, avec peu d'écarts entre modèle et chantier.

I.3.1.3. Avantages des outils BIM pour Coordination et gestion

❖ Navisworks :

- Outil de coordination et de détection de conflits.
- Permet de fusionner plusieurs maquettes issues de logiciels différents.
- Contribue à réduire les risques d'erreurs et de reprises sur chantier.
- Avantage principal: réduction notable des erreurs sur chantier grâce à l'intégration des dimensions temporelle (4D) et financière (5D) dans la simulation du projet.

❖ BIM 360 (Autodesk Construction Cloud) :

- Plateforme collaborative en ligne pour partager modèles, documents et rapports.
- Facilite la traçabilité en direct des modifications et commentaires.
- Avantage principal : communication fluide entre tous les acteurs, même à distance.

I.4. BIM DANS LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

L'intégration de la modélisation de l'information du bâtiment (BIM) dans le domaine des infrastructures de transport représente une avancée majeure qui transforme en profondeur la planification, la conception, la construction et la gestion des projets routiers et ferroviaires. Alors que les méthodes traditionnelles reposaient sur une coordination fragmentée entre disciplines, le BIM propose une plateforme numérique centralisée, permettant de consolider toutes les données techniques, économiques et environnementales au sein d'un modèle unique.

Ce modèle va au-delà de la simple représentation tridimensionnelle : il intègre également les dimensions du temps (4D), des coûts (5D), de la durabilité (6D) et de la gestion du cycle de vie (7D). Cette approche offre ainsi la possibilité de simuler l'évolution des chantiers, d'anticiper les contraintes liées aux ressources, d'améliorer la précision des estimations budgétaires et de renforcer la fiabilité de la prise de décision.

Dans le domaine des infrastructures linéaires, pareillement les routes et les voies ferrées, où les projets se caractérisent par leur grande échelle, leur complexité technique et leurs impacts environnementaux et sociaux, le BIM apparaît comme un levier stratégique. Il favorise la réduction des incertitudes, améliore la clarté vis-à-vis des parties prenantes et contribue à une conception plus sûre, durable et optimisée.

I.4.1. Processus de mise en œuvre du BIM dans les infrastructures routières

L'adoption du BIM dans le domaine des infrastructures routières transforme profondément la manière de concevoir, de construire et de gérer les projets. Contrairement aux approches traditionnelles, le BIM centralise toutes les données dans un modèle numérique unique,

CHAPITRE I: Building Information Modeling

permettant une orchestration précise de la planification en tenant compte des contraintes de tracé, de géométrie, de sécurité et d'intégration environnementale. La mise en œuvre du BIM se déroule de façon ordonnée. Elle débute par l'établissement des objectifs, incluant la définition des règles d'échange de données, puis se poursuit par l'élaboration du plan d'exécution BIM (BEP), véritable feuille de route pour l'ensemble du projet. Vient ensuite la phase de modélisation collaborative des informations, où chaque discipline (génie civil, VRD, structure) développe sa partie du modèle commun.

Cette approche facilite notamment la simulation des variantes de tracé, l'anticipation des volumes de terrassement, l'optimisation des ouvrages d'art et la détection des conflits techniques entre disciplines (géotechnique, hydraulique, réseaux, signalisation, etc.). La visualisation tridimensionnelle et les représentations interactives offrent également une meilleure compréhension des impacts du projet sur le territoire, ce qui renforce la concertation publique et la transparence des décisions. Une fois le modèle consolidé, il est utilisé pour la planification fine du chantier (4D), l'estimation des coûts (5D) et le suivi de la construction, avant d'être livré au maître d'ouvrage pour exploiter le jumeau numérique durant toute la durée de vie de l'infrastructure.

La construction d'infrastructures constitue un enjeu majeur, car la qualité de la conception routière est directement liée à la planification et à la sécurité des usagers. Le BIM, en permettant la création de modèles virtuels intelligents et évolutifs, favorise une observation dynamique du cycle de vie des infrastructures et contribue à l'identification précoce des problèmes de conception. Cela se traduit par une optimisation continue, améliorant la précision, l'efficacité et la durabilité dès les premières phases de planification (**Gan & Ge, 2023**).

Par ailleurs, les avancées récentes en matière de modélisation paramétrique et de traitement des données renforcent la capacité du BIM à analyser des zones difficiles d'accès pour les opérateurs, Ce processus contribue à accroître la rigueur des évaluations et à optimiser durablement la gestion des actifs routiers (**D'Amico et al., 2023**).

Enfin, le développement de cadres d'évaluation de l'adoption du BIM a permis d'identifier des catégories clés pour sa mise en œuvre, telles que le leadership, la gestion des parties prenantes, la planification stratégique, les ressources humaines et matérielles, les processus, ainsi que l'analyse et la gestion des connaissances. Ces indicateurs constituent des leviers essentiels pour accompagner les entreprises de construction dans l'intégration progressive et efficace du BIM (**Doan et al., 2019**).

I.4.1.1. Phase Avant-Projet Sommaire (APS)

L'Avant-Projet Sommaire représente l'étape initiale où l'usage du BIM prend toute son importance dans la planification et conception des infrastructures routières. Cette phase vise principalement à définir les orientations générales du tracé et à comparer plusieurs alternatives en fonction de leur faisabilité technique, de leurs coûts prévisionnels ainsi que de leurs incidences environnementales et sociales. Le recours au BIM présente à ce stade plusieurs avantages :

CHAPITRE I: Building Information Modeling

- Intégration des données topographiques, géologiques et environnementales dans un modèle unique.
- Exploration de différentes variantes de tracé, prenant en considération les contraintes liées à la géométrie, à la sécurité et à l'insertion paysagère.
- Estimation préliminaire des volumes de terrassement et des coûts à travers les dimensions 4D et 5D.
- Amélioration entre les parties prenantes grâce aux représentations 3D interactives, qui favorisent la compréhension du projet et soutiennent les démarches de concertation publique.

Ainsi, l'APS appuyé par le BIM dépasse la fonction d'une esquisse de départ pour devenir un véritable dispositif d'analyse multicritère, permettant de retenir un tracé techniquement fiable, économiquement pertinent et aligné sur les exigences de durabilité.

I.4.1.2. Phase de conception détaillée (APD)

La phase de conception détaillée se réfère à la phase où les décisions prises lors de l'APS sont perfectionnées et converties en solutions techniques spécifiques. Dans ce contexte, le BIM s'impose comme un outil central en favorisant une modélisation paramétrique et collaborative, où chaque discipline qu'il s'agisse du tracé routier, des structures, de l'hydraulique, des réseaux ou de la signalisation contribue à l'élaboration d'un modèle unique et cohérent. Les principaux apports du BIM durant l'APD peuvent être résumés comme suit :

- Identification anticipée des interférences techniques entre disciplines grâce aux processus de détection des conflits.
- Amélioration de la conception des ouvrages d'art et des systèmes de sécurité, grâce à l'optimisation issue des simulations.
- Amélioration de la planification est réalisée en intégrant les éléments temporels (4D) et en affinant l'estimation des coûts (5D).
- Prise en compte élargie des dimensions environnementales et sociales (6D), permettant d'anticiper plus efficacement les impacts et l'établissement de mesures d'atténuation appropriées.

En somme, l'APD constitue l'étape charnière entre la faisabilité et la mise en œuvre opérationnelle du projet. Elle assure la rigueur et la cohérence technique du modèle BIM, éléments essentiels avant le passage à la phase de construction.

I.4.1.3. Phase de construction

Au cours de la phase de construction, le BIM se transforme en un outil central de pilotage et de coordination. Il permet notamment de :

- Organiser le déroulement du chantier et en planifier les différentes étapes grâce à la dimension 4D.
- Contrôler l'avancement réel des travaux en le confrontant aux prévisions.
- Améliorer l'échange d'informations entre le donneur d'ordre (le maître d'ouvrage), les entreprises et les sous-traitants par l'utilisation d'un modèle collaboratif.

CHAPITRE I: Building Information Modeling

- Enregistrer en temps réel les modifications effectuées sur site, garantissant la traçabilité et la fiabilité des données pour la phase d'exploitation future.

De cette manière, le BIM contribue à limiter les retards, à maîtriser les coûts et à réduire les erreurs d'exécution, tout en assurant une meilleure qualité de l'ouvrage livré.

I.4.1.4. Phase d'exploitation et maintenance

Dès la mise en service de l'infrastructure, le BIM évolue en véritable réplique numérique de l'ouvrage, constituant un outil stratégique pour sa gestion à long terme. Son utilisation rend possible :

- Conservation et la structuration de l'ensemble des données issues de la construction et des interventions ultérieures.
- Suivi de l'état des chaussées et des ouvrages grâce à des inspections intégrées directement dans le modèle.
- Programmation efficace des interventions de maintenance, qu'elles soient de nature préventive ou correctives, en tenant compte des ressources et des coûts.
- Évaluation de la durabilité (6D) ainsi que des performances environnementales et énergétiques.
- L'accompagnement des travaux de réhabilitation ou d'extension, en s'appuyant sur un modèle constamment mis à jour.

En définitive, le BIM garantit une chaîne numérique continue entre les étapes de conception, de réalisation et d'exploitation, permettant une gestion plus durable, efficiente et optimisée des infrastructures tout au long de leur cycle de vie (7D).

I.4.2. Collaboration et communication dans le BIM

Le BIM se distingue par sa capacité à améliorer la collaboration entre les parties prenantes d'un projet. En centralisant les données dans une plateforme commune, il garantit la traçabilité des informations et une meilleure coordination entre les différents intervenants (maîtres d'ouvrage, ingénieurs, urbanistes, entreprises). Comme l'illustre la Figure I.3, les projets routiers mobilisent une diversité de spécialistes : le géomètre, l'ingénieur chargé du choix des variantes dans la phase initiale, les ingénieurs en tracé routier et en ouvrages d'art, ainsi que les ingénieurs en hydraulique, entre autres.

La visualisation 3D et les représentations interactives constituent des outils puissants pour réduire les risques d'erreurs et faciliter le dialogue entre parties prenantes. Elles permettent de détecter rapidement les incompatibilités techniques et de limiter les malentendus grâce à une compréhension partagée du projet. Cette approche collaborative assure une meilleure maîtrise des coûts et des délais, tout en accroissant la fiabilité et la qualité finale des ouvrages.

De plus, le BIM contribue à une construction plus durable en intégrant, dès la phase de conception, des critères environnementaux et de gestion future des infrastructures. Il peut être associé à des systèmes de certification environnementale, afin d'analyser les bénéfices, les contraintes et les ajustements nécessaires pour une intégration optimale dans une démarche de construction écologique (**GhaffarianHoseini et al., 2017**).

CHAPITRE I: Building Information Modeling

En somme, le BIM dans les infrastructures routières ne se limite pas à une simple innovation technologique. Il constitue un véritable cadre collaboratif qui associe conception optimisée, communication fluide et durabilité, tout en prenant en compte les défis de sécurité, d'efficacité et de performance économique.

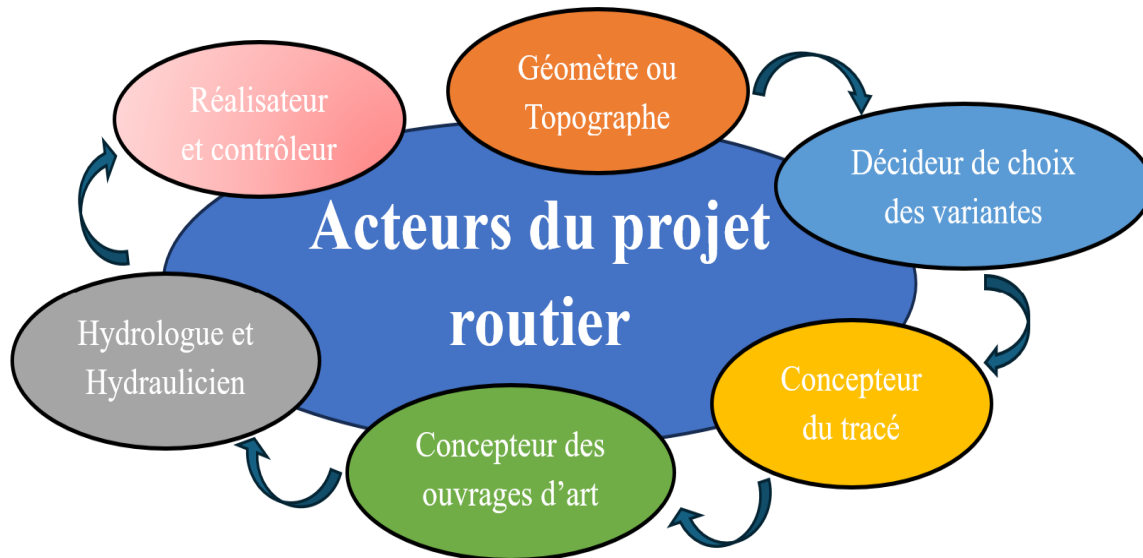


Figure I. 3: Les parties prenantes d'un projet routier

I.5. CONCLUSION

À travers ce chapitre, nous avons vécus en évidence l'émergence et l'évolution du Building Information Modeling en tant que paradigme incontournable dans le domaine de la construction et des infrastructures. Son historique, ses niveaux de maturité et ses multiples dimensions montrent que le BIM dépasse largement le rôle d'un simple outil numérique pour s'imposer comme une méthode intégrée de gestion de l'information à travers l'ensemble du cycle de vie du projet.

L'analyse des outils et technologies associés, en particulier dans le secteur des infrastructures routières et de transport, illustre la valeur ajoutée du BIM dans la précision de la conception, la coordination interdisciplinaire, la réduction des erreurs et la maîtrise des coûts et délais. L'examen des pratiques internationales révèle également une dynamique mondiale d'adoption progressive, portée par des initiatives gouvernementales, des standards normatifs et une recherche accrue de durabilité.

Par ailleurs, les volets relatifs au processus de mise en œuvre et à la collaboration entre acteurs démontrent que le BIM n'est pas seulement un instrument technologique, mais surtout un cadre organisationnel qui favorise la transparence, la communication et la concertation dans les projets complexes.

En somme, le BIM représente aujourd'hui une véritable révolution dans la façon de concevoir, construire, gérer et exploiter les infrastructures. Il ouvre la voie à une approche plus collaborative, durable et performante, tout en constituant un socle essentiel pour l'intégration future de technologies avancées telles que les jumeaux numériques, l'intelligence artificielle ou

CHAPITRE I: Building Information Modeling

la réalité augmentée. Ce socle conceptuel et méthodologique servira de base aux développements du chapitre suivant, consacré aux méthodes multicritères d'aide à la décision appliquées à l'évaluation et à la comparaison de variantes de tracés routiers.

**CHAPITRE II: ANALYSE
MULTICRITERE D'AIDE A LA
DECISION**

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

II.1. INTRODUCTION

La prise de décision en ingénierie et en aménagement des infrastructures s'inscrit dans un contexte particulièrement complexe, marqué par la coexistence de critères multiples, parfois contradictoires. Qu'il s'agisse de la planification de projets routiers, de la gestion des ressources, ou encore de l'évaluation de solutions techniques, le décideur doit concilier simultanément des dimensions économiques, techniques, environnementales et sociales. Dans ce cadre, les approches classiques fondées sur un critère unique tel que le coût se révèlent insuffisantes, car elles ne reflètent pas fidèlement la complexité et la multi dimensionnalité des choix à opérer.

L'Aide Multicritère à la Décision (AMAD), ou Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) en anglais, a été développée précisément pour répondre à ces défis. Elle constitue un ensemble structuré de méthodes et d'outils admettant d'identifier, d'analyser et de comparer différentes alternatives en tenant compte simultanément de plusieurs critères. L'objectif de l'AMAD n'est pas de remplacer le décideur, mais de le soutenir en rendant la prise de décision plus transparente, logique et justifiable (**Larbani & Aouni, 2025**).

Les méthodes d'analyse décisionnelle multicritère sont essentielles dans les systèmes d'aide à la décision, car elles assistent les décideurs dans le choix entre des alternatives comportant de multiples critères contradictoires (**Suk-Joo, 2023**). Elles occupent une place centrale dans l'identification de la meilleure alternative grâce à un large éventail de techniques, telles que l'AHP, l'ANP, le TOPSIS, le PROMETHEE, l'ELECTRE, le VIKOR, entre autres (**Tan et al., 2021; Zlaugotne et al., 2020**). Par ailleurs, l'association de ces méthodes à des instruments de modélisation 3D permet aux responsables d'évaluer de manière plus précise les différentes alternatives de conception d'un projet routier (**Hadjar et al., 2025**).

Depuis son apparition dans les années 1960, l'AMAD a connu un essor considérable et s'est imposée dans de nombreux domaines: transport, urbanisme, énergie, gestion environnementale, ou encore conduite de projets. La diversité et la complémentarité des approches allant des méthodes de surclassement aux fonctions de synthèse, en passant par des approches interactives et hybrides illustrent sa capacité d'adaptation à des contextes décisionnels hétérogènes.

Parmi ces méthodes, certaines occupent une place centrale dans l'évaluation multicritère des infrastructures, en particulier TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR. Chacune repose sur une logique décisionnelle distincte: la distance à la solution idéale pour TOPSIS, le principe de surclassement pour ELECTRE III, et la recherche d'un compromis équilibré pour VIKOR (**Basilio et al., 2022**). Leur intégration dans les projets routiers, notamment lorsqu'elles sont combinées avec des outils numériques et de modélisation 3D, ouvre des perspectives prometteuses pour l'analyse et la comparaison des variantes de tracés.

Dans cette perspective, ce chapitre s'articule en cinq sections principales: il présente tout d'abord les fondements généraux de l'AMAD, puis propose une classification des principales familles de méthodes. Il examine ensuite l'intégration de trois approches représentatives ELECTRE III, TOPSIS et VIKOR dans le domaine des infrastructures routières. Enfin, il procède à une comparaison critique de leurs différences conceptuelles, de leurs forces et limites,

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

ainsi que des critères de choix d'une méthode adaptée, avant d'ouvrir sur les perspectives offertes par des approches hybrides et robustes.

II.2. GÉNÉRALITÉS SUR L'AIDE MULTICRITÈRE A LA DÉCISION

II.2.1. Définition sur l'AMAD et concepts fondamentaux

L'Aide Multicritère à la Décision désigne un cadre méthodologique structuré regroupant un ensemble de méthodes conçues pour soutenir les décideurs lorsqu'ils sont confrontés à des situations complexes, caractérisées par la présence de critères multiples, hétérogènes et parfois contradictoires. Elle se distingue des approches monocritères, qui privilégient une dimension unique comme le coût, le temps ou la performance technique, en permettant l'intégration simultanée de dimensions économiques, techniques, environnementales, sociales, institutionnelles et politiques.

L'objectif de l'AMAD n'est pas de fournir une solution unique, optimale et universelle, mais d'accompagner le processus décisionnel en structurant les différentes étapes de l'analyse. Elle facilite la clarification des objectifs, l'identification et la pondération des critères, l'évaluation et la hiérarchisation des variantes, ainsi que la mise en évidence des compromis et des zones de consensus possibles entre acteurs. Elle repose donc sur des concepts fondamentaux tels que l'intégration de la diversité des perspectives, la gestion des conflits entre critères et la recherche d'un équilibre entre rigueur analytique et acceptabilité sociale.

En ce sens, l'AMAD contribue à rendre la décision plus transparente, rationnelle et justifiable, tout en renforçant sa légitimité auprès des parties prenantes concernées (**Mardani et al., 2015**). Elle s'impose ainsi comme un outil de médiation et de rationalisation, particulièrement adapté aux contextes où les décisions engagent des enjeux stratégiques, économiques et sociétaux.

II.2.2. Historique et évolution des méthodes multicritères

L'aide multicritère à la décision a émergé dans la seconde moitié du 20^e siècle, dans un contexte où l'accroissement de la complexité croissante des choix en économie, gestion, ingénierie et aménagement du territoire. Contrairement aux approches classiques, qui privilégiaient une vision réductrice centrée sur un seul critère, généralement économique, les méthodes multicritères ont été développées pour intégrer simultanément des dimensions multiples économiques, sociales, techniques et environnementales souvent contradictoires (**Figueira et al., 2005**).

Les premières contributions remontent aux années 1950 et 1960, avec des figures majeures comme Herbert Simon, qui introduisit la notion de rationalité limitée, ainsi que Koopmans et Debreu, qui ont établi les bases de la théorie de l'utilité à plusieurs attributs. Ces apports ont permis de dépasser la quête d'une optimalité absolue pour privilégier la recherche de compromis acceptables et réalistes (**Zavadskas et al., 2014**).

Un tournant important survient dans les années 1970 et 1990, marqué par la formalisation de méthodes emblématiques:

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

- MAUT (Multi-Attribute Utility Theory), qui propose une modélisation mathématique des préférences.
- AHP (Analytic Hierarchy Process) de Saaty (1987), reposant sur une structuration hiérarchique et des comparaisons par paires.
- Les approches par surclassement, avec ELECTRE (Roy, 1968) et ses variantes, ainsi que PROMETHEE (Brans & Mareschal, 1982).
- TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution), introduite par Hwang & Yoon (1981), qui évalue les alternatives en fonction de leur proximité à une solution idéale et leur éloignement à une solution anti-idéale.
- VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), proposée et développée par Opricovic & Tzeng (2004), qui met l'accent sur la recherche d'un compromis entre critères en conflit.

Ces méthodes ont constitué une avancée décisive en offrant des cadres opérationnels capables de traiter des critères hétérogènes et des préférences imprécises.

À partir des années 1990, l'AMAD connaît une diffusion accrue grâce à son intégration aux technologies de l'information et aux systèmes d'aide à la décision informatisés. Le développement de logiciels dédiés a facilité son adoption, notamment dans les secteurs du développement durable, de la gestion des infrastructures et de l'aménagement du territoire, où la prise de décision requiert un équilibre entre efficacité économique, équité sociale et durabilité environnementale.

Aujourd'hui, l'AMAD continue d'évoluer vers des approches hybrides, combinant intelligence artificielle, logique floue ou méthodes bayésiennes. Cette dynamique illustre la volonté d'adapter les outils décisionnels à la complexité croissante des systèmes contemporains, tout en renforçant la transparence, la participation et la robustesse des décisions.

II.2.3. Domaines d'application

Les méthodes multicritères d'aide à la décision se caractérisent par leur capacité à intégrer des critères multiples, souvent contradictoires, ce qui leur confère une grande polyvalence. Elles sont ainsi utilisées dans une diversité de domaines où la complexité et la pluralité des enjeux exigent des arbitrages éclairés.

II.2.3.1. Transport et mobilité

Le secteur des transports constitue un champ d'application majeur de l'AMAD. Ces méthodes sont mobilisées pour :

- Comparer des variantes de tracés routiers, ferroviaires ou aéroportuaires.
- Sélectionner des politiques de mobilité urbaine (transports collectifs, modes doux, gestion du trafic).
- Évaluer des alternatives technologiques (véhicules électriques, carburants alternatifs).

Elles permettent d'intégrer simultanément les critères économiques (coûts d'investissement et d'exploitation), techniques (faisabilité, performance), sociaux (sécurité, accessibilité) et environnementaux (pollution, nuisances).

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

II.2.3.2. Environnement et développement durable

Dans la gestion environnementale, l'AMAD facilite la comparaison de scénarios visant à préserver les ressources naturelles et à réduire les impacts écologiques. On la retrouve notamment dans :

- L'évaluation et le choix de sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, biomasse, hydraulique).
- Le management des déchets et de l'eau en tant que ressource.
- La planification de stratégies pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Ces applications contribuent à une approche intégrée du développement durable, conciliant viabilité économique, équité sociale et respect de l'environnement.

II.2.3.3. Gestion de projets et ingénierie

Dans le domaine de la gestion de projets, les méthodes multicritères sont utilisées pour hiérarchiser et sélectionner des alternatives en tenant compte des objectifs multiples des parties prenantes. Elles interviennent dans :

- La sélection et l'évaluation de projets d'investissement.
- La gestion des risques et des incertitudes.
- Le choix de technologies, matériaux ou fournisseurs dans un cadre industriel ou d'ingénierie.

Elles permettent d'objectiver la décision tout en intégrant des préférences qualitatives et quantitatives.

II.3. CLASSIFICATION DES MÉTHODES MULTICRITÈRES

L'analyse multicritère regroupe un ensemble de méthodes visant à accompagner le décideur dans le choix, le classement ou la hiérarchisation d'alternatives en tenant compte de plusieurs critères souvent contradictoires. Ces méthodes se distinguent par leur logique de fonctionnement, leurs fondements mathématiques et leur finalité. Elles se classent généralement en trois grandes familles: les méthodes de surclassement, les méthodes de synthèse en une fonction unique et les méthodes interactives ou hybrides, comme illustre dans le Tableau II. 1.

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

Tableau II. 1: Classification et Caractéristiques des familles de méthodes multicritères

Famille de méthodes	Principe	Exemples de méthodes	Avantages
Méthodes de surclassement	Comparaison paire à paire des alternatives pour déterminer si l'une « surclasse » l'autre selon la majorité des critères.	ELECTRE, PROMETHEE	<ul style="list-style-type: none"> - Capables de traiter efficacement des critères de nature hétérogène (quantitatifs/qualitatifs). - Autorisent l'existence de situations d'incomparabilité, particulièrement pertinentes en cas de conflits marqués entre critères. - Adaptées aux problèmes complexes.
Méthodes de synthèse en une fonction unique	Agrégation des critères en un score global via une fonction de valeur ou d'utilité.	AHP, TOPSIS, VIKOR, MAUT	<ul style="list-style-type: none"> - Fournissent un classement clair et complet. - Simples à comprendre et à appliquer. - Bien adaptées quand on cherche une hiérarchie nette des alternatives.
Méthodes interactives ou hybrides	Impliquent le décideur dans un processus itératif et adaptatif, ou combinent plusieurs approches pour bénéficier de leurs avantages respectifs.	Programmation linéaire interactive, AHP–TOPSIS, PROMETHEE–VIKOR	<ul style="list-style-type: none"> - Intègrent directement les préférences du décideur. - Grande flexibilité. - Plus proches de la réalité des processus décisionnels complexes.

Dans ce contexte, l'analyse multicritère d'aide à la décision (AMAD) constitue un outil incontournable pour sélectionner l'alternative la plus adaptée aux objectifs fixés par les parties prenantes (**Pagone & Salonitis, 2023**). En effet, face aux limites des approches traditionnelles souvent insuffisantes pour traiter la complexité croissante des projets, les méthodes d'AMAD offrent un cadre analytique plus robuste et pertinent (**Kumar & Pamucar, 2025**).

Parmi les méthodes les plus utilisées, certaines occupent une place centrale dans la recherche et la pratique. La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) repose sur le principe de proximité à la solution idéale et permet de classer les alternatives en fonction de leur distance à la solution optimale et à la solution la moins favorable. Elle est largement appliquée dans les études comparatives, notamment en ingénierie et en gestion de projets, pour sa simplicité et sa capacité à fournir un classement clair (**Youssef, 2020**).

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

De leur côté, les méthodes de surclassement telles que ELECTRE III s'attachent à établir des relations de dominance partielle entre alternatives, en intégrant des seuils de préférence, de l'indifférence. Cette approche est particulièrement adaptée aux décisions complexes où les critères sont hétérogènes et peuvent entrer en conflit. Elle permet de mieux refléter l'incertitude et les nuances des préférences réelles du décideur (Gao et al., 2018).

Enfin, la méthode VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) se distingue par son orientation vers la recherche d'une solution de compromis. Elle met en avant l'équilibre entre la satisfaction collective (mesurée par la proximité à la solution idéale) et la minimisation de l'insatisfaction maximale, ce qui en fait un outil pertinent dans les contextes où le consensus entre parties prenantes est essentiel (Zlaugotne et al., 2020).

Ainsi, que ce soit à travers l'approche de la proximité idéale (TOPSIS), la logique du surclassement (ELECTRE III) ou la recherche d'un compromis (VIKOR), ces méthodes illustrent la diversité et la complémentarité des outils d'AMAD. Plusieurs travaux récents soulignent d'ailleurs l'importance de leur intégration avec des technologies émergentes comme la Modélisation des Informations du Bâtiment (BIM) dans le but d'accroître la qualité, la fiabilité et la transparence du processus décisionnel (Zigmund, 2022).

II.3.1. Méthodes de surclassement

Les méthodes de surclassement reposent sur le principe qu'une alternative peut « dominer » ou « surclasser » une autre lorsqu'elle obtient des performances au moins équivalentes sur l'ensemble des critères et strictement meilleures sur au moins l'un d'entre eux.

Ces approches introduisent deux notions fondamentales :

- La concordance, qui mesure dans quelle proportion une alternative peut être considérée comme au moins aussi performante qu'une autre.
- La discordance, qui évalue l'importance des écarts défavorables susceptibles d'invalider le surclassement.

Les familles de méthodes ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) et PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) constituent les représentants les plus emblématiques de cette catégorie. Leur popularité en ingénierie et en aménagement du territoire s'explique par leur capacité à traiter des contextes décisionnels complexes, impliquant un grand nombre de critères souvent hétérogènes et parfois conflictuels.

II.3.2. Méthodes de synthèse en une fonction unique

Les méthodes de synthèse en une fonction unique visent à agréger l'ensemble des critères en une fonction globale d'évaluation, permettant d'attribuer un score unique à chaque alternative afin de les comparer directement. Le principe repose généralement sur la construction d'une fonction de valeur ou d'utilité, fondée sur la pondération des critères et la normalisation des données, afin d'assurer la comparabilité entre critères de nature différente.

Parmi les approches les plus représentatives, on retrouve :

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

- La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), qui classe les alternatives en fonction de leur proximité par rapport à une solution idéale et de leur éloignement vis-à-vis d'une solution anti-idéale.
- La méthode VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), qui cherche à identifier une solution de compromis en considérant à la fois la distance à l'idéal et l'équilibre entre les critères, particulièrement utile lorsque les préférences du décideur sont conflictuelles ou imprécises.
- La somme pondérée WSM (Weighted Sum Model), qui combine linéairement les performances des alternatives en fonction des poids attribués aux critères.
- L'analyse hiérarchique des processus AHP (Analytic Hierarchy Process), qui s'appuie sur des comparaisons binaires afin de déterminer les poids des critères et d'évaluer les alternatives.

Ces méthodes sont largement appréciées pour leur simplicité conceptuelle, leur facilité de mise en œuvre et leur caractère intuitif. Néanmoins, elles comportent certaines limites: elles requièrent souvent que les critères soient exprimés sur des échelles homogènes et supposent que les préférences du décideur soient bien définies et cohérentes.

II.3.3. Méthodes interactives et hybrides

Les méthodes interactives placent le décideur au cœur du processus d'évaluation. L'analyse s'effectue par itérations successives : à chaque étape, le décideur est amené à exprimer ses préférences, ajuster les pondérations ou modifier certains paramètres. Ce dialogue continu entre le modèle et le décideur permet de raffiner progressivement la solution, en tenant compte des retours et des évolutions de jugement au cours du processus décisionnel.

Les méthodes hybrides, quant à elles, visent à combiner les avantages de plusieurs familles de méthodes (par exemple, associer une approche de surclassement à une méthode de synthèse en fonction unique). Cette intégration permet de mieux capturer la complexité des problèmes réels, en conciliant rigueur analytique et flexibilité.

Ces approches sont particulièrement appropriées pour les décisions stratégiques, qui se caractérisent par un haut degré d'incertitude, une pluralité de critères hétérogènes et une dimension subjective marquée liée aux préférences des parties prenantes. Elles favorisent également une meilleure acceptabilité des résultats, puisque le décideur participe activement à leur construction.

En résumé, le choix d'une méthode multicritère dépend du caractère de problème, de la nature des critères et du niveau de précision souhaité.

II.4. INTEGRATION DES METHODES TOPSIS, ELECTRE III ET VIKOR DANS LES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

Le lancement d'un projet d'infrastructure routière commence par la phase Avant-Projet Sommaire (APS), une étape cruciale du processus de planification. Cette phase consiste à générer, analyser et classer différentes alternatives de conception. Pour ce faire, Il est essentiel d'ajouter des éléments supplémentaires au modèle initial et d'évaluer plusieurs variantes.

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

L'objectif principal de l'APS est d'apporter des recommandations techniques solides afin de soutenir la prise de décision et d'orienter vers des choix plus éclairés. Elle fournit une évaluation multicritère complète des variantes possibles en vue d'identifier la solution la plus adaptée. Une fois toutes les alternatives analysées, la variante la plus performante est retenue pour être développée dans la phase d'avant-projet détaillée (APD). Or, dans de nombreux cas, la sélection repose encore sur des méthodes traditionnelles, souvent limitées, ce qui souligne la nécessité de recourir à des approches d'aide multicritère plus avancées (**Kumar & Pamucar, 2025**).

Dans ce cadre, l'analyse multicritère d'aide à la décision (AMAD) apparaît comme un outil essentiel pour gérer la complexité des projets routiers. En effet, le choix du tracé optimal implique une diversité de critères topographiques, géologiques, techniques, économiques, environnementaux et sociaux, qui sont hétérogènes, parfois contradictoires et marqués par l'incertitude. Aucune méthode ne peut, à elle seule, restituer l'ensemble de cette complexité, d'où la pertinence de combiner plusieurs approches afin d'obtenir des résultats plus robustes et crédibles.

Parmi les méthodes illustre dans la Figure II.1 peuvent être utilisées de façon complémentaire et disponibles, TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR se distinguent par leurs atouts spécifiques et leur complémentarité. TOPSIS propose un classement global clair et intuitif, basé sur la distance relative à une solution idéale et à une solution anti-idéale (**Yardimci & Kurucay, 2024 ; Youssef, 2020**). Toutefois, sa logique strictement compensatoire peut parfois masquer des écarts importants entre critères. ELECTRE III, fondée sur le principe du surclassement, introduit des seuils d'indifférence et de préférence, permettant de gérer l'incertitude et de refléter le comportement réaliste des décideurs. Elle est particulièrement efficace pour écarter les alternatives nettement dominées (**Wang et al., 2024**). Enfin, VIKOR met en avant une approche de compromis, en recherchant un équilibre entre proximité de l'idéal et équité entre les alternatives, ce qui favorise l'acceptabilité de la décision, même en présence de critères conflictuels (**Zlaugotne et al., 2020**).

La combinaison de ces trois méthodes est justifiée par leur complémentarité :

- ELECTRE III assure la rigueur analytique et la prise en compte de l'incertitude,
- TOPSIS fournit un classement simple et lisible,
- VIKOR identifie une solution de compromis acceptable.

Appliquée aux projets routiers, notamment dans la phase APS, cette intégration permet non seulement de valider les résultats par triangulation méthodologique, mais aussi de mieux répondre aux enjeux multidimensionnels: réduire les coûts, respecter les contraintes techniques, limiter les impacts environnementaux et garantir l'acceptabilité sociale. Une telle démarche hybride constitue ainsi une approche robuste et adaptée pour soutenir les décideurs dans la sélection du tracé routier optimal.

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

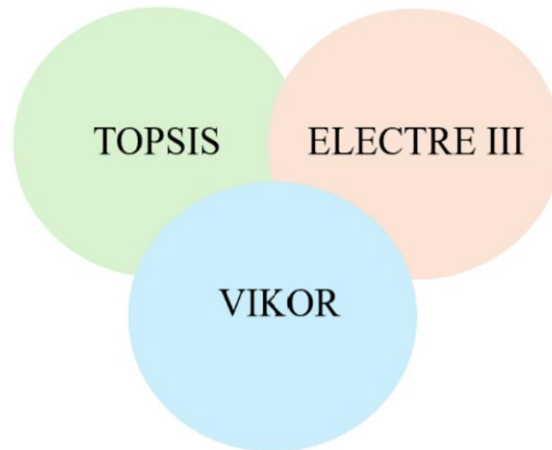


Figure II. 1: Complémentarité des méthodes pour le choix des tracés routiers

II.5. COMPARAISON ENTRE TOPSIS, ELECTRE III ET VIKOR

II.5.1. Différences conceptuelles et méthodologiques

Les méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR reposent sur des fondements conceptuels distincts qui conditionnent leur mode de fonctionnement et leurs résultats :

- TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) repose sur le principe de la proximité d'une alternative à une solution idéale (meilleure sur tous les critères) et de son éloignement à une solution anti-idéale (la pire). L'alternative optimale est celle qui minimise la distance à la solution anti-idéale tout en maximisant sa proximité avec la solution idéale. Cette approche est simple, intuitive et bien adaptée à des critères quantitatifs (**Yardimci & Kurucay, 2024 ; Youssef, 2020**).
- ELECTRE III (Élimination et Choix Expriment la Réalité) adopte une logique de surclassement, fondée sur les relations de concordance et de discordance. Elle permet de comparer des alternatives même en présence d'incertitude, d'imprécision ou de préférences floues, grâce à l'utilisation de seuils d'indifférence, de préférence (**Wang et al., 2024**).
- VIKOR (VIsekriterijumsko KOMPromisno Rangiranje) se distingue par une approche de compromis. Développée par **Opricovic et Tzeng (2004)**, elle vise à identifier une solution qui soit acceptable pour toutes les parties prenantes, en équilibrant performance globale et acceptabilité sociale. Elle est particulièrement adaptée dans les contextes où les acteurs ont des priorités divergentes (**Sarkar et al., 2022 ; Pourghasemi et al., 2021**).

II.5.2. Forces et limites de chaque approche

Chaque méthode présente des atouts et des limites spécifiques :

- TOPSIS : Sa force tient à sa simplicité d'application et sa transparence, avec un classement clair et facile à interpréter. Elle est particulièrement adaptée à des critères numériques comme les coûts, les distances ou les volumes d'excavation (**Mouhib,**

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

2020). En revanche, elle est sensible à la normalisation des données et au choix des poids, ce qui peut influencer les résultats.

- ELECTRE III : Elle offre une grande flexibilité méthodologique grâce aux seuils d'indifférence, de préférence. Elle permet de traiter l'incomparabilité et les conflits entre critères, fréquents dans les projets routiers (Wang et al., 2024). Cependant, sa limite principale réside dans sa complexité et la difficulté d'interprétation des résultats par des décideurs non experts.
- VIKOR : Elle se distingue par sa capacité à identifier un compromis collectif et à gérer les conflits entre critères, tout en prenant en compte l'imprécision des données. Sa limite tient à une interprétation plus complexe et à la nécessité d'une pondération rigoureuse des critères pour éviter des biais (Sarkar et al., 2022).

II.5.3. Critères de choix d'une méthode adaptée

Le choix d'une méthode d'aide multicritère soumet des caractéristiques du problème étudié et des objectifs de la décision. Pour un projet routier:

- ✓ Si les critères sont majoritairement quantitatifs et bien mesurables, et que l'on souhaite obtenir un classement clair et rapide, TOPSIS est le plus adapté.
- ✓ Si les critères sont nombreux, conflictuels et entachés d'incertitude, et que l'on souhaite intégrer des préférences floues des parties prenantes, ELECTRE III constitue un meilleur choix.
- ✓ Si l'objectif est de parvenir à un compromis équilibré entre plusieurs alternatives, en particulier lorsque les acteurs ont des priorités divergentes, VIKOR représente une solution pertinente.

En pratique, le choix dépend donc en fonction du type des données (quantitatives ou qualitatives), du niveau de précision des préférences exprimées et du degré d'acceptabilité recherché par les parties prenantes.

II.5.4. Perspectives d'intégration et robustesse des approches hybrides

Face aux limites propres à chaque méthode, l'intégration de plusieurs approches constitue une solution pertinente pour améliorer la robustesse des résultats. L'association de TOPSIS et ELECTRE III permet, par exemple, de combiner la clarté d'un classement global avec la rigueur du surclassement (Mouhib, 2020). L'ajout de VIKOR enrichit encore cette complémentarité en introduisant une dimension de compromis collectif (Sarkar et al., 2022).

De plus, leur intégration dans des environnements numériques tels que le BIM (Building Information Modeling) renforce la transparence, la collaboration et la traçabilité des décisions. Cette synergie entre méthodes multicritères et outils numériques favorise une prise de décision plus éclairée, systémique et durable, ce qui est particulièrement crucial dans le domaine des infrastructures routières.

Ainsi, les approches hybrides apparaissent comme une voie prometteuse, permettant de concilier rigueur méthodologique, lisibilité des résultats et acceptabilité sociale des choix de tracés.

CHAPITRE II: Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

II.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé le cadre théorique et conceptuel de l'analyse multicritère d'aide à la décision. À la suite de la définition de l'AMAD et au retraçage de son évolution historique, nous avons souligné ses principaux domaines d'application, en particulier dans les secteurs du transport, de l'environnement et de la gestion des projets d'ingénierie.

Nous avons ensuite proposé une classification des méthodes multicritères, distinguant les approches de surclassement, les méthodes de synthèse en une fonction unique ainsi que les approches interactives et hybrides. Chacune de ces familles présente des avantages et des limites, ce qui justifie la diversité des méthodes disponibles dans la littérature scientifique.

Parmi celles-ci, trois méthodes se distinguent par leur pertinence et leur applicabilité dans le domaine de l'ingénierie civile et, plus particulièrement, dans l'évaluation des infrastructures routières : TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR. Leur présentation a mis en lumière leurs principes de fonctionnement, leurs domaines d'utilisation ainsi que leurs atouts et limites. La comparaison conceptuelle entre ces approches montre qu'elles se complètent et offrent des perspectives intéressantes lorsqu'elles sont mobilisées dans des contextes décisionnels complexes.

Ainsi, ce cadre théorique met en lumière l'importance des méthodes multicritères pour l'aide au choix dans les projets d'infrastructures routières, où de multiples critères techniques, économiques, sociaux et environnementaux doivent être pris en compte simultanément.

Le chapitre suivant sera consacré à l'approche méthodologique adoptée pour ce travail. Nous y détaillerons le processus de sélection et de pondération des critères (via l'outil SRF), la construction de la matrice de décision, ainsi que l'application des méthodes multicritères retenues (TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR) pour le choix de variantes de tracés routiers dans un environnement BIM.

**CHAPITRE III: COORDINATION
DU BIM ET AMAD POUR LE
CHOIX DE LA VARIANTE
ROUTIERE**

III.1. INTRODUCTION

Les infrastructures constituent un moteur essentiel de développement et de progrès. Elles stimulent la croissance économique, améliorent la qualité de vie, réduisent la pauvreté et la marginalisation, tout en renforçant la compétitivité. Cependant, le choix d'un tracé routier optimal représente un problème de décision multidisciplinaire, marqué par des objectifs souvent contradictoires et une multiplicité de solutions possibles. Dans ce cadre, l'analyse décisionnelle multicritère particulièrement efficace pour identifier l'alternative la plus performante selon les critères établis par les parties prenantes (**Pagone et Salonitis, 2023**). La complexité de ce choix réside dans la diversité des intervenants, l'importance de l'information à traiter, le caractère multidisciplinaire du problème, les conflits d'objectifs et les contraintes budgétaires. Ainsi, la réussite d'un projet dépend largement de la qualité de la prise de décision, elle-même directement liée à la pertinence et à la fiabilité de l'information mobilisée (**Jato-Espino et al., 2014 ; Elonen et Artto, 2003**).

La modélisation des données du bâtiment (BIM) s'impose aujourd'hui comme une méthodologie évolutive et une plateforme d'intégration ayant profondément transformé la conception, la construction et la gestion des ouvrages. L'accélération récente des innovations numériques a favorisé son adoption dans le domaine des infrastructures linéaires, en particulier routières (**Ait-Lamallam et al., 2019**). Grâce à l'utilisation de sections paramétriques et d'outils numériques avancés, le BIM permet de créer des modèles routiers détaillés et d'analyser des zones difficilement accessibles, améliorant ainsi la fiabilité des évaluations (**D'Amico et al., 2023**).

Ces technologies offrent la possibilité de générer, importer et manipuler des modèles 3D enrichis d'informations paramétriques, intégrant aussi bien des dessins 2D traditionnels que des données géométriques tridimensionnelles. Le modèle BIM constitue de ce fait une base documentaire complète, largement exploitée dans les activités de projet (**Feng, 2022 ; Biancardo et al., 2020**). Il favorise une meilleure planification, conception, construction et gestion (**Eastman et al., 2011**), tout en améliorant l'échange et l'interopérabilité des données numériques (**Azhar, 2011**). Cette approche facilite également la collaboration entre les différents acteurs impliqués dans un projet routier (**Salman et al., 2012 ; Succar, 2009**).

Le processus de développement d'un projet routier débute par la phase de planification préliminaire, qui consiste à générer, analyser et comparer différentes alternatives. Cette étape vise à intégrer des recommandations techniques afin de soutenir une prise de décision optimale et éclairée. Elle repose sur une évaluation multicritère des variantes, dans le but d'identifier la solution la plus adaptée. La variante retenue est ensuite développée et détaillée lors de la phase de conception détaillée.

Dans ce contexte, les modèles d'aide à la décision multicritère (MCDM) jouent un rôle déterminant, car la sélection des projets repose encore fréquemment sur des méthodes traditionnelles limitées, ce qui souligne la nécessité d'approches plus robustes (**Kumar & Pamucar, 2025**). Le choix du tracé optimal nécessite en effet une évaluation approfondie d'alternatives selon des critères topographiques, géologiques, environnementaux et économiques. Parmi les méthodes les plus utilisées, TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR se

distinguent par leurs atouts complémentaires. TOPSIS, fondée sur la proximité à la solution idéale, permet de classer les variantes en fonction de leur distance relative à une solution idéale et à une solution anti-idéale, offrant un classement clair et intuitif (Yardimci & Kurucay, 2024). ELECTRE III, basée sur le principe du surclassement, prend en compte l'imprécision, l'incertitude et les préférences floues grâce à l'intégration de seuils d'indifférence et de préférence, reflétant plus fidèlement le comportement des décideurs (Wang et al., 2024). VIKOR, pour sa part, vise à déterminer une solution de compromis optimale en tenant compte de la proximité des alternatives à l'idéal et de l'équilibre entre critères contradictoires (Zlaugotne et al., 2020). L'utilisation combinée de ces méthodes permet donc une comparaison approfondie et une validation croisée des résultats.

L'intégration de ces approches dans des outils de modélisation 3D tels qu'Autodesk InfraWorks renforce la précision et la pertinence des analyses. Elle permet une visualisation immersive, interactive et plus rigoureuse des variantes, favorisant une prise de décision transparente et participative dans le domaine des infrastructures.

Traditionnellement, la comparaison des variantes reposait sur des représentations bidimensionnelles (2D) issues de documents cartographiques. Bien que pratiques, ces approches demeuraient limitées pour répondre aux exigences de précision et de modélisation fine. L'émergence des outils de modélisation tridimensionnelle (3D), notamment InfraWorks, a marqué un véritable changement de paradigme, en offrant une représentation plus réaliste et intégrée du contexte.

Enfin, l'évaluation des alternatives de conception s'appuie désormais sur un ensemble de critères multidimensionnels, intégrant des considérations économiques (coûts), techniques (pentes, volumes de terrassement) et environnementales (impacts écologiques). Cette approche globale favorise des décisions mieux informées et optimise le choix de la solution la plus adaptée aux objectifs du projet.

III.2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

III.2.1. Localisation géographique

Nous avons soigneusement choisi la région de Sidi Belattar, située dans la wilaya de Mostaganem, à l'ouest de l'Algérie, comme cadre d'étude pour notre projet. Comme le montre la Figure III. 1, cette zone s'étend de la latitude 36° 01'36 Nord à la longitude 0° 16'10 Est et couvre une superficie d'environ 88 km². Selon les données du recensement général de la population et de l'habitat de 2014, la population est estimée à 6 794 habitants.

Sidi Belattar fait partie des monts Dahra, situés au cœur d'une région agricole dynamique. Ses limites géographiques sont définies par :

- Au nord : la forêt et le barrage de Kerrada,
- Au sud : l'oued Chellif,
- À l'est : la RN 90,
- À l'ouest : l'agglomération de Sidi Belattar.

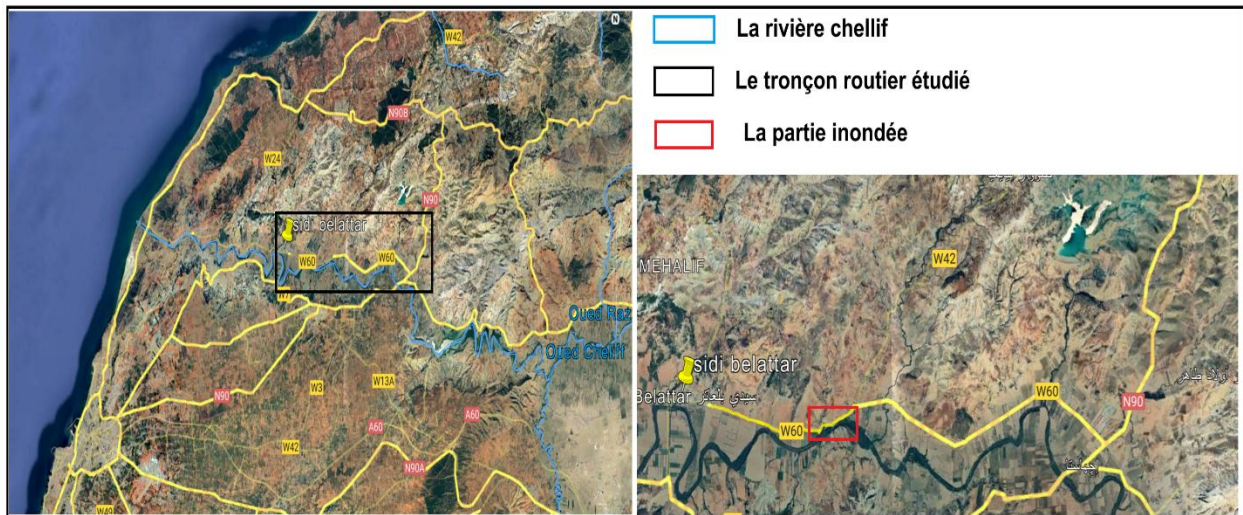


Figure III. 1: Localisation de la région d'étude en Algérie

III.2.2. Contexte physique et environnemental

La topographie de la région est caractérisée par une pénélaine vallonnée, avec une végétation forestière clairsemée. Les pentes sont généralement modérées, mais deviennent plus raides à proximité de la RN90.

Le climat est de type semi-aride, marqué par des conditions chaudes et sèches, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 360 mm.

Le réseau hydrographique est relativement dense. Le principal cours d'eau est la rivière Chellif, qui traverse le sud de la zone d'étude et joue un rôle déterminant dans la dynamique hydrologique locale.

III.2.3. Contraintes et enjeux du projet routier

La zone d'étude présente plusieurs contraintes naturelles et anthropiques influençant le développement du projet routier. L'une des principales difficultés est liée aux risques d'inondation. En effet, durant la saison des pluies, le tronçon reliant la ville de Sidi Belattar à la RN90 est fréquemment submergé. Un événement marquant s'est produit lors de la crue de janvier 2017, provoquée par le débordement de l'oued Chellif, comme illustre dans la Figure III. 2.

Ces phénomènes naturels, associés à la présence de zones agricoles et forestières, imposent une planification rigoureuse afin de concilier les enjeux de mobilité, de sécurité routière et de préservation de l'environnement.



Figure III. 2: Inondation de la route en janvier 2017 étudiée (Zaoui et al., 2020)

III.3. INTEGRATION DU BIM DANS LA PHASE D'AVANT-PROJET SOMMAIRE ROUTIER

Le Building Information Modeling constitue aujourd'hui un outil incontournable dans le domaine des infrastructures routières. Dans la phase d'avant-projet, son intégration permet de visualiser, d'analyser et de comparer différentes variantes de tracés routiers de manière efficace et collaborative. Parmi les logiciels BIM dédiés aux infrastructures, Autodesk InfraWorks occupe une place privilégiée grâce à ses capacités de modélisation 3D, d'intégration de données géospatiales et de simulation multicritère.

III.3.1. Limites de la cartographie 2D et apport de la 3D

Traditionnellement, l'élaboration des variantes reposait sur des documents cartographiques 2D, composés uniquement des dimensions x et y. Ces supports, représentés sous forme de cartes ou de plans, permettent de localiser des entités géographiques telles que les routes, les cours d'eau et les limites administratives. Ils sont largement utilisés pour la planification et la représentation de données spatiales dans un environnement bidimensionnel.

Cependant, ces documents présentent des limites, notamment l'absence de la dimension z, qui représente le relief et l'élévation. L'outil InfraWorks surmonte cette contrainte en intégrant une représentation tridimensionnelle (x, y, z), permettant ainsi une modélisation de terrain, une planification plus réaliste des infrastructures et une visualisation immersive (Lafrance, 2018).

Dans le cadre de la phase d'avant-projet sommaire (APS), qui fait suite à l'étude de faisabilité, différents tracés routiers sont élaborés et évalués selon des critères variés : impact environnemental et social, considérations économiques, faisabilité technique, conformité réglementaire, sécurité, longueur du tracé et nombre d'ouvrages d'art. L'objectif principal est de sélectionner le tracé optimal, en cohérence avec les exigences du projet.

Dans les approches classiques, ces variantes étaient projetées manuellement sur un document cartographique 2D couvrant la zone d'étude. Dans notre cas, cette zone s'étend de Sidi Belattar jusqu'à la RN90 dans la vallée de Chellif (Algérie). Chaque couleur représentait une variante possible, comme illustré dans la Figure III. 3.

CHAPITRE III: Coordination du BIM et AMAD pour le Choix de la Variante Routière

L'outil InfraWorks, parmi les logiciels BIM les plus utilisés, est aujourd'hui couramment mobilisé dans le domaine de l'ingénierie et de la planification des infrastructures routières. Il permet de projeter et de créer différents modèles 3D intégrés et variantes, prenant en compte une multitude de critères, et facilite ainsi l'analyse multicritère selon les deux méthodes retenues dans cette étude. Son utilisation contribue à améliorer la qualité des travaux et à favoriser une prise de décision éclairée lors du choix de la variante optimale pour les projets d'infrastructure (Arnaud, 2020 ; Vincent, 2017).

Dans le cadre du présent projet, huit alternatives ont été projetées à l'aide d'InfraWorks, comme illustré à la Figure III. 4. Grâce à cette modélisation, les conceptions routières peuvent être visualisées et analysées directement dans leur contexte géospatial, ce qui facilite la sélection rationnelle de la meilleure variante dès la phase de conception préliminaire.

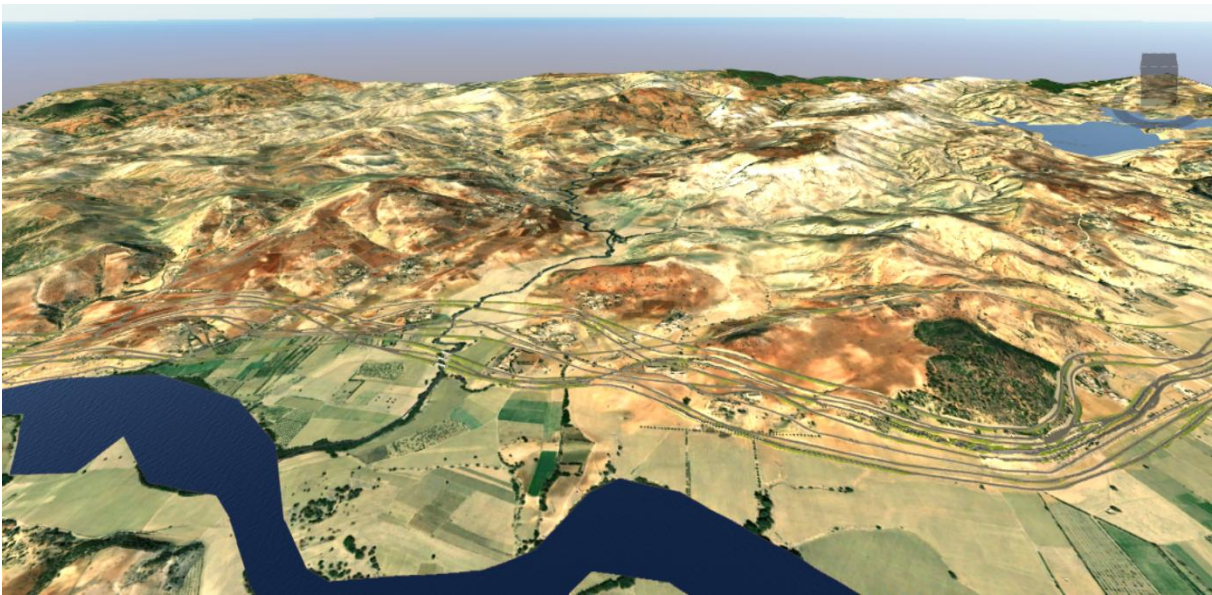


Figure III. 4: Représentation des variantes par l'outil InfraWorks

III.3.3. Planification des variantes routières dans InfraWorks

La planification des variantes routières dans l'InfraWorks s'effectue selon une démarche progressive, qui intègre à la fois la modélisation 3D et la préparation de scénarios comparatifs. Cette approche permet d'évaluer simultanément plusieurs alternatives dans un environnement virtuel réaliste.

La procédure peut être décomposée en plusieurs démarches progressive :

III.3.3.1. Importation et préparation des données du site

- Définition du système de coordonnées du projet (WGS 84 / UTM Zone 31N), comme illustré à la Figure III. 5.
- Import des données géographiques (MNT, orthophotos, limites administratives, etc).
- Délimitation de la zone d'étude dans InfraWorks.

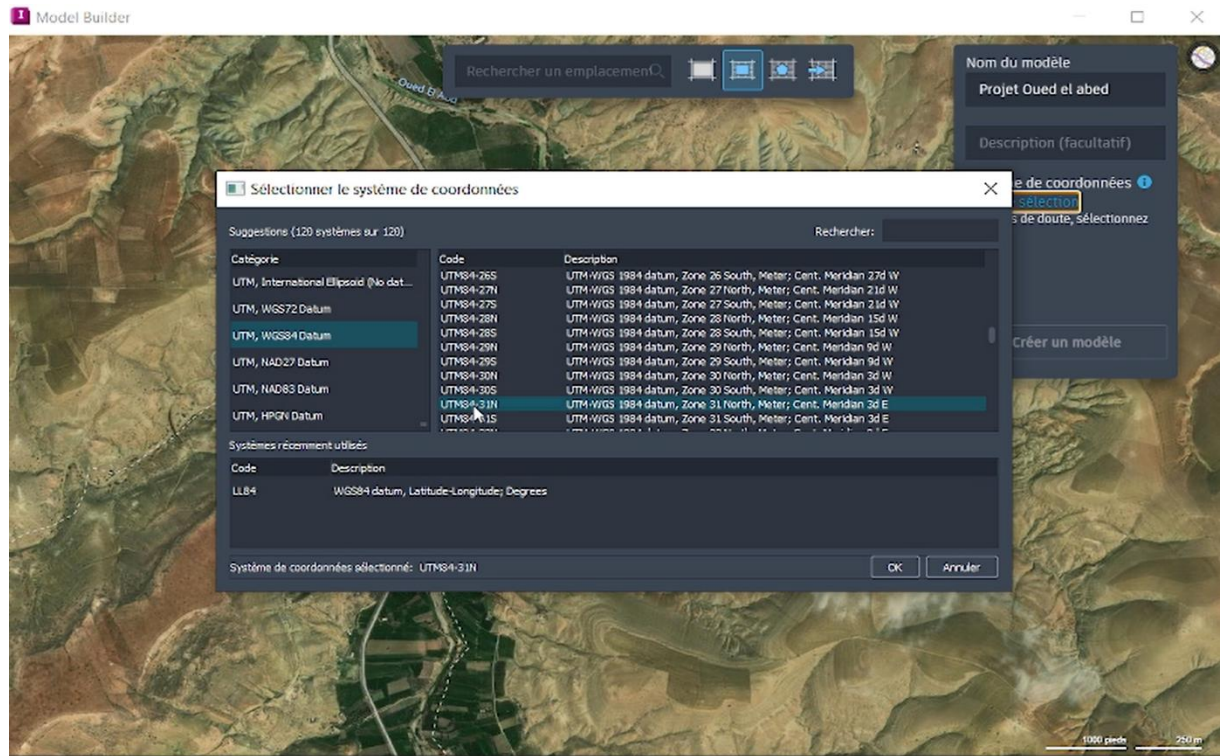


Figure III. 5: Représentation du système de coordonnées du projet

III.3.3.2. Définition des tracés routiers

- Création de plusieurs variantes de tracés en fonction des contraintes techniques (topographie, géométrie routière, normes de conception). Dans ce projet, huit alternatives de tracé ont été proposées, représentant différentes solutions de passage, comme illustré dans la Figure III.4 précédente.

III.3.3.3. Paramétrage des caractéristiques routières

- Définition des largeurs de chaussée, nombre de voies, pentes maximales, rayons de courbure, paramétrage des vitesses de conception, profils en long et en travers, ainsi que l'intégration des ouvrages d'art nécessaires (ponts, tranchées, remblais), comme illustre dans les Figures III. 6 et III. 7.

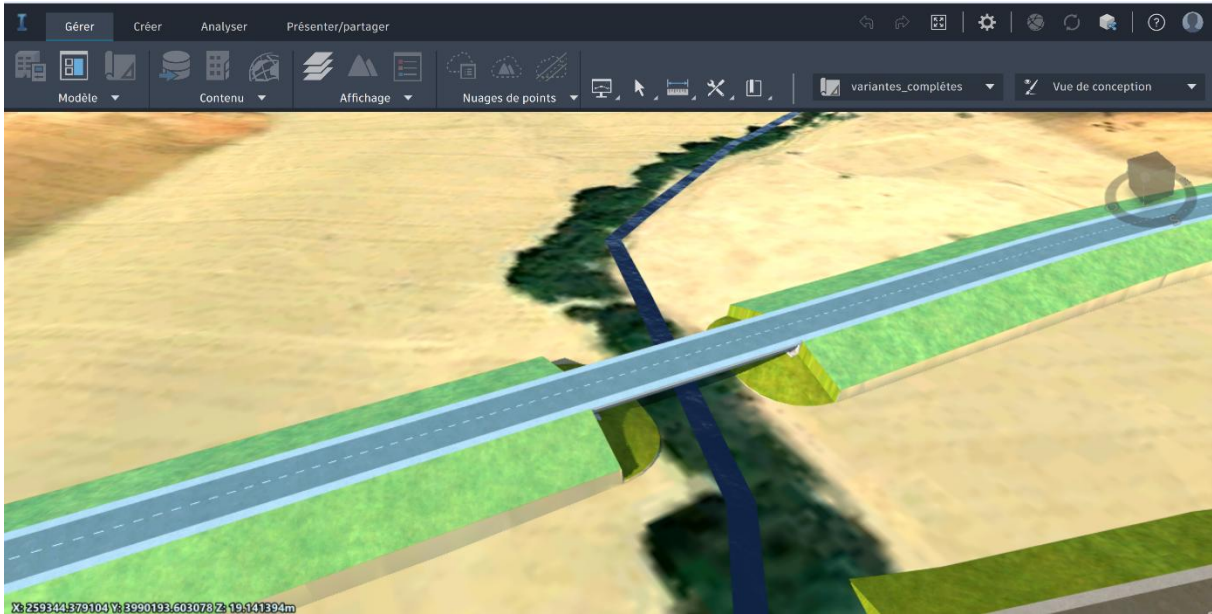


Figure III. 6: Visualisation en 3D d'un ouvrage d'art dans l'environnement InfraWorks

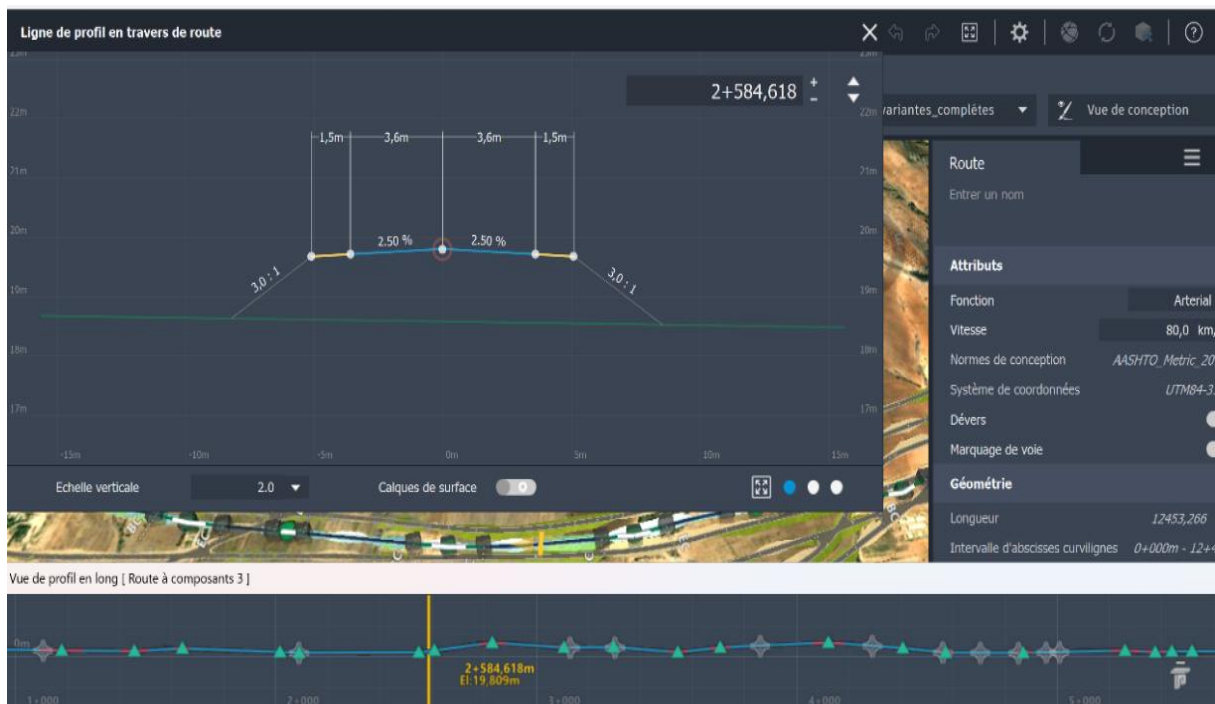


Figure III. 7: Caractéristiques d'une variante de route

III.3.3.4. Simulation et planification comparative

- Visualisation des variantes dans un environnement 3D réaliste pour faciliter la compréhension, la communication et la préparation à l'analyse multicritère.

Cette étape permet de disposer d'un panel de solutions de tracés, toutes modélisées dans un cadre homogène et cohérent, prêt pour l'analyse multicritère.

III.3.4. Extraction des données techniques, économiques et environnementales

Une fois les variantes créées, InfraWorks offre la possibilité d'extraire automatiquement un ensemble d'indicateurs nécessaires à l'évaluation multicritère :

- Données techniques : longueur totale du tracé, dénivelé, pentes et rampes maximales, rayons et longueurs des courbures, volumes de déblais et remblais, servitude (longueur entre la rivière et la voirie).
- Données économiques : estimation des coûts de construction liés aux terrassements, aux ouvrages d'art et à la chaussée.
- Données environnementales : emprise foncière, surfaces boisées ou agricoles impactées, traversée de zones sensibles (cours d'eau, zones protégées).

Ces données, obtenues de manière rapide et automatisée, constituent la base pour appliquer les méthodes multicritères telles que TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR, permettant de hiérarchiser objectivement les variantes de tracé.

III.4. MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE POUR LA SELECTION DE LA VARIANTE OPTIMALE

Cette section examine les principaux enjeux liés à l'intégration du processus BIM dans les infrastructures routières (Nielsen et al., 2024), en utilisant des méthodes d'analyse multicritère pour appuyer la prise de décision. Elle se concentre spécifiquement sur la sélection optimale d'une variante parmi plusieurs alternatives tracées par un outil BIM appelé InfraWorks lors de la phase initiale d'un projet routier. À ce stade, le projet est encore en structuration et les ressources disponibles dans la bibliothèque standard des outils BIM peuvent rester limitées.

La réussite de cette première phase repose sur une collaboration étroite entre les acteurs concernés. Elle met en évidence l'interaction entre le géomaticien, qui fournit des données géospatiales précises et actualisées, et le décideur, chargé d'évaluer et de sélectionner les variantes en fonction de critères de faisabilité, de coût et d'impact environnemental (Riera-Spiegelhalder et al., 2025). Cette synergie assure l'efficacité du projet ainsi que sa conformité aux exigences de qualité et de durabilité.

Dans ce contexte, l'utilisation d'outils avancés tels qu'InfraWorks combinée à l'application rigoureuse des méthodes d'analyse multicritère permet d'orienter les choix dès les premières étapes, garantissant une prise de décision plus fiable et éclairée.

La Figure III. 8 illustre une méthodologie générale pour trouver la meilleure solution pour remplacer une section vulnérable aux inondations, complètement inondée au cours de la dernière décennie en raison de la crue de la rivière Chellif pendant la saison des pluies. Cette méthodologie vise à fournir un aperçu détaillé des trois méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR, largement reconnues pour leur capacité à traiter des problèmes multicritères dès la phase initiale des projets routiers. Ces méthodes sont mises en œuvre à l'aide d'un outil BIM, offrant ainsi une approche intégrée et efficace pour relever les défis complexes liés à la gestion des risques d'inondation.

Dans cette étude, le choix des méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR pour l'évaluation des alternatives d'un projet routier repose sur un ensemble de considérations méthodologiques et pratiques qui tiennent compte efficacement de la complexité et de la variété des critères impliqués. Ces méthodes sont particulièrement adaptées à la gestion de la diversité des critères techniques, économiques et environnementaux, ainsi que de leurs relations complexes, offrant

des avantages significatifs en termes de rigueur, de flexibilité et de clarté dans la prise de décision. L'objectif est de sélectionner des méthodes robustes, capables de gérer les compromis et de fournir une évaluation claire et cohérente des alternatives.

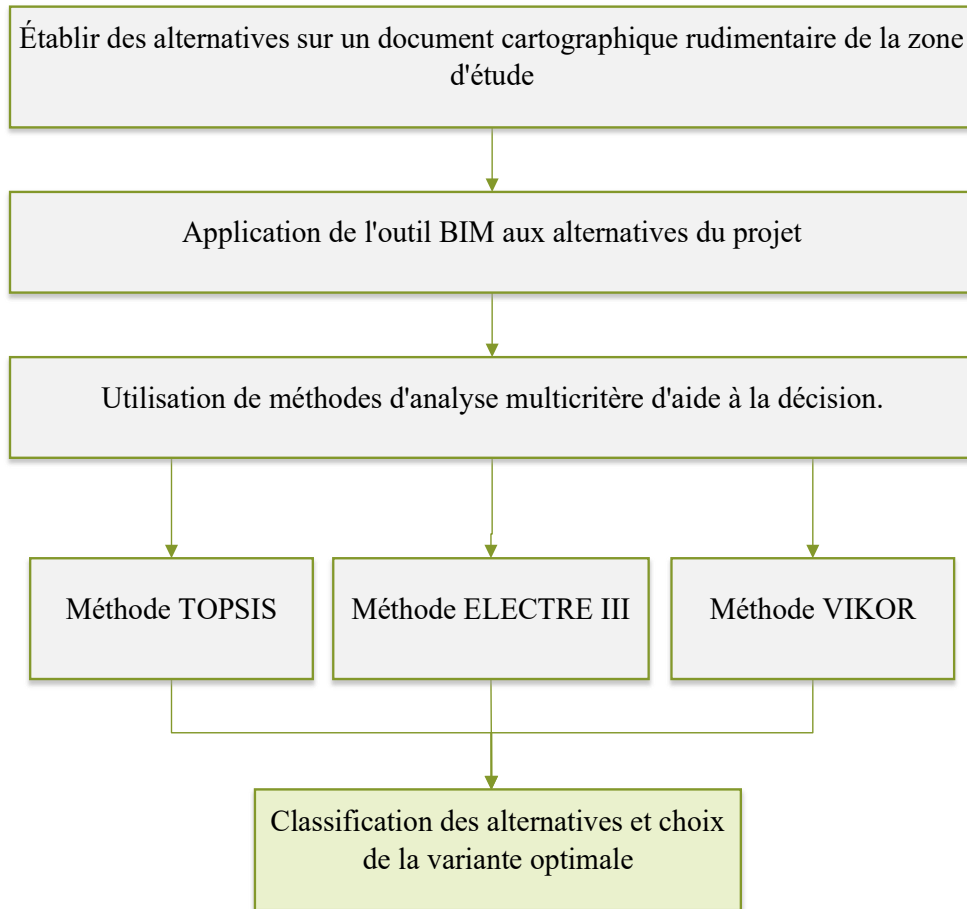


Figure III. 8: Aperçu de la méthodologie du processus

III.5. METHODES MULTICRITERES D'AIDE A LA DECISION D'ÉVALUATION

Les méthodes d'aide à la décision multicritères sont largement utilisées pour résoudre des problèmes de sélection dans divers domaines, puisqu'elles permettent d'évaluer et de comparer plusieurs alternatives en tenant compte simultanément de différents critères. Dans le cadre de notre étude de cas, nous avons retenu trois méthodes parmi les plus répandues, à savoir TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR, afin d'identifier la variante optimale. La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) consiste à choisir l'alternative la plus proche de la solution idéale et la plus éloignée de la moins souhaitable (Yardimci et Kurucay, 2024). De son côté, la méthode ELECTRE III (Élimination et Choix Traduisant la Réalité) introduit la notion d'incomparabilité entre certaines alternatives et repose sur une agrégation partielle des critères pour établir un classement plus nuancé (Wang et al., 2024). Quant à la méthode VIKOR, elle adopte une approche de compromis en intégrant un mécanisme de pondération entre la satisfaction globale et la satisfaction individuelle, permettant ainsi de proposer une solution équilibrée conciliant les critères les plus influents (Lin et al., 2025). Ces trois approches, appliquées notamment dans le domaine des infrastructures routières, constituent des outils efficaces pour soutenir la décision en intégrant simultanément plusieurs critères (Zougari, 2011; Ben Mahcen & Mezabia, 2022). La Figure III. 9 illustre

l'organigramme détaillé de la méthodologie appliquée, clarifiant les différentes étapes et facilitant une analyse systématique et approfondie des méthodes.

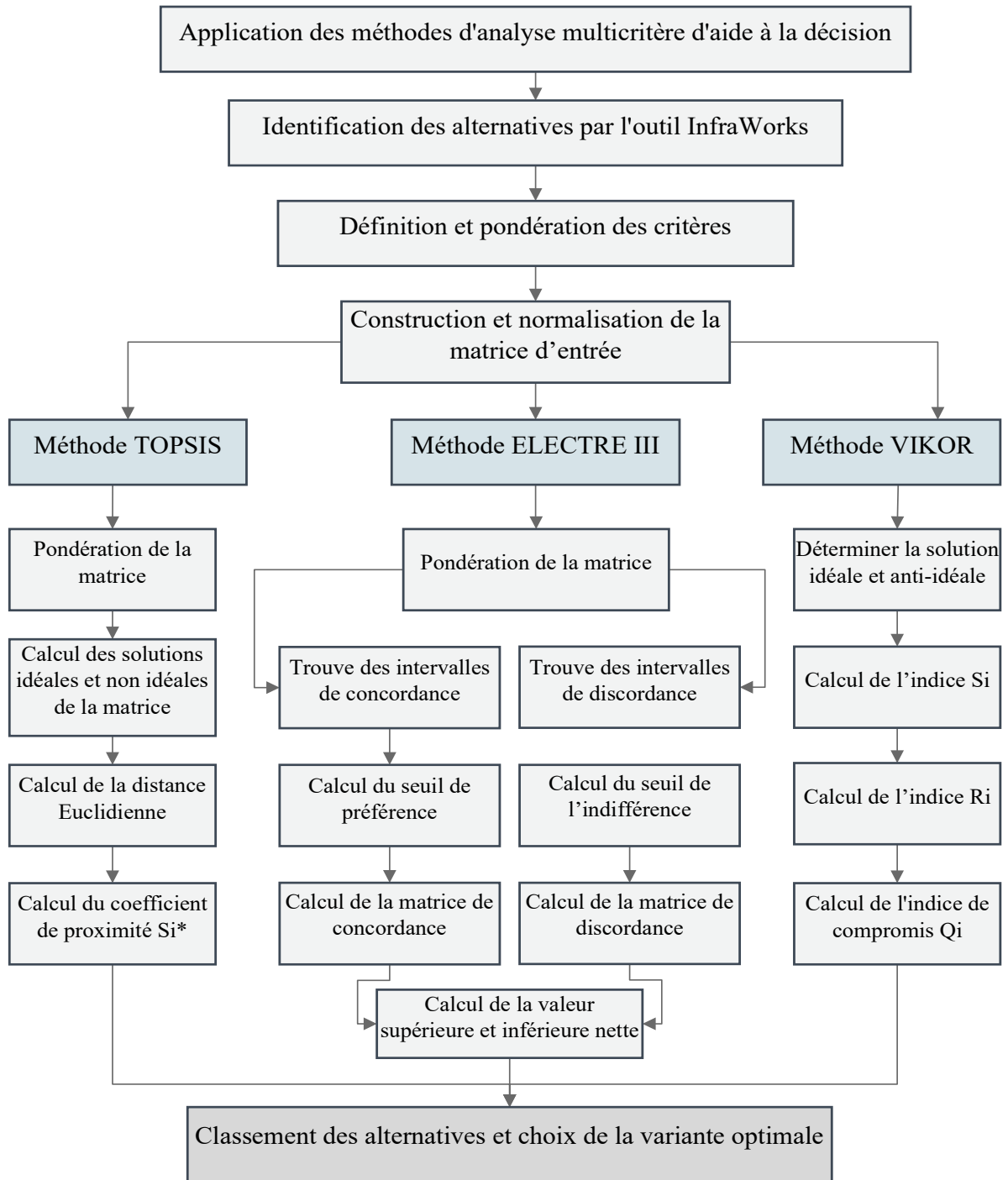


Figure III. 9: Organigramme des sous-étapes des trois méthodes appliquées

III.5.1. Application de la méthode TOPSIS

TOPSIS est une méthode d'aide à la décision multicritère utilisée pour résoudre des problèmes de décision multicritère. Développée par Hwang et Yoon en 1981, elle fait partie des techniques d'aide à la décision. Son atout réside dans sa simplicité de mise en œuvre grâce à un principe clair, son application à la collecte d'informations exactes et complètes, la prise en compte des

solutions idéales positives et négatives, et l'offre d'un cadre analytique bien structuré pour classer les alternatives (Kabir, 2014). La méthode TOPSIS est simple et ne nécessite pas l'utilisation de logiciels sophistiqués. Son principe essentiel est de choisir une solution qui maximise sa proximité avec la solution idéale tout en minimisant son éloignement de la solution la moins souhaitable pour chacun des critères considérés (Zouggari, 2011 ; Roszkowska, 2011). La méthode TOPSIS se décompose en cinq étapes (Madanchian et Taherdoost, 2023) :

➤ **Étape 1 : Définition et normalisation la matrice d'entrée**

Cette étape consiste à définir les alternatives à évaluer et les critères de décision, ainsi qu'à attribuer des niveaux à chaque critère pour chaque alternative dans la matrice. Ensuite, les données sont normalisées de manière que les valeurs des critères soient comprises entre 0 et 1, permettant une comparaison équitable entre les alternatives. Pour ce faire, nous appliquons l'équation (1) afin d'obtenir les nouvelles entrées de la matrice.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (1)$$

➤ **Étape 2 : Pondération de la matrice**

En utilisant un coefficient de pondération pour les critères compris entre 0 et 1 selon l'équation (2), La matrice des scores est obtenue en multipliant les entrées de la matrice par les poids associés aux critères.

$$r_{ij} = w_j \times x_{ij} \quad (2)$$

➤ **Étape 3 : Calcul de la meilleure et la pire solution**

Pour chaque critère, en calculant la valeur associée la plus favorable A^+ et la moindre A^- en fonction de la nature du critère à l'aide des équations présentées dans les expressions 3 et 4.

$$A^+ = \{\max_i x_{ij} (i \in J^+) \setminus \min_i x_{ij} (i \in J^-)\} \quad (3)$$

$$A^- = \{\min_i x_{ij} (i \in J^+) \setminus \max_i x_{ij} (i \in J^-)\} \quad (4)$$

➤ **Étape 4 : Calcul de la distance Euclidienne à l'alternative idéale et à l'alternative négative**

En calculant les vecteurs E_i^+ et E_i^- à l'aide des équations 5 et 6, nous évaluons l'ensemble des écarts de chaque alternative. Ces écarts sont exprimés sous forme de distances euclidiennes, représentant à la fois la distance la plus courte à la solution idéale et la plus grande distance à la solution non idéale entre les valeurs de chaque critère et les valeurs associées déjà évaluées à l'étape précédente.

$$E_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_j^+ - r_{ij})^2} \quad (5)$$

$$E_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_j^- - r_{ij})^2} \quad (6)$$

➤ **Étape 5 : Calcul de la proximité et rangement en ordre**

Dans la dernière étape, en déterminant le coefficient de proximité de chaque alternative selon l'équation (7) qui est obtenue par le taux (entre 0 et 1 ou d'une manière équivalente entre 0% et 100%). Il s'agit de choisir celle qui est la plus proche de la solution idéale favorable A^+ et la plus loin possible de la solution idéale défavorable A^- en conséquence classer les alternatives en fonction de leur proximité à l'alternative idéale et à l'alternative négative.

$$S_i^* = \frac{E_i^-}{E_i^- + E_i^+} \quad (7)$$

III.5.2. Application de la méthode ELECTRE III

Outre le fait que la méthode multicritère ELECTRE III a été largement utilisée et validée dans le contexte des problématiques environnementales, et qu'une source d'information significative est disponible, trois raisons ont justifié le choix d'ELECTRE III. En préambule, cette approche d'analyse multicritère repose sur une approche constructive. Le contexte d'utilisation des outils multicritères est appelé à évoluer au fil du temps et des informations acquises. De plus, l'analyse multicritère s'avère être un outil d'aide à la décision, permettant de parvenir à un compromis entre les différentes parties prenantes. Dans cette perspective, il apparaît nécessaire de laisser aux parties prenantes concernées la possibilité d'ajuster progressivement l'approche en fonction de l'avancement de l'étude. De plus, ELECTRE III permet de prendre en compte les pondérations attribuées aux critères de jugement. Cette étape de pondération permet aux différents acteurs de donner leur avis et d'exprimer d'éventuelles divergences de jugement. L'application des méthodes multicritères ne conduit pas nécessairement à un consensus. Si tel est le cas, une solution possible consiste à réviser les pondérations initiales et à réitérer l'application de la méthode, en faisant valoir auprès des parties prenantes que leurs divergences d'opinions empêchent de parvenir à un consensus. Leyva-Lopez et Fernandez-Gonzales ont également développé une extension de la méthode ELECTRE III pour aider un groupe de décideurs (ou de parties prenantes) à trouver un consensus sur la base d'un ensemble d'alternatives possibles et de différents systèmes de valeurs. Enfin, ELECTRE III est une méthode multicritère basée sur les principes de la logique floue, permettant de prendre en compte les incertitudes liées aux calculs et à l'évaluation des performances à l'aide de pseudo-critères. L'une des principales caractéristiques de cette méthode est sa capacité à traiter des évaluations difficiles à définir, grâce à l'existence de seuils (**Leyva-Lopez & Fernandez-Lonzales, 2003**).

La méthode ELECTRE III est une méthode multicritère d'aide à la décision, développée par Bernard Roy et bien connue, qui classe un ensemble d'alternatives selon un ensemble de critères d'évaluation. Appartenant à la famille des méthodes ELECTRE, cette méthode utilise des comparaisons de paires et des seuils de concordance et de discordance pour comparer les alternatives. Elle prend en charge les valeurs numériques et ordinales des **critères (Charlotte & Michel, 2005 ; Harem, 2020)**. La méthode ELECTRE III se décompose en huit étapes (**Taherdoost & Madanchian, 2023**) :

➤ **Étape 1 : Définition et normalisation la matrice d'entrée**

Cette étape consiste à définir les alternatives à évaluer et les critères de décision, ainsi qu'à attribuer des niveaux à chaque critère pour chaque alternative dans la matrice. Ensuite, les données sont normalisées de manière que les valeurs des critères soient comprises entre 0 et 1, permettant une comparaison équitable entre les alternatives. Pour ce faire, nous appliquons l'équation (8) afin d'obtenir les nouvelles entrées de la matrice.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (8)$$

➤ **Étape 2 : Pondération de la matrice**

En utilisant un coefficient de pondération pour les critères compris entre 0 et 1 selon l'équation (9), La matrice des scores est obtenue en multipliant les entrées de la matrice par les poids associés aux critères.

$$r_{ij} = w_j \times x_{ij} \quad (9)$$

➤ **Étape 3 : Trouver les ensembles d'intervalles de concordance et de discordance**

Dans les expressions (10) et (11), En divisant les ensembles d'attributs en deux ensembles différents d'intervalle de concordance (C_{ab}) et d'intervalle de discordance (D_{ab}).

L'intervalle de concordance est appliqué pour décrire la requête de dominance.

$$C_{ab} = \{j \setminus x_{aj} \geq x_{bj}\} \quad (10)$$

L'intervalle de discordance calculé comme ci-dessous.

$$D_{ab} = \{j \setminus x_{aj} < x_{bj}\} = J - C_{ab} \quad (11)$$

➤ **Étape 4 : Calcul de la matrice d'intervalle de concordance**

Construire la matrice d'intervalle de concordance partielle pour chaque paire d'alternatives. Le seuil de concordance indique la préférence de l'assertion (a surclasse b) qui exprime le minimum de concordance requis. La concordance est définie par l'équation (12).

$$C_{ab} = \sum_{j \in C_{ab}} w_j \quad (12)$$

➤ **Étape 5 : Calcul de la matrice d'intervalle de discordance**

Évaluez la discordance entre chaque paire d'alternatives en comparant les écarts de performance avec un seuil de discordance qui exprime le maximum de discordance toléré. La discordance est définie par l'équation (13) suivante.

$$D_{ab} = \frac{\max_{j \in D_{ab}} |V_{aj} - V_{bj}|}{\max_{j \in J, m, n \in I} |V_{mj} - V_{nj}|} \quad (13)$$

➤ **Étape 6 : Détermination de la matrice de l'indice de concordance**

En comparant les alternatives deux à deux pour chaque critère en évaluant si l'une est au moins aussi bonne. Cela conduit à une matrice de concordance. La matrice d'indice de concordance pour le problème de mesure de la satisfaction peut être écrite selon l'expression (15).

$$\bar{C} = \sum_{a=1}^m \sum_b^m \frac{C(a,b)}{m(m-1)} \quad (14)$$

\bar{C} Représente le seuil de concordance ou l'indice de dominance qui est calculé selon l'équation (14).

$$\begin{cases} e(a, b) = 1 & \text{if } c(a, b) \geq \bar{c} \\ e(a, b) = 0 & \text{if } c(a, b) < \bar{c} \end{cases} \quad (15)$$

➤ **Étape 7 : Détermination de la matrice de l'indice de discordance**

La préférence de l'insatisfaction peut être mesurée par l'indice de discordance qui est calculé selon l'équation (16).

$$\bar{D} = \sum_{a=1}^m \sum_b^m \frac{D(a,b)}{m(m-1)} \quad (16)$$

\bar{D} Représente le seuil de discordance qui est calculé selon l'équation précédente (16).

Sur la base de l'indice de discordance, la matrice d'indice de discordance (f) est donnée par le système (17).

$$\begin{cases} f(a, b) = 1 & \text{if } D(a, b) \leq \bar{D} \\ f(a, b) = 0 & \text{if } D(a, b) > \bar{D} \end{cases} \quad (17)$$

➤ **Étape 8 : Calcul de la valeur nette supérieure et inférieure**

Dans la dernière étape, en calculant la valeur nette supérieure et la valeur nette inférieure selon les équations 18 et 19. le critère C_a résume le nombre de supériorités compétitives pour toutes les alternatives. Plus ce nombre est élevé, plus la performance s'améliore, et donc il peut fournir le classement des alternatives. En revanche, le critère D_a détermine le nombre d'infériorités, classant ainsi les alternatives.

$$C_a = \sum_{b=1}^n C_{(a,b)} - \sum_{b=1}^n C_{(b,a)} \quad (18)$$

$$D_a = \sum_{b=1}^n D_{(a,b)} - \sum_{b=1}^n D_{(b,a)} \quad (19)$$

III.5.3. Application de la méthode VIKOR

La méthode VIKOR (VIsekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje) est une autre technique robuste de AMAD développée par Opricovic et Tzeng en 2004 (**Opricovic & Tzeng, 2004**).

Outre sa réputation de méthode multicritère robuste et éprouvée, la méthode VIKOR a été choisie pour plusieurs raisons. Premièrement, elle se distingue par sa concentration sur la recherche d'une solution de compromis, ce qui en fait un outil particulièrement adapté aux contextes où les parties prenantes ont des préférences divergentes. Contrairement à d'autres méthodes de prise de décision multicritères qui privilégient uniquement les solutions optimales, VIKOR se concentre sur l'obtention d'une solution acceptable par toutes les parties, basée sur le concept de proximité de la solution idéale (**Sarkar et al., 2022**).

De plus, VIKOR permet de prendre en compte l'importance relative des critères grâce à l'attribution de pondérations reflétant les priorités des décideurs. Cette flexibilité garantit une adaptation aisée à des contextes décisionnels variés, que ce soit dans les domaines économique, environnemental ou technique. De plus, la méthode VIKOR se distingue par sa capacité à gérer l'incertitude et à approximer les évaluations, ce qui la rend particulièrement pertinente dans les contextes où les données disponibles sont incomplètes ou imprécises. Enfin, elle permet de hiérarchiser les alternatives tout en identifiant la meilleure solution de compromis, facilitant ainsi la prise de décision (**Pourghasemi et al., 2021**).

La méthode VIKOR se décompose en cinq étapes (**Biswas et al., 2023**) :

➤ **Étape 1 : Définition et normalisation de la matrice d'entrée**

Cette étape consiste à définir les alternatives à évaluer et les critères de décision, ainsi qu'à attribuer des niveaux à chaque critère pour chaque alternative dans la matrice. Ensuite, les

données sont normalisées de manière que les valeurs des critères soient comprises entre 0 et 1, permettant une comparaison équitable entre les alternatives. Pour ce faire, nous appliquons l'équation (20) afin d'obtenir les nouvelles entrées de la matrice.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (20)$$

➤ **Étape 2 : Détermination de la solution idéale et non-idéale**

Dans cette étape, déterminez la solution idéale X_i^+ (la meilleure valeur pour chaque critère) et la solution non-idéale X_i^- (la pire valeur pour chaque critère) selon les équations (21) et (22).

$$X_j^+ = \max r_{ij} \quad (21)$$

$$X_j^- = \min r_{ij} \quad (22)$$

➤ **Étape 3 : Calcul des indices de distance S_i et R_i**

Les mesures ou les indices de distance sont calculés à ce stade. Premièrement, en utilisant l'équation (23) comme guide, S_i représente le total pondéré des écarts de chaque alternative par rapport à la solution idéale. Ensuite, en utilisant l'équation (24), R_i représente l'écart le plus important (scénario le plus défavorable) pour chaque choix.

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j \frac{X_i^+ - r_{ij}}{X_i^+ - X_i^-} \quad (23)$$

$$R_i = \max_j (w_j \frac{X_i^+ - r_{ij}}{X_i^+ - X_i^-}) \quad (24)$$

➤ **Étape 4 : Calcul de l'indice de compromis**

Cette étape consiste à déterminer l'indice de compromis (Q_i) de chaque alternative. Grâce à cet indice, nous pouvons classer les options selon leur proximité avec l'équation (25), la solution de compromis optimale.

$$Q_i = U * \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - U) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (25)$$

Où U est un paramètre de pondération (souvent fixé à 0,4), représentant le degré d'importance accordé à la stratégie de compromis.

S^* et S^- sont respectivement les valeurs minimale et maximale de S_i .

R^* et R^- sont respectivement les valeurs minimale et maximale de R_i .

➤ **Étape 5 : Classement des alternatives**

Les alternatives sont classées selon les trois indices calculés précédemment: S_i , R_i et Q_i . Ces indices représentent respectivement la somme pondérée des écarts par rapport à la solution idéale, l'écart pondéré maximal et l'indice de compromis qui combine les deux. Les alternatives sont classées par ordre croissant, c'est-à-dire de la valeur la plus faible à la plus élevée pour chaque indice. L'indice Q_i est particulièrement important car il permet d'identifier la meilleure solution de compromis. L'alternative présentant la plus petite valeur Q_i est initialement considérée comme la meilleure solution.

III.6. DEFINITION ET PONDERATION DES CRITERES D'EVALUATION PAR SRF

III.6.1. Présentation générale de l'outil SRF

L'outil SRF, conçu grâce à la collaboration de Jean Simos, Bernard Roy et José Figueira, est particulièrement bien adapté aux méthodes ELECTRE pour la détermination des pondérations (Figueira & Roy, 2002), comme le démontre l'interface illustrée dans la Figure III. 10. Cet outil a été mentionné dans des références bibliographiques comme un outil adapté à la méthode ELECTRE pour l'évaluation et l'agrégation multicritère. Un outil utilisé pour attribuer une importance relative à chaque critère lors de l'évaluation ou de la prise de décision. SRF vise à optimiser la valorisation des poids dans les trois méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR par la technique des paquets de cartes.



Figure III. 10: Interface du logiciel SRF

III.6.2. Identification des critères de performance et construction de la matrice de décision

Avant de construire la matrice, en parlant sur les critères d'évaluation qui ont été établis en collaboration avec les responsables des travaux publics. Cette collaboration implique probablement que les responsables des travaux publics ont fourni leur expertise et leurs connaissances pour identifier les critères les plus pertinents et les plus appropriés à prendre en compte lors de l'évaluation. Cela garantit que les critères choisis sont bien adaptés aux besoins et aux normes spécifiques du domaine des travaux publics. Les dix critères suivants ont été pris en considération :

- Critère 1 : Longueur du tronçon.
- Critère 2 : Servitude correspond à la courte distance entre le tronçon et le bord de l'oued Chellif de chaque variante.
- Critère 3 : Cubatures de chaque variante correspondent à la différence entre les volumes de déblai et de remblai calculés.
- Critère 4 : Déclivité représente la valeur absolue maximale entre le pourcentage maximal de la pente et celui de la rampe.
- Critère 5 : Coût de financement.

CHAPITRE III: Coordination du BIM et AMAD pour le Choix de la Variante Routière

- Critère 6 : Taux de courbure ou sinuosité est défini comme le pourcentage de la longueur cumulée des courbes de l'arc par rapport à la longueur totale du tronçon.
- Critère 7 : Nombre d'ouvrages d'art.
- Critère 8 : Durée du parcours est le temps nécessaire pour parcourir l'itinéraire.
- Critère 9 : L'agglomération est définie comme la distance la moins courte entre la variante et le regroupement de populations.
- Critère 10 : Surface des terrains à indemniser pour déterminer le montant adéquat de l'indemnisation.

Les critères 1, 3, 4, 5, 7, 8 et 10 doivent être minimisés, tandis que les critères 2, 6 et 9 doivent être maximisés.

Tableau III. 1: Matrice d'entrée pour les critères de performance routière

Critères	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unité	m	m	m ³	%	DA	%	-	s	m	m ²
V 1	12698,87	293,50	77651,67	13,98	367004933,90	52,88	2,00	571,45	49,20	253977,36
V 2	12849,73	126,90	114972,84	14,74	359405121,20	59,71	2,00	578,24	17,30	256994,66
V 3	12452,61	203,10	250032,63	14,48	500069568,40	49,42	2,00	560,37	41,40	249052,12
V 4	12875,55	114,90	502374,31	14,14	976624275,60	45,56	2,00	579,40	28,90	257510,98
V 5	12643,46	162,80	635215,75	14,58	13699762040	51,42	2,00	568,96	13,90	252869,10
V 6	12448,15	103,90	38321,34	14,55	354931386,50	43,51	2,00	560,17	17,70	248963,08
V 7	12602,07	130,20	852682,72	13,90	1863490031,00	60,72	2,00	567,09	24,50	252041,42
V 8	11686,88	85,50	3820,43	10,13	261548203,30	55,85	2,00	525,91	12,30	233737,60

1: Longueur du tronçon, 2: Servitude, 3 : Cubatures, 4 : Déclivité, 5 : Coût, 6 : Taux de courbes, 7 : Nombre d'ouvrages, 8 : Durée de parcours, 9 : L'agglomération, 10 : Terrains indemnisées.

III.6.3. Étapes de la procédure de pondération des critères par SRF

Les étapes suivies par le logiciel pour atteindre à la pondération des critères sont exposées comme suit :

Première étape

Cette étape débute par mentionner l'intitulé et le numéro et le code de chaque critère comme représenté sur la Figure III. 11. Le logiciel peut saisir ces informations dans une boîte de dialogue qui permet d'écrire chaque critère un par un pour chacun des n critères.



Figure III. 11: Saisie les informations de chaque critère

Après avoir saisi tous les critères, une autre boîte de dialogue s'affiche pour identifier l'acteur (décideur) par son nom comme divulgué par la fenêtre de la Figure III. 12.



Figure III. 12: Identification des acteurs

Deuxième étape

Pour compléter la boîte de dialogue, il est nécessaire de renseigner la colonne "RANG". Chaque critère est associé à une carte, dont le numéro représente en réalité le rang du critère, par ordre croissant. Le critère le moins important est attribué au rang 1, le critère suivant au rang 2, et ainsi de suite pour tous les critères comme le montre la Figure III. 13. Les cartes correspondant à des critères de même importance sont regroupées en une seule carte.

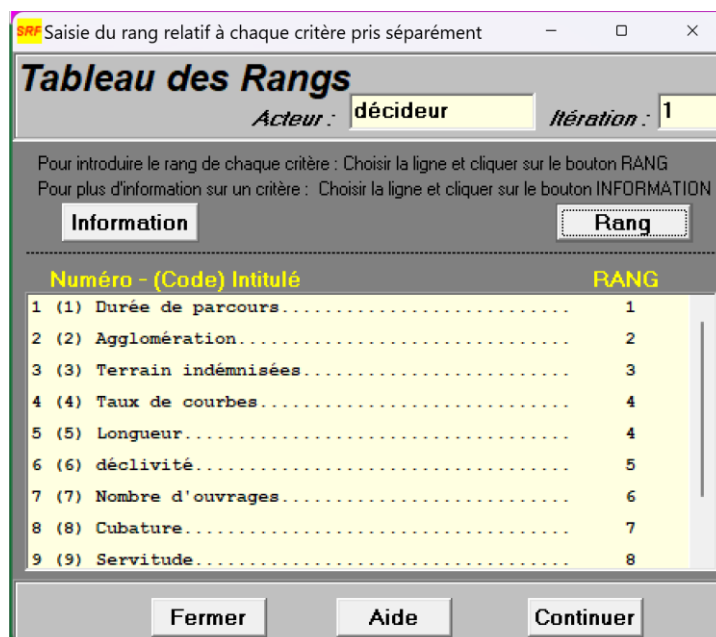


Figure III. 13: Saisie du rang à chaque critère

CHAPITRE III: Coordination du BIM et AMAD pour le Choix de la Variante Routière

Lorsque deux classes de critères successifs dans l'outil de classement ont des importances relativement proches, il est nécessaire d'insérer des cartes blanches entre elles pour refléter cet écart d'importance comme se montre sur la Figure III. 14. L'absence de carte blanche indique que les critères n'ont pas le même poids, mais que l'écart d'importance existe néanmoins. Ce dernier est doublé en insérant une carte, triplé en insérant deux cartes, et ainsi de suite.

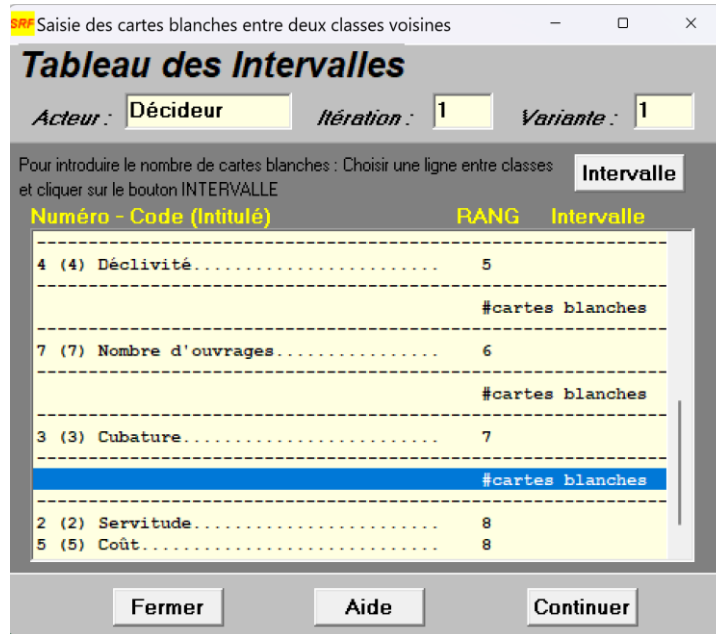


Figure III. 14: Saisie des cartes blanches

✚ Troisième étape

À cette étape comme le montre la Figure III. 15, le logiciel traite et calcule les poids de chaque critère le plus important au moins important. Le logiciel effectue le calcul des poids en prenant en considération la relation entre le poids du critère le plus important et celui du critère le moins important. La somme des poids normée doit être égale à 100%.

Tableau des Résultats

Acteur = Itération = Variante = Format = Valeur Z =

Numéro - (Code) Intitulé	Rang	Intervalle	Poids non Normés	Poids Normés
9 - (9) Agglomération.....	2	1	1,78	4
10 - (10) Terrain indemnisées.....	3	1	2,56	6
1 - (1) Longueur.....	4	2	3,72	8
6 - (6) Taux de courbes.....	4	2	3,72	8
4 - (4) Déclivité.....	5	2	4,89	11
7 - (7) Nombre d'ouvrages.....	6	1	5,67	12
3 - (3) Cubature.....	7	2	6,83	15
2 - (2) Servitude.....	8	2	8	17
5 - (5) Coût.....	8	2	8	17
				100

Fermer

Figure III. 15: Poids relative de chaque critère par SRF

III.7. CONCLUSION

Ce chapitre a mis en évidence l'importance de la coordination entre le BIM et les méthodes multicritère d'aide à la décision (AMAD) dans le processus de sélection d'une variante routière optimale d'un projet routier. La présentation de la zone d'étude de Sidi Belattar a permis de situer les enjeux techniques, économiques et environnementaux qui conditionnent la réussite du projet.

L'intégration de l'outil BIM (InfraWorks) a démontré sa valeur ajoutée en phase d'avant-projet routier: génération de modèles 3D réalistes, simulation de plusieurs alternatives, extraction automatisée d'indicateurs fiables, et amélioration de la communication entre les parties prenantes. Cette approche dépasse les limites des représentations 2D classiques, en offrant une base solide pour une analyse comparative plus précise et plus transparente.

Dans ce cadre, la méthodologie proposée s'est appuyée sur trois méthodes reconnues d'aide multicritère (TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR). Chacune apporte une logique décisionnelle complémentaire: la recherche de proximité à une solution idéale (TOPSIS), la prise en compte d'incertitudes et de préférences floues (ELECTRE III), et la recherche de compromis équilibrés (VIKOR). L'utilisation combinée de ces méthodes, associée à une pondération des critères via l'outil SRF, assure une évaluation robuste et participative des alternatives, tout en renforçant la fiabilité des résultats obtenus.

Ainsi, ce chapitre a permis de poser les fondations méthodologiques et techniques nécessaires à l'évaluation multicritère des variantes de tracés routiers. Les développements qui suivront présenteront l'application concrète de cette démarche sur les variantes proposées, afin d'identifier la solution optimale répondant le mieux aux exigences du projet et aux contraintes de la zone d'étude.

**CHAPITRE IV: ANALYSE,
DISCUSSION ET VALIDATION
DES RESULTATS**

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

IV. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus à la suite de l'évaluation multicritère des différentes variantes de tracé routier. Après la mise en œuvre méthodologique décrite dans le chapitre précédent, les résultats issus des trois approches retenues TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR sont ici examinés afin d'identifier la variante la plus performante selon un ensemble cohérent de critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux.

Les pondérations des critères, établies à l'aide de l'outil SRF en fonction des préférences exprimées par les experts, constituent la base de l'analyse multicritère. Ces pondérations permettent d'attribuer un poids relatif à chaque facteur influençant la qualité du tracé et d'assurer une évaluation équilibrée des différentes alternatives.

La première partie de ce chapitre présente une synthèse des résultats obtenus, notamment les poids des critères, les scores de performance et les classements issus de chaque méthode. La seconde partie est consacrée à la discussion comparative, mettant en évidence les convergences, les écarts et la robustesse des classements à travers une analyse de sensibilité. Enfin, la validation de la variante optimale est réalisée à l'aide de la modélisation BIM sous InfraWorks, permettant de vérifier la cohérence géométrique, la compatibilité environnementale et la faisabilité technique du tracé retenu.

Cette organisation vise à assurer une lecture progressive et critique des résultats, tout en démontrant la pertinence et la fiabilité de la démarche multicritère adoptée pour la sélection du tracé routier optimal.

IV.2. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES RESULTATS OBTENUS

IV.2.1. Récapitulatif des pondérations et critères

Les critères retenus pour l'évaluation des variantes intègrent les dimensions techniques, économiques, d'exploitation et de performance, ainsi que les dimensions environnementales et sociales. Les pondérations ont été déterminées à partir des préférences exprimées à l'aide du logiciel SRF, utilisé pour quantifier l'importance relative de chaque critère dans le processus décisionnel. Les critères les plus influents se sont révélés être le coût global du projet, l'impact environnemental et la sécurité routière, traduisant ainsi une recherche d'équilibre entre faisabilité technique et durabilité.

Les critères considérés dans cette étude sont les suivants: la longueur du tronçon (Critère 1), la servitude, correspondant à la distance la plus courte entre le tracé et le bord de l'oued Chélif pour chaque variante (Critère 2), et la cubature, exprimant la différence entre les volumes de déblais et de remblais calculés (Critère 3). La déclivité représente la valeur absolue maximale entre le pourcentage maximal de la pente et celui de la rampe (Critère 4), tandis que le coût de financement du projet constitue le cinquième critère (Critère 5). Le taux de courbure ou sinuosité, défini comme le pourcentage de la longueur cumulée des courbes par rapport à la longueur totale du tronçon, est pris en compte pour évaluer la régularité du tracé (Critère 6). Le nombre d'ouvrages d'art nécessaires à la réalisation du projet est également considéré (Critère

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

7), de même que la durée du parcours, représentant le temps nécessaire pour franchir le tronçon (Critère 8). Sur le plan environnemental et social, la proximité de l'agglomération, définie comme la distance minimale entre la variante et le tissu urbain, est évaluée (Critère 9), ainsi que la surface des terrains à indemniser, permettant d'estimer le montant adéquat des compensations foncières (Critère 10).

Le Tableau IV. 1 présente les poids relatifs attribués à chacun de ces critères, tels qu'ils ont été déterminés à partir des préférences des experts. Ces pondérations ont été normalisées de manière que la somme totale soit égale à 100%, garantissant ainsi une cohérence dans le processus d'agrégation multicritère.

Tableau IV. 1: Poids relatifs des critères d'évaluation

Nom du critère	Numéro de critère	Rang du critère	Poids non normés	Poids relatif
Longueur du tronçon	1	5	3,72	8
Servitude	2	1	8	17
Cubature	3	2	6,83	15
Déclivité	4	4	4,89	11
Coût de financement	5	1	8	17
Taux de courbure	6	5	3,72	8
Nombre d'ouvrages d'art	7	3	5,67	12
Durée du parcours	8	8	0,84	2
Proximité de l'agglomération	9	7	1,78	4
Surface des terrains à indemniser	10	6	2,56	6
				100%

Afin de mieux illustrer la hiérarchisation des critères, deux représentations histogrammes ont été élaborées.

La Figure IV. 1 présente un histogramme des poids relatifs des critères, permettant de visualiser directement la contribution de chacun d'eux dans le modèle de pondération.

La Figure IV. 2, quant à elle, montre un histogramme du classement des critères par rang, mettant en évidence leur ordre de priorité selon les pondérations obtenues.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

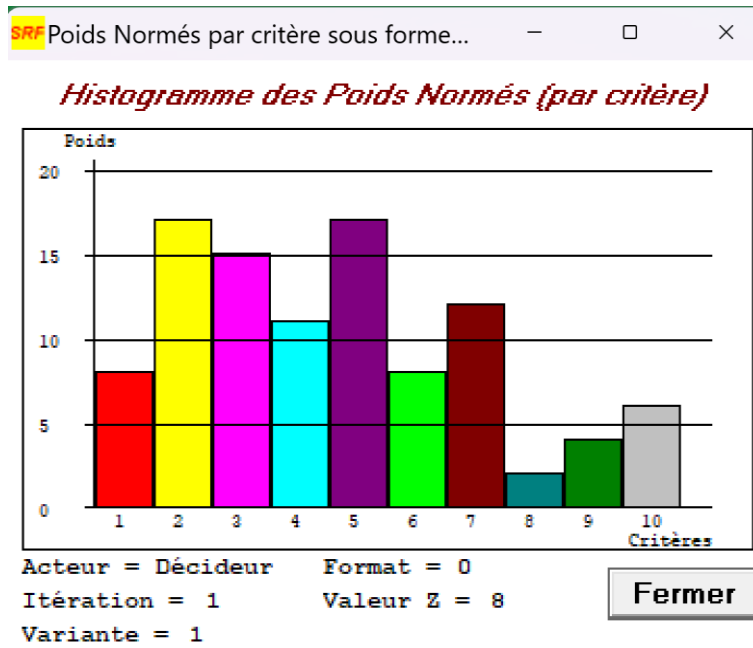


Figure IV. 1: Histogramme des poids relatifs des critères

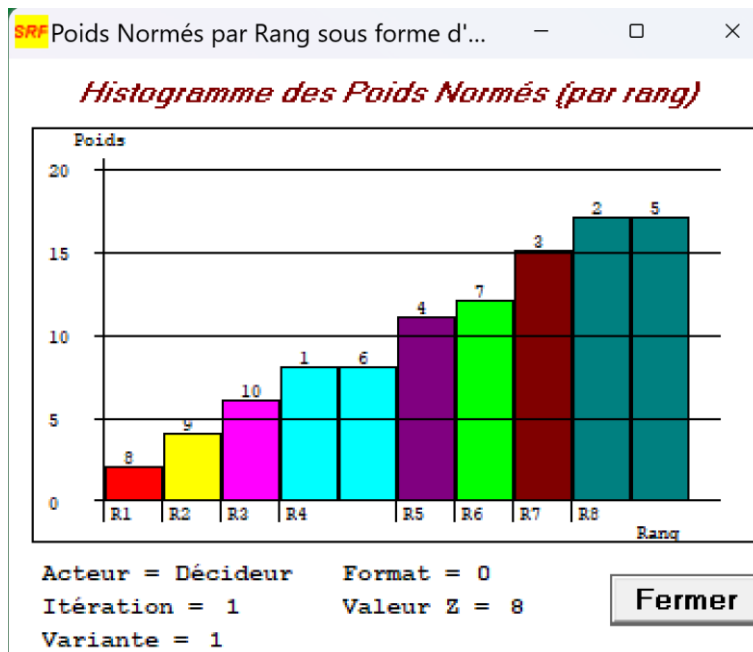


Figure IV. 2: Histogramme du classement des critères par rang

IV.2.2. Résultats des classements obtenus

Après l'établissement de la matrice des critères de performance routière, les huit variantes de tracé ont été modélisées et analysées à l'aide de l'outil Autodesk InfraWorks, permettant une évaluation intégrée des paramètres géométriques, techniques et environnementaux. La Figure IV. 3 présente la configuration générale des variantes étudiées, tandis que la Figure IV. 4 illustre la performance relative de chaque critère pour l'ensemble des variantes proposées. Cette représentation met en évidence les différences significatives entre les alternatives, facilitant

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

ainsi l'interprétation comparative et la hiérarchisation des variantes selon les méthodes multicritères appliquées.

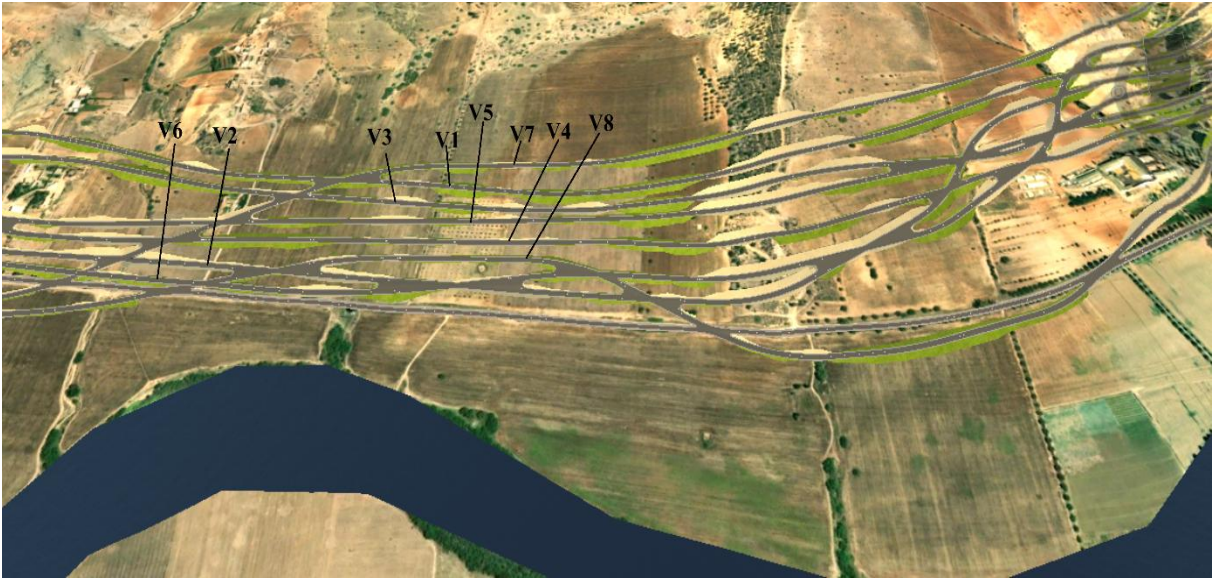


Figure IV. 3: Planification des variantes par l'outil InfraWorks

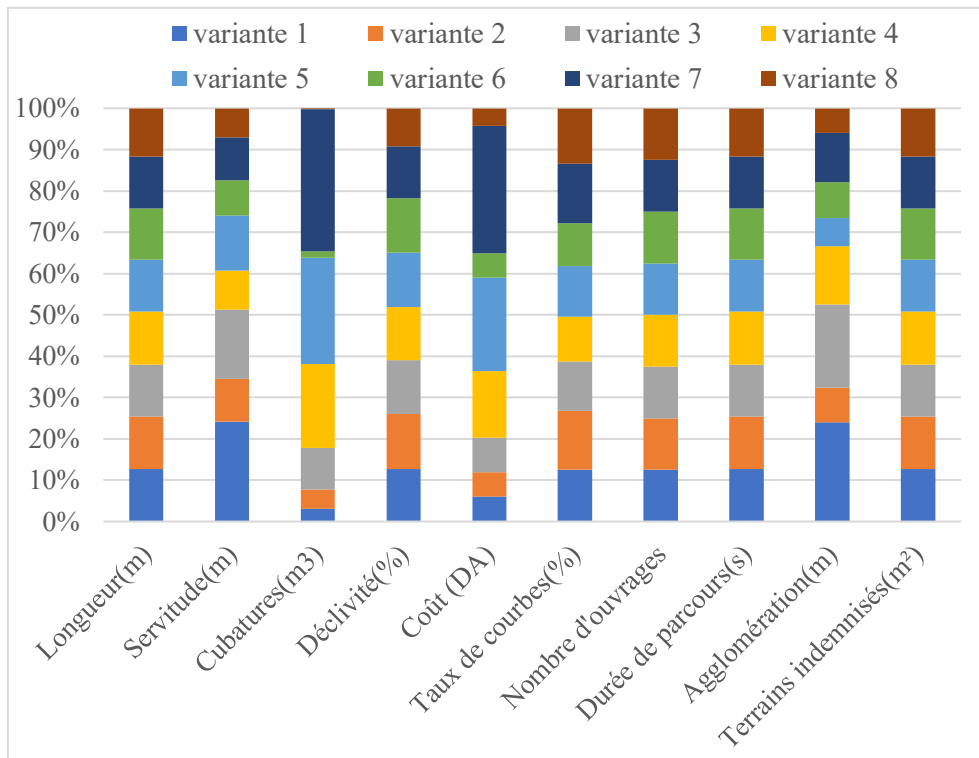


Figure IV. 4: Critères selon leur importance relative parmi les variantes proposées

IV.2.2.1. Résultats de la méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS vise à déterminer la solution la plus performante parmi un ensemble de variantes évaluées selon plusieurs critères, comme présenté précédemment. Son principe repose sur une double optimisation : réduire la distance à la solution idéale tout en augmentant la

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

distance à la solution non idéale. Autrement dit, chaque alternative est évaluée en fonction de sa proximité à la meilleure et à la pire solution pour chaque critère, puis classée selon un indice de proximité relative à la solution idéale, ce qui correspond à un classement par ordre décroissant.

Les résultats de l'application de la méthode TOPSIS montrent que la variante 1 se distingue comme la meilleure, avec un score de proximité de 0,90, suivie de la variante 3 avec un score de 0,71. Les variantes 2 et 8 enregistrent respectivement des scores de 0,67 et 0,66. Enfin, les variantes 6, 4, 5 et 7 obtiennent des scores de 0,65, 0,42, 0,30 et 0,11, confirmant l'ordre de classement illustré dans la Figure IV. 5.

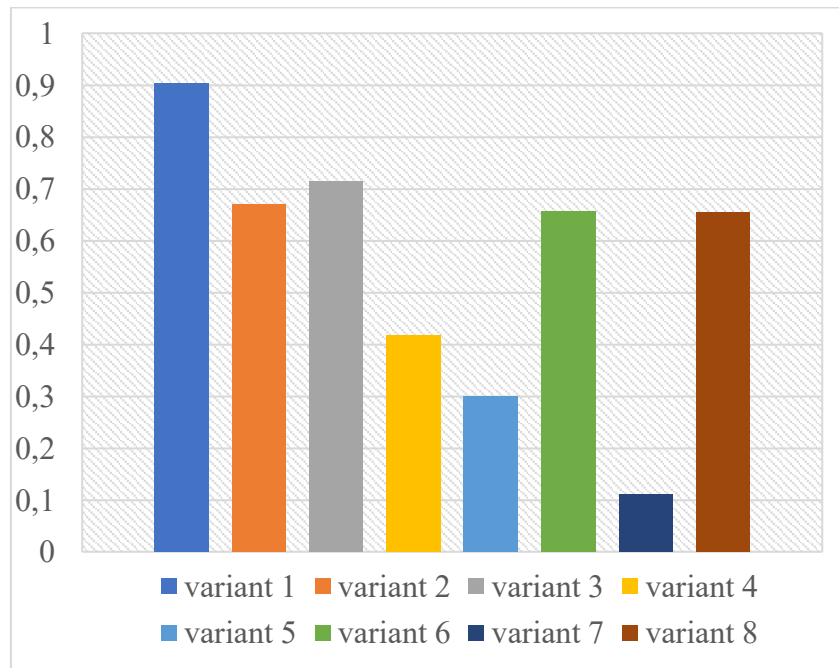


Figure IV. 5: Classement des huit alternatives selon leur coefficient de proximité

IV.2.2.2. Résultats de la méthode ELECTRE III

La méthode ELECTRE III est efficace pour comparer plusieurs variants selon divers critères. Ce processus produit des résultats qui dépendent directement des données d'entrée, telles que les variants représentés, les critères évalués et les pondérations qui leur sont attribuées. Les résultats obtenus par la méthode ELECTRE III peuvent être représentés sous forme de tableaux et de matrices de concordance et de discordance, comme indiqué dans les Tableaux IV. 2 et IV. 3. Ces matrices permettent de calculer les indices de concordance et de discordance, facilitant ainsi le classement des variants selon leurs performances relatives par rapport aux autres variants comparés deux à deux, en référence au seuil de concordance (0,70) et au seuil de discordance (0,62).

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

Tableau IV. 2: Matrice d'intervalle de concordance

	variant 1	variant 2	variant 3	variant 4	variant 5	variant 6	variant 7	variant 8
V1	1	0,5	0,57	0,41	0,57	0,89	0,6	0,92
V2	0,62	1	0,47	0,48	0,51	0,96	0,56	1
V3	0,55	0,65	1	0,52	0,33	0,89	0,44	0,92
V4	0,71	0,64	0,6	1	0,32	0,89	0,43	0,92
V5	0,55	0,61	0,79	0,8	1	0,96	0,56	0,92
V6	0,23	0,16	0,23	0,23	0,16	1	0,23	0,92
V7	0,52	0,56	0,68	0,69	0,56	0,89	1	1
V8	0,2	0,12	0,2	0,2	0,2	0,2	0,12	1

Tableau IV. 3: Matrice d'intervalle de discordance

	variant 1	variant 2	variant 3	variant 4	variant 5	variant 6	variant 7	variant 8
V1	0	0,076	0,645	0,805	1	0,023	1	0,021
V2	1	0	1	1	1	0,021	1	0
V3	1	0,198	0	0,968	1	0,006	1	0,080
V4	1	0,158	1	0	1	0,020	1	0,089
V5	0,693	0,069	0,264	0,294	0	0,025	1	0,030
V6	1	1	1	1	1	0	1	0,535
V7	0,660	0,025	0,347	0,143	0,492	0,018	0	0
V8	1	1	1	1	1	1	1	0

Les différentes variantes sont classées par ordre croissant en fonction de leur valeur nette maximale, comme illustré à la Figure IV. 6. La meilleure variante est déterminée par le score le plus élevé en termes de concordance avec les critères d'évaluation. L'analyse réalisée avec la méthode Electre III indique que la variante 5 obtient le meilleur résultat avec un score de 2,54, suivie de près par la variante 7 avec une valeur de 1,96. Les variantes 2 et 4 ont des valeurs de 1,36 et 1,18. De plus, les variantes 1, 3, 6 et 8 affichent des valeurs respectives de 1,08, 0,76, -3,52 et -5,36.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

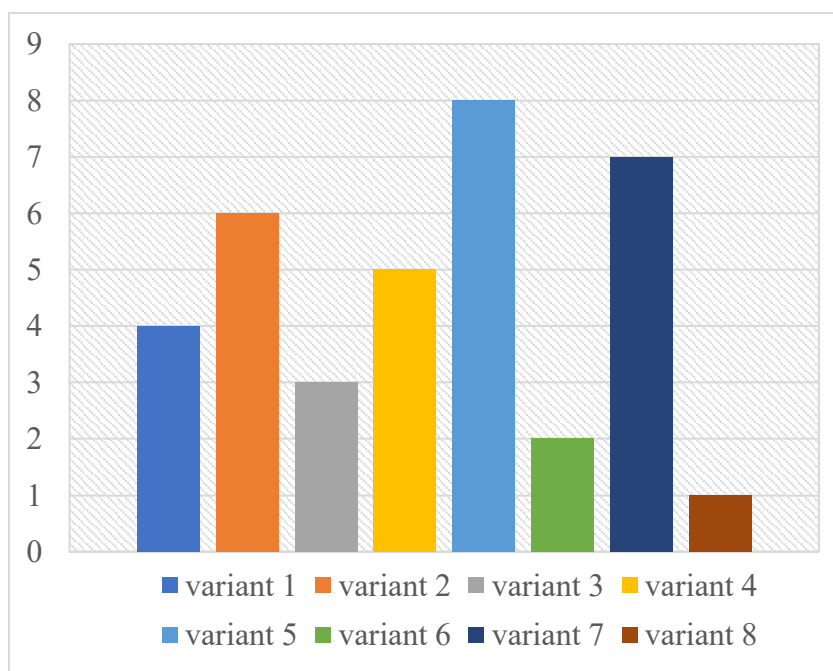


Figure IV. 6: Classement des huit variantes selon la valeur nette supérieure

IV.2.2.3. Résultats de la méthode VIKOR

La méthode VIKOR vise à déterminer le compromis le plus proche de la solution idéale en prenant simultanément en compte le regret individuel et la satisfaction collective. Il s'agit d'une approche d'aide à la décision multicritère qui cherche à minimiser le désavantage maximal tout en optimisant la performance globale des critères.

Chaque alternative est évaluée à partir de deux indices fondamentaux: S_i , qui exprime l'écart global par rapport à la solution idéale, et R_i , qui traduit l'écart individuel maximal parmi les critères. À partir de ces deux mesures, un indice de compromis global (Q_i) est calculé pour établir le classement des variantes, les valeurs les plus faibles indiquant une meilleure performance le classement se faisant ainsi par ordre croissant de Q_i .

L'analyse des résultats met en évidence que la variante 1 constitue la meilleure solution de compromis, avec un score Q_i de 0,048, traduisant une parfaite conformité aux conditions de la méthode VIKOR. Elle est suivie par la variante 3, avec un score de 0,24, tandis que les variantes 2 et 5 enregistrent respectivement 0,54 et 0,56. Enfin, les variantes 8, 6, 4 et 7 affichent des scores Q_i de 0,60, 0,71, 0,78 et 1,00, les positionnant en fin de classement, comme illustré à la Figure IV. 7.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

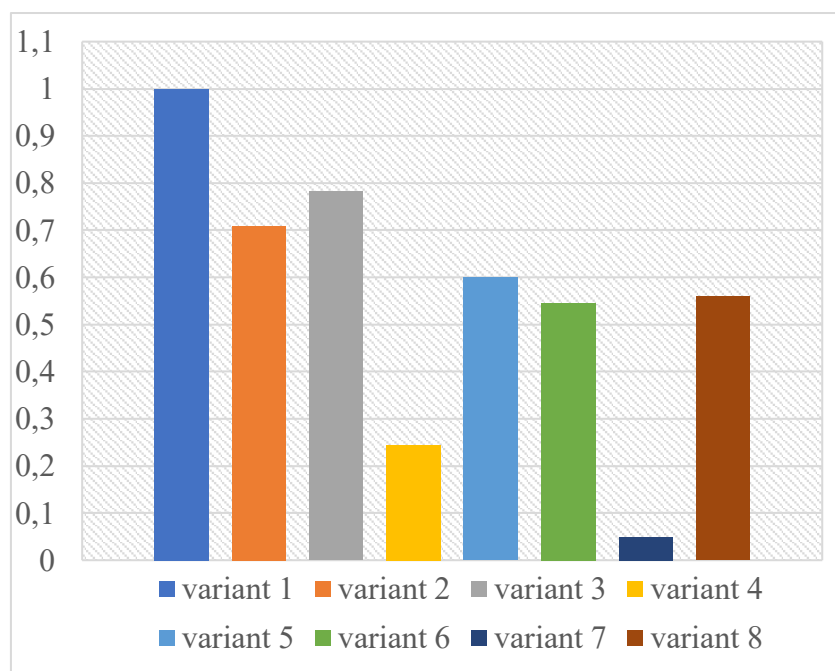


Figure IV. 7: Classement des huit alternatives en fonction du score de compromis

IV.3. DISCUSSION COMPARATIVE DES RESULTATS

IV.3.1. Concordance entre les classements

L'analyse comparative des résultats issus des trois méthodes multicritères TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR met en évidence à la fois des convergences notables et certaines divergences dans le classement des variantes de tracé.

Dans l'ensemble, les méthodes TOPSIS et VIKOR présentent une forte cohérence dans leurs résultats, toutes deux identifiant la variante 1 comme la meilleure alternative. Cette concordance s'explique par la proximité conceptuelle des deux approches, fondées sur l'évaluation de la distance par rapport à une solution idéale et sur la recherche d'un compromis optimal entre les différents critères considérés.

À l'inverse, la méthode ELECTRE III accorde une importance plus marquée à la variante 5, traduisant une sensibilité accrue aux critères économiques et techniques, tels que le coût de financement ou la faisabilité d'exécution. Cette divergence illustre la spécificité du modèle ELECTRE III, qui intègre des seuils de préférence et d'indifférence, rendant l'évaluation plus nuancée face à des écarts limités entre alternatives.

Malgré ces différences d'appréciation, une tendance générale de concordance se dégage: les variantes 1 et 3 apparaissent de manière récurrente parmi les solutions les plus performantes, confirmant leur robustesse et leur équilibre global vis-à-vis des divers modèles décisionnels mobilisés.

IV.3.2. Interprétation des écarts observés

Les écarts constatés entre les classements proviennent principalement de la nature mathématique et conceptuelle des méthodes employées.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

Les méthodes TOPSIS et VIKOR s'appuient sur une logique compensatoire, visant à identifier les alternatives offrant le meilleur équilibre global entre l'ensemble des critères. Cette approche favorise les solutions présentant une performance homogène, même en présence de légères faiblesses sur certains aspects. C'est ce qui explique la position dominante de la variante 1, qui affiche une performance équilibrée sur la majorité des critères.

À l'inverse, la méthode ELECTRE III repose sur un mécanisme de comparaison par paires et l'utilisation de seuils de préférence et d'indifférence, rendant le processus de classement plus sélectif et sensible aux critères fortement pondérés. Ainsi, une différence minimale concernant le coût de financement ou la cubature peut modifier la hiérarchie entre deux variantes proches, traduisant une approche plus rigoureuse vis-à-vis des écarts de performance.

Ces écarts illustrent la complémentarité des approches : alors que TOPSIS et VIKOR privilégient la cohérence globale, ELECTRE III met davantage en évidence la dominance locale selon certains critères décisifs. L'ensemble de ces résultats démontre la fiabilité du processus décisionnel et souligne l'intérêt d'une approche multi-méthodes pour renforcer la robustesse des conclusions.

IV.3.3. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a pour objectif d'évaluer la stabilité du classement des variantes face aux variations des pondérations attribuées aux critères d'évaluation. Cette étape constitue un élément essentiel de validation des résultats issus des méthodes multicritères, permettant de vérifier la robustesse et la fiabilité du modèle décisionnel adopté.

Dans le cadre de cette étude, cinq scénarios distincts ont été définis, chacun reposant sur une modification progressive ($\pm 10\%$) des poids relatifs des critères, en accordant tour à tour une importance accrue aux dimensions techniques, économiques, environnementales, sociales et d'exploitation. Ces ajustements ont été intégrés dans les trois modèles décisionnels (TOPSIS, VIKOR et ELECTRE III) afin d'observer les éventuelles fluctuations dans l'ordre de classement des variantes.

Les résultats obtenus, présentés dans le Tableau IV. 4, indiquent que les méthodes TOPSIS et VIKOR conservent la variante 1 comme solution optimale dans la majorité des scénarios analysés, suivie de près par les variantes 3 et 2, confirmant ainsi leur stabilité et leur performance globale. La méthode ELECTRE III, quant à elle, manifeste une légère sensibilité aux variations des pondérations, en particulier lorsqu'elles concernent les critères économiques et techniques tels que le coût de financement et la cubature. Toutefois, ces fluctuations n'affectent pas de manière significative la hiérarchie globale des alternatives.

Cette stabilité générale des classements face aux modifications de pondération traduit la cohérence interne du modèle de décision et la consistance des préférences exprimées. Elle confirme la robustesse des résultats obtenus et renforce la validité scientifique de la démarche multicritère adoptée pour l'évaluation et la sélection du tracé routier optimal.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

Tableau IV. 4: Des poids différents pour chaque scénario

Poids	Longueur	Servitude	Cubature	Déclivité	Coût	Taux de courbure	Nombre d'ouvrages d'art	Durée du parcours	Proximité de l'agglomération	Terrains à indemniser
Scenario 1	0,08	0,17	0,15	0,11	0,17	0,08	0,12	0,02	0,04	0,06
Scenario 2	0,07	0,15	0,13	0,11	0,16	0,12	0,11	0,04	0,06	0,05
Scenario 3	0,08	0,17	0,14	0,11	0,20	0,11	0,06	0,03	0,04	0,06
Scenario 4	0,07	0,16	0,15	0,13	0,18	0,10	0,09	0,03	0,05	0,04
Scenario 5	0,11	0,17	0,14	0,12	0,15	0,09	0,11	0,02	0,04	0,05

IV.4. VALIDATION DE LA VARIANTE OPTIMALE PAR LE BIM

Une analyse approfondie des cinq scénarios définis pour chaque critère, ainsi que des résultats obtenus par les trois méthodes multicritères (TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR), a révélé une convergence significative dans les classements des variantes. Les résultats montrent que la variante 2 occupe systématiquement les premières positions selon les trois méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR. Cette proximité de performance confirme que la variante 2 représente la solution optimale commune aux trois approches, tandis que la variante 1 constitue une alternative crédible. Les résultats démontrent que, malgré leurs fondements méthodologiques distincts, les trois approches identifient les mêmes variantes parmi les plus performantes, confirmant ainsi la robustesse du processus d'évaluation.

De manière générale :

- **Variante 2:** apparaît comme la solution optimale, étant classée parmi les trois premières positions selon TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR. Elle se distingue par son équilibre entre performance technique, coût maîtrisé et faible impact environnemental ;
- **Variante 1:** occupe la première position selon les méthodes TOPSIS et VIKOR, et la cinquième selon ELECTRE III, représentant ainsi une alternative crédible et robuste ;
- **Variantes 3 et 4:** présentent des performances intermédiaires, avec des classements relativement stables selon les trois approches ;
- **Variantes 6 et 7:** sont moins performantes, affichant des scores faibles dans l'ensemble des méthodes, traduisant une pertinence limitée pour le projet ;
- **Variantes 5 et 8:** se retrouvent systématiquement en dernière position, confirmant leur inadéquation avec les objectifs du projet.

Cette convergence des résultats atteste de la fiabilité des conclusions obtenues. La **variante 2** émerge comme la solution optimale commune aux trois méthodes, tandis que la variante 1 peut être retenue comme option secondaire en raison de ses performances proches, comme illustre dans le Tableau IV. 5. Les pondérations des dix critères, établies à l'aide du logiciel SRF, ont assuré une prise en compte équilibrée des dimensions économiques, environnementales et techniques, garantissant une évaluation objective et transparente.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

L'intégration de ces résultats dans l'environnement BIM a permis de valider visuellement et techniquement la solution optimale. La modélisation 3D du tronçon a confirmé la cohérence géométrique, la faisabilité technique et la compatibilité hydrologique de la variante 2, notamment en matière de réduction du risque d'inondation. Cette validation numérique renforce la pertinence du choix final et démontre l'efficacité d'une approche intégrée BIM-AMAD, combinant rigueur analytique et simulation spatiale.

En conclusion, la variante 2 s'impose comme la solution optimale, validée par les trois méthodes et par le BIM, offrant le meilleur compromis global entre les critères techniques, économiques et environnementaux. Elle garantit ainsi une décision robuste, justifiable et scientifiquement fondée pour la planification du tronçon étudié de la CW 60, reliant l'agglomération de Sidi Belattar à la RN 90, à proximité de la rivière Cheliff.

Tableau IV. 5: Classement des variantes à l'aide des trois méthodes précédentes

Variantes	Classement de la méthode TOPSIS	Classement de la méthode ELECTRE III	Classement de la méthode VIKOR
variante 1	1	5	1
variante 2	3	3	3
variante 3	2	6	2
variante 4	6	4	7
variante 5	7	1	4
variante 6	4	7	6
variante 7	8	2	8
variante 8	5	8	5

IV.4.1. Visualisation et simulation sous InfraWorks

La phase de validation finale des variantes a été réalisée à l'aide de l'outil Autodesk InfraWorks, qui constitue une plateforme intégrée de modélisation, de visualisation et de simulation 3D dédiée à la planification des infrastructures. Cet environnement a permis de traduire les résultats de l'analyse multicritère en représentations géospatiales dynamiques, facilitant ainsi la compréhension des différences entre les variantes et la vérification de leur faisabilité sur le terrain, comme l'illustre la Figure IV. 8.

La simulation 3D a confirmé la cohérence géométrique de la variante retenue et a permis d'identifier certains points sensibles, notamment au niveau des zones d'intersection et de franchissement d'oueds. Ces analyses visuelles ont contribué à la validation technique et environnementale du projet avant la phase de conception détaillée.

L'outil a également permis de simuler le comportement hydrologique du tronçon étudié. Les résultats ont confirmé que la variante 2, identifiée comme optimale par les méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR, présente la meilleure adaptation au contexte hydrologique local, en réduisant significativement les zones d'accumulation d'eau et en améliorant la sécurité du tracé.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

De plus, la visualisation 3D a permis d'évaluer les aspects techniques et esthétiques du projet, tels que les volumes de terrassement, la cohérence des profils en long et en travers, ainsi que l'intégration paysagère du tracé. Cette étape a constitué un outil d'aide à la décision visuelle essentiel, permettant de valider la pertinence technique et environnementale de la variante sélectionnée.

Ainsi, l'utilisation d'InfraWorks a permis de valider, simuler et communiquer les résultats de l'évaluation multicritère de manière claire, interactive et collaborative. Elle a joué un rôle déterminant dans la confirmation du choix de la variante 2 comme solution optimale, tout en assurant la traçabilité et la transparence du processus décisionnel au sein d'un environnement BIM intégré.



Figure IV. 8: Visualisation dynamique de la variante optimale du tracé routier

IV.4.2. Vérification géométrique et environnementale

La vérification géométrique et environnementale constitue une étape essentielle du processus de validation finale du projet. Elle vise à s'assurer que la variante optimale, modélisée et simulée sous Autodesk InfraWorks, respecte à la fois les normes de conception routière et les exigences de durabilité environnementale.

Sur le plan géométrique, une analyse détaillée des principaux paramètres notamment la longueur du tracé, les pentes longitudinales, les rayons de courbure, la visibilité, ainsi que les dénivelés a été effectuée à partir du modèle 3D. Les résultats confirment la conformité du tracé aux standards en vigueur, garantissant ainsi la sécurité de la circulation et le confort des usagers.

Les caractéristiques principales de la variante 2, identifiée comme optimale, sont résumées dans le Tableau IV. 6 ci-dessous.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

Tableau IV. 6: Caractéristiques de la variante optimale

Paramètres	Valeurs
Longueur (m)	12849,733
Servitude (m)	126,9
Cubatures (m3)	114972,838
Déclivité (%)	14,738
Coût (DA)	359405121,2
Taux de courbes (%)	59,714
Nombre d'ouvrages	2
Durée de parcours (s)	578,237985
Proximité de l'agglomération (m)	17,3
Terrains à indemniser (m ²)	256994,66

Sur le plan environnemental, la simulation 3D a permis d'évaluer l'interaction du tracé avec son environnement immédiat. Les analyses ont porté sur la proximité des zones habitées, la préservation des zones naturelles sensibles, ainsi que la réduction des emprises foncières. Les résultats indiquent que la variante 2, identifiée comme optimale par les trois méthodes multicritères (TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR), présente la meilleure intégration paysagère et le moindre impact environnemental.

Cette double vérification géométrique et environnementale confirme la pertinence du choix de la variante retenue, qui se distingue par un équilibre optimal entre performance technique, compatibilité environnementale et maîtrise des coûts. Elle illustre également la valeur ajoutée de l'intégration du BIM et de la modélisation 3D dans le processus de planification des infrastructures, en renforçant la traçabilité, la transparence et la qualité de la décision finale.

IV.5. DISCUSSION GENERALE

L'analyse comparative réalisée à partir des trois méthodes multicritères a permis de confronter les différentes variantes de tracé routier selon un ensemble cohérent de critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux. Cette approche a mis en évidence la pertinence des méthodes multicritères comme outil d'aide à la décision rationnelle et transparente dans le cadre de la planification des infrastructures routières.

Les résultats montrent une forte cohérence entre les méthodes TOPSIS et VIKOR, qui désignent toutes deux la variante 1 comme solution optimale. La méthode ELECTRE III, quant à elle, favorise la variante 5, reflétant une sensibilité accrue aux critères économiques et techniques fortement pondérés. Cependant, l'ensemble des méthodes s'accorde sur la performance remarquable de la variante 2, constamment classée parmi les trois premières positions, ce qui traduit sa stabilité et sa robustesse face aux différences méthodologiques et aux pondérations appliquées.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

Cette convergence partielle met en lumière la complémentarité des approches : TOPSIS et VIKOR privilégient la cohérence globale et la proximité à la solution idéale, tandis qu'ELECTRE III adopte une logique de comparaison par paires, plus discriminante et sensible aux seuils de préférence. L'analyse de sensibilité a confirmé que les variations modérées des poids des critères n'affectent pas significativement la hiérarchie des meilleures variantes, soulignant la solidité du modèle de pondération et la fiabilité du processus d'évaluation.

La validation BIM réalisée sous InfraWorks a permis de visualiser et de simuler la variante optimale, confirmant sa cohérence géométrique, sa compatibilité environnementale et son intégration harmonieuse dans le territoire étudié.

En définitive, cette étude démontre que l'intégration d'une démarche multicritère appuyée par le BIM constitue une méthode performante pour l'évaluation, la sélection et la validation des tracés routiers. Elle favorise la prise en compte équilibrée des enjeux de durabilité, de sécurité et de faisabilité technique, tout en renforçant la transparence et la robustesse du processus décisionnel. La variante 2 apparaît ainsi comme une solution de compromis solide, conciliant efficacité technique, coût maîtrisé et impact environnemental réduit une alternative à privilégier dans une perspective de développement durable et de planification raisonnée des infrastructures.

IV.6. CONCLUSION

Les résultats obtenus à travers l'analyse multicritère, appuyée par la modélisation BIM, ont permis d'identifier avec précision les variantes de tracé les plus performantes et de confirmer la pertinence de la démarche méthodologique adoptée. Les pondérations des critères, établies à l'aide de l'outil SRF selon les préférences exprimées, ont garanti une répartition objective de l'importance relative des paramètres techniques, économiques, environnementaux et sociaux.

L'intégration conjointe des méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR a permis de croiser plusieurs logiques d'évaluation, assurant une analyse globale et robuste des variantes. Les résultats obtenus démontrent la fiabilité du processus décisionnel, la stabilité des classements et la cohérence interne du modèle adopté.

De plus, la validation numérique réalisée sous InfraWorks a permis de confirmer la conformité géométrique et la compatibilité environnementale de la variante optimale, traduisant une intégration efficace des résultats de l'analyse multicritère dans un environnement de conception réaliste.

Ainsi, cette approche intégrée, combinant pondération par l'outil SRF, évaluation multicritère et validation BIM, constitue un cadre méthodologique solide et reproductible pour la planification optimisée des projets routiers. Elle favorise la prise en compte équilibrée des enjeux de durabilité, de sécurité et de faisabilité technique, tout en renforçant la transparence et la traçabilité du processus décisionnel.

Enfin, l'application de cette démarche a permis d'identifier la variante 2 comme une solution de compromis stable et performante, conciliant efficacité technique, coût maîtrisé et impact environnemental réduit.

CHAPITRE IV: Analyse, Discussion et Validation des Résultats

Cette contribution méthodologique ouvre la voie à la conclusion générale de cette recherche, qui présentera les enseignements majeurs, les apports scientifiques et les perspectives d'approfondissement futurs.

**CHAPITRE V: AVANT-PROJET
DETAILLE PAR BIM DE LA
VARIANTE OPTIMALE**

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

V.1. INTRODUCTION

À l'issue de l'analyse multicritère présentée dans le chapitre précédent, la variante optimale du tracé routier a été retenue sur la base des résultats obtenus par les méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR intégrant les critères techniques, économiques et environnementaux. Cette variante, jugée la plus performante, fait désormais l'objet d'un avant-projet détaillé, réalisé à l'aide des outils BIM et plus particulièrement du logiciel Autodesk Civil 3D, reconnu pour sa puissance dans la conception et la modélisation des infrastructures routières.

La conception des infrastructures routières constitue un facteur déterminant pour assurer l'efficacité, la sécurité et la durabilité des réseaux de transport (**Basnet, 2024**). L'objectif principal de ce chapitre est de développer un modèle numérique complet et précis de la variante optimale, depuis la modélisation du terrain naturel jusqu'à la génération des profils types, en passant par la définition du tracé en plan et la conception du profil en long. Cette étape constitue la phase de transition entre l'étude théorique et la modélisation technique, permettant de concrétiser la solution optimale identifiée dans les chapitres précédents.

La démarche adoptée repose sur l'exploitation conjointe des outils SIG (ArcGIS, Google Earth) et BIM (Civil 3D). Dans un premier temps, un levé topographique de la zone d'étude, située entre Sidi Belattar et la RN90, a été réalisé. Les données altimétriques et planimétriques ont été extraites à partir de Google Earth et traitées sous ArcGIS pour générer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de haute précision. Ce MNT constitue la base de la modélisation du projet routier dans Civil 3D.

La démarche repose dans un premier temps sur la modélisation du terrain naturel, obtenue à partir d'un levé topographique réalisé à l'aide d'outils SIG tels que ArcGIS et Google Earth, puis importée dans Civil 3D après géoréférencement selon le système UTM-WGS84. Cette base topographique permet la reconstitution du Modèle Numérique de Terrain (MNT), support essentiel à la conception de l'infrastructure routière.

Par la suite, le projet est développé dans l'environnement Civil 3D, qui permet d'élaborer et d'intégrer les différentes composantes géométriques du tracé tout en garantissant la précision et la conformité aux normes routières. Le recours à la modélisation 3D facilite la compréhension du relief, la cohérence des données et la préparation des étapes ultérieures d'exécution.

Ainsi, ce chapitre présente le processus complet de réalisation de l'avant-projet détaillé par BIM de la variante optimale, depuis le levé topographique et la modélisation du terrain jusqu'à la synthèse du modèle numérique. Cette approche intégrée illustre les avantages du BIM pour la conception d'infrastructures routières modernes, notamment en termes de précision, de collaboration et de visualisation tridimensionnelle du projet.

V.2. PRESENTATION GENERALE DE LA VARIANTE OPTIMALE

À la suite de l'analyse multicritère présentée dans le chapitre précédent, la variante 2 a été identifiée comme solution optimale pour le projet de tracé routier étudié. Ce choix résulte d'une évaluation intégrée prenant en compte les critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux, selon une approche méthodologique combinant les méthodes TOPSIS, ELECTRE

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

III et VIKOR, pondérées à l'aide de l'outil SRF. La convergence des résultats, confirmée par la validation visuelle et géométrique sous Autodesk InfraWorks, a permis de confirmer la pertinence de cette variante comme compromis équilibré entre performance et durabilité.

La variante optimale se distingue par sa cohérence géométrique, son adaptation harmonieuse au relief naturel et sa compatibilité environnementale. Son tracé minimise les volumes de déblais et de remblais, optimise la longueur et les rayons de courbure tout en respectant les normes géométriques applicables aux routes de cette catégorie. Elle offre également un bon compromis entre le coût de réalisation et la sécurité des usagers, tout en réduisant l'impact sur les zones sensibles du site d'étude situé entre Sidi Belattar et la RN90.

Ce cinquième chapitre est consacré à l'élaboration de l'avant-projet détaillé (APD) de cette variante retenue, à travers l'utilisation du logiciel Autodesk Civil 3D dans un cadre BIM. L'objectif est de traduire la solution conceptuelle validée lors de la phase d'évaluation multicritère en un modèle géométrique et numérique complet, permettant une représentation tridimensionnelle précise de l'infrastructure projetée.

L'avant-projet détaillé comprend plusieurs étapes successives :

- La préparation des données topographiques et la modélisation du terrain naturel (MNT) à partir des levés extraits de Google Earth et ArcGIS ;
- Le tracé en plan, intégrant les éléments géométriques principaux de la route ;
- La définition du profil en long, assurant la cohérence altimétrique du projet avec la topographie existante ;
- Enfin, la génération des profils en travers types, permettant d'analyser la configuration structurelle de la plateforme et les volumes de terrassement associés.

L'utilisation de Civil 3D dans un environnement BIM apporte une valeur ajoutée significative à cette phase du projet: elle permet une intégration dynamique des données topographiques, une visualisation 3D réaliste et une analyse précise des paramètres géométriques et volumétriques. Cette modélisation constitue une base fiable pour la planification des travaux, l'estimation des coûts et la coordination interdisciplinaire au sein du projet d'infrastructure.

Ainsi, ce chapitre vise à illustrer concrètement la transition entre la phase d'analyse multicritère (chapitre IV) et la phase de conception technique détaillée, démontrant l'efficacité du couplage entre méthodes d'aide à la décision et technologies BIM pour la planification et la conception optimisée des projets routiers.

V.3. LEVE TOPOGRAPHIQUE ET MODELISATION DU TERRAIN

La première étape de la conception de l'avant-projet détaillé consiste à établir une représentation précise et fidèle du terrain naturel, qui constitue la base fondamentale de toute modélisation routière. Le levé topographique joue un rôle déterminant dans ce processus, en permettant de mesurer, quantifier et représenter avec exactitude les caractéristiques géométriques de la surface terrestre. Ces données sont ensuite exploitées pour générer un modèle numérique de terrain (MNT) d'une grande précision, servant de référence essentielle à

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

la conception du tracé en plan, du profil en long et des profils en travers (Batakanwa & Maliaki, 2025).

V.3.1. Importation des points topographiques et création du MNT

Le levé topographique est un processus qui vise à quantifier et mesurer et à représenter la forme et les caractéristiques d'une surface terrestre. Grâce aux avancées technologiques, il est aujourd'hui possible d'obtenir des données topographiques de haute précision à partir de sources satellitaires et d'outils de visualisation tels que Google Earth, un outil puissant permettant de visualiser des images satellites de la zone d'étude (Bernard, 2011), comme le montre la Figure V. 1.

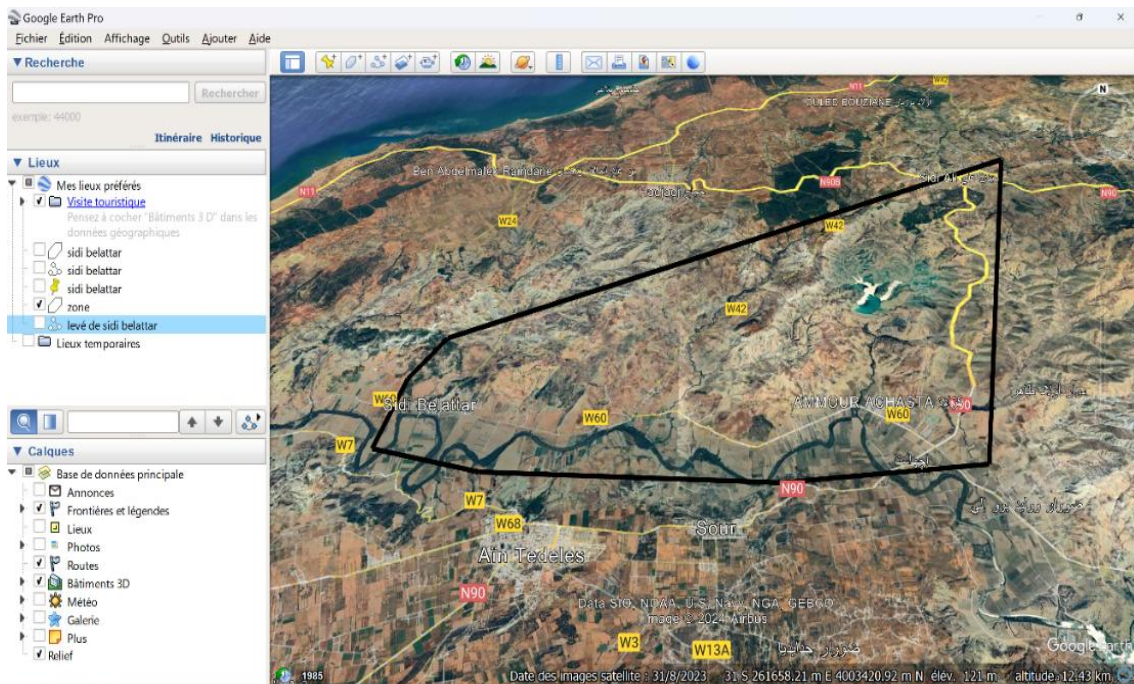


Figure V. 1: Polygone sur la zone d'étude par google Earth

Cet outil permet de délimiter la zone d'étude et d'extraire les informations altimétriques nécessaires sous forme de fichiers KML/KMZ. Ces données sont ensuite exploitées dans un environnement SIG, notamment sous ArcGIS, afin de générer le modèle numérique de terrain. Cette opération permet de représenter les reliefs, les pentes et les altitudes de manière tridimensionnelle. En revanche, ArcGIS offre une plateforme plus puissante pour une analyse spatiale approfondie. Les données de levés topographiques peuvent y être importées, géoréférencées et analysées en détail grâce à divers outils, comme illustre la Figure V. 2. Cela permet de créer des cartes précises, de réaliser des analyses spatiales poussées et de générer des rapports basés sur les informations topographiques obtenues.

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

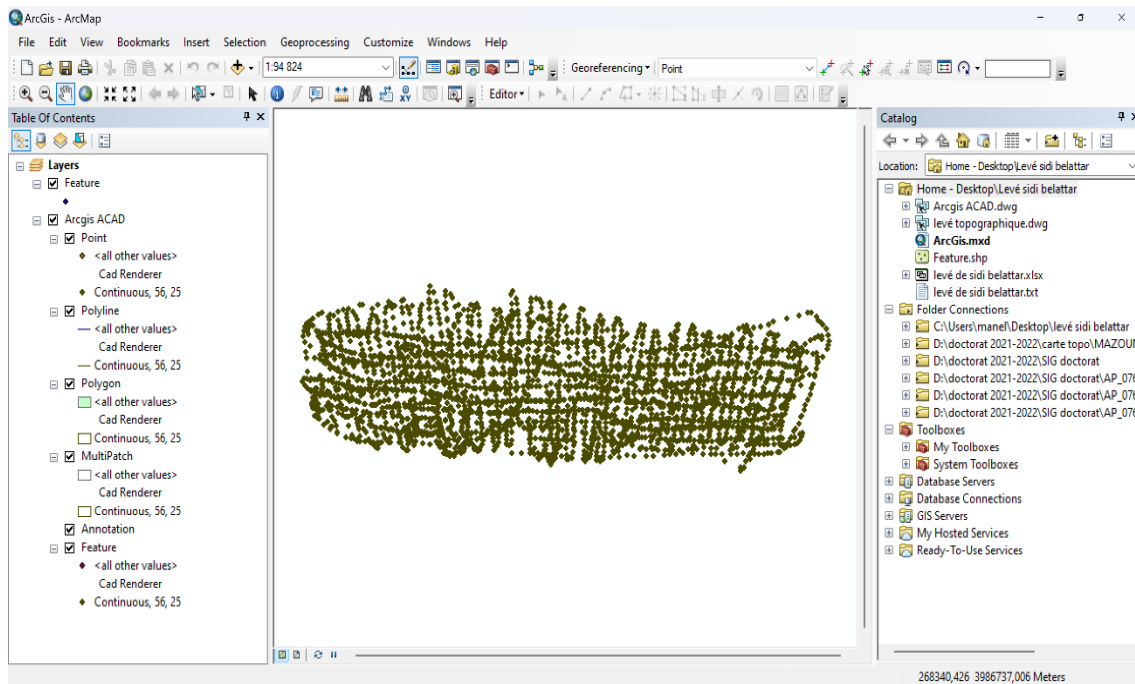


Figure V. 2: Levé topographique de la zone d'étude par ArcGIS

Au cours des vingt dernières années, la création de Modèles Numériques de Terrain (MNT) a connu une évolution spectaculaire pour répondre aux besoins croissants dans les secteurs scientifiques et industriels. Cette avancée a été facilitée par l'essor des technologies satellitaires, avec de nombreux satellites de surveillance de la Terre équipés de capteurs optiques et radar, permettant une acquisition de nombreuses données croissantes précise et détaillée. Ces progrès ont transformé la cartographie et la modélisation du terrain, offrant des applications variées allant de la gestion des ressources naturelles à l'urbanisme et à la prévention des risques naturels.

Il est désormais envisageable de générer des MNT couvrant la majeure partie de la surface terrestre. De plus, les méthodes de traitement des images et des nuages de points ont connu une évolution significative. Grâce à ces avancées, il est possible de concevoir des MNT à diverses échelles, accessibles à un large public. Les applications géomorphologiques, en particulier, ont grandement bénéficié de ces progrès, en exploitant les formes du terrain pour lesquelles le MNT constitue une donnée essentielle (Abbas & Salwan, 2016; El Hage, 2012).

L'usage combiné de Google Earth et ArcGIS constitue une approche efficace pour la préparation des données géospatiales, car elle associe la facilité de visualisation du premier à la puissance analytique du second. ArcGIS offre la possibilité de géoréférencer, de filtrer et d'analyser les points topographiques afin d'obtenir une surface régulière et cohérente. Le MNT ainsi obtenu est exporté vers Autodesk Civil 3D, où il sert de base à l'ensemble des travaux de conception géométrique.

Pour garantir la cohérence géographique, les coordonnées de la zone d'étude (Sidi Belattar au RN90) ont été définies selon le système de coordonnées et le fuseau "UTM-WGS84", assurant l'alignement des points avec la réalité du terrain. Une fois les données importées dans Civil 3D, les points sont vérifiés et positionnés à l'aide de l'outil de géolocalisation intégré, comme illustre dans la Figure V. 3. La carte aérienne de Google Earth est activée pour valider la

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

correspondance entre le modèle numérique et le site réel, en contrôlant les élévations et la distribution spatiale des points topographiques.

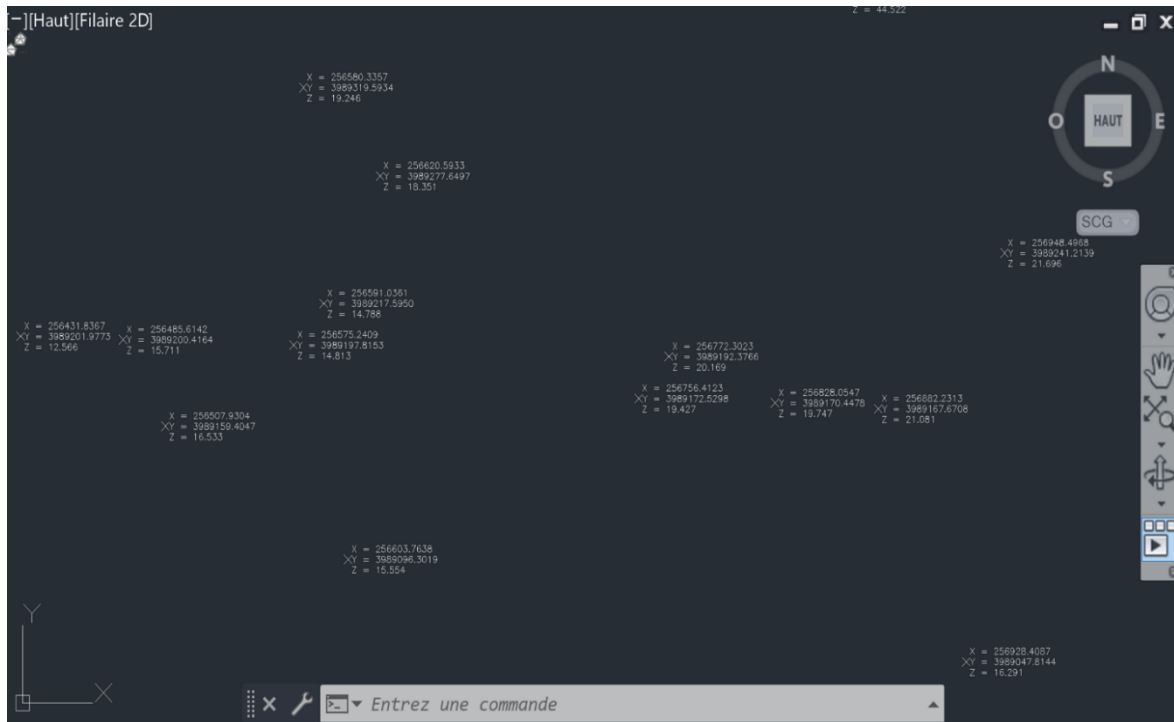


Figure V. 3: Levé topographique importé au civil 3D

V.3.2. Vérification et nettoyage de la surface du terrain

Une fois le MNT généré, une étape de vérification et de nettoyage est nécessaire pour éliminer les points aberrants et corriger les discontinuités de la surface. Ces irrégularités peuvent provenir d'erreurs de saisie, de données bruitées ou de doublons lors de l'importation. Civil 3D offre des outils dédiés à la gestion et à la correction de surfaces, permettant de supprimer les anomalies altimétriques, de combler les vides et de lisser la triangulation du modèle.

Cette opération garantit la qualité géométrique du Modèles Numériques de Terrain, condition essentielle pour la fiabilité des étapes ultérieures, notamment la conception du profil en long et des coupes transversales. Après nettoyage, le modèle est recalculé et sauvegardé sous une surface de référence unique « Surface_Terrain_Naturel » qui servira de base à l'ensemble du processus de conception routière.

V.4. ETUDE DU TRACE EN PLAN SOUS CIVIL 3D

L'étude du tracé en plan constitue une étape déterminante dans la conception géométrique d'un projet routier, puisqu'elle permet de définir la trajectoire horizontale de la route en fonction du relief naturel, des contraintes techniques et environnementales, ainsi que des exigences de sécurité et de confort de conduite.

Dans le cadre de ce travail, cette phase a pour objectif d'exploiter et de perfectionner la variante optimale précédemment sélectionnée et modélisée sous Autodesk InfraWorks, en la transférant

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

vers Autodesk Civil 3D afin d'effectuer une analyse géométrique plus fine et de préparer la réalisation de l'avant-projet détaillé (APD).

L'association d'InfraWorks et de Civil 3D s'inscrit dans une démarche BIM intégrée, favorisant une transition fluide entre la modélisation conceptuelle et la conception technique détaillée. Cette interopérabilité garantit la cohérence et la continuité des données géométriques, tout en renforçant la précision des calculs et en optimisant les délais de modélisation et d'ajustement du projet.

V.4.1. Importation du modèle 3D d'InfraWorks vers Civil 3D

Afin de garantir la continuité du processus de conception entre la phase de l'avant-projet sommaire et l'avant-projet détaillé, l'ensemble du modèle InfraWorks a été importé dans Autodesk Civil 3D. Cette opération ne se limite pas à l'importation d'un seul axe, mais concerne toute la zone d'étude, comprenant les différentes variantes de tracé, le modèle numérique de terrain (MNT), ainsi que les éléments tridimensionnels du projet routier.

L'importation est réalisée via le format IMX, qui assure la compatibilité complète entre les deux environnements BIM développés par Autodesk. Ce format permet de transférer simultanément les surfaces topographiques, les alignements, les profils en long et les objets 3D sans altération des coordonnées géospatiales ni des propriétés géométriques, comme l'illustre la Figure V. 4.

Une fois le modèle importé dans Civil 3D, une phase de filtrage et de nettoyage est effectuée afin d'alléger la base de données et de se concentrer sur les éléments essentiels du projet. Toutes les variantes alternatives générées dans InfraWorks sont ainsi supprimées, ne laissant visible que la variante 2, identifiée précédemment comme variante optimale à la suite de l'analyse multicritère.

Cette approche présente plusieurs avantages :

- Elle garantit la fidélité géométrique du tracé importé ;
- Elle maintient la cohérence altimétrique et spatiale avec le MNT d'origine ;
- Elle permet de conserver l'environnement 3D complet du projet (relief, emprises, zones d'emprise et ouvrages).

Le modèle ainsi épuré constitue la base de travail pour la phase de conception détaillée sous Civil 3D. Il permet d'effectuer des analyses géométriques précises, d'ajuster les paramètres du tracé horizontal et de préparer la création du profil en long et des profils en travers.

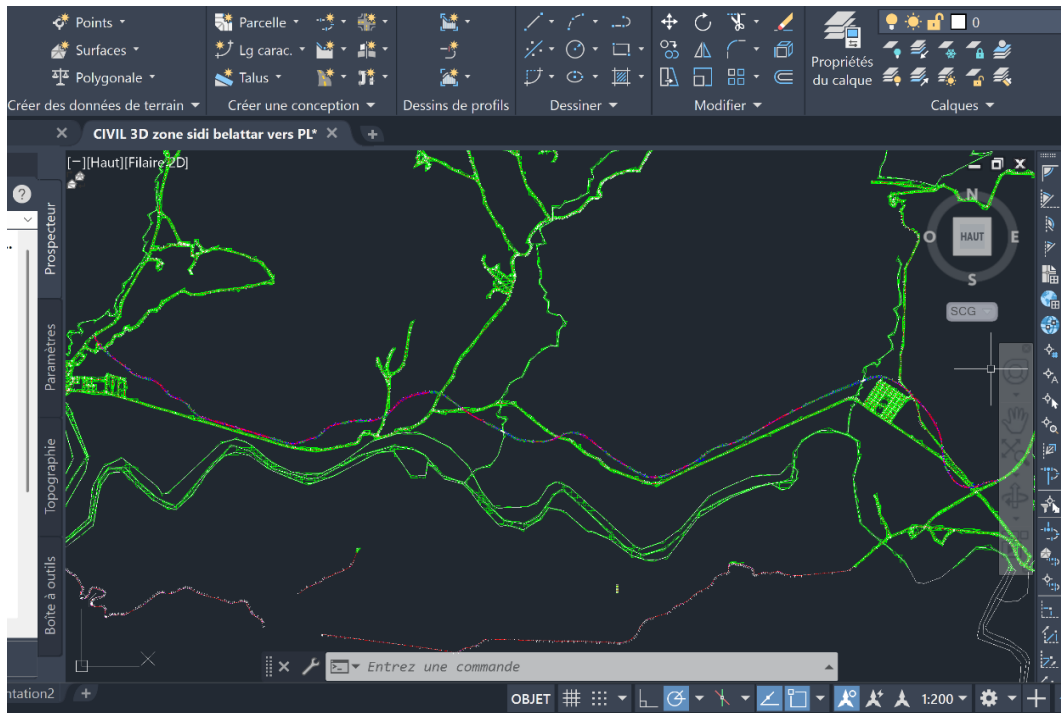


Figure V. 4: Importation du modèle 3D complet depuis InfraWorks vers Civil 3D

V.4.2. Vérification et ajustement du tracé en plan sous Civil 3D

Après l'importation du modèle depuis InfraWorks, une phase de vérification géométrique est effectuée afin de s'assurer que le tracé importé conserve fidèlement les caractéristiques du projet initial. Cette étape est essentielle pour garantir la cohérence des données géométriques, la continuité de l'axe et la conformité du tracé avec les normes de conception routière.

Dans Autodesk Civil 3D, l'axe de la variante optimale est inspecté à l'aide des outils d'analyse géométrique intégrés. L'objectif est de confirmer la bonne définition des alignements droits et des courbes, ainsi que la continuité des raccordements entre les différents segments. Toute anomalie telle qu'un point de rupture, un chevauchement ou une incohérence de rayon est corrigée directement dans Civil 3D afin d'assurer une transition fluide entre les éléments linéaires et circulaires.

Une attention particulière est portée à la vérification des coordonnées géospatiales et des unités de travail, afin de s'assurer que le modèle importé est correctement positionné dans le système de projection adopté (UTM, WGS84). Cette vérification garantit une correspondance parfaite entre le modèle Civil 3D et les données topographiques initiales issues du levé et du MNT, comme l'illustre la Figure V. 5, représentant la conservation de la variante optimale après filtrage des tracés alternatifs dans Civil 3D.

Enfin, le tracé est réanalysé dans son environnement 3D afin de vérifier la cohérence visuelle et topographique de l'implantation sur le terrain. Cette étape de contrôle permet de s'assurer que la géométrie horizontale de la route s'intègre harmonieusement au relief naturel, évitant ainsi des incohérences qui pourraient affecter la conception du profil en long.

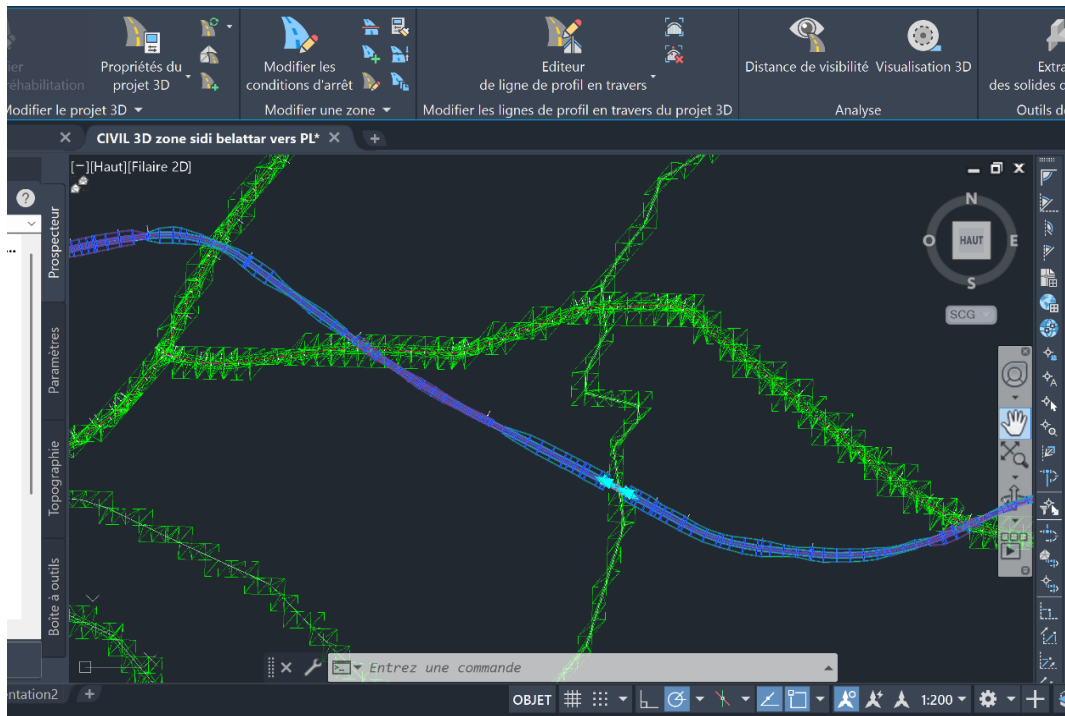


Figure V. 5: Conservation de la variante optimale après filtrage des tracés alternatifs dans Civil 3D

V.4.3. Vérification des rayons et conformité aux normes routières

Une fois le tracé en plan vérifié et ajusté, une analyse de conformité géométrique est réalisée afin de s'assurer que les paramètres du tracé respectent les exigences des normes routières algériennes en vigueur. Cette étape garantit la sécurité, le confort et la fluidité de la circulation tout en optimisant l'adaptation du projet au relief existant.

Grâce aux outils d'analyse intégrés dans Autodesk Civil 3D, il est possible de contrôler avec précision les rayons de courbure, les longueurs de raccordement ainsi que les angles de transition entre les sections droites et les courbes. Le respect des valeurs minimales imposées par les normes selon la classe de la route et la vitesse de conception adoptée est systématiquement vérifié.

Les rayons insuffisants ou les courbes trop serrées sont identifiés automatiquement, puis corrigés en ajustant les tangentes ou en modifiant les points d'inflexion afin d'obtenir un tracé fluide et conforme.

Une attention particulière est également accordée à la cohérence entre les éléments horizontaux et verticaux, en prévision de la conception du profil en long. La progressivité des raccordements et la visibilité en plan sont examinées afin d'assurer une transition fluide des véhicules et d'améliorer la sécurité des usagers.

Ainsi, cette phase de validation géométrique joue un rôle de liaison méthodologique entre la modélisation conceptuelle issue d'InfraWorks et la conception technique détaillée réalisée dans Civil 3D. Elle permet de disposer d'un axe principal rigoureux, conforme aux exigences

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

normatives et prêt à servir de base solide pour l'élaboration du profil en long et des profils en travers.

V.5. ETUDE DU PROFIL EN LONG SOUS CIVIL 3D

L'étude du profil en long représente une étape fondamentale de la conception routière, car elle permet de définir la géométrie verticale de la chaussée en assurant l'équilibre entre les contraintes topographiques, les normes géométriques et les considérations économiques.

Après validation du tracé en plan, cette phase consiste à établir le profil du terrain naturel et à concevoir le profil projeté, éléments indispensables pour évaluer les volumes de terrassement, les déclivités et la faisabilité technique du projet.

L'utilisation d'Autodesk Civil 3D offre une approche intégrée et précise pour la génération, la visualisation et la vérification des profils en long. Ce logiciel permet de relier directement l'axe horizontal aux données topographiques importées, garantissant ainsi une cohérence parfaite entre les géométries horizontales et verticales.

V.5.1. Elaboration du profil en long et conception de la ligne de projet

L'étude du profil en long constitue une étape fondamentale de la conception géométrique routière, car elle permet de définir la variation altimétrique de la route le long de son axe. Elle vise à assurer une transition harmonieuse entre les différentes altitudes du terrain, tout en respectant les contraintes techniques, les normes de conception et le confort de conduite.

Dans Autodesk Civil 3D, le profil en long est généré automatiquement à partir de l'axe horizontal validé de la variante optimale. Le logiciel extrait le profil du terrain naturel (TN) selon cet alignement, ce qui permet d'analyser la topographie du site et d'identifier les zones de déblais et de remblais.

À partir de ce profil du terrain, la ligne de projet (TP) est ensuite conçue. Celle-ci traduit les choix d'ingénierie relatifs aux pentes, rampes et raccordements verticaux, tout en respectant les valeurs limites imposées par les normes routières algériennes notamment la vitesse de référence, le rayon minimal des courbes verticales et la déclivité maximale autorisée, comme l'illustre la Figure V. 6.

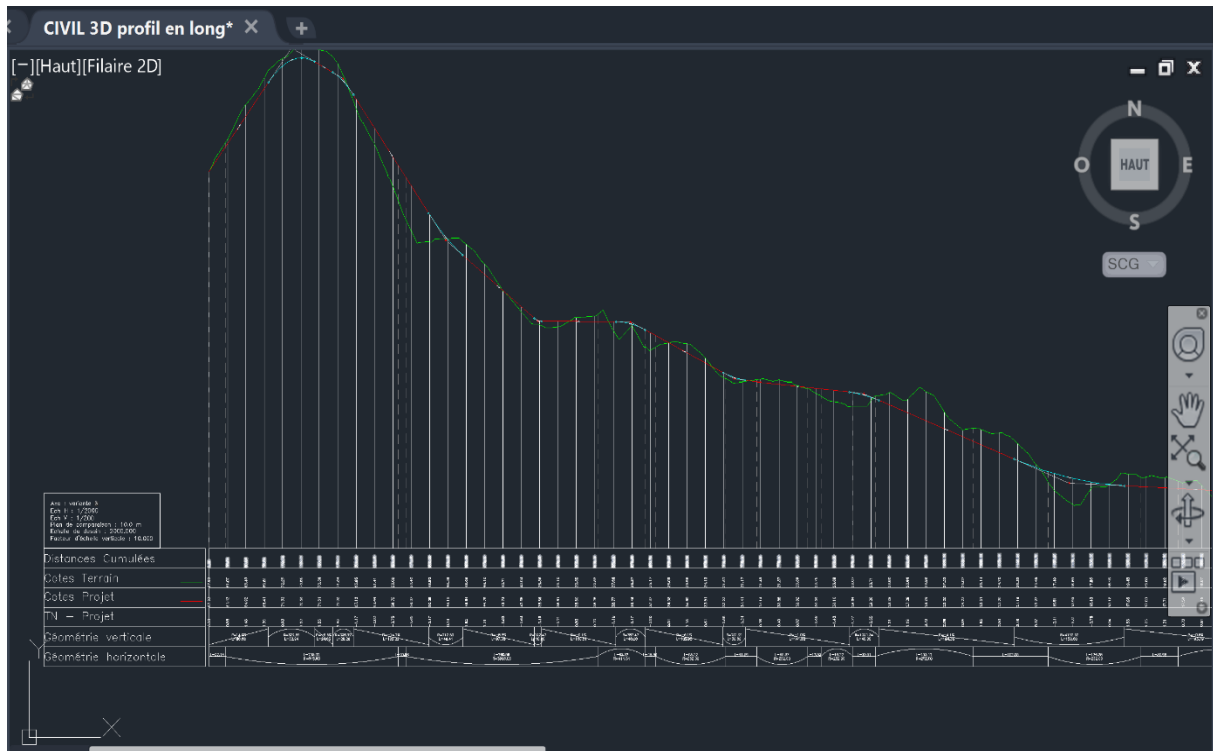


Figure V. 6: Partie du profil en long de la variante optimale choisie (Variante 2)

Les outils intégrés de Civil 3D facilitent la création et la modification dynamique de la ligne de projet à l'aide de points de rupture et de raccordements paraboliques. L'objectif est d'obtenir un profil équilibré assurant :

- Une adaptation optimale au relief naturel,
- Une réduction des volumes de terrassement,
- Une sécurité de conduite conforme aux exigences de confort et de visibilité.

Cette approche permet ainsi de garantir une cohérence géométrique entre le tracé en plan et le profil en long, tout en préparant la modélisation des profils en travers à l'étape suivante.

V.5.2. Analyse et vérification des déclivités maximales

Une fois la ligne de projet établie, une analyse approfondie des pentes longitudinales est effectuée afin de vérifier la conformité du profil en long aux normes routières algériennes applicables à la catégorie de la route étudiée. Cette étape vise à garantir la sécurité, le confort de conduite et la durabilité de l'infrastructure.

Dans Autodesk Civil 3D, la vérification des pentes longitudinales est réalisée à l'aide des outils d'analyse géométrique intégrés. Ces outils permettent d'identifier automatiquement les sections où les déclivités dépassent les valeurs limites fixées par les normes routières, sans nécessiter un calcul manuel détaillé. Cette approche automatisée offre un contrôle rapide et fiable de la conformité du profil en long, tout en facilitant les ajustements nécessaires sur la ligne de projet.

Lorsque certaines sections présentent des pentes supérieures aux seuils autorisés, des ajustements sont effectués sur la ligne de projet, notamment par :

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

- La modification des altitudes aux points de passage critiques,
- Le recalage des raccordements paraboliques,
- Encore le réajustement local des pentes pour améliorer la visibilité et la continuité du profil.

Cette vérification systématique permet d'assurer la compatibilité géométrique entre le profil en long et les conditions réelles du terrain, tout en minimisant les volumes de déblais et remblais. Elle contribue également à la stabilité des talus et à la bonne évacuation des eaux de ruissellement, éléments essentiels pour la pérennité de l'ouvrage.

Ainsi, le profil en long final obtenu représente un compromis optimal entre performance technique, respect des normes et intégration harmonieuse dans le site naturel.

Les caractéristiques géométriques et descriptives de la variante optimale sont présentées dans le Tableau V. 1 ci-dessous. Ces paramètres traduisent les principales propriétés du tracé, tant du point de vue de la configuration fonctionnelle que de la géométrie horizontale et verticale, tout en illustrant son adéquation au relief naturel et sa conformité aux exigences normatives de conception routière.

Tableau V. 1: Paramètres géométriques et descriptifs de la variante optimale (Variante 2)

Nombre de voie	2
La vitesse de référence	80 km/h
Le rayon minimal des courbes horizontales	252 m
La rampe maximale	+13,686 %
La pente maximale	-14,738 %
Nombre de virages	50
Taux de courbes	59,71%

V.6. ETUDE DU PROFIL EN TRAVERS SOUS CIVIL 3D

L'étude des profils en travers constitue une phase fondamentale de la conception géométrique routière, car elle permet de représenter, à intervalles réguliers, les coupes perpendiculaires à l'axe du projet. Ces coupes offrent une lecture détaillée de la structure de la chaussée, de la configuration des talus, des accotements et de l'interaction entre l'infrastructure projetée et le terrain naturel. Cette étape revêt une importance majeure pour l'évaluation des volumes de déblais et de remblais, la vérification de la stabilité des pentes, ainsi que la préparation du dossier technique de l'avant-projet détaillé (APD).

Dans le cadre du présent travail, les profils en travers de la variante 2 optimale ont été élaborés à l'aide du logiciel Autodesk Civil 3D, sur la base de l'axe du projet et du modèle numérique de terrain établi lors des étapes précédentes. La démarche méthodologique adoptée s'articule autour de trois étapes principales :

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

- ✓ La définition du profil en travers type, représentant la géométrie standard de la route ;
- ✓ La modélisation du profil type dans Civil 3D à l'aide d'assemblages paramétriques ;
- ✓ La génération automatique des profils en travers tout au long du tracé, permettant une visualisation précise de l'adaptation de la route au relief naturel.

V.6.1. Définition et modélisation du profil en travers type

Avant la génération des profils en travers, il est nécessaire de concevoir un profil en travers type, représentant la géométrie standard de la route étudiée. Ce profil type constitue la base de la modélisation du corridor routier dans Autodesk Civil 3D et décrit la structure complète de la plate-forme, de la chaussée jusqu'aux talus de raccordement au terrain naturel.

Le profil type comprend principalement :

- **Deux voies** de circulation conformes à la catégorie de la route, d'une largeur de 3,60 m chacune, correspondant à la vitesse de conception retenue de 80 km/h ;
- **Des accotements** stabilisés de 1,50 m, assurant la sécurité et la protection des bords de chaussée, tout en facilitant l'arrêt d'urgence et l'écoulement des eaux de surface ;
- **Des talus de déblai et de remblai**, dont les pentes sont définies selon la nature géotechnique du sol et les prescriptions normatives algériennes en matière de stabilité et de sécurité ;
- **Des fossés d'assainissement**, prévus en zones de déblai, afin d'assurer le drainage efficace des eaux pluviales et la protection de la structure de la chaussée.

En outre, la structure de la chaussée a été intégrée au profil type afin de représenter la composition réelle de la plate-forme. Elle se décompose comme suit :

- ❖ **Couche de roulement:** couche supérieure en contact direct avec le trafic, assurant la résistance à l'usure et une bonne adhérence. Elle est généralement réalisée en béton bitumineux d'une épaisseur moyenne de 8 cm;
- ❖ **Couche de revêtement :** couche superficielle située sous la couche de roulement, jouant un rôle de liaison et de protection contre les agressions climatiques et les infiltrations d'eau. Elle est souvent constituée d'un enduit superficiel ou d'un béton bitumineux mince, d'une épaisseur moyenne de 15 cm ;
- ❖ **Couche de base:** couche intermédiaire en grave-bitume ou en matériau équivalent, assurant la résistance mécanique, la répartition des charges et la stabilité structurelle de la chaussée. Son épaisseur moyenne est de 30 cm;
- ❖ **Couche de forme:** couche inférieure de la structure, garantissant l'homogénéité du support et la protection du sol de fondation. Elle est réalisée en matériaux sélectionnés et compactés, avec une épaisseur moyenne de 50 cm.

La modélisation de ce profil type est réalisée dans Autodesk Civil 3D à l'aide des Subassemblages disponibles dans la bibliothèque du logiciel. Ces composants paramétriques permettent de définir avec précision les largeurs, les pentes transversales et les épaisseurs des différentes couches de la chaussée, comme l'illustre la Figure V. 7.

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

Une fois l'ensemble des paramètres saisis et validés, le profil type est enregistré sous forme d'assemblage (Assembly), puis rattaché à l'axe du projet et au profil en long. Ce processus constitue la base de la modélisation tridimensionnelle du corridor routier, garantissant une cohérence parfaite entre le tracé en plan, le profil en long et les profils en travers.

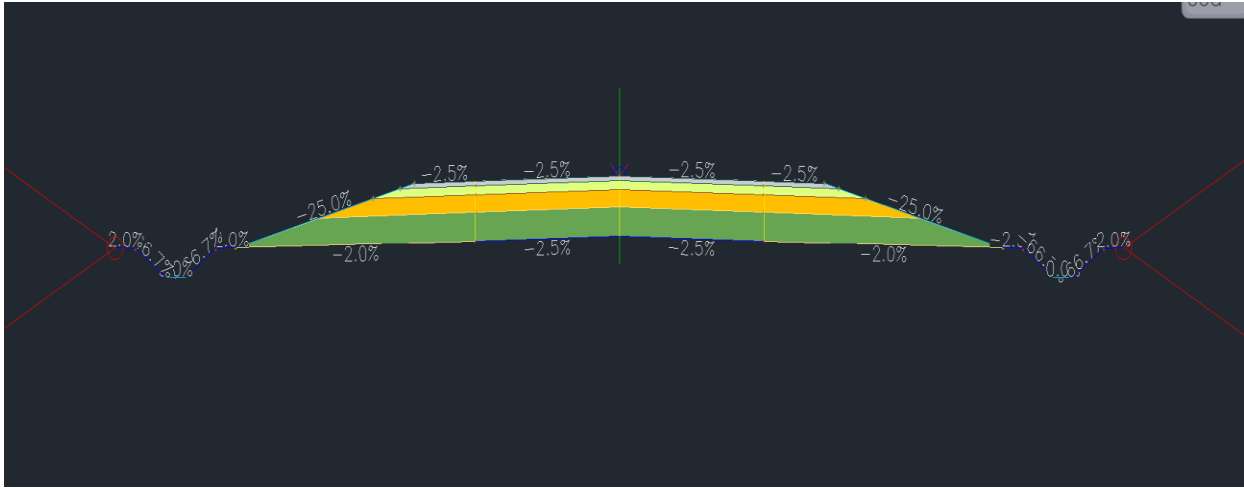


Figure V. 7: Profil en travers type modélisé sous Autodesk Civil 3D, intégrant la structure complète de la chaussée

V.6.2. Génération automatique des profils en travers

Une fois le profil en travers type défini, il est intégré dans Autodesk Civil 3D afin de générer automatiquement les profils en travers réels le long de l'axe du projet. Le logiciel permet d'appliquer ce gabarit type à des intervalles réguliers, généralement tous les 25 mètres, ainsi qu'aux points caractéristiques du tracé tels que les changements de pente, de courbure ou les intersections avec des éléments topographiques notables.

Chaque profil en travers met en évidence la superposition du terrain naturel et du projet routier, permettant d'identifier avec précision les zones de déblai et de remblai, et d'évaluer l'adaptation géométrique de la route au relief existant.

L'approche automatisée de Civil 3D présente plusieurs avantages :

- ❖ Elle offre une visualisation continue et dynamique du projet sur l'ensemble du linéaire ;
- ❖ Elle permet un contrôle géométrique précis des largeurs, des pentes transversales et des altitudes ;
- ❖ Elle facilite la mise à jour automatique des profils en cas de modification du tracé ou du MNT.

Cette étape constitue ainsi un outil d'aide à la décision essentiel pour optimiser la conception, réduire les mouvements de terre et garantir la cohérence entre les éléments horizontaux et verticaux du projet. Les profils en travers obtenus servent de base fiable pour les études de quantités, les estimations économiques et la planification des travaux, tout en assurant une représentation fidèle, précise et conforme aux normes de la géométrie routière de la variante optimale.

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

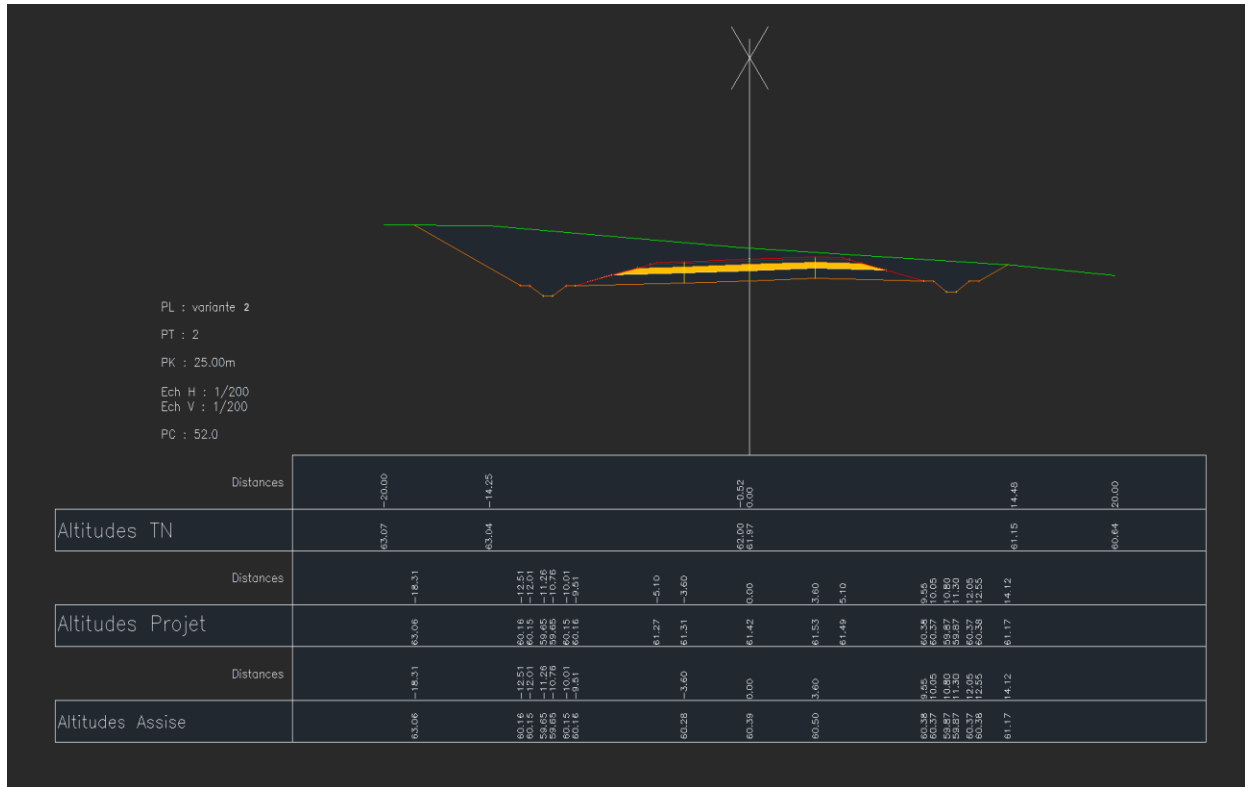


Figure V. 8: Profil en travers en déblai de la variante 2 au PK 0+025 m

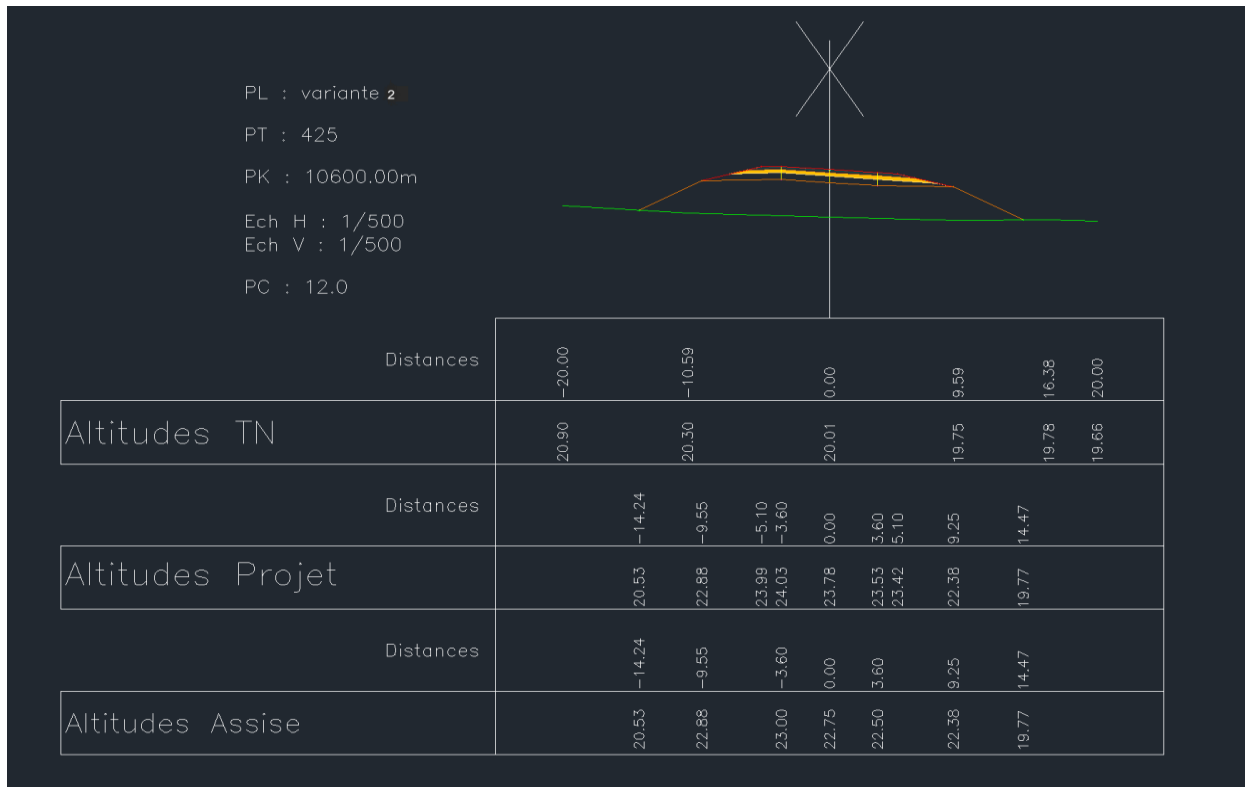


Figure V. 9: Profil en travers en remblai de la variante 2 au PK 10+600 m

Les Figures V. 8 et V. 9 illustrent deux profils en travers types appliqués à la variante 2. On y distingue la structure complète de la chaussée, composée de la couche de forme, de la couche

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

de base, du revêtement et de la couche de roulement, ainsi que les éléments latéraux tels que les accotements, les talus de déblai et de remblai et les fossés d'assainissement.

Ces profils types constituent le modèle de référence utilisé pour la génération automatique des coupes transversales le long du tracé. La Figure V. 8 présente un profil en déblai situé au point kilométrique PK 0+025 m, tandis que la Figure V. 9 illustre un profil en remblai au point kilométrique PK 10+600 m.

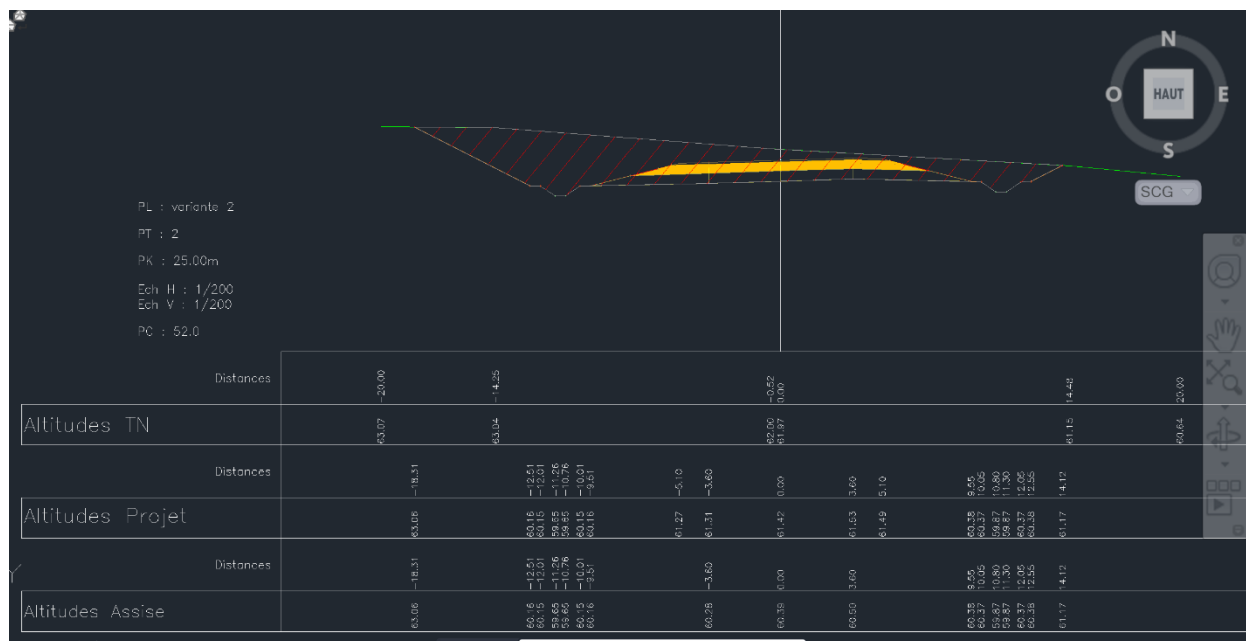
Ils permettent de visualiser la configuration géométrique du projet, d'évaluer la stabilité des talus et d'estimer les volumes de terrassement nécessaires à la réalisation de l'infrastructure routière.

V.6.3. Calcul des volumes de déblais et de remblais sous civil 3D

L'étude des profils en travers générés sous Autodesk Civil 3D permet d'évaluer avec précision les volumes de déblais et de remblais nécessaires à la construction de la route. Cette étape, essentielle dans la phase d'avant-projet détaillé, conditionne non seulement le coût global des travaux de terrassement, mais également l'équilibre des mouvements de terre et la durabilité de l'ouvrage.

Civil 3D calcule automatiquement ces volumes en comparant la surface du terrain naturel (MNT) et celle du projet routier à chaque intervalle de profil, selon la méthode des prismes droits. Cette méthode consiste à relier les surfaces successives de deux profils transversaux consécutifs et à calculer le volume entre ces surfaces.

Les zones hachurées entre le projet et le terrain naturel représentent les volumes de remblai (au-dessus du terrain) et de déblai (en dessous du terrain), comme l'illustrent les Figures V. 10 et V. 11.



CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

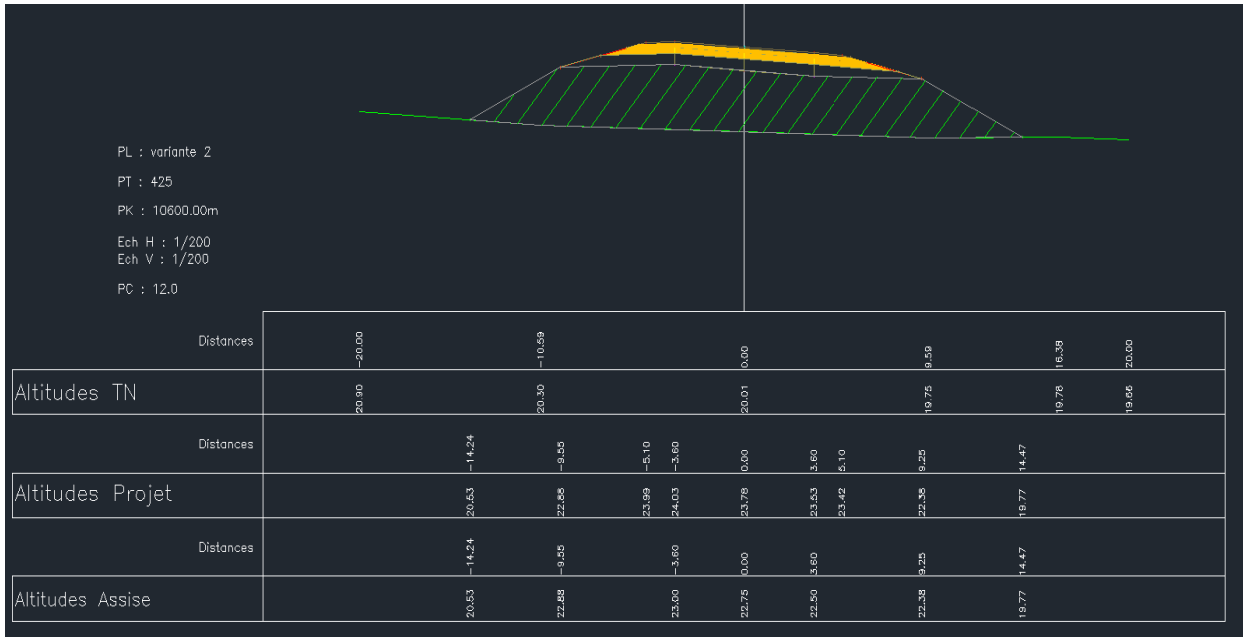


Figure V. 11: Profil en travers type en déblai de la variante 2 au PK 10+600 m

Autodesk Civil 3D génère automatiquement des tableaux de surfaces, de cubature et des diagrammes de volumes cumulés, permettant de calculer le volume net de déblais et de remblais pour chaque profil en travers, à des intervalles réguliers de 25 mètres.

Ces données offrent une lecture quantitative précise de la répartition des volumes tout au long du projet, en distinguant les volumes unitaires et le volume net cumulé, ce dernier représentant l'évolution globale du mouvement des terres le long du tracé.

Cette analyse permet d'identifier les zones de déséquilibre entre déblais et remblais, de proposer des ajustements du profil en long pour optimiser les mouvements de terre, et de garantir un équilibre économique et technique du projet.

Les résultats obtenus à l'issue de cette étape sont présentés dans les Tableaux V. 2 et V. 3 ci-dessous.

Tableau V. 2: Volumes et surfaces des déblais et remblais de la variante au PK 0+025 m

Volume total au niveau de l'abscisse curviligne 0+25.00	
Surface de déblai	52.52
Surface de remblai	0.00
Vol déblai	976.36
Vol remblai	0.00
Vol déblai cumulé	976.36
Vol remblai cumulé	0.00
Vol net	976.36

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

Tableau V. 3: Volumes et surfaces des déblais et remblais de la variante au PK 10+600 m

Volume total au niveau de l'abscisse curviligne 106+00.00	
Surface de déblai	0.00
Surface de remblai	63.89
Vol déblai	0.00
Vol remblai	1965.35
Vol déblai cumulé	428383.40
Vol remblai cumulé	199005.75
Vol net	229377.65

V.6.4. Évaluation des surfaces et volumes des couches d'assise

En complément du calcul global des volumes de terrassement, Civil 3D permet également d'évaluer les volumes des couches de la structure de chaussée (couche de forme, base, revêtement et roulement), comme l'illustrent les Tableaux V. 4 et V. 5.

Ces données sont obtenues à partir des assemblages paramétriques appliqués sur le corridor, offrant ainsi une estimation précise des quantités de matériaux nécessaires à la mise en œuvre des différentes couches de la plateforme.

Tableau V. 4: Surfaces et volumes des couches de la structure de chaussée au PK 0+025 m

Matériau(x) au niveau de l'abscisse curviligne 0+25.00			
Nom du matériau	Aire	Volume	Volume cumulé
Roulement	0.84	21	21
Base	1.74	43	43
Fondation	4.08	102	102
Forme	8.33	209	209

Tableau V. 5: Surfaces et volumes des couches de la structure de chaussée au PK 10+600 m

Matériau(x) au niveau de l'abscisse curviligne 106+00.00			
Nom du matériau	Aire	Volume	Volume cumulé
Roulement	0.85	21	8963
Base	1.76	44	18498
Fondation	4.20	105	43615
Forme	7.89	198	87127

CHAPITRE V: Avant-Projet Détaillé par BIM de la Variante Optimale

Ces résultats fournissent une base quantitative solide pour l'estimation des coûts de construction et la planification logistique du projet. L'analyse combinée des volumes de terrassement et des volumes de structure permet d'obtenir une vision globale de la balance des matériaux, élément clé pour la durabilité et l'efficacité économique de la route.

V.7. SYNTHÈSE DES RESULTATS BIM

L'intégration de la variante optimale (Variante 2) dans un environnement BIM à l'aide des logiciels Autodesk InfraWorks et Autodesk Civil 3D a permis de passer d'une modélisation conceptuelle à une conception technique détaillée, tout en assurant la continuité et la cohérence des données tout au long du processus de conception.

Cette démarche numérique a permis de représenter le projet routier de manière tridimensionnelle, paramétrique et géoréférencée, favorisant une meilleure compréhension spatiale et une coordination précise entre les différentes composantes du projet (tracé, topographie, profils, volumes, etc.).

Les principaux résultats issus de cette modélisation BIM peuvent être synthétisés comme suit :

- Interopérabilité fluide entre InfraWorks et Civil 3D grâce au format IMX, permettant le transfert complet du modèle 3D incluant les surfaces, les alignements, les profils en long et les variantes.
- Modélisation fidèle du terrain naturel à partir du levé topographique et génération d'un MNT précis, garantissant la justesse géométrique du projet.
- Définition et validation du tracé optimal, conforme aux exigences normatives en matière de rayons, de déclivités et de sécurité routière.
- Création du profil en long et analyse des pentes pour assurer la compatibilité géométrique avec le relief, tout en optimisant les volumes de terrassement.
- Génération automatique des profils en travers, permettant une lecture complète de la géométrie du projet et une estimation rigoureuse des déblais et remblais.
- Évaluation volumétrique précise grâce aux outils de cubature intégrés, facilitant l'équilibrage des terres et la planification des travaux.
- Production de visualisations 3D et de rendus réalistes, offrant une interprétation claire du projet et facilitant la communication avec les parties prenantes.

L'exploitation du BIM dans cette phase d'avant-projet détaillé a donc permis de renforcer la précision géométrique, réduire les incohérences de conception, et optimiser la coordination entre les différentes étapes du projet routier.

De plus, elle contribue à instaurer une approche moderne et durable de la conception d'infrastructures, en intégrant de manière cohérente les dimensions technique, économique, environnementale et visuelle.

Enfin, cette modélisation constitue une base solide pour les phases ultérieures du projet (études d'exécution, planification des travaux, gestion et maintenance), tout en démontrant la valeur ajoutée du BIM dans le domaine de la conception routière intégrée.

V.8. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté le développement de l'avant-projet détaillé de la variante optimale (Variante 2) à l'aide de la modélisation BIM, en s'appuyant sur les outils Autodesk InfraWorks et Civil 3D. L'objectif principal était de traduire les résultats de l'analyse multicritère en une modélisation géométrique complète et cohérente, intégrant les dimensions horizontale, verticale et transversale du tracé.

L'étude a permis de définir avec précision les caractéristiques géométriques du projet, notamment le tracé en plan, le profil en long et le profil en travers type, tout en assurant leur conformité aux normes de conception routière algériennes. Les profils en travers générés ont offert une représentation fidèle de la structure de la chaussée, des talus, des accotements et des fossés d'assainissement, facilitant ainsi l'analyse des volumes de déblais et remblais.

L'utilisation du BIM a montré tout son potentiel en matière de coordination et d'intégration des données. Elle a permis d'automatiser la génération des profils, le calcul des volumes, la visualisation 3D et la mise à jour dynamique du modèle en cas de modification du tracé. Cette approche a considérablement amélioré la précision, la rapidité et la cohérence du processus de conception.

En somme, l'application du BIM dans cette étude a démontré son efficacité en tant qu'outil d'aide à la décision pour la planification, l'optimisation et la conception intégrée des projets routiers. Les résultats obtenus constituent une base solide pour les analyses économiques et environnementales, ainsi que pour la comparaison multicritère des variantes développée dans le chapitre précédent. Cette démarche confirme l'intérêt de l'intégration conjointe du BIM et des méthodes d'aide à la décision multicritère dans le cadre d'une conception routière moderne, rationnelle et durable.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'évolution rapide des technologies numériques et des approches décisionnelles a profondément transformé la manière de concevoir et de gérer les projets d'infrastructures. Dans ce contexte, cette thèse a exploré l'intégration du Building Information Modeling (BIM) et des méthodes multicritères d'aide à la décision (AMAD) comme cadre méthodologique innovant pour l'optimisation du choix de variantes routières. Cette combinaison vise à pallier les limites des approches traditionnelles basées sur des documents 2D, souvent peu interactives et sujettes à des erreurs d'interprétation, en introduisant une dimension tridimensionnelle, collaborative et analytique dans le processus de conception.

Le BIM, en tant qu'environnement numérique partagé, a démontré sa capacité à centraliser, structurer et visualiser les informations relatives au projet de manière cohérente et dynamique. Son adoption dans les infrastructures routières permet non seulement d'améliorer la communication entre les acteurs du projet, mais aussi d'assurer une meilleure compréhension spatiale et technique des variantes étudiées. En parallèle, les méthodes multicritères telles que TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR ont apporté un cadre rigoureux pour évaluer et hiérarchiser ces variantes selon un ensemble de critères techniques, économiques et environnementaux. L'utilisation du Système de Répartition des Facteurs (SRF) a permis de pondérer ces critères de manière transparente et justifiée, en traduisant les priorités des décideurs et des ingénieurs sous forme de valeurs quantitatives exploitables dans le modèle d'évaluation.

L'application de cette approche intégrée à un cas réel de substituer d'un tronçon routier vulnérable aux inondations, reliant Sidi Belattar à la RN 90 en Algérie, a permis de démontrer la pertinence et la robustesse du cadre proposé. Le recours à InfraWorks pour la modélisation 3D des variantes a offert une visualisation réaliste du contexte topographique et environnemental, facilitant la compréhension des enjeux et l'analyse comparative. Les résultats obtenus à travers les méthodes TOPSIS, ELECTRE III et VIKOR ont révélé une concordance significative, validant la cohérence de la démarche et confirmant la fiabilité du classement obtenu. La variante 2, désignée comme solution optimale, s'est avérée conforme non seulement sur le plan technique, mais également sur le plan environnemental et économique.

Cette recherche a ainsi mis en évidence l'intérêt d'une approche interdisciplinaire combinant la modélisation numérique et l'analyse décisionnelle. Le BIM apporte une dimension visuelle et collaborative qui favorise la coordination entre les acteurs, tandis que l'AMAD garantit une évaluation rationnelle et structurée des solutions. Ensemble, ils forment un cadre décisionnel complet, permettant de réduire les incertitudes, d'améliorer la qualité des choix techniques et de renforcer la durabilité des projets routiers. L'expérimentation a également montré que cette intégration contribue à une meilleure traçabilité des décisions, à une diminution des erreurs de conception et à une plus grande transparence dans le processus de planification.

Les apports de ce travail sont multiples. Sur le plan scientifique, il propose une méthodologie intégrée qui combine les avantages du BIM et des méthodes multicritères pour l'aide à la décision dans les infrastructures de transport. Sur le plan technique, il démontre l'efficacité des outils numériques tels qu'InfraWorks et Civil 3D pour la simulation, l'évaluation et la validation des variantes routières dans un environnement tridimensionnel. Sur le plan méthodologique, il introduit une démarche systématique et reproductible pour le choix des alternatives, reposant

Conclusion générale

sur une pondération objective et des critères mesurables. Enfin, sur le plan pratique, il offre une approche applicable aux études d'avant-projet, permettant d'améliorer la coordination, la précision et la transparence dans la conception routière.

Cependant, comme toute recherche scientifique, ce travail présente certaines limites. La sélection des critères et des pondérations reste partiellement dépendante du jugement des experts, ce qui peut introduire une part de subjectivité. De plus, l'application de la méthodologie à un seul cas d'étude limite la généralisation complète des résultats. Enfin, les outils BIM utilisés, bien que puissants, présentent encore des contraintes en matière d'interopérabilité et de traitement automatique des données multicritères.

Ces limites ouvrent néanmoins de nombreuses perspectives pour des recherches futures. L'intégration de méthodes hybrides, telles que l'association AHP-TOPSIS ou PROMETHEE-ELECTRE, permettrait de renforcer la robustesse des résultats et d'enrichir l'analyse comparative. Le couplage du BIM avec les systèmes d'information géographique (SIG) offrirait, quant à lui, des analyses spatiales plus détaillées et une meilleure évaluation des impacts environnementaux. De même, l'extension du cadre méthodologique à d'autres phases du cycle de vie des infrastructures, telles que la construction, l'exploitation et la maintenance, constituerait une étape importante vers la gestion intégrée des projets. L'intégration des dimensions temporelle (4D), économique (5D) et environnementale (6D) du BIM pourrait enfin conduire à une modélisation plus complète et prédictive, contribuant à la réalisation d'infrastructures plus durables et résilientes.

En conclusion, cette thèse a démontré que l'intégration du BIM et de l'AMAD, appuyée par le Système de Répartition des Facteurs, représente une avancée majeure dans le domaine de l'ingénierie routière. Elle offre une nouvelle vision de la conception des infrastructures, fondée sur la collaboration, la précision et la durabilité. Par la synergie entre la puissance des outils numériques et la rigueur des méthodes décisionnelles, cette approche contribue à faire évoluer les pratiques traditionnelles vers une ingénierie plus intelligente, intégrée et orientée vers la performance globale des projets d'infrastructure.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbas, Z, K.; Salwan, S. (2016). Topographic Survey with Analytical Close-Range Photogrammetry. *Engineering and Technology Journal*, 34(8), 1605-1614. <https://doi.org/10.4000/eps.5508>.
- Ait-Lamallam, S.; Sebari, I.; Yaagoubi, R.; Doukari, O. (2019). Vers une extension du Building Information Modeling aux projets d'infrastructures routières : étude de cas d'un échangeur autoroutier au Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 7(4), 609-617.
- Alsofiani, M.A. (2024). Digitalization in Infrastructure Construction Projects: A PRISMA-Based Review of Benefits and Obstacles. Preprint submitted to *Astronomy & Computing*. <https://doi:10.48550/arXiv.2405.16875>.
- Arayici, Y.; Aouad, G. (2010). Building information modelling (BIM) for Construction Lifecycle Management. Chapter in *Construction and Building: Design, Materials, and Techniques*, University of Salford, Greater Manchester UK.
- Arnaud, M. (2020). The contribution of the development of BIM tools within infrastructure projects. Ph.D. dissertation, University of surveys and topographers, France. Dumas-02437121.
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252. [https://doi:10.1061/\(asce\)lm.1943-5630.0000127](https://doi:10.1061/(asce)lm.1943-5630.0000127).
- Basilio, M.P.; Pereire, V.; Costa, H.G.; Santos, M.; Ghosh, A. (2022). A Systematic Review of the Applications of Multi-Criteria Decision Aid Methods (1977–2022). *Electronics*, 11(11), 1720. <https://doi:10.3390/electronics11111720>.
- Basnet, R. (2024). Academic report on detailed engineering survey, design and estimation of road section. Tribhuvan University. <https://doi:10.13140/RG.2.2.14454.92485>.
- Batakanwa, N.; Maliaki, G. (2025). A Critical Review of Road Survey Requirements and Procedures in Tanzania Data Collection, Processing and Report Submissions. *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences*, 8(4). <https://doi:10.48346/IMIST.PRSM/ajlp-gs.v8i4.52660>.
- Ben mahcen, M.I.; Mezabia, M.I. (2020). Les influences de plusieurs méthodes d'aide à la décision multicritères sur le choix du site d'une centrale solaire. University Kasdi Merbah of Ouargla, Algérie, 01-60. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/30176>.
- Berdiglyjov, M.; H. Popa, H. The implementation and role of geotechnical data in BIM process. *E3S Web of Conferences*, 85, 2019. <https://doi:10.1051/e3sconf/20198508009>.
- Bernard, L. (2011). Dominique Couret : Manuel de cartographie rapide de l'échelle de la région à celle du mobilier urbain. Institut de recherche pour le développement, Marseille. <https://doi:10.4000/eps.5508>.
- Biancardo, S.B.; Viscione, N.; Cerbone, A. and All. (2020). BIM-Based Design for Road Infrastructure: A Critical Focus on Modeling Guardrails and Retaining Walls. *Infrastructures*, 5 (59), 1-23. <https://doi:10.3390/infrastructures5070059>.
- Biswas, B.; Ghosh, A.; Sailo, BL. (2023). Spring water suitable and vulnerable watershed demarcation using AHP-TOPSIS and AHP-VIKOR models: study on Aizawl district of North-Eastern hilly state of Mizoram, India. *Environmental Earth Sciences*, 82(80). <https://doi:10.1007/s12665-023-10766-w>.
- Bouziani, M., Mouatassim, H., Fadl, K., & Nouari, H. (2021). Development of a BIM infrastructure workflow adapted to facilities of land subdivision projects in Morocco. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-4/W5-2021, 119- 123.

- <https://doi:10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W5-2021-119-2021>.
- Brands, J.P.; Mareschal, B. (2005).** Promethee Methods. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, Springer, 78, 163-186. https://doi:10.1007/0-387-23081-5_5.
- Charlotte, M.; Michel, L. (2005).** The multi-criteria method ELECTRE III Definitions, principle and example of application to urban stormwater management, Central Laboratory of Bridges and Roads. REF. 4568, 29-46.
- CEREMA - Dter CE. (2017).** Le BIM pour les infrastructures. Département Construction Aménagement Projet.
- D'Amico, F.; Bertolini, L.; Napolitano, A.; Bianchini Ciampoli, L.; Manalo, J.R.D.; Gagliardi, V.; Calvi, A. (2023).** A possible implementation of non-destructive data surveys in the definition of BIM models for the analysis of road assets. 3rd International Conference on Transport Infrastructure and Systems, Transportation Research Procedia, 63(1), 187-194. <https://doi:10.1016/j.trpro.2023.02.161>.
- Doan, C.; Ghaffarianhoseini, A.; Naismith, N.; Tongrui, Z.; Rehman, A.U.; Tookey, J.; Ghaffarianhoseini, A. (2019).** Building Information Modelling (BIM) Framework for Practical Assessment. International Conference on Construction and Real Estate Management 2019, Alberta, Canada. <https://doi:10.1061/9780784482308.005>.
- Eastman, C.; Teicholz, P.; Sacks, R; et Liston, K. (2011).** BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. John Wiley & Sons, Hoboken.
- El Hage, M. (2012).** Étude de la qualité géomorphologique de modèles numériques de terrain issus de l'imagerie spatiale. Thèse de doctorat. Conservatoire national des arts et métiers-CNAM. <https://doi:10.13140/RG.2.1.5024.5281>.
- Elonen, S.; Artto, K.A. (2003).** Problems in managing internal development projects in multi-project environments. International Journal of Project Management, 21(6), 395-402. [https://doi:10.1016/S02637863\(02\)00097-2](https://doi:10.1016/S02637863(02)00097-2).
- Feng, Y. (2022).** Research on the Application of Computer-Based BIM Technology in Construction Projects. IEEE, 1-7. <https://doi:10.1109/ICKECS56523.2022.10059739>.
- Figueira, J.; Roy, B. (2002).** Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. European Journal of Operational Research, 139(2), 317-326. [https://doi:10.1016/S03772217\(01\)00370-8](https://doi:10.1016/S03772217(01)00370-8).
- Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M. (2005).** Multiple criteria decision analysis: state-of-the-art surveys. Springer, eISBN: 978-0-387-23081-8. <https://doi:10.1007/b100605>.
- Gan, W.; Ge, Y. (2023).** Application Strategy of BIM Technology in Municipal Road Design. Journal of World Architecture, 7(3) 15-20. <https://doi:10.26689/jwa.v7i3.4768>.
- Gao, T.; Na, S.; Dang, X.; Zhang, Y. (2018).** Study of the competitiveness of Quanzhou Port on the Belt and Road in China based on a fuzzy-AHP and ELECTRE III model. Sustainability, 10(4), 1253. <https://doi:10.3390/su10041253>.
- Ghaffarianhoseini, A., Doan, D. T., Naismith, N., Tookey, J., Ghaffarianhoseini, A. (2017).** Amplifying the Practicality of Contemporary Building Information Modelling (BIM) Implementations for New Zealand Green Building Certification (Green Star). Engineering, Construction and Architectural Management, 24(4), 696-714. <https://doi:10.1108/ECAM-02-2016-0043>.
- Hadjar, M.I.; Zaoui, M.; Kadri, T.; Bensoula M.; Draiche, K. (2025).** Application of BIM technology in road infrastructures: choice of the best variant using TOPSIS & ELECTRE III methods. Asian Journal of Civil Engineering. <https://doi:10.1007/s42107-025-01499-1>.
- Harem, W. (2020).** Multi-criteria decision support: the ELECTRE family and the problem of investment choice. University of Tlemcen, FSEGSC, Algeria, 3(2), 140-162.
- Hwang, C.L.; Yoon, K. (1981).** Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag, New York. <https://doi:10.1007/978-3-642-48318-9>.

- Jato-Espino, D.; Castillo-Lopez, E.; Rodriguez-Hernandez, J.; Canteras-Jordana, J.C. (2014).** A review of application of multi-criteria decision-making methods in construction. *Automation in Construction*, 45, 151-162. <https://doi:10.1016/j.autcon.2014.05.013>.
- Kabir, G.; Sadiq, R.; Tesfamariam, S. (2014).** A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10 (9), 1176-1210. <https://doi:10.1080/15732479.2013.795978>.
- Kang, S. (2025).** BIM Application in Road Construction Sector of Developing Countries. *Journal of World Architecture*, 9(3), 109-115. <https://doi:10.26689/jwa.v9i3.10927>.
- Kumar, R; Pamucar, D. (2025).** M A Comprehensive and Systematic Review of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Methods to Solve Decision-Making Problems: Two Decades from 2004 to 2024. *Spectrum of Decision Making and Applications*, 2 (1), 178-197. <https://doi:10.31181/sdmap21202524>.
- Lafrance, F. (2018).** Towards a 2D/3D web mapping platform - dynamic for citizen participation. University of Laval, 01-185.
- Larbani, M.; Aouni, B. (2025).** A generalized approach for multi-criteria decision aid methods. *Annals of Operations Research* 346, 1187-1215. <https://doi:10.1007/s10479-024-06327-4>.
- Leyva-Lopez, J.C.; Fernandez-Lonzales, E. (2003).** A new method for group decision support based on ELECTRE III methodology. *European Journal of Operational Research*, 148, 14-27.
- Lin, T.Y.; Hung, K.C.; Jablonsky, J.; Lin, K.P. (2025).** An Enhanced VIKOR and Its Revisit for the Manufacturing Process Application. *Computers, Materials & Continua*, 83(2), 1901-1927. <https://doi:10.32604/cmc.2025.063543>.
- Madanchian, M.; Taherdoost, H. (2023).** A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making. *Sustainable Social Development*, 1(1), 2220. <https://doi:10.54517/ssd.v1i1.2220>.
- Mardani, A.; Jusoh, A.; Nor, K.M.D.; Khalifah, Z.; Zakwan, N.; Valipour, A. (2015).** Multiple Criteria Decision-Making techniques and their applications, a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, 28, 516-571. <https://doi:10.1080/1331677X.2015.1075139>.
- Mouhib, Y. (2020).** Une méthode de tri multicritère multi-périodes pour la sélection de projet en contexte d'incertitude. Mémoire, Université du Québec à Rimouski, Unités départementales des sciences de la gestion, 120.
- Nielsen, O.A.; Miceli, G.Jr.; Ferreira Filho, A.D.S.; Pellanda, P.C. (2024).** A Review of Global Efforts in BIM Adoption for Road Infrastructure, *Infrastructures*, 9(8), 126. <https://doi:10.3390/infrastructures9080126>.
- Olivatto, T.F.; Borchers, T.; Lima, B.J.; Bueno, C. (2024).** Intégration de la modélisation des informations et du SIG dans les applications de mobilité et de transport. *Revista de Arquitetura IMED*, 13(1), 135. <https://doi:10.18256/2318-1109.2024.v13i1.5038>.
- Opricovic, S.; Treng, G.H. (2004).** Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455. [https://doi:10.1016/S03772217\(03\)00020-1](https://doi:10.1016/S03772217(03)00020-1).
- Pagone, E. & Salonitis, K. (2023).** Comparative Study of Multi-criteria Decision Analysis Methods in Environmental Sustainability, *Smart Innovation, Systems and Technologies, Sustainable Design and Manufacturing*, 338, Springer, 223-231. https://doi:10.1007/978-981-19-9205-6_21.
- Pourghasemi, HR.; Honarmandnejad, F.; Rezaei, M.; Tarazkar, MH.; Sadhasivam, N. (2021).** Prioritization of water erosion-prone subwatersheds using three ensemble methods in Qareaghaj catchment, southern Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 37894-37917. <https://doi:10.1007/s11356-021-13300-2>.

- Riera-Spiegelhalder, M., Campos Rodrigues, L., & Ferrandis Martínez, A. (2025). A Multicriteria Analysis to Integrate Stakeholder Perceptions of Ecosystem-Based Flood Adaptations in Coastal Urban Areas. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 71(1), 153–179. <https://doi:10.5565/rev/dag.933>.
- Roszkowska, E. (2011). multi-criteria decision-making models by applying the TOPSIS method to crisp and interval data, 201-230, ISBN: 978-83-7246-722-5.
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, Série verte, Tome 2*, 2(8), 57-75.
- RGRA. (2017). BIM & infrastructures. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA)*, 943.
- Saaty, R.W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176. [https://doi:10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi:10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- Salman, A.; Khalfan, M.; Tayyab, M. (2012). Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond, *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 12(4), 15-28. <https://doi:10.5130/ajceb.v12i4.3032>.
- Sarkar, P.; Kumar, P.; Vishwakarma, DK.; Ashok, A.; Elbeltagi, A.; Gupta, S.; Kuriqi, A. (2022). Watershed prioritization using morphometric analysis by MCDM approaches. *Ecological Informatics*, 70, 101763. <https://doi:10.1016/j.ecoinf.2022.101763>.
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357-375.
- Suk-Joo, L. (2023). Comparative Study of Multi-criteria Decision Analysis Methods in Environmental Sustainability. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 223-231. https://doi:10.1007/978-981-19-9205-6_21.
- Schrayen, J.; Delfosse, V.; Juchmes, R.; Leclercq, P. (2012). Evaluation des échanges au format IFC dans le cadre de la réglementation thermique. *Conférence Proceeding, Université de Liège, Belgique*. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/121711>.
- Taherdoost, H.; Madanchian, M. (2023). A Comprehensive Overview of the ELECTRE Method in Multi-Criteria Decision-Making. *Journal of Management Science & Engineering Research*, 6(2), 5-16. <https://doi:10.30564/jmser.v6i2.5637>.
- Talha, Y.; El jemli, Z. (2022). Le BIM entre obligation et encouragement, un état des lieux du BIM dans le monde (+15 pays). *HEXABIM*, <https://www.hexabim.com/blog/le-bim-entre-obligation-et-encouragement-un-etat-des-lieux-du-bim-dans-le-monde>.
- Tan, T.; Mills, G.R.; Papadonikolaki, E.; Liu, Z. (2021). Combining multi-criteria decision making (MCDM) methods with building information modelling (BIM): A review. *Automation in Construction*, 121, 103451. <https://doi:10.1016/j.autcon.2020.103451>.
- UNECE. (2021). Building Information Modelling (BIM) for road infrastructure: TEM requirements and recommendation. United nations economic commission for Europe, eISBN: 978-92-1-005549-9.
- Vincent, F. (2017). Testimonial of using Infracore 360 in an urban planning project. *Landscape Laboratory*. <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/emea/docs/labodes-paysages-customer-story-fr-3p-web.pdf>.
- Wang, J.; Xu, M.; Wang, Y.; Zhu, Z. (2024). A Novel IVBPRTELECTRE III Algorithm Based on Bidirectional Projection and Its Application. *Symmetry*, 17(1), 26. <https://doi:10.3390/sym17010026>.
- Yardimci, Y.; Kurucay. (2024). LCA-TOPSIS Integration for Minimizing Material Waste in the Construction Sector: A BIM-Based Decision-Making. *Buildings*, 14(12), 3919. <https://doi:10.3390/buildings14123919>.

- Youssef, A.E.** (2020). An Integrated MCDM Approach for Cloud Service Selection Based on TOPSIS and BWM. *IEEE*, 8, 71851-71865. <https://doi:10.1109/ACCESS.2020.2987111>.
- Zaoui, M.; Himouri, S.; Kadri, T; Benaouina, C.** (2020). Selection of the best alternative for a road project to replace a section in a flood-prone area using GIS and AMC tools. *Journal of materials and engineering structures* 7, 307-324.
- Zavadskas, E.K.; Turskis, Z.; Kildiene, S.** (2014). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and economic development of economy*, 20(1), 165-179. <https://doi:10.3846/20294913.2014.892037>.
- Zigmund, V.** (2022). Analysis of BIM and MCDM integration in design, manufacturing and construction stages. *Mokslas - Lietuvos ateitis*, 14, 1-5. <https://doi:10.3846/mla.2022.13788>.
- Zlaugotne, B.; Zihare, L.; Balode, L.; Kalnbalkite, A.; Khabdullin, A.; Blumberga, D.** (2020). Multi-Criteria Decision Analysis Methods Comparaison. *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), 454-471. <https://doi:10.2478/RTUECT-2020-0028>.
- Zougari, A.** (2011). Une approche couplant logique floue et capitalisation des connaissances pour la résolution du problème de choix des fournisseurs. Thèse de doctorat, University Paul Verlaine – METZ, Français, 1-105.