République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المـــدرســـة الوطنيـــة العليـــا للأشغـال العموميـة

فرنسـيس جانســون

École Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson

Mémoire

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

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Routes et Ouvrages

Thème

Conception et modélisation d'un tunnel par l'approche BIM : cas du tronçon PK 38 + 837.159 à Pk 39 + 137.159 du lot 3, métro d'Alger.

Présenté par :

BENZAID Lina

SADALLAH Fella

Encadré par :

M. HEBIB Rafik

M. AMINI Ali

Promotion 2024 / 2025

© ENSTP-FJ – Garidi – Vieux Kouba


بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicace

À nos très chers parents.

À nos aimables frères et sœurs.

À nos braves amis et camarades.

Pour le noble chemin que nous avons parcouru ensemble.

Remerciements

Nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, pour toutes les grâces qu'Il nous a accordées.

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur, M. HEBIB Rafik, Docteur en Géologie appliquée au Génie civil et Enseignant à l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics ENSTP, pour ses précieux conseils et sa disponibilité.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à M. AMINI Ali, Sous-Directeur Technique de Cosider TP / M29, pour son aide précieuse et son soutien.

Nous remercions les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer la qualité et la valeur de notre travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à nos enseignants, qui ont éclairé notre chemin tout au long de ces années.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude envers nos familles pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inconditionnels.

Résumé

Ce mémoire constitue un essai d'intégration de l'approche BIM dans la conception d'un tronçon de tunnel du métro d'Alger. Pour ce faire, plusieurs outils de la suite logicielle Autodesk ont été utilisés. Ainsi, le modèle géotechnique a été établi à l'aide de l'extension Geotechnical Modeler du logiciel Civil 3D ; la maquette a été développée avec les logiciels InfraWorks, Civil 3D, Inventor Professional et Revit ; les vérifications structurelles ont été effectuées avec le logiciel Robot Structural Analysis Professional. La détection des conflits a été réalisée avec l'outil Clash Detective de Navisworks, la modélisation du phasage de réalisation avec l'outil TimeLiner de Navisworks, et l'estimation des quantités et des coûts avec les logiciels Civil 3D et Revit. Les résultats obtenus ont révélé les grandes potentialités d'adaptation des solutions existantes ; toutefois, des évolutions sont nécessaires pour certains aspects, notamment ceux relatifs à la vérification tridimensionnelle de la stabilité géotechnique et de la stabilité structurelle.

Mots clés

Métro, Modélisation, Autodesk, Géotechnique, Structure, Planification, Contrôle coût.

ملخص

هذه الأطروحة هي محاولة لدمج نهج BIM في تصميم قسم نفق مترو الجزائر. ولتحقيق ذلك، استُخدمت العديد من أدوات مجموعة برامج Autodesk. وهكذا، تم إنشاء النموذج الجيوتقني باستخدام ملحق Geotechnical Modeler لبرنامج Civil 3D؛ وتم تطوير النموذج باستخدام برامج InfraWorks وCivil 3D وInventor Professional وRevit؛ وتم إجراء عمليات التحقق الهيكلي باستخدام برنامج Robot Structural Analysis Professional. و تم الكشف عن التعارضات باستخدام أداة Clash Detective من برنامج Navisworks، تمت نمذجة مراحل الإنجاز باستخدام أداة TimeLiner من برنامج Navisworks، وتقدير الكميات والتكاليف باستخدام برنامجي Civil 3D وRevit. كشفت النتائج التي تم الحصول عليها عن الإمكانات الكبيرة لتكييف الحلول الحالية؛ ومع ذلك، فإن التطويرات ضرورية لبعض الجوانب، وخاصة تلك المتعلقة بالتحقق ثلاثي الأبعاد للاستقرار الجيوتقني والاستقرار الهيكلي.

الكلمات المفتاحية

المترو، النمذجة، Autodesk، الجيوتقنية، الهيكل، التخطيط، مراقبة التكاليف.

Abstract

This thesis is an attempt to integrate the BIM approach into the design of a tunnel section of the Algiers metro. To do this, several tools from the Autodesk software suite were used. Thus, the geotechnical model was established using the Geotechnical Modeler extension of the Civil 3D software ; the model was developed with the InfraWorks, Civil 3D, Inventor Professional and Revit software; the structural verifications were carried out with the Robot Structural Analysis Professional software. Clash detection was carried out with the Navisworks Clash Detective tool, the modeling of the construction phasing with the Navisworks TimeLiner tool, and the estimation of quantities and costs with the Civil 3D and Revit software. The results obtained revealed the great potential for adapting existing solutions ; however, developments are necessary for certain aspects, particularly those relating to the three-dimensional verification of geotechnical stability and structural stability.

Keywords

Metro, Modeling, Autodesk, Geotechnical, Structure, Planning, Cost Control.

Sommaire

Introduction générale **19**
Chapitre I : Généralités sur les tunnels et le BIM **2**
I.1. Introduction 3
I.2. Généralités sur les tunnels 3
I.2.1. Définition et description 3
I.2.2. Principes généraux de la construction des tunnels 4
I.2.2.1. La méthode de convergence – confinement 8
I.2.3. La nouvelle méthode autrichienne NATM 9
I.2.3.1. Définition et principes de la méthode 9
I.2.3.2. Techniques de soutènement provisoire et de pré-soutènement selon la NATM 10
I.2.3.3. Techniques de creusement des tunnels 11
I.3. Généralités sur le BIM 14
I.3.1. Définition et principes fondamentaux du BIM 14
I.3.2. Le BIM dans les projets tunnels 15
I.3.3. Phases du BIM workflow dans les projets tunnels. 16
I.3.3.1. Niveaux de développement du modèle BIM du tunnel 18
I.3.4. Logiciels utilisés pour la création d'une maquette BIM pour les projets tunnels 20
I.3.5. Normes et standards du BIM 20
I.3.6. Exemples de projets de tunnels réalisés avec le BIM 20
I.4. Conclusion 21
Chapitre II : Description du projet **22**
II.1. Introduction 23
II.2. Métro d'Alger 23
II.2.1. L'histoire du Métro d'Alger 23
II.2.2. Lignes et Extensions du Métro d'Alger 24
II.2.3. Extensions en cours d'exploitation 24
II.2.4. Extensions en cours de réalisation 25
II.2.5. Extensions en cours d'étude 26
II.3. Extension « Chevalley – Bab El Oued – Place des Martyrs » 27
II.4. Acteurs du projet de l'extension « Chevalley – Bab El Oued – Place des Martyrs » 29
II.4.1. Le maître de l'ouvrage délégué 29
II.4.2. L'entreprise de réalisation 29

II.4.3. Historique des études 29
II.4.3.1. Les études préliminaires (Avant-projet détaillé -APD) 29
II.4.3.2. Le contrat de conception détaillé (Étude d'exécution) 30
II.5. Description du tronçon de 300 m entre la station Taleb Abderrahmane et Trois horloges 30
II.5.1. Le tunnel de voie 30
II.5.2. Le puits de ventilation 31
II.5.3. Le rameau de connexion 31
II.6. Conclusion 31
Chapitre III : Élaboration du modèle géotechnique 33
III.1. Introduction 34
III.2. Description de la zone d'étude 34
III.2.1. Contexte géologique 34
III.2.1.1. Géomorphologie 34
III.2.1.2. Stratigraphie 36
III.2.1.3. Tectonique 37
III.2.1.4. Lithostratigraphie 38
III.2.2. Contexte hydrogéologique 39
III.2.2.1. Étude hydrogéologique 39
III.2.2.2. Hydrogéologie de la zone du projet 40
III.2.3. Contexte sismique 41
III.2.3.1. Aperçu sur la tectonique d'Algérie 41
III.2.3.2. Contexte tectonique de la région d'Alger 41
III.2.4. Aperçu sismique de la zone d'Alger 42
III.2.5. Classification sismique selon RPOA 2008 44
III.3. Étude gÉotechnique 45
III.3.1. Campagne d'investigation 46
III.3.1.1. Sondages 48
III.3.1.2. Essais pressiométriques PMT 49
III.3.1.3. Essais de Perméabilité du Type Lugeons 49
III.3.2. Essais en laboratoire 50
III.3.3. Résultats des essais en laboratoire 50
III.3.3.1. Échantillon de terrains métamorphiques 50
III.3.3.2. Essai de compression simple 51
III.3.3.3. Essais de Cerchar (Dureté et l'Abrasivité) 52

III.3.4. Calcul des paramètres géotechniques 53
III.3.4.1. Détermination des paramètres géotechniques des remblais 54
III.3.4.2. Détermination des paramètres géotechniques des formations quaternaires (QA et QS) par corrélations pressiométriques 54
III.3.4.3. Détermination des paramètres géotechniques du calcaire - des socles (S) et les socles altérés (SA) 59
III.3.4.4. Tableau récapitulatif 59
III.3.5. Interprétation des résultats 60
III.3.5.1. Interprétation géologique générale du tracé (PK 38+837.159 à PK 39+137.159) 60
III.3.5.2. Interprétation des résultats des essais in situ et des essais de laboratoire réalisés 60
III.3.5.3. Interprétation géotechnique du tronçon étudié en BIM (PK 38+930 à PK 38+980) 61
III.3.6. Profil géologique 61
III.3.7. Profil géotechnique 61
III.4. Conclusion 61
Chapitre IV : Élaboration de la maquette 3D 64
IV.1. Introduction 65
IV.2. Flux de travail (WORKFLOW) BIM pour la modélisation du tunnel 65
IV.2.1. Préparation des données topographiques 65
IV.2.1.1. Importation préliminaire depuis InfraWorks 65
IV.2.1.2. Utilisation du levé topographique haute précision 67
IV.2.2. Création de la Surface dans Civil 3D 67
IV.2.3. Intégration des données géologiques et géotechniques 69
IV.2.4. Définition de l'axe en plan, du profil en long et du profil type 70
IV.2.4.1. Définition de l'axe en plan (tracé en plan) 70
IV.2.4.2. Élaboration du profil en long 70
IV.2.4.3. Création du profil type 71
IV.2.5. Création du corridor 3D dans le logiciel Civil 3D 73
IV.2.6. Modélisation du réseau d'assainissement 75
IV.2.6.1. Conception paramétrique des composants 75
IV.2.6.2. Création du réseau gravitaire 76
IV.2.7. Création des tabulations et profils en travers 77
IV.2.7.1. Création des tabulations (Sample lines) 77

IV.2.7.2. Génération des profils en travers (Cross Sections) 77
IV.2.8. Interopérabilité BIM : Export du modèle Civil 3D et configuration dans InfraWorks 78
IV.2.9. Conception de la section du tunnel dans Autodesk Inventor 79
IV.2.10. Export du modèle 3D personnalisé depuis Inventor et intégration dans InfraWorks 80
IV.2.11. Affectation de la section personnalisée au tunnel dans InfraWorks 81
IV.2.12. Exportation du modèle vers Revit pour coordination et documentation BIM 82
IV.2.13. Finalisation du Modèle dans Civil 3D 83
IV.2.13.1. Automatisation du Placement des Blocs via Dynamo Civil 3D 83
IV.2.13.2. Extraction des Solides 3D et Visualisation Globale 84
IV.2.14. Synchronisation automatique du modèle entre Civil 3D, InfraWorks et Revit .. 86
IV.3. Conclusion 86
Chapitre V : Modélisation native dans revit et détection des conflits 87
V.1. Introduction 88
V.2. Mise à niveau du modèle Revit 89
V.2.1. Extraction des points de projet depuis le corridor Civil 3D 89
V.2.2. Création de familles paramétriques adaptatives 91
V.2.3. Création du projet Revit et configuration initiale 94
V.2.4. Géoréférencement du modèle Revit 94
V.2.5. Développement des scripts Dynamo 96
V.2.6. Résultat de l'exécution des scripts Dynamo 102
V.3. Détection des conflits dans Navisworks Manage 103
V.3.1. Exportation du modèle Revit 103
V.3.2. Importation dans Navisworks 103
V.3.3. Paramétrage du test de détection de conflits 104
V.3.4. Analyse des résultats 105
V.4. Conclusion 106
Chapitre VI : Modélisation et analyse structurelle 107
VI.1. Introduction 108
VI.2. Modélisation et vérification du soutènement provisoire 108
VI.2.1. Élaboration du modèle et paramétrage géotechnique et structurel 108
VI.2.2. Paramétrage du phasage de réalisation 109
VI.2.3. Résultat 109
VI.2.3.1. Déplacement vertical 109

VI.2.3.2. Déplacement horizontal 109
VI.2.3.3. Déplacement au niveau du front d'excavation 110
VI.2.3.4. Résultats des efforts internes 110
VI.3. Modélisation et vérification du revêtement définitif 110
VI.3.1. Calcul des charges 110
VI.3.1.1. Détermination des charges verticales et horizontales agissant sur le revêtement du tunnel selon la théorie de TERZAGHI 110
VI.3.1.2. Charge verticale active due au terrain encaissant 111
VI.3.1.3. Charge horizontale active due au terrain encaissant 112
VI.3.2. Détermination des charges verticales et horizontales agissantes sur le revêtement du tunnel selon la méthode géostatique 112
VI.3.2.1. Charge verticale active due au terrain encaissant 113
VI.3.2.2. Charge horizontale active due au terrain encaissant 113
VI.3.3. Calcul de la charge sous le radier selon TSIMBARIEVITCH 113
VI.3.3.1. Évaluation des charges appliquées 115
VI.3.4. Interopérabilité Revit - Robot Structural Analysis Professional 115
VI.3.4.1. Modélisation d'un portique test dans Revit et exportation vers Robot Structural Analysis Professional 115
VI.3.4.2. Exportation du modèle du tunnel vers Robot Structural Analysis Professional 117
VI.3.5. Modélisation analytique sur Robot Structural Analysis Professional 118
VI.3.6. Définition du modèle de calcul 118
VI.3.7. Modélisation géométrique de la section du tunnel 118
VI.3.8. Affectation de la section 121
VI.3.9. Conditions aux limites et modélisation des appuis 122
VI.3.10. Définition des charges et combinaisons de charges 125
VI.3.11. Résolution du modèle 127
VI.3.12. Ferraillage du revêtement définitif 128
VI.3.13. Ferraillage longitudinal 129
VI.3.14. Ferraillage transversal 129
VI.3.14.1. Ferraillage secondaire 130
VI.4. Conclusion 131
Chapitre VII : BIM 4D : Similation du phasage constructif 132
VII.1. Introduction 133
VII.2. Création du modèle 4D dans Navisworks 134

VII.2.1. Combinaison des modèles 3D 134
VII.2.1.1. Importation du modèle Revit 134
VII.2.1.2. Importation du modèle Civil 3D 134
VII.2.2. Création des jeux de sélection 135
VII.2.3. Création du planning des tâches 137
VII.2.4. Intégration du planning dans TimeLiner 138
VII.2.4.1. Importation du fichier CSV 139
VII.2.4.2. Association automatique des jeux de sélection aux tâches 140
VII.2.4.3. Paramétrage et lancement de la simulation 4D 140
VII.3. Conclusion 142
Chapitre VIII : BIM 5D : Estimation des quantités et des coûts 143
VIII.1. Introduction 144
VIII.2. Extraction des quantités à partir de la maquette BIM 144
VIII.2.1. Extraction avec Autodesk Civil 3D 144
VIII.2.2. Extraction avec Autodesk Revit 145
VIII.3. Estimation des coûts 148
VIII.4. Conclusion 151
Conclusion générale 152
Bibliographie 155
Annexe 1 160
Annexe 2 164
Annexe 3 166
Annexe 4 171
Annexe 5 174
Annexe 6 187
Annexe 7 192
Annexe 8 215

Liste des figures

Figure I.1: Tunnel construit en mine. 4
Figure I.2: Tunnel construit à ciel ouvert. 4
Figure I.3: L'effet de voûte 5
Figure I.4 : Les trois (3) cas possibles d'effet de voûte. 5
Figure I.5 : Structure type avec dispositifs de soutènement, d'étanchéité et de drainage. 7
Figure I.6 : Composition du génie de voie dans un tunnel ferroviaire à doubles voies. 8
Figure I.7 : Principe de la méthode convergence - confinement. 9
Figure I.8 : Phases du cycle d'avancement dans la technique de creusement par explosifs. ... 12
Figure I.9 : Séquences d'exécution du tir. 12
Figure I.10 Machines à attaque ponctuelle pour le creusement mécanique. 13
Figure I.11 : Machine à attaque globale (TBM). 13
Figure I.12 : (A) : Excavation à pleine section, (B)-(C)-(D) : Excavation à section partielle. 14
Figure I.13 : Terminologie des dimensions du BIM. 15
Figure I.14 : Stratigraphie du terrain-modèle géologique. 16
Figure I.15 : (A) : section simplifiée – (B) : section détaillée. 17
Figure I.16 : Modèle sol – structure. 17
Figure I.17 : Phasage de construction : (A) : Excavation et pose du soutènement provisoire – (B) : Structure finale. 17
Figure I.18 : Exemple de visualisation. 18
Figure I.19 : Triangle représentant les trois domaines du BIM, avec les normes internationales associées (source : buildingSMART). 21
Figure II.1 : Plan général du prolongement du Métro d'Alger entre Chevalley et la place Martyrs. 27
Figure II.2 : Plan de métro d'Alger. 28
Figure II.3 : Tunnel de voie – Section transversale type. 30
Figure II.4 : Vue en profil transversal du puits de ventilation PV08. 31
Figure III.1 : Ensembles morphologiques de la région - Implantation du tracé. 35
Figure III.2 : Extrait de la carte géologique de l'Algérie, Chéragas – implantation du tracé ... 36
Figure III.3 : Légende de l'extrait de la carte géologique de l'Algérie, Chéragas 37
Figure III.4 : La série lithologique du massif d'Alger (Saadallah) 37
Figure III.5 : La carte lithologique du massif d'Alger (BRGM 2005) 39
Figure III.6 : Extrait de la carte hydrogéologique de la région d'Alger – 1:200 000 40
Figure III.7 : Carte des structures actives de la région d'Alger (Djerouit 2009) 42
Figure III.8 : Carte de la sismicité historique de 1359 à 1895 (Harbi, 2006) et de la sismicité instrumentale du Nord de l'Algérie de 1900 à 2005 (source, Benouar, 1995 et ISC). 42
Figure III.9 : Carte structurale de la région d'Alger (modifiée d'après Yelles et al. 2005, Kieken,1962 ; Wildi,1983, et Boudiaf,1996), comportant aussi la sismicité instrumentale. ... 44
Figure III.10 : Zonage sismique de l'Algérie. 44
Figure III.11 : Localisation des sondages mécaniques exécutés au cours des différentes campagnes. 47
Figure III.12 : Profil géologique 62
Figure III.13 : Profil géotechnique 63
Figure IV.1 : Workflow général pour la modélisation BIM du tunnel. 65

Figure IV.2 : Délimitation de la zone d'étude dans Model Builder (source : capture d'écran InfraWorks). 66
Figure IV.3 : Modèle 3D contextuel généré dans InfraWorks (relief, réseaux, bâtiments). 66
Figure IV.4 : Surface MNT importée dans Civil 3D..... 67
Figure IV.5 : Configuration du système de coordonnées WGS 84 / UTM Zone 31N dans Civil 3D. 67
Figure IV.6 : Configuration de l'import des points XYZ dans Civil 3D. 68
Figure IV.7 : Surface MNT brute avec pics aberrants. 68
Figure IV.8 : surface MNT finale, après suppression des points aberrants. 69
Figure IV.9 : Visualisation des sondages importés dans Civil 3D. 69
Figure IV.10 : Visualisation des strates géologiques interpolées..... 70
Figure IV.11 : Visualisation de l'axe en plan de tunnel dans Civil 3D..... 70
Figure IV.12 : Contour extérieur codé (voûte « Top_Outside » / radier « Datum_Outside »).71
Figure IV.13 : Processus de création géométrique dans Subassembly Composer. 72
Figure IV.14 : Élément de profil type du tunnel créé avec Subassembly Composer. 72
Figure IV.15 : Profil type créé dans Civil 3D à l'aide de l'élément conçu dans Subassembly Composer. 73
Figure IV.16 : Vue 3D du corridor du tunnel dans Civil 3D 74
Figure IV.17 : Projection en plan des limites du tunnel..... 74
Figure IV.18 : Visualisation 3D des surfaces de la voûte (en bleu) et du radier (en marron), générées à partir du corridor..... 75
Figure IV.19 : Composants d'une structure de drainage..... 75
Figure IV.20 : La structure de drainage créée. 76
Figure IV.21 : Réseau d'assainissement en 3D. 76
Figure IV.22 : Profil en travers au PK 38+980 77
Figure IV.23 : Fenêtre de sélection des entités à importer depuis un fichier DWG Civil 3D. 78
Figure IV.24 : Tunnel généré dans InfraWorks via la commande « Ajouter une structure : Tunnel »..... 79
Figure IV.25 : Conception de la section du tunnel dans Inventor : esquisse 2D et extrusion 3D. 79
Figure IV.26 : Export du modèle paramétrique depuis Autodesk Inventor via le plugin Infrastructure Part Shape Utility. 80
Figure IV.27 : Configuration des attributs du nouveau composant paramétrique de tunnel. .. 80
Figure IV.28 : Affectation du composant paramétrique personnalisé à la section du tunnel. . 81
Figure IV.29 : Le tunnel personnalisé dans InfraWorks après affectation du composant issu d'Inventor et suppression des portails. 81
Figure IV.30 : Exportation du modèle de tunnel depuis InfraWorks vers Revit via la commande « Publier les ouvrages». 82
Figure IV.31 : Visualisation du tunnel importé dans Revit..... 82
Figure IV.32 : Blocs modélisés (traverses et supports de rail de courant). 83
Figure IV.33 : Alignement automatique des traverses et supports de rail de courant – Vue en plan. 84
Figure IV.34 : Alignement automatique des traverses et supports de rail de courant – Vue 3D. 84
Figure IV.35 : Visualisation 3D du tunnel dans Autodesk Civil 3D intégrant les entités extraites, le réseau de drainage et les composants positionnés par Dynamo. 85

Figure IV.36 : Visualisation 3D du modèle via la commande « Visualisation3D » d'Autodesk Civil 3D. 85
Figure IV.37 : Utilisation de la commande « Réimporter » dans InfraWorks pour synchroniser les données depuis Civil 3D. 86
Figure IV.38 : Commande « Publier les ouvrages > Mettre à jour le modèle existant » dans InfraWorks. 86
Figure V.1 : Workflow BIM utilisé pour la création de la maquette numérique. 88
Figure V.2 : Accès à la commande « Rapport de points de projet 3D » dans la Boîte à outils – exportation des données de projet. 89
Figure V.3 : Boîte de dialogue du « Rapport de points de projet 3D » avec sélection des paramètres (projet 3D, abscisse curviligne, code de point, colonnes, etc) 90
Figure V.4 : Exemple de sortie du rapport de points exporté au format Excel (.xlsx) 90
Figure V.5 : Illustration des familles Revit de la première catégorie – familles à trois points adaptatifs. 91
Figure V.6 : Illustration des familles Revit de la deuxième catégorie – familles à deux points adaptatifs. 92
Figure V.7 : Familles Revit de la troisième catégorie – familles à positionnement ponctuel. 92
Figure V.8 : Étapes de création d'une famille générique métrique adaptative dans Revit (exemple de la famille Voûte) 93
Figure V.9 : Attribution des propriétés graphiques au béton C30/37 - Onglet 'Apparence' du navigateur de matériaux. 94
Figure V.10 : Définition des caractéristiques mécaniques du béton C30/37 - Onglet 'Physique' du navigateur de matériaux 94
Figure V.11 : Création d'un nouveau projet Revit. 94
Figure V.12 : Saisie des coordonnées du point de base. 95
Figure V.13 : Coordonnées finales du point de base après géoréférencement. 96
Figure V.14 : Coordonnées finales du point topographique après géoréférencement 96
Figure V.15 : Téléchargement du package « Dynabridge 0.0.6 » via le Dynamo Package Manager. 96
Figure V.16 : Environnement Dynamo - Le package "Tunnel" développé, constitué de cinq nœuds personnalisés pour la modélisation de tunnels. 97
Figure V.17 : Problèmes de précision graphique liés à l'éloignement de la géométrie de l'origine interne du modèle. 97
Figure V.18 : Positionnement des points d'alignement dans l'environnement 3D de Dynamo 98
Figure V.19 : Repères locaux générés par le nœud « Créer_Repères_Locaux » dans Dynamo 98
Figure V.20 : Création des limites gauche et droite du tunnel via le nœud « Créer_Corridors » 98
Figure V.21 : Illustration des vides entre les familles le long du tracé avant traitement par script 99
Figure V.22 : Exemple de résultats obtenus après l'exécution du script (à gauche : angles de rotation des familles de la catégorie 1 ; à droite : angles de rotation des familles de la catégorie 2) 99
Figure V.23 : Exemple de feuille Excel pour la Partie 1 du tunnel, contenant les coordonnées (encadrées en rouge), les angles de rotation de la catégorie 1 (encadrés en bleu) et les angles de rotation de la catégorie 2 (encadrés en jaune). 100

Figure V.24 : Exemple d'un nœud d'entrée configuré dans Dynamo lors de la création du script. 101
Figure V.25 : Interface du Lecteur Dynamo affichant les paramètres configurables. 101
Figure V.26 : Interface du Lecteur Dynamo utilisée pour l'exécution des scripts. 102
Figure V.27 : Modèle final du tunnel généré dans Revit à l'issue de l'exécution des scripts Dynamo. 102
Figure V.28 : Exportation du modèle Revit vers Navisworks au format .nwc 103
Figure V.29 : Modèle final du tunnel généré dans Revit, importé dans Navisworks. 104
Figure V.30 : Accès à la commande « Clash Detective » et affichage de sa fenêtre dans Navisworks. 104
Figure V.31 : Configuration des sélections et des paramètres du test de détection des conflits dans Navisworks 105
Figure V.32 : Affichage des résultats du test de détection des conflits 105
Figure V.33 : Illustration du conflit n°1 détecté entre câble électrique et colonne sèche 106
Figure V.34 : Modèle du tunnel mis à jour après déplacement de la colonne sèche hors des passerelles 106
Figure VI.1 : Élaboration du modèle de calcul. 108
Figure VI.2 : Exemple de paramètres géotechniques et structurels intégré dans le calcul. 109
Figure VI.3 : Hypothèse de calcul de TERZAGI. 111
Figure VI.4 : Représentation des poussées sur le radier d'après TSIMBARIEVITCH. 113
Figure VI.5 : Modélisation d'un portique test dans Revit. 115
Figure VI.6 : La génération automatique du modèle analytique à partir du modèle physique 116
Figure VI.7 : Modèle analytique du portique. 116
Figure VI.8 : Exportation du portique de Revit vers Robot Structural Analysis Professional. 117
Figure VI.9 : Interface de sélection du « projet coque ». 118
Figure VI.10 : Définition des lignes de construction. 119
Figure VI.11 : Boîte de dialogue de la commande « Arc » utilisée pour le tracé de la section transversale du tunnel. 119
Figure VI.12 : Comparaison entre la discrétisation automatique (A) et la discrétisation à nombre fixe (B) 120
Figure VI.13 : Définition manuelle du matériau et de la section. 121
Figure VI.14: Affectation des propriétés mécaniques et modification du type d'élément en poutre pour les arcs de la section du tunnel. 122
Figure VI.15 : Application de la raideur radiale du terrain 124
Figure VI.16 : Modèle de la section transversale du tunnel avec l'ensemble des appuis élastiques radiaux appliqués. 125
Figure VI.17 : Définition de cas de charge. 125
Figure VI.18 : Définition des charges appliquées au revêtement du tunnel. 126
Figure VI.19 : Modélisation du tunnel avec l'ensemble des charges appliquées. 126
Figure VI.20 : Définition de combinaisons de charges. 127
Figure VI.21 : Lancement de calcul. 127
Figure VI.22 : Coupe transversale de la section de calcul. 128
Figure VI.23 : Ferraillage de la voûte 130
Figure VI.24 : Ferraillage du radier. 131
Figure VII.1 : Flux de travail pour la création du modèle BIM 4D dans Navisworks 133

Figure VII.2 : Importation du modèle Revit (.nwc) dans Navisworks via la fonction « Ajouter ». 134
Figure VII.3 : Positionnement exact du réseau de drainage (Civil 3D) dans la structure du tunnel (Revit). 135
Figure VII.4 : Exemple d'instruction de recherche ciblant les rails dans Navisworks. 135
Figure VII.5 : Fonction « Enregistrer la sélection » (encadré rouge) et « Rechercher des éléments » (encadré bleu). 136
Figure VII.6 : Vue de l'arborescence de sélection dans Navisworks. 136
Figure VII.7 : Fenêtre jeux dans Navisworks affichant les jeux créés. 136
Figure VII.8 : Accès à l'outil « TimeLiner » depuis l'interface de Navisworks. 138
Figure VII.9 : Interface de l'outil « TimeLiner » avec ses quatre onglets principaux. 138
Figure VII.10 : Importation d'un fichier CSV via l'onglet « Sources de données » de TimeLiner. 139
Figure VII.11 : Boîte de dialogue « Sélecteur de champ ». 139
Figure VII.12 : Hiérarchisation des tâches via le menu contextuel dans TimeLiner. 139
Figure VII.13 : Association automatique des jeux de sélection aux tâches via les règles dans TimeLiner. 140
Figure VII.14 : Association manuelle d'un jeu à une tâche via le menu contextuel. 140
Figure VII.15 : Séquences de construction simulées dans Navisworks via TimeLiner. 142
Figure VIII.1 : Paramétrage du critère de métré dans Civil 3D – Règles de calcul par matériau. 144
Figure VIII.2 : Création d'une surface différentielle entre (Surface_Voûte) et (Surface_Radier). 145
Figure VIII.3 : Résumé de déblai/remblai. 145
Figure VIII.4 : Création d'une nomenclature. 146
Figure VIII.5 : Boîte de dialogue « Propriétés du relevé de matériaux ». 146
Figure VIII.6 : Champs sélectionnés dans l'exemple. 147
Figure VIII.7 : Nomenclature générée affichée dans sa vue dédiée. 147
Figure VIII.8 : Exportation de la nomenclature depuis Autodesk Revit. 148
Figure VIII.9 : Fichier de nomenclature importé dans Excel pour exploitation. 148

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Configurations et Fonctions des Inclusions rigides. 11
Tableau I.2 : Niveaux LOD appliqués à la modélisation BIM des tunnels. 19
Tableau I.3 : Tableau récapitulatif des logiciels Autodesk et Bentley selon les étapes du processus BIM pour les tunnels. 20
Tableau III.1 : Les classements hydrogéologiques de terrain 40
Tableau III.2 : Principaux séismes ressentis dans la ville d'Alger. 43
Tableau III.3 : Récapitulatif de la localisation des Sondages. 48
Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des conditions stratigraphiques 48
Tableau III.5 : Récapitulatif de la localisation des essais pressiométriques effectués. 49
Tableau III.6 : Classification lugeons 50
Tableau III.7 : Roches (Classification AFTES 2003). 52
Tableau III.8 : Classification des sols d'après PL (Fasc.62). 54
Tableau III.9 : Classification des sols selon le rapport Em/PLM. 55
Tableau III.10 : Récapitulatif des résultats de l'essai pressiométrique Ménard selon chaque sondage. 55
Tableau III.11 : Récapitulatif des résultats de l'essai pressiométrique Ménard 56
Tableau III.12 : Tableau récapitulatif des paramètres géotechniques des unités. 59
Tableau V.1 : Les trois points de référence pour le géoréférencement dans Revit(buildingSMART France—Mediaconstruct, 2020) [19] 95
Tableau VI.1 : Résultats des efforts internes au niveau de soutènement provisoire 110
Tableau VI.2 : Tableau récapitulatif des charges appliquées au revêtement définitif du tunnel. 115
Tableau VI.3 : Méthodes de définition et paramètres de discrétisation des éléments de la section 120
Tableau VI.4 : Calcul du coefficient de raideur 122
Tableau VI.5 : Résultats des efforts internes au niveau de revêtement définitif 127
Tableau VI.6 : Efforts internes du revêtement. 129
Tableau VI.7 : Ferraillage longitudinal pour la voûte et le radier. 129
Tableau VI.8 : Vérification de l'effort tranchant. 129
Tableau VI.9 : Ferraillage secondaire pour la voute et le radier 130
Tableau VII.1 : Planning des tâches pour la simulation 4D 137
Tableau VIII.1 : Estimation des coûts du projet 149

Abréviations

2D : Représentation en deux dimensions

3D : Représentation en trois dimensions

AFTES : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain

APD : Avant-Projet Détaillé

APS : Avant-Projet Sommaire

AS : Accès de secours

BIM : Building Information Modeling

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

HVAC : Heating, Ventilation, and Air Conditioning

LoD : Level of Detail

LoG : Level of Geometry

LoI : Level of Information

MEF : Méthode des Éléments Finis

NATM : New Austrian Tunneling Method

PHT : Poste Haute Tension

PK : Point Kilométrique

PV : Puits de Ventilation

RPOA : Règles Parasismiques Applicables aux Ouvrages d'Art

SC : Sondage carotté

SP : Sondage pressiométrique

TBM : Tunnel Boring Machine

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les tunnels sont reconnus dans le domaine de génie civil comme des infrastructures essentielles de communication et de mobilité, englobant une variété de structures telles que les tunnels ferroviaires, routiers ainsi que les galeries hydrauliques et celles dédiées aux canalisations.

L'évolution des tunnels témoigne de la manière dont les civilisations ont su s'adapter aux défis géologiques et au besoin de développement. Utilisés depuis des millénaires, ces ouvrages ont d'abord été creusés à la main pour des fins hydrauliques, militaires et même religieuses.

Les ouvrages souterrains font partie des projets qui connaissent un intérêt de plus en plus croissant tant leurs intérêts économiques sont avérés, et qui s'intègrent entièrement dans les objectifs du développement durable.

Au fil du temps, les civilisations ont adopté de nouvelles techniques de construction, mais aussi de conception et de gestion de l'exploitation. En effet, actuellement, le développement de la civilisation est accompagné par le passage vers des infrastructures de grande envergure, qui rendent les méthodes classiques de conception et de gestion de l'exploitation obsolètes et qui nécessitent des moyens très importants.

Par ailleurs, le développement technologique permet actuellement de développer des techniques de gestion de l'ouvrage le long de son cycle de vie de manière automatisée.

Dans ce sens, le Building Information Modeling (BIM) constitue une approche innovante et révolutionnaire pour la prise en charge des ouvrages du génie civil. Le BIM permet, à l'aide de la maquette numérique, d'optimiser le processus de conception, d'exécution et de gestion dès les premières étapes du projet. La maquette BIM simplifie la communication en partageant les données entre collaborateurs au sein du même modèle numérique. En conséquence, le BIM améliore la coordination et contribue à éviter les conflits inattendus, les modifications et les retards de planification, donc réduit les dépenses inutiles et permet la plus efficace et durable exécution du projet BTP.

Ce mémoire est un essai d'implantation du BIM dans un projet d'ouvrage souterrain, et ce, pour ses trois premières dimensions, à savoir la dimension 3D, qui correspond à la modélisation géométrique, à la visualisation physique de l'ouvrage et à la détection des conflits ; la dimension 4D relative à la simulation de phasage du projet ; et la dimension 5D qui porte sur le suivi des coûts et l'estimation des quantités.

Le projet en question est un tronçon du Lot 3 (Chevalley – Place des Martyrs) du métro d'Alger, compris entre la station de Taleb Abderrahmane et la station Trois Horloges. Le tronçon initialement retenu pour l'étude s'étendait sur 300 m entre les points kilométriques Pk 38 + 837,159 et Pk 39 + 137,159. L'étude géotechnique incluant l'élaboration du profil géologique - géotechnique et le calcul des paramètres du terrain a été réalisée sur l'ensemble de cette section.

Cependant, pour des raisons pratiques liées à la complexité de la modélisation BIM et aux ressources disponibles, la modélisation numérique a été recentrée sur un tronçon représentatif de 50 mètres, compris entre les points kilométriques PK 38 + 930 et PK 38 + 980, faisant partie intégrante de la section initiale.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES TUNNELS ET LE BIM

I.1. INTRODUCTION

La réalisation d'un tunnel mobilise de multiples intervenants, chaque partie génère une quantité considérable d'informations échangées tout au long du projet. Pour un projet meilleur et plus rentable, des corrections et ajustements sont apportés à chaque étape, cela signifie que la communication et l'échange d'informations entre deux participants du projet constituent un processus itératif, au cours duquel tous les autres participants doivent également être informés des modifications apportées. Le suivi des modifications est compliqué par le volume d'informations et la nécessité de répéter certaines tâches, ce qui engendre des retards et des risques d'erreurs. Une collaboration et l'implication des acteurs du projet sont donc essentielles pour obtenir un résultat satisfaisant.

La nécessité d'un concept de liaison, qui relie de manière indissociable la conception, les calculs, la construction, le suivi, etc., s'est imposée avec force. Les outils et procédures BIM agissent résolument, apportant non seulement des solutions ponctuelles, mais aussi en transformant et en élargissant les procédures, les stratégies et les possibilités (Kontothanasis, Krommyda, Roussos, 2020) [32]. La collaboration entre la modélisation, le calcul, les outils de surveillance et le partage d'informations sous forme de données numériques sont les piliers fondamentaux qui font du BIM un véritable levier pour la coopération entre les différents acteurs du projet.

I.2. GÉNÉRALITÉS SUR LES TUNNELS

I.2.1. Définition et description

Le tunnel est un ouvrage linéaire creusé en souterrain, généralement dans le sol ou la roche, il permet le passage d'une voie de communication (Balasubramanian, 2014) [18], dans le but de :

- Franchir un obstacle (montagne, zone urbaine).
- Développer ou prolonger des réseaux de transport souterrain (voies ferrées, routes ou des métros).
- Transporter des conduites de fluide (eau, gaz) et des réseaux de câblages (électrique, télécoms).

Les tunnels sont classés selon :

La fonction

- Les tunnels de communication (tunnels ferroviaires, tunnels routiers)
- Les tunnels de transport (galeries hydrauliques, galeries de canalisations, égouts ...)

Le tracé et sa position

- Longueur du tunnel (court ou long)
- Profondeur du tunnel
- Inclinaison du tunnel (faible pente, forte pente ou sans inclinaison)
- Type d'alignement (droit ou courbe)

- Nombre de tubes et disposition (monotube, bitube ou multiple)

Le mode et la technique d'exécution

Les tunnels peuvent être réalisés :

- En mine ou à ciel ouvert



Figure I.1: Tunnel construit en mine.



Figure I.2: Tunnel construit à ciel ouvert.

- En pleine section ou section partielle
- Par l'explosif, à l'attaque ponctuelle ou à l'aide d'un bouclier (tunnelier)

La forme

- Tunnel sous forme circulaire.
- Tunnel sous forme de fer à cheval.
- Tunnel sous forme rectangulaire ou carrée.

I.2.2. Principes généraux de la construction des tunnels

Le creusement d'un tunnel est un processus particulièrement complexe, constitué d'une série d'étapes techniques interdépendantes. L'excavation du tunnel traverse des terrains aux caractéristiques variées et parfois inexplorées en raison de la ponctualité des essais de reconnaisse géotechniques réalisées en amont. Cette phase de creusement modifie progressivement l'équilibre interne préexistant du terrain (sol ou bien la roche).

En parallèle avec l'excavation, un soutènement provisoire est mis en place pour stabiliser les parois du tunnel. Ce soutènement permet de limiter les risques liés aux déformations instantanées du front et de parois, avant la stabilisation définitive de la structure. À ce stade, les

contraintes dans le terrain ne sont pas totalement confinées par le revêtement final, ce qui peut provoquer une concentration de contraintes sur les parois de l'excavation.

L'effet de voûte désigne un phénomène qui se produit lors de l'excavation, qui résulte de la déviation des contraintes préexistantes dans la masse rocheuse lorsque la cavité est ouverte, cette déviation des contraintes dépend des charges à supporter et du comportement du terrain, se manifeste soit près du profil de la section, éloignée de celui-ci, ou dans certains cas, qu'elle ne se produise même pas.(Lunardi, 2008) [33]

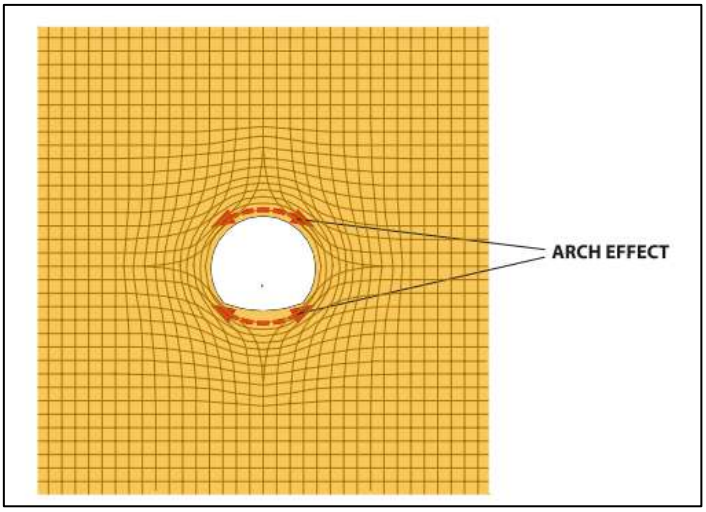


Figure I.3: L'effet de voûte

Le premier cas se produit lorsque le terrain autour de la cavité résiste bien au flux de contraintes dévié autour de la cavité, réagissant de manière élastique en termes de contraintes et de déformations. (Lunardi, 2008) [33]

Le second cas se produit lorsque le terrain autour de la cavité ne résiste pas au flux de contraintes dévié et réagit en se plastifiant et se déformant proportionnellement au volume du terrain impliqué dans le phénomène de plastification. (Lunardi, 2008) [33]

Le troisième cas se présente lorsque le terrain autour de la cavité est totalement incapable de résister au flux de contraintes dévié et réagit dans la zone de rupture, provoquant l'effondrement de la cavité. (Lunardi, 2008) [33]

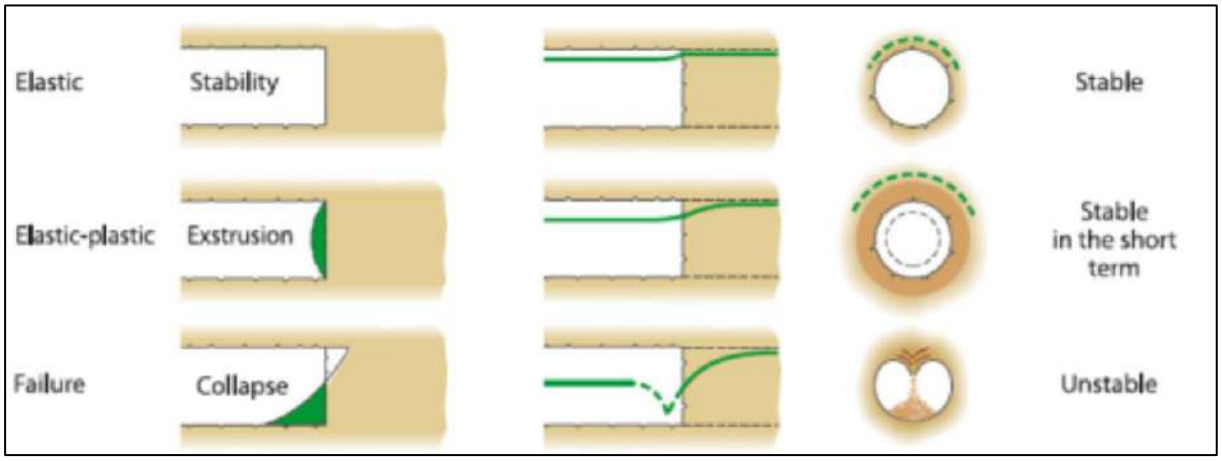


Figure I.4 : Les trois (3) cas possibles d'effet de voûte.

Le processus de creusement doit constamment s'adapter aux conditions spécifiques du terrain et aux perturbations générées par l'excavation. La réaction du terrain face à l'excavation, notamment l'effet de voûte, dépend principalement de la nature géologique du site. À partir de cet effet de voute et des observations faites au cours de l'excavation, le soutènement provisoire choisi lors de la phase d'étude est vérifié ou ajusté en fonction des conditions réelles rencontrées sur le terrain.

Une fois la cavité soutenue, des dispositifs de drainage éventuels sont installés pour capter les infiltrations d'eau provenant du massif rocheux ou du sol environnant. Ils comprennent des drains longitudinaux ou transversaux (au radier ou le long des parois), associés à des nappes drainantes comme le géotextile posé contre le soutènement. Après la mise en place des drains, le système d'étanchéité est posé. La technique d'étanchéité la plus utilisée dans les constructions souterraines est le dispositif d'étanchéité par géomembrane. Ces membranes sont soudées entre elles et fixées mécaniquement au soutènement. L'évacuation des eaux souterraines par drainage reste l'une des tâches les plus importantes de la construction d'ouvrages souterrains afin d'éviter les infiltrations d'eau dangereuses et de permettre une progression rapide et sûre du tunnel avec le moins d'obstructions possible.(Maidl, Thewes, Maidl, 2014) [35]

Le revêtement définitif marque la dernière étape des travaux de génie civil. Il consiste en la mise en place d'un anneau en béton armé, appliqué successivement sur le radier, les piédroits, puis la voûte. On peut définir ce revêtement comme la structure résistante située la plus à l'intrados du tunnel, cette position dans l'ouvrage conduit à faire jouer au revêtement plusieurs fonctions possibles : (Centre d'études des tunnels, 1998) [23].

- **Fonction mécanique**

C'est la fonction la plus traditionnelle du revêtement, conçu pour garantir la stabilité à long terme de l'ouvrage.

- **Fonction d'étanchéité**

Le revêtement joue un rôle important dans l'étanchement de l'ouvrage :

- Soit qu'il l'assure à lui seul (voussoirs préfabriqués avec joints par exemple).
- Soit qu'il assure l'étanchéité de surface (béton coffré dont seuls les joints de reprise sont traités en joints d'étanchéité).
- Soit qu'il joue le rôle de support pour une étanchéité d'intrados ou de soutien et de protection pour une étanchéité d'extrados.

- **Fonction liée à l'exploitation**

- L'intrados d'un tunnel reste la seule partie visible pour l'usager et son aspect, voire sa forme doivent être prise en compte dans sa conception. En fonction du type de tunnel, de sa longueur, de la nature et de l'importance du trafic, il convient de choisir un niveau de confort de conduite auquel contribuent la qualité des parements et leur éclairement.
- Lorsque le tunnel possède un système de ventilation mécanique, un revêtement lisse contribue à minimiser les pertes de charge.

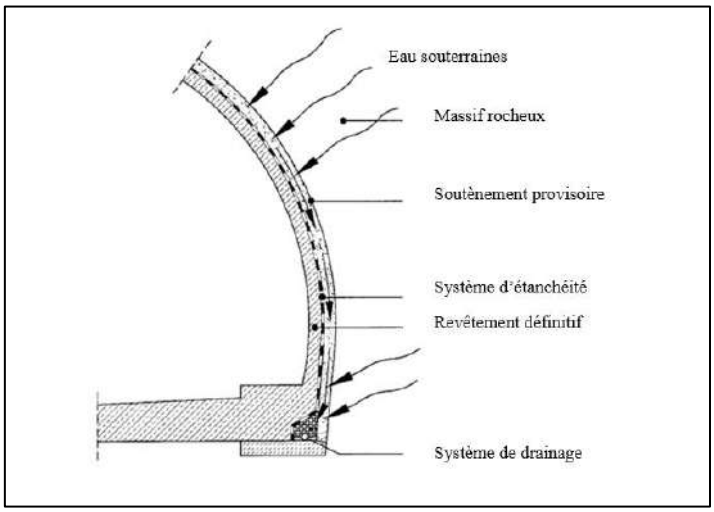


Figure I.5 : Structure type avec dispositifs de soutènement, d'étanchéité et de drainage.

Après la mise en œuvre du revêtement, un béton de remplissage de classe C20/25 est appliqué pour ajuster la plateforme au niveau de la voie, il sert principalement à régulariser la surface et assurer un support stable pour l'installation des composants de la superstructure ferroviaire. L'ensemble de ces éléments constitue ce qu'on appelle le génie de voie, ils assurent la stabilité, la sécurité et le bon fonctionnement de l'infrastructure ferroviaire :

- **Rail de roulement**

Le rail de roulement est l'élément principal de guidage et de support des véhicules ferroviaires. Fabriqué généralement en acier, il est disposé par paires parallèles alignées bout à bout pour former une voie ferrée. Ces rails reposent sur des traverses pour conserver un écartement constant.

- **Rail de courant**

Le rail de courant est un rail conducteur d'électricité utilisé pour l'alimentation électrique des trains, il est souvent réalisé en alliage conducteur et placé en position surélevé par rapport au rail de roulement.

- **Rail de sécurité**

Le rail de sécurité est un rail complémentaire installé entre les rails principaux. Il limite le risque de déraillement dans les sections sensibles du tracé.

- **Traverses**

Les traverses sont des éléments transversaux préfabriqués en béton placés entre deux rails, ils servent à la transmission des efforts entre le rail et le béton de voie ainsi qu'au maintien de l'écartement des deux files de rails.

- **Drainage de la plate-forme de voie**

Le drainage de la plate-forme de la voie est assuré de manière transversale, surtout le long du tracé, par des caniveaux de drainage superficiel, qui collectent et évacuent les eaux vers un réseau central de drainage. La conception et la disposition de ces dispositifs doivent être adaptées au tracé de la voie.

- **Béton de voie**

Le béton de voie est un béton structurel de classe C30/37 coulé directement sous les traverses, il sert de support de voie et participe à l'amortissement des efforts dynamiques induits par le trafic ferroviaire.

- **Béton de remplissage de voie**

Le béton de remplissage de voie (de classe 20/25) est utilisé pour combler les vides entre les équipements de voie (traverses, éléments de fixation…).

- **Câbles d'énergie**

Les câbles d'énergie acheminent l'électricité nécessaire au fonctionnement des systèmes du tunnel (éclairage, alimentation des équipements de signalisation et de communication).

- **Câbles de signalisation, communications, éclairage**

Ces câbles assurent la transmission des données liées à la signalisation ferroviaire, aux communications internes et à l'éclairage du tunnel.

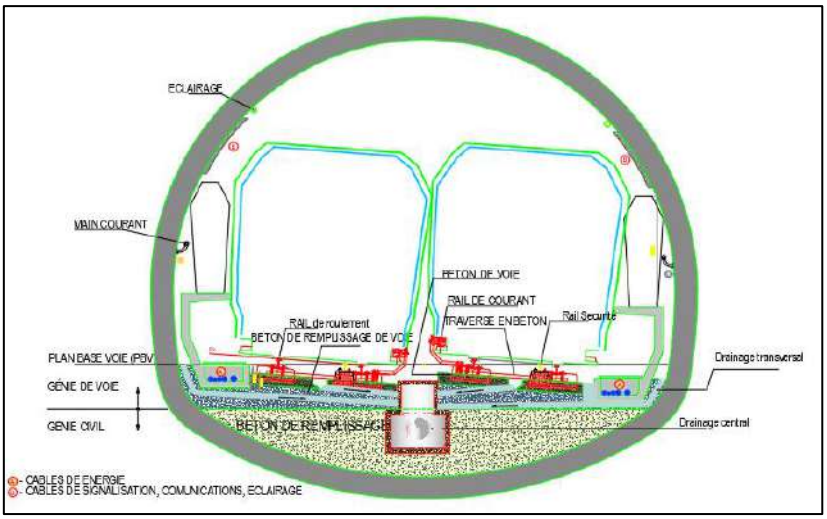


Figure I.6 : Composition du génie de voie dans un tunnel ferroviaire à doubles voies.

I.2.2.1. La méthode de convergence – confinement

La méthode convergence-confinement est un outil de pré-dimensionnement des tunnels, initialement développé pour les tunnels circulaires à face pleine creusés dans un terrain homogène, sous contraintes isotropes, où les effets de la gravité peuvent être négligés (AFTES, 2002). Cette méthode est basée sur l'analyse des contraintes et des déformations autour d'un tunnel circulaire. Elle permet de comprendre l'interaction entre le soutènement et le terrain grâce à un modèle de déformation plane du creusement du tunnel. Le problème 3D est donc simplifié par une hypothèse de déformation plane 2D, dans laquelle le creusement du tunnel est simulé par une réduction progressive d'une pression interne de soutènement appliquée à la paroi du tunnel (De La Fuente, Taherzadeh, Sulem, Nguyen, Subrin, 2019) [24].

La méthode consiste essentiellement à définir le point d'intersection entre deux courbes caractéristiques du terrain et du soutènement. En effet, la première courbe représente la réaction du terrain, qui passe d'un état confiné à un état déconfiné au fur et à mesure que le front

d'excavation se rapproche. Cette perte progressive de confinement entraîne des déformations du terrain, appelées convergences, observées au niveau des parois du tunnel. La seconde courbe concerne l'activation du soutènement, qui est installé pour bloquer le déconfinement du massif.(Panet, Sulem, 2022) [38]

Le principal objectif de la méthode convergence – confinement est de définir l'intersection des deux courbes caractéristiques, dit le point d'équilibre, qui correspond à la pression de soutènement nécessaire au blocage de la convergence ainsi qu'à la convergence totale enregistrée.

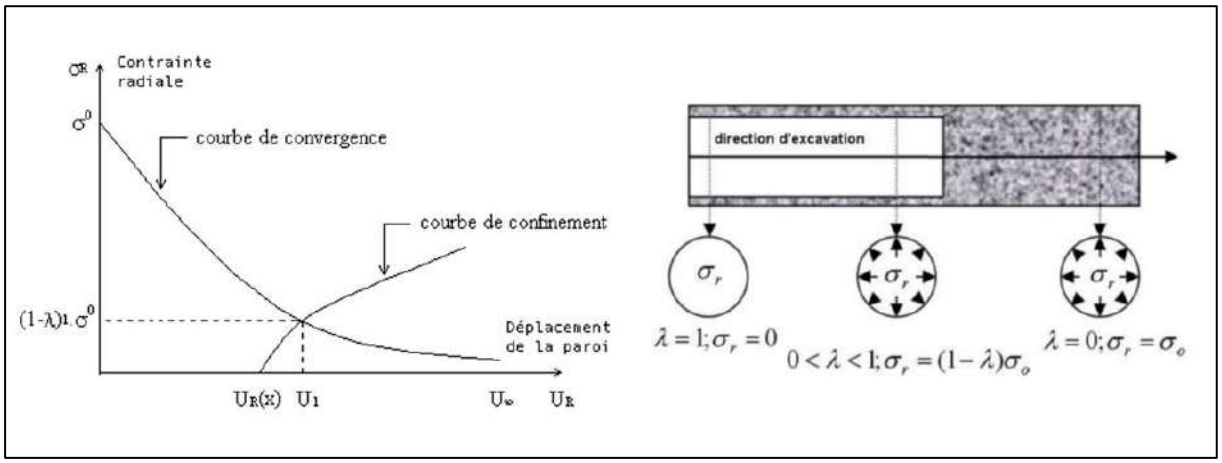


Figure I.7 : Principe de la méthode convergence - confinement.

I.2.3. La nouvelle méthode autrichienne NATM

I.2.3.1. Définition et principes de la méthode

En 1980, le Comité national autrichien pour la construction (Construction de cavités) de l'Association Internationale des Travaux Souterrains (AFTES) a publié une définition officielle de la NATM : La Nouvelle méthode autrichienne de construction de tunnels (NATM) suit une conception qui utilise le terrain autour de la cavité (sol ou roche) comme élément de support par activation d'un anneau de terrain portant. [10]

Müller et Fecker (1978) ont publié 22 principes pour décrire pleinement le NATM. Les principes essentiels peuvent être résumés comme suit : [11].

- Le sol constitue le support principal du tunnel creusé. Le béton projeté n'a qu'une fonction secondaire de soutènement.
- La résistance initiale du sol doit être préservée. L'ameublissement du sol détériore sa résistance.
- Le soutènement ne doit être installé ni trop tôt ni trop tard. Il ne doit être ni trop rigide ni trop faible.
- Le couplage de transfert de force entre le revêtement et le sol, et la mise en place du soutènement au bon moment sont essentiels.
- Le choix du soutènement et la séquence de construction sont basés sur le suivi des déplacements.

- La méthode utilise un revêtement mince en béton projeté.
- L'augmentation du soutènement ne se fait pas par un revêtement plus épais, mais par l'utilisation de poutres, d'armatures en acier et d'ancrages.
- Le tunnel doit être considéré comme un système composite composé du sol et des mesures de soutènement et de stabilisation, telles que le béton projeté, les ancrages et autres.
- L'installation d'une fermeture de radier à effet structurel (si nécessaire) donnera à l'arche de terre la fonction structurelle d'un tube fermé.
- Le maintien d'une forme arrondie pour le profil du tunnel.

I.2.3.2. Techniques de soutènement provisoire et de pré-soutènement selon la NATM

- **Béton projeté**

La méthode NATM repose principalement sur l'application de béton projeté, armé de treillis soudés, sur les parois latérales et le front d'excavation. Il est appliqué et compacté à l'air comprimé par voie humide ou sèche, s'hydrate sur le substrat et durcit (Maidl, Thewes, Maidl, 2013) [34]. Le béton projeté assure un confinement immédiatement après durcissement, avec une adhérence optimale au massif rocheux.

- **Cintre métallique**

Les cintres métalliques sont des structures en arc ou en portique, disposés selon la section transversale de l'ouvrage (Maidl, Thewes, Maidl, 2013) [34], dont les membrures prennent la forme sur les parois de l'excavation. Ils sont généralement constitués d'éléments rigides, tels que des profilés standards de type IPN, IPE, HEA ou HEB. Ils assurent une protection provisoire contre les chutes de blocs et limitent la convergence des parois(Martin, SAÏTTA, 2012) [36], avant la mise en place du revêtement définitif.

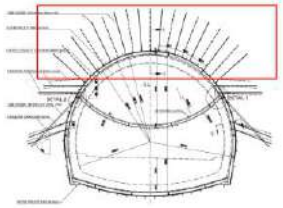
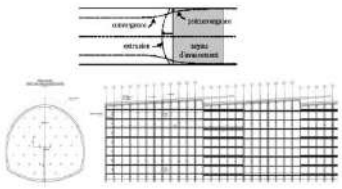
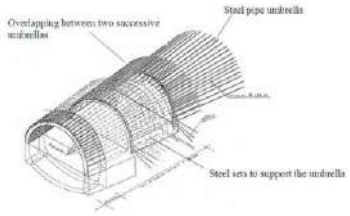
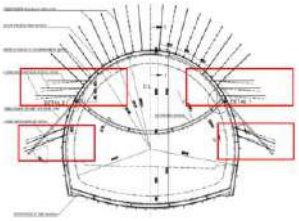
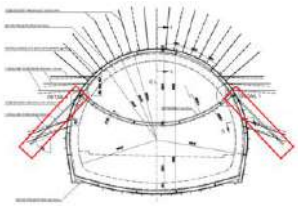
- **Inclusions rigides**

Les inclusions rigides sont des éléments métalliques ou en fibre de verre disposés à l'intérieur du massif rocheux ou du sol. Selon leur position et l'objectif recherché, elles peuvent servir à (Maidl, Thewes, Maidl, 2013) [34]:

- Suspendre les matériaux instables.
- Confiner le terrain.
- Assurer une fonction d'armature structurelle.
- Prévenir les effondrements.
- Agir comme éléments de fondation.

Leur mode de fonctionnement varie selon leur usage, il peut être radial, frontal, en clé de voûte, latérale ou en fondation(Maidl, Thewes, Maidl, 2013) [34].
Le tableau ci-dessous présente les différentes configurations possibles et les fonctions associées à chacune :

Tableau I.1 : Configurations et Fonctions des Inclusions rigides.

Configuration	Fonctionnement	
Radial	-Stabilisation des blocs instables, -Réduction de la convergence radiale, -Armement et confinement du terrain	
Frontal	-Renforce la stabilité du front d'excavation en limitant les risques d'éboulement et en réduisant les phénomènes d'extrusion (déformation du front).	
Clé de voûte	-Prévention des éboulements de la voûte et limitation des tassements en surface.	
Latéral	-Stabilisation des parois latérales lors des phases d'élargissement.	
Fondation	-Stabilisation du radier en cas de risque de soulèvement.	

I.2.3.3. Techniques de creusement des tunnels

En ingénierie il existe plusieurs méthodes de creusement de tunnel, le choix de la méthode dépend de certains paramètres, nature du terrain traversé, la géométrie du tunnel, l'environnement, le niveau de la nappe phréatique, voici un aperçu des principales méthodes de creusement utilisées dans la construction de tunnels :

- **Creusement par explosifs**

L'abattage avec emploi d'explosifs est généralement utilisé pour l'excavation de tunnels situés dans les roches de dureté moyenne à élevée, lorsque les méthodes mécaniques deviennent

techniquement et économiquement inappropriées. Ce procédé, mis en œuvre de manière cyclique à chaque volée d'avancement, commence par l'élaboration d'un plan de tir, qui détermine la localisation et le diamètre des trous, la puissance des charges, les types de détonateurs utilisés, ainsi que l'ordre et le délai de mise à feu. Le chargement des explosifs ne se fait qu'après la fin complète du forage, dans le respect des règles de sécurité. La mise à feu provoque la fragmentation de la roche, suivie d'une ventilation pour évacuer les gaz, d'une purge des blocs instables, puis du marinage, c'est-à-dire l'évacuation des déblais(Maidl, Thewes, Maidl, 2013) [34].

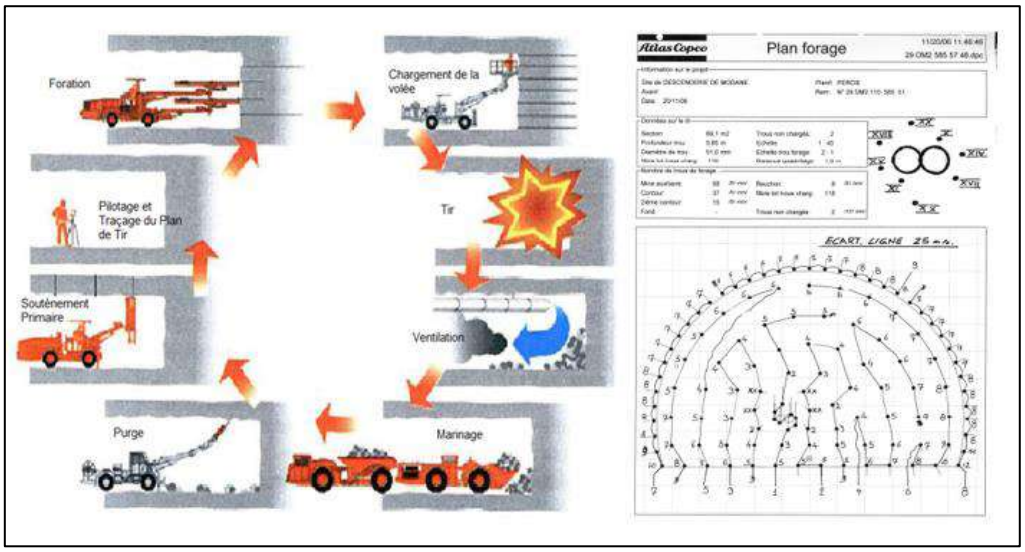


Figure I.8 : Phases du cycle d'avancement dans la technique de creusement par Explosifs.

Le schéma de tir est divisé en trois séquences successives : tir de bouchons– tir de dégraissage et tir de découpage, dans l'objectif d'optimiser le rendement de creusement par explosif. Chaque phase est espacée temporellement de façon à limiter la transmission des vibrations dans le massif rocheux. Ce processus permet à la fois de maîtriser la propagation des ondes de choc et la fragmentation des déblais générée par l'explosion, en outre, il assure que le profil d'excavation respecte le profil géométrique des plans d'exécutions.

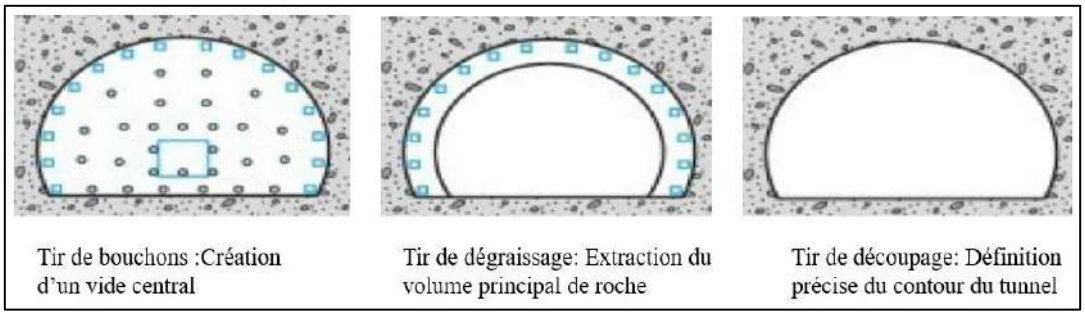


Figure I.9 : Séquences d'exécution du tir.

- **Creusement mécanisé**

Les méthodes mécaniques sont utilisées pour le creusement des tunnels à l'aide des machines à attaque ponctuelle ou globale. Ce mode de creusement remplace efficacement l'usage d'explosif dans les zones urbaines ou aux terrains de moyenne à faible résistance, ou il est nécessaire de limiter les vibrations.

- Creusement à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle

Un bras articulé ou télescopique, équipé d'un outil d'attaque, intervient pour gratter et abattre le matériau en place au front de taille. Selon la nature du terrain, différents engins peuvent être mobilisés, tels que les haveuses, brise-roches hydrauliques ou pelles mécaniques(Martin, SAÏTTA, 2012) [36]. Cette technique est efficace pour les roches modérément abrasives dont la résistance à la compression uniaxiale est de 100-120 MPa (Centre d'études des tunnels, 1998) [22], et jusqu'à 160 MPa pour les massifs rocheux fortement fracturés. En revanche, son rendement diminue fortement dans les formations très abrasives (Çopur et al., 1998).

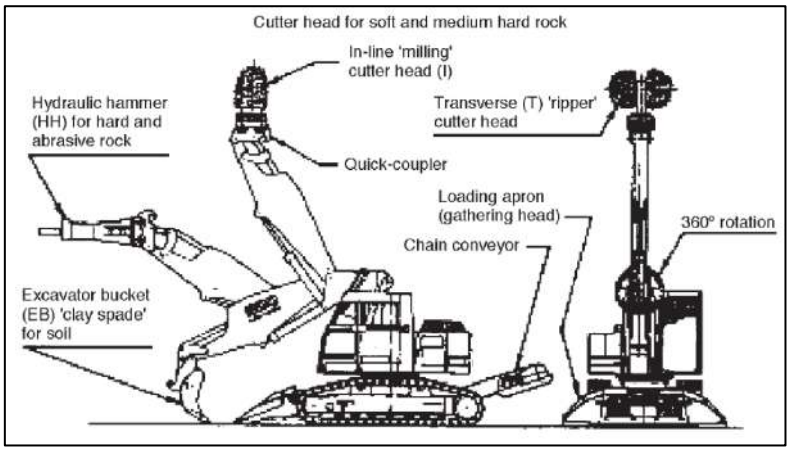


Figure I.10 Machines à attaque ponctuelle pour le creusement mécanique.

- Creusement à machine à attaque global

Le tunnelier ou TBM (tunnel boring machines) est une machine qui permet une excavation mécanique à pleine section, et assure simultanément le soutènement des parois à l'aide de voussoirs préfabriqués en béton armé. Ce mode de creusement est adapté au terrain de faible résistance, ou l'intervention rapide d'un soutènement est indispensable pour maîtriser les déformations et prévenir les éboulements(Maidl, Thewes, Maidl, 2014) [35].

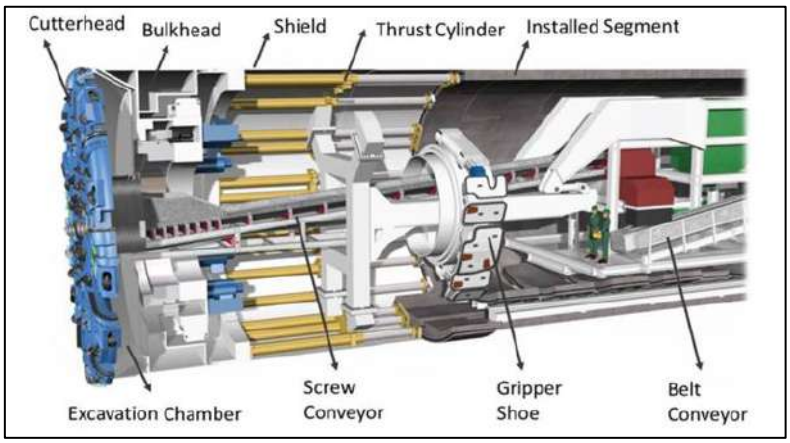


Figure I.11 : Machine à attaque globale (TBM).

L'excavation d'un tunnel se réalise selon deux modes : creusement par section pleine et creusement par section partielle, le choix de l'un ou l'autre étant déterminé principalement par les paramètres géotechniques du terrain traversé et la géométrie du tunnel, voici un aperçu de ces deux techniques :

- Creusement par section pleine

Ce mode consiste à excaver l'ensemble de la section transversale du tunnel en une seule phase. Il est utilisé lorsque les conditions géotechniques favorables, ou les risques d'instabilité pendant l'avancement restent limités. Cette méthode permet la mise en œuvre d'un soutènement provisoire léger et s'applique aux tunnels de petite à moyenne section (Maidl, Thewes, Maidl, 2013) [34], pour lesquels un creusement global reste techniquement et économiquement viable.

- Creusement par section partielle

Le creusement partiel est couramment utilisé pour les tunnels de grande section, notamment dans des contextes géotechniques complexes où le terrain présente un risque d'instabilité, dans de telles conditions, il est essentiel de mettre en place un soutènement provisoire de manière progressive, au fur et à mesure de l'élargissement de la section excavée pour limiter les risques d'effondrement des parois ou du front (Maidl, Thewes, Maidl, 2013) [34].

Il existe plusieurs types d'excavation partielle, on peut citer :

- Excavation à partir de la calotte (calotte-stross-radier)
- Excavation subdivisée à partir de la calotte (galerie de la faîte-calotte-stross-radier)
- Excavation à partir des galeries latérales (galeries latérales-calotte-stross-radier)

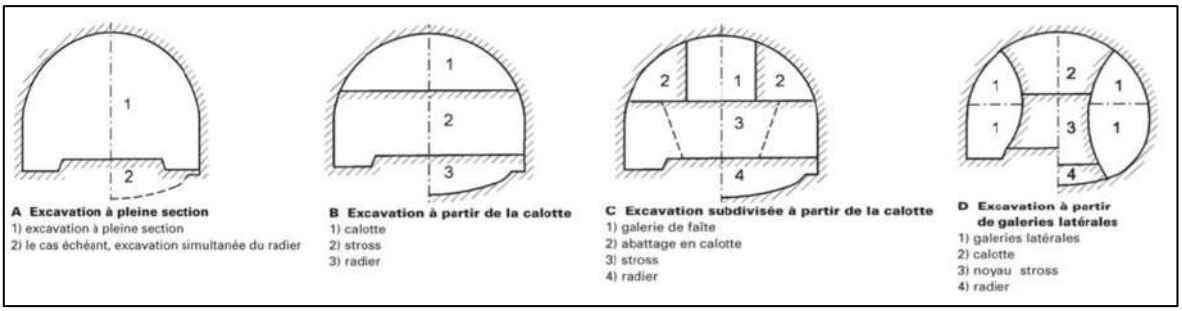


Figure I.12 : (A) : Excavation à pleine section, (B)-(C)-(D) : Excavation à section partielle.

I.3. GÉNÉRALITÉS SUR LE BIM

I.3.1. Définition et principes fondamentaux du BIM

Le Building information modeling ou Modélisation des Informations du Bâtiment, désigne un processus collaboratif centré sur la production, l'analyse et l'exploitation d'une maquette numérique intelligente en 3D, représentant d'une manière intégrale l'ouvrage à construire(Sharafat, Khan, Latif, Seo, 2021) [42]. Contrairement à une simple modélisation géométrique 3D, la maquette BIM constitue une véritable base de données structurée, dans laquelle chaque composant contient toutes les informations utiles et nécessaires à chaque phase d'avancement du projet.

En effet, le BIM accompagne l'ouvrage tout au long de son cycle de vie. En conception, il permet d'optimiser les choix techniques et simuler différents scénarios. En phase d'exécution, il sert de support à la planification, à la synthèse technique et à la coordination entre intervenants (Klinc, Gabršček, Česnik, Žibert, Hostnik, Logar, 2021) [31]. Enfin en phase d'exploitation, la maquette numérique devient un outil de gestion d'ouvrage, elle facilite la maintenance et le suivi grâce à l'accès centralisé aux données actualisées de l'ouvrage.

Initialement, le BIM a commencé par des représentations en 3D, et a progressivement évolué pour intégrer jusqu'à 7 dimensions de conception. Tous les aspects dimensionnels sont définis et mis à jour tout au long du cycle de vie d'un projet (Kontothanasis, Krommyda, Roussos, 2020) [32] :

- **Aspect 3D** :

Géométrie, visualisation physique, analyse des conflits

- **Aspect 4D** :

Simulations de phasage du projet, avancement des activités, construction virtuelle

- **Aspect 5D** :

Suivi des coûts et du budget, planification des analyses de coûts, estimations des matériaux, des équipements et de la main-d'œuvre

- **Aspect 6D** :

Développement durable, analyses de consommation énergétique, performance des infrastructures

- **Aspect 7D** :

Gestion des installations, exploitations, maintenance, simulations de phasage du projet, avancement des activités.

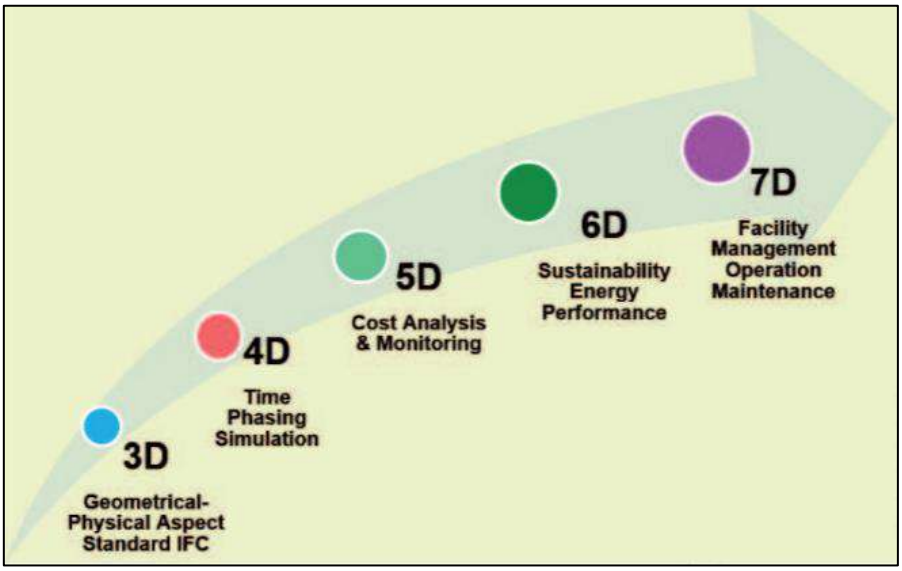


Figure I.13 : Terminologie des dimensions du BIM.

I.3.2. Le BIM dans les projets tunnels

Une demande croissante d'utilisation de l'espace souterrain a stimulé l'industrie du creusement de tunnels au fil des années. Combinée aux nécessités de rénovation et de réparation, une demande immédiate pour le développement et l'utilisation d'outils de simulation numérique avancés est apparue (Kontothanasis, Krommyda, Roussos, 2020) [32]. L'ingénierie souterraine, traditionnellement prudente face aux risques, bénéficie de l'intégration du BIM dans ces projets, qui permet une conception et un suivi structurel en 5D à

7D. Cette approche est particulièrement pertinente pour modéliser des structures linéaires complexes dans des conditions géotechniques variables.

I.3.3. Phases du BIM workflow dans les projets tunnels.

L'intégration du BIM dans les projets de tunnels est une approche modulaire, où la modélisation varie en fonction des outils utilisés (Klinc, Gabršček, Česnik, Žibert, Hostnik, Logar, 2021) [31]. Ce processus couve les principales phases de création d'une maquette BIM pour les tunnels, il s'agit de la modélisation du terrain et l'intégration des données géologiques et géotechniques, modélisation de l'ensemble des éléments de tunnel, l'analyse par éléments finis et la gestion du temps de construction.

- **Phase 1 : Définition de la topographie du terrain**

La première phase consiste à définir une base cartographique tridimensionnelle, qui représente l'environnement dans lequel s'insère le projet. Cette modélisation repose initialement sur des données cartographiques générales, puis se précise progressivement à l'aide de levers topographiques détaillés, elle permet de générer un modèle numérique de terrain de haute précision, qui servira par la suite comme une base topographique de référence utilisée dans les étapes de modélisation suivantes (Fabozzi, Cipolletta, Capano, Asprone, Dell'Acqua, Bilotta, 2019) [30].

- **Phase 2 : Définition de la stratigraphie : modèle géologique - géotechnique**

L'un des enjeux fondamentaux des projets souterrains est la prise en compte de la complexité du milieu géologique, la représentation topographique est insuffisante, il est donc indispensable d'y intégrer les données issues des campagnes d'investigation géotechnique, afin de construire un modèle géologique-géotechnique qui représente la stratigraphie du terrain de projet(Fabozzi, Cipolletta, Capano, Asprone, Dell'Acqua, Bilotta, 2019) [30]. Les informations géotechniques intégrées dans le processus BIM conduit à un choix de méthodes de creusement en adéquation aux caractéristiques du terrain.

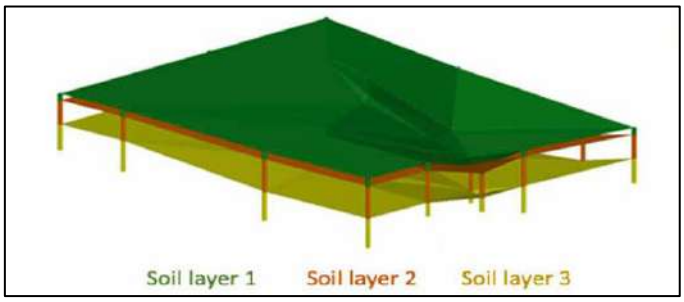


Figure I.14 : Stratigraphie du terrain-modèle géologique.

- **Phase 3 : Définition du modèle BIM du tunnel**

Cette partie concerne la modélisation du tunnel, incluant la définition de l'axe du tunnel, son tracé en plan, le profil en long ainsi que la géométrie structurelle à partir de la documentation technique et le modèle numérique établi dans les étapes précédentes. Deux sections de tunnel différentes peuvent être modélisées : un modèle simplifié et un modèle réel. Le modèle simplifié est utilisé pour les phases préliminaires, tandis que le modèle détaillé représente l'état final du tunnel (Fabozzi, Cipolletta, Capano, Asprone, Dell'Acqua, Bilotta, 2019) [30].

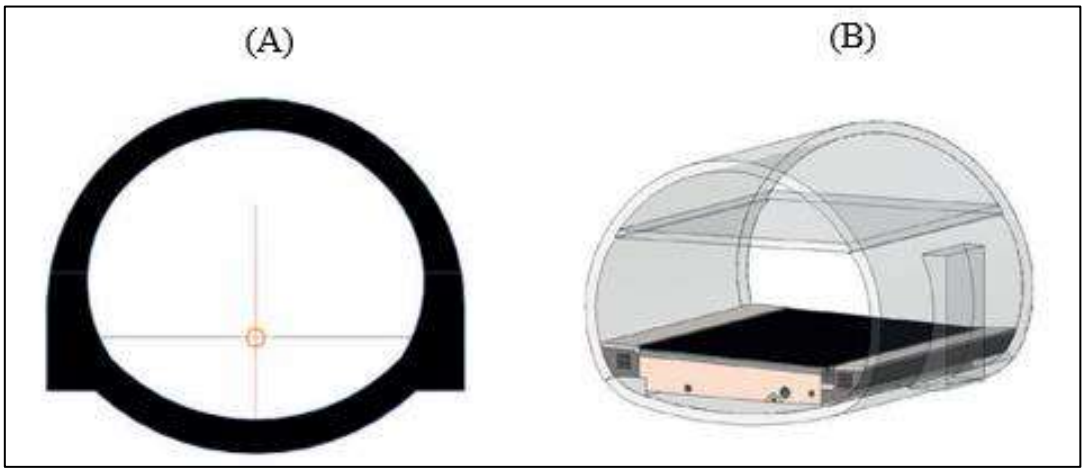


Figure I.15 : (A) : section simplifiée – (B) : section détaillée.

- **Phase 4 : Interopérabilité BIM-MEF : définition du modèle sol – structure**

Cette phase consiste à importer le modèle de terrain et de tunnel défini précédemment, dans un logiciel MEF (Méthode des éléments finis), pour simuler l'excavation et vérifier les contraintes et les déformations des parois de l'ouvrage, ainsi que l'effet de l'excavation sur les structures environnantes (Fabozzi, Cipolletta, Capano, Asprone, Dell'Acqua, Bilotta, 2019) [30].

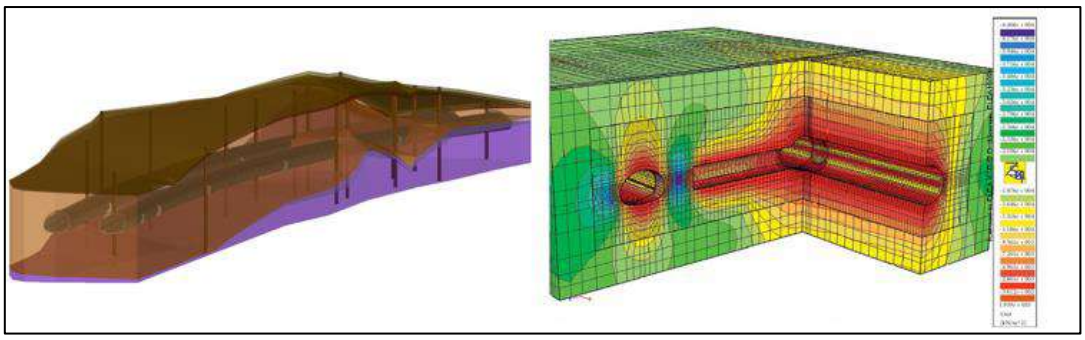


Figure I.16 : Modèle sol – structure.

- **Phase 5 : BIM 4D : gestion de temps du processus d'excavation du tunnel**

La planification 4D intègre les données du planning de construction avec la maquette numérique du projet, ce qui rend possible de visualiser l'évolution du projet dans le temps, d'identifier des interférences potentielles et anticipation des conflits (Fabozzi, Cipolletta, Capano, Asprone, Dell'Acqua, Bilotta, 2019) [30].

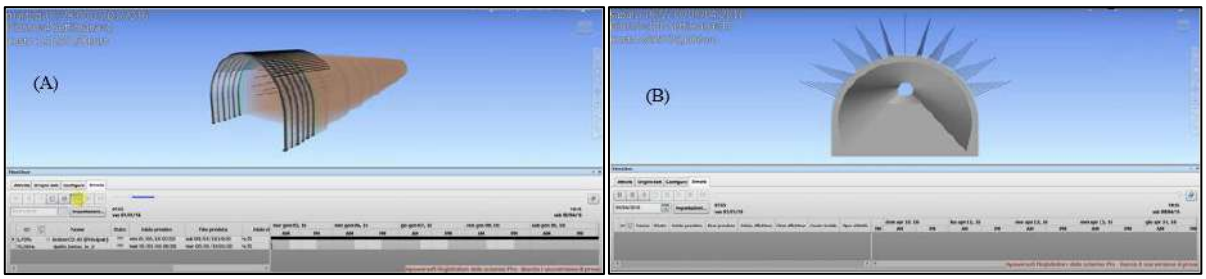


Figure I.17 : Phasage de construction : (A) : Excavation et pose du soutènement provisoire – (B) : Structure finale.



Figure I.18 : Exemple de visualisation.

- **Phase 6 : BIM 5D : Estimation et suivi des coûts**

L'intégration de la cinquième dimension (5D) dans le modèle BIM permet d'associer des informations économiques aux objets numériques. Chaque composant du tunnel est enrichi de données relatives aux coûts unitaires des matériaux, à la main-d'œuvre, à l'équipement et aux délais de livraison.

- **Phase 7 : BIM 6D : Développement durable et performance énergétique**

La sixième dimension (6D) introduit les critères de durabilité et de performance environnementale dans le processus BIM. Elle consiste à analyser les impacts énergétiques et environnementaux du tunnel tout au long de son cycle de vie.

- **Phase 8 : BIM 7D : Exploitation et maintenance**

La septième dimension (7D) concerne la gestion de l'ouvrage en phase d'exploitation. Une fois le tunnel réalisé, le modèle BIM devient un jumeau numérique qui centralise toutes les données d'exécution incluant :

- Les fiches techniques des équipements.
- Le plan de maintenance préventive.
- Les historiques d'interventions et d'inspections.

I.3.3.1. Niveaux de développement du modèle BIM du tunnel

Le développement progressif d'un modèle BIM se base sur une structuration détaillée des informations et de la géométrie des objets modélisés. Cette structuration est présentée par la notion de niveau de développement (Level of Development – LOD), qui permet d'évaluer la maturité d'un élément BIM à un instant donné du cycle de vie du projet. Pour la description des différents niveaux d'information, des termes internationaux tels que Level of Geometry-Information-Detail-Development se sont imposés, les différentes étapes de détail peuvent augmenter avec l'avancement du projet et sont ainsi analogues à l'augmentation du niveau de détail des plans à des échelles plus grandes (Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V." (DAUB), 2019) [26] :

- **LoG : Level of Geometry**

Décris le niveau de détail géométrique d'un élément (par exemple, forme simple à géométrie réaliste du tunnel).

- **LoI : Level of Information**

Décrit les données associées à un objet BIM (comme le type de béton, la classe de revêtement, les dates de pose, etc.).

- **LoD : Level of Detail**

Une combinaison de LoG et LoI, qui décrit le niveau global de détail d'un modèle.

- **LOD : Level of Development**

Degré de maturité d'une maquette pour répondre aux exigences de différents cas d'utilisation à différentes phases du projet

Le tableau ci-dessous représente les différents niveaux de développement (LOD) utilisés dans la modélisation BIM appliquée aux projets de tunnels :

Tableau I.2 : Niveaux LOD appliqués à la modélisation BIM des tunnels.

Niveau LOD	Désignation	Description technique	
LOD 100	Conceptuel	Le modèle contient des volumes indicatifs sans dimensions précises. Il permet d'examiner l'implantation générale, les variantes de tracé, et les faisabilités.	
LOD 200	Schématique	Les objets sont modélisés avec une forme géométrique approximative et des informations génériques. Utilisé pour l'avant-projet sommaire.	
LOD 300	Détaillé	Les éléments ont une géométrie exacte et des propriétés suffisantes pour permettre la coordination interdisciplinaire et l'établissement des plans d'exécution.	
LOD 350	Coordination technique	Intègre les interfaces physiques avec les autres systèmes (ventilation, canalisations, structures secondaires).	
LOD 400	Exécution	Modèle utilisé pour la fabrication et la construction. Inclut des données précises sur les matériaux, méthodes de pose et équipements.	
LOD 500	Exploitation	Représente l'état réel du tunnel après exécution. Utilisé pour la gestion, la maintenance et les opérations d'exploitation de l'infrastructure.	

I.3.4. Logiciels utilisés pour la création d'une maquette BIM pour les projets tunnels

Le tableau ci-dessous présente la classification des principaux logiciels développés par Autodesk et Bentley Systems, utilisés dans le cadre de la modélisation BIM appliquée aux projets de tunnels.

Tableau I.3 : Tableau récapitulatif des logiciels Autodesk et Bentley selon les étapes du processus BIM pour les tunnels.

Phases du Workflow	Logiciels	
	Autodesk	Bentley Systems
Définition de la topographie du terrain	InfraWorks	ConceptStation
Définition de la stratigraphie géotechnique	Civil 3D	OpenRail Designer
Modélisation du tunnel	Revit Civil 3D	OpenRail Designer
Interopérabilité BIM-FEM	Robot Structural Analysis	PLAXIS 2D/3D
Simulation 4/5D – Gestion du temps	Navisworks Manage	Synchro 4D Pro

I.3.5. Normes et standards du BIM

Les standards BIM internationaux sont des procédures et des lignes directrices reconnues par plusieurs organismes officiels à l'échelle mondiale, permettant de gérer efficacement toutes les opérations tout au long du cycle de vie de l'ouvrage. Cela permet d'obtenir des processus mieux organisés et une meilleure collaboration, même entre des équipes situées dans différentes régions du monde.

Dans cette logique, buildingSMART représente l'écosystème BIM sous forme d'un triangle, où chaque côté correspond à un domaine clé : terminologie, données et processus. La figure I.19 illustre ces trois domaines, chacun faisant l'objet de normes spécifiques, accompagné d'exemples de normes internationales.

I.3.6. Exemples de projets de tunnels réalisés avec le BIM

L'adoption du BIM dans les projets de tunnels connaît une croissance rapide à l'échelle mondiale, comme en témoignent plusieurs projets internationaux. Cette évolution reflète l'intégration progressive du BIM dans le secteur du génie civil, en particulier dans la conception, la construction et la gestion des infrastructures souterraines. Parmi les projets notables figurent :

- Le Grand Paris Express (France)
- Crossrail / Elizabeth Line (Royaume-Uni)
- Le tunnel des Karavanke (Slovénie – Autriche)
- Le Brenner Base Tunnel (Autriche – Italie)

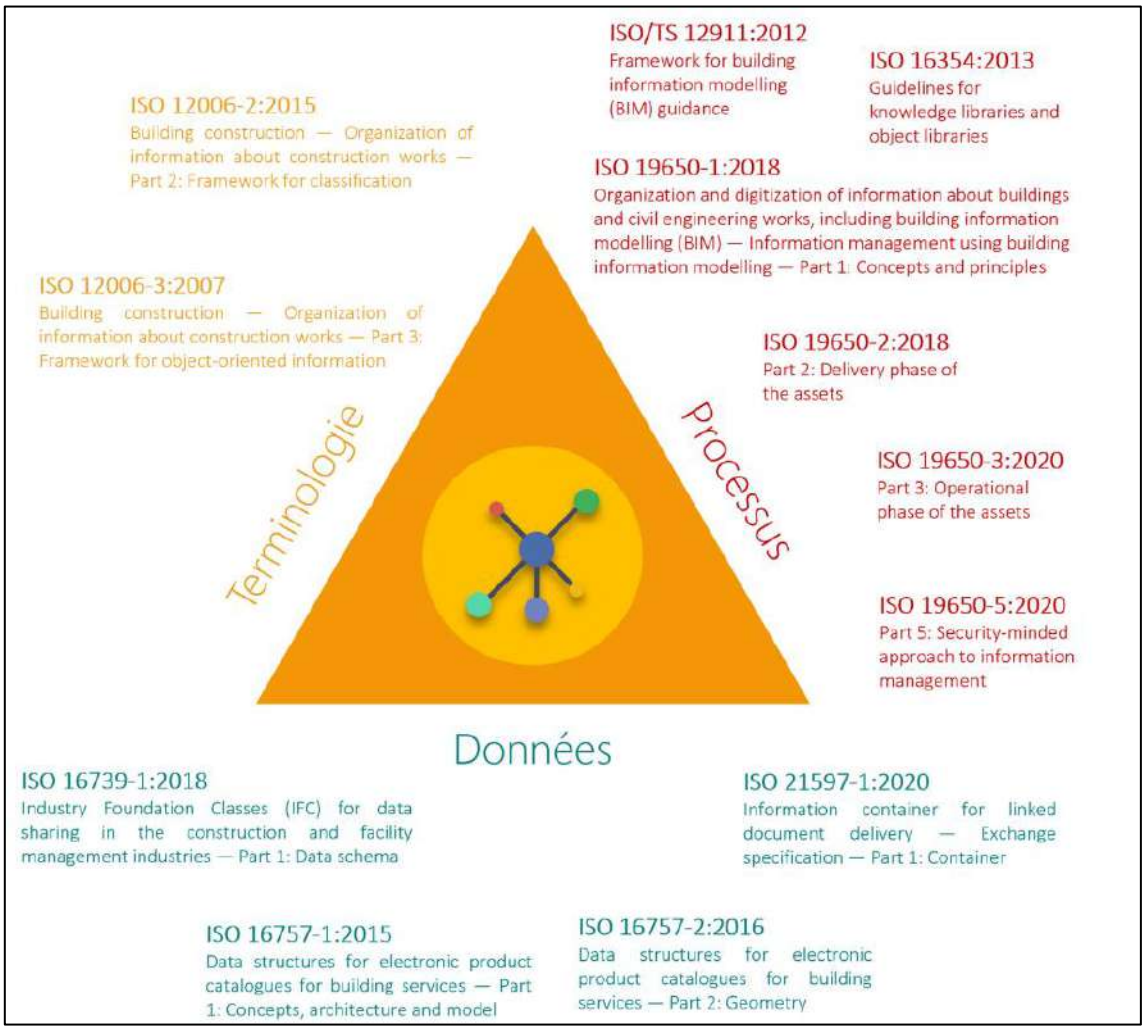


Figure I.19 : Triangle représentant les trois domaines du BIM, avec les normes internationales associées (source : buildingSMART).

I.4. CONCLUSION

Comprendre les tunnels, tant du point de vue géotechnique que structurel met en lumière la complexité de ces ouvrages enfouis sous nos pieds, qu'ils soient construits par des méthodes traditionnelles comme la NATM ou des solutions mécanisées, la réalisation des tunnels demande, à chaque étape, une collaboration étroite entre toutes les parties prenantes du projet. Dans ce contexte, le BIM prend tout son sens, à travers une représentation tridimensionnelle réelle du tunnel dans son environnement, le BIM permet non seulement de mieux planifier les phases de construction, mais surtout d'améliorer la coordination interdisciplinaire.

Au croisement de l'ingénierie souterraine et les outils numériques, le BIM transforme la manière dont les projets de tunnels sont conçus, analysés et exécutés. Il contribue à anticiper les risques, à limiter les aléas et à optimiser les choix techniques à toutes les étapes du cycle de vie de l'ouvrage.

CHAPITRE II
DESCRIPTION DU PROJET

II.1. INTRODUCTION

Le développement rapide du tissu urbain de l'agglomération d'Alger a entraîné des besoins de plus en plus importants en matière de déplacements, et une mobilité à la fois croissante et diversifiée. Les axes routiers majeurs, même s'ils facilitent l'accès à certains quartiers, ont aussi accumulé beaucoup de trafic, ce qui a engendré de gros embouteillages aux entrées des zones centrales d'Alger.

Pour y faire face, les pouvoirs publics ont orienté leur politique de déplacements vers la mise en place d'un réseau de transport à haute capacité. La construction d'un tunnel de métro constitue une solution adaptée pour améliorer le transport urbain à Alger. Ce réseau est en constante expansion, avec des extensions en exploitation, en cours de réalisation ou en phase d'étude.

Ce chapitre porte sur la description générale du tronçon de 300 m situé entre la station Taleb Abderrahmane et Trois Horloges, faisant partie du Lot 3 (Chevalley – Place des Martyrs), Lot 3, du métro d'Alger.

II.2. MÉTRO D'ALGER

Le métro d'Alger est un réseau ferroviaire à vocation de transport urbain qui dessert la capitale algérienne depuis 2011, constituant une alternative rapide et efficace pour réduire la congestion routière et améliorer la mobilité urbaine. À l'heure actuelle, le réseau de métro s'étend sur une longueur de 19 km et comporte 19 stations, reliant des pôles stratégiques tels que la Grande Poste, El Harrach et Aïn Naâdja.

II.2.1. L'histoire du Métro d'Alger

Le premier projet de métro d'Alger date de 1928, mais il ne verra jamais le jour. Ce n'est qu'à la fin des années 1970 que l'initiative du métro actuel a été lancée, cette fois-ci, en réponse à des défis concrets de mobilité urbaine. (TREVI ALGÉRIE, 2020) [46]

En effet, les premières études sur le transport urbain à Alger ont été menées durant cette décennie, où une tendance inquiétante a été révélée : la ville d'Alger, en pleine expansion, était confrontée au risque de saturation de son réseau de transport urbain, notamment en raison de la surpopulation.

Face à cette problématique, le conseil du gouvernement algérien a décidé de doter la capitale d'un réseau de métro. Les études de conception et d'ingénierie, réalisées entre 1982 et 1985, ont abouti à la définition d'un schéma de principe constitué de trois lignes totalisant 56 km et comprenant 54 stations, avec l'identification d'un tronçon prioritaire entre Oued Koriche et Bachdjarrah (Haï El Badr) de 12,5 km.(Djamel, 2009) [27]

Cependant, malgré la sélection de deux entreprises internationales, l'une allemande et l'autre japonaise, pour la réalisation du projet, la crise économique mondiale de 1986 a eu des répercussions importantes sur les pays producteurs de pétrole, dont l'Algérie. La chute des prix du baril a entraîné une diminution considérable des revenus du pays, ce qui a rendu difficile le financement de projets d'infrastructure comme le métro d'Alger, compromettant ainsi sa réalisation.

Ce n'est qu'à partir de 1988 qu'une série de marchés de réalisation fut attribuée à deux entreprises nationales (COSIDER et GENI-SIDER). Toutefois, la crise financière et politique, suivie de l'insécurité des années 1990, a paralysé les chantiers. Ainsi, sur une période de quinze ans, de 1988 à 2003, seules quatre stations ont été achevées et 3,4 km ont été creusés entre la Grande Poste et Hamma.(TREVI ALGÉRIE, 2020) [46]

Malgré ces difficultés, le projet du métro d'Alger a marqué un tournant décisif. L'amélioration des conditions économiques et sécuritaires a permis de relancer le projet en 2003, avec la signature d'un contrat pour la réalisation du tronçon restant (Hamma - Hai El Badr). Ce dernier a été confié au groupement algéro-allemand GAAMA, composé de l'allemand Dywidag et des entreprises algériennes Cosider TP et Infrafer, tandis que la maîtrise d'œuvre a été attribuée au français Systra. (TREVI ALGÉRIE, 2020) [46]

En janvier 2006, un contrat a été signé avec le groupement franco-espagnol Siemens-Vinci-Caf pour achever la ligne, acquérir, installer et mettre en œuvre un système intégral du métro.(Djamel, 2009) [27]

Le 31 octobre 2011, le tronçon initial de la première ligne du métro d'Alger, reliant Tafourah (Grande Poste) à Hai El Badr, a été mis en service. Ce tronçon, d'une longueur de 9,5 km, comprenait dix stations. (APS ALGÉRIE PRESSE SERVICE, 2011) [1]

L'exploitation du métro d'Alger, initialement confiée à RATP El Djazaïr dès son lancement en 2011 (APS ALGÉRIE PRESSE SERVICE, 2011) [1], a été reprise le 31 octobre 2020 par Métro El Djazaïr, une filiale de la société publique Métro d'Alger (EMA).

Cette étape marquante a concrétisé des décennies d'efforts et de travail acharné, marquant ainsi l'ouverture d'une nouvelle ère pour le développement du réseau de métro, avec l'extension du service à l'ensemble de la capitale algérienne.

II.2.2. Lignes et Extensions du Métro d'Alger

La figure II.2 présente le plan du réseau du métro d'Alger, où l'on peut identifier les lignes en service (indiquées en bleu), les extensions en cours de réalisation (Lot 1, Lot 2 et Lot 3, indiqués en jaune), ainsi que celles actuellement en phase d'étude (Lot 4.1 et Lot 4.2, indiqués en magenta).

II.2.3. Extensions en cours d'exploitation

- **Extension « Grande Poste - Place des Martyrs » (extension A)**

En 2009, un groupement composé d'entreprises algériennes, brésiliennes et portugaises (ANDRADE GUTIERREZ : TEIXEIRA DUARTE ; GESI-TP ; ZAGOPE – CONSTRUÇÕES E ENGENHARIA, S.A.) (TPF- CONSULTORES DE ENGENHARIA E ARQUITETURA, S.A., 2021) [45], a été chargé des travaux de génie civil et de pose de rails pour le prolongement de la ligne 1 vers la Place des Martyrs.

Les travaux ont été considérablement retardés en raison de la découverte de vestiges archéologiques datant de deux millénaires, nécessitant des fouilles archéologiques autour de la Place des Martyrs, près de la Casbah. En conséquence, des adaptations dans la conception de la station de la Place des Martyrs à la nature du site ont été nécessaires : cette station qui était

initialement prévue à ciel ouvert a été modifiée pour être souterraine. Cela a permis de valoriser le potentiel patrimonial et archéologique de la région.

Mis en service en 2018, ce segment de 1,75 km comprend trois puits de ventilation et deux stations : Ali Boumendjel dans la commune d'Alger-Centre et Place des Martyrs dans la commune de la Casbah.

- **Extension « Hai El Badr - El Harrach Centre » (extension B)**

Les travaux de prolongement de la ligne 1 depuis la station Hai el Badr vers El-Harrach ont commencé en août 2008, sous la conduite du groupement algéro-germano-italien G.D.C.T, composé de DYWIDAG, Cosider et TREVI.(TREVI ALGÉRIE, 2020) [46].

En 2012, le groupement franco-algérien CRK, composé de Colas Rail et de son partenaire local de BTP, KouGC, a remporté le contrat pour l'équipement intégral du système du métro.

L'extension, d'une longueur de 4 km, a été inaugurée en juillet 2015. Elle comprend quatre stations : Bachdjarrah Tennis – Bachdjarrah – El Harrach Gare et El Harrach Centre (Debabi, 2017) [25], un viaduc de 280 m de long, un tunnel cadre de 408,48 m, un tunnel souterrain voûté de 2 166,54 m de long et trois puits de ventilation(TREVI ALGÉRIE, 2020) [46].

- **Extension « Hai El Badr - Ain Naâdja » (extension C)**

En août 2010, le marché de réalisation des travaux de génie civil de cette extension a été attribué au groupement algéro-allemand GDC (DYWIDAG et Cosider). Les travaux de génie civil ont débuté en 2011.

Les travaux de cette extension de 3,6 km comprennent : trois stations, dont une station aérienne (Station des Ateliers) et deux stations souterraines (station Gué de Constantine et station Aïn Naâdja) (Debabi, 2017) [25], un viaduc de 132,5 m, un tunnel souterrain voûté de 1 840,88 m, un tunnel cadre de 241,5 m, ainsi que trois puits de ventilation (TREVI ALGÉRIE, 2020) [46]

Cette extension a été ouverte à l'exploitation commerciale en 2018.

II.2.4. Extensions en cours de réalisation

À l'heure actuelle, trois extensions de la ligne 1 du métro d'Alger sont en cours de réalisation.

- **Extension « El Harrach – Aéroport » (extension B1 – Lot 1)**

En 2013, Cosider a obtenu le contrat pour la réalisation de ce tronçon, où la conception détaillée des travaux civils (études d'exécution) a été confiée au consortium portugais formé par TPF Consultores de Engenharia e Arquitetura (CENOR Consultores) et Fer-consult. Les études préliminaires (Avant-Projet Détaillé) ont été réalisées par le consortium Dongmyeong, Eurostudios et Saeti (Santo, Conceição, Mohamed, Mahieddine, Haouchine, 2023) [41].

Les travaux de cette extension, débutés en juin 2015, visent à relier la gare d'El Harrach au nouveau terminal de l'aéroport international Houari Boumediene, le projet comprend neuf stations souterraines, dix puits de ventilation et un tunnel à double voie long de 9,6 km (TREVI ALGÉRIE, 2020) [46], creusé à l'aide d'un tunnelier TBM, utilisé pour la première fois.

Cette ligne desservira des quartiers denses en population tels que : Beaulieu, Oued Smar, Cité 5 juillet, Bab Ezzouar, le Pôle Universitaire d'El Harrach, le Centre des Affaires de Bab Ezzouar et l'Université Houari Boumediene. Elle reliera le Tramway au carrefour de l'université Houari Boumediène offrant ainsi une connexion multimodale à cette station.

Les neuf stations de cette extension sont : Station Hassan Badi – Station Pôle Universitaire – Station Beaulieu – Station Oued Smar – Station Université Houari Boumediene – Station Rabia Tahar – Station Smail Yefsah – Station Centre des Affaires – Station Aéroport.

- **Extension « Aïn Naâdja – Baraki » (extension C1 – Lot 2)**

L'extension du métro d'Alger reliant Aïn Naâdja à Baraki s'étend sur une longueur de 6 km (TREVI ALGÉRIE, 2020) [46] et comprend six stations visant à desservir une zone en plein développement. Ce prolongement facilite l'accès au centre de Baraki tout en offrant une liaison directe avec le réseau ferroviaire (gare de Gué de Constantine).

Cette extension inclut un viaduc de 1 453,50 m qui relie la station Mohamed Boudiaf à la station Mohamed Belarbi. Elle traverse la ligne ferroviaire de la SNTF, la route nationale N°38 ainsi qu'Oued El Harrach (TREVI ALGÉRIE, 2020) [46].

Les six stations de l'extension Aïn Naâdja – Baraki sont : Mohamed Boudiaf – Ain Naâdja Gare – Futur parc urbain – Mohamed Belarbi – Jardin – Cité 2004.

Les études de ce tronçon ont été attribuées en 2012 au groupement algéro-espagnol Sidem/Idom. La réalisation a été confiée à Cosider en 2013, simultanément à l'extension B1. Le contrôle et le suivi des travaux ont été assurés par le groupement Dohwa-Yooshin. Les travaux de génie civil ont débuté en 2015 avec le lancement du chantier de la station Mohamed Boudiaf.

Pour la gestion complète du projet d'extension du métro, de la conception à la mise en service, l'entreprise américaine Hill International a été choisie.

- **Extension « Place des Martyrs – Bab El Oued – Chevalley » (Lot 3)**

Cette extension s'étend sur une longueur totale d'environ 9,50 km et comprend huit stations et huit puits de ventilation (c, 2014) [20]. Les stations de ce tronçon sont : Taleb Abderrahmane – Trois Horloges – Triolet – Théâtre Verdure – Malika Gaïd – Place Kennedy – Faculté Médecine – Chevalley.

La réalisation de la première phase de cette extension, reliant la Place des Martyrs à Bab El Oued sur une distance de 1,5 km, a été confiée à la société nationale Cosider. Cette mission inclut la réalisation des travaux préparatoires pour les stations Taleb Abderrahmane, Trois Horloges et Triolet, ainsi que leurs ouvrages annexes et du génie civil et gros œuvre du tronçon « Station Place des Martyrs-Station Taleb Abderrahmane », incluant le tunnel et l'ouvrage de ventilation (c, 2014) [20].

II.2.5. Extensions en cours d'étude

- **Extension « Chevalley – Dely Ibrahim - El Achour - Draria » (Lot 4.1)**

Cette nouvelle branche, d'une longueur de 7,8 km, doit relier la station de Chevalley à la commune de Draria à travers huit stations : Cité Sportive – Stade 5 Juillet – Ain Allah – Oued Romane – El Achour – Oued Terfa – Draria Centre – Draria Jardin.

- **Extension « Chevalley – Dely Ibrahim - Chéraga - Ouled Fayet » (Lot 4.2)**

Cette nouvelle branche, d'une longueur de 9,2 km, doit relier la station de Chevalley à la commune de Ouled Fayet à travers huit stations : Dely Brahim – 11 Décembre – Cheraga1 – Cheraga Gare – Amara – El Bahdja – AADL Ouled Fayet – Ouled Fayet.

II.3. EXTENSION « CHEVALLEY – BAB EL OUED – PLACE DES MARTYRS »

Cette extension, qui fait partie du Lot 3, s'étend entre Chevalley et la station Place des Martyrs, couvrant les Pks 29+975,688 et 39+406. Elle présente une longueur totale d'environ 9,50 km et comprend huit (8) stations, huit (8) puits de ventilation (PV), trois (3) accès de secours (AS), un poste haute tension (PHT), un terminus, ainsi qu'une voie en cul-de-sac (c, 2014) [20].

La réalisation de cette extension est scindée en deux phases : « Place des Martyrs – Triolet », soit 1,5 km de ligne avec 3 stations, et « Triolet – Chevalley », couvrant 8 km avec 5 stations (c, 2014) [20].

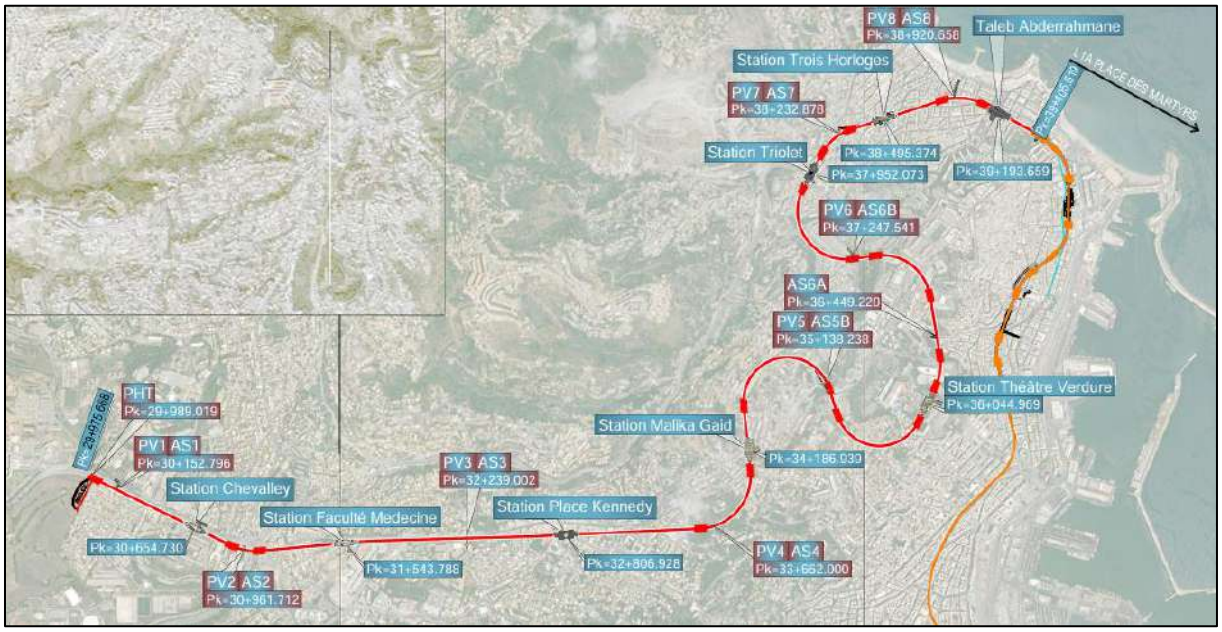


Figure II.1 : Plan général du prolongement du Métro d'Alger entre Chevalley et la place Martyrs.

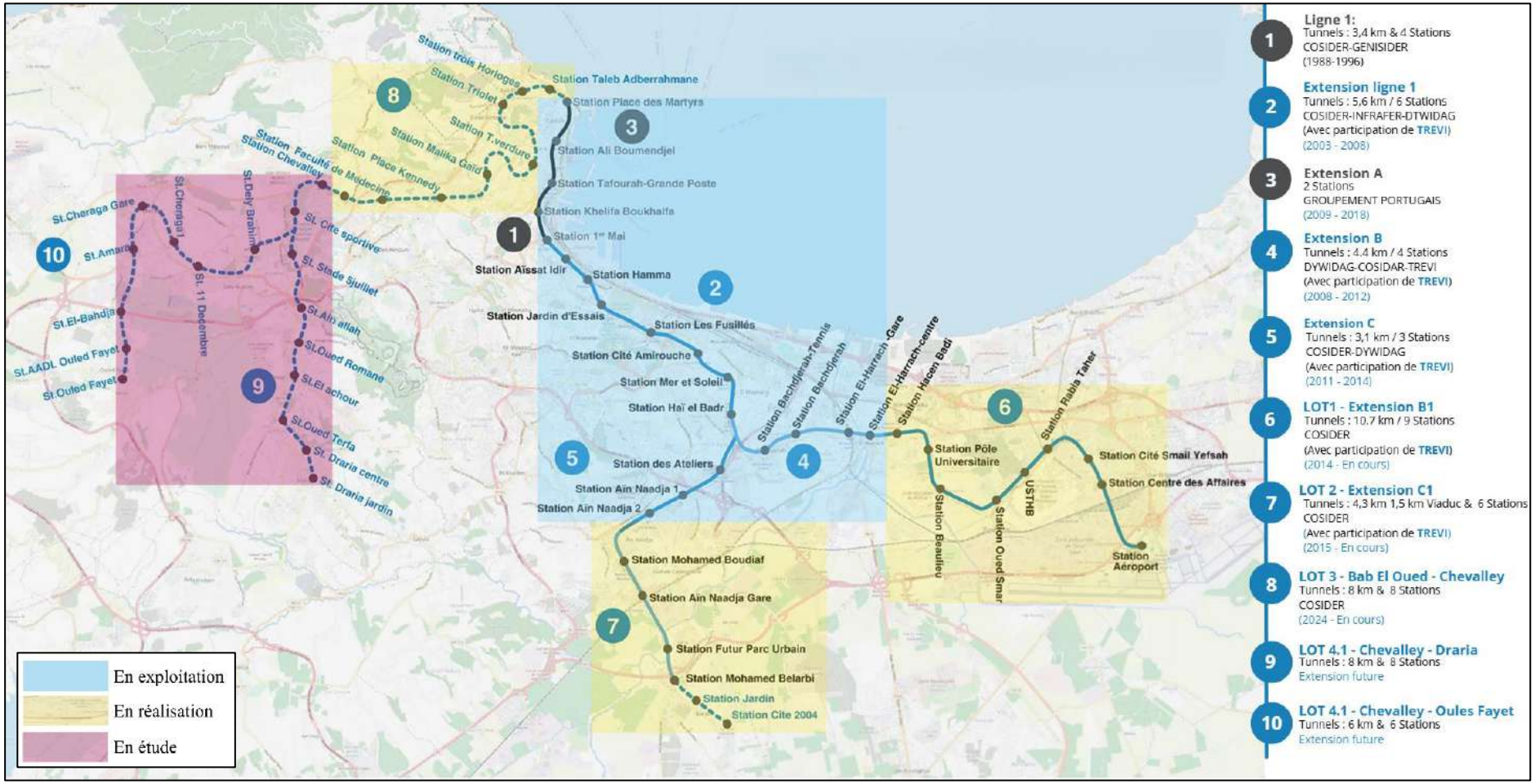
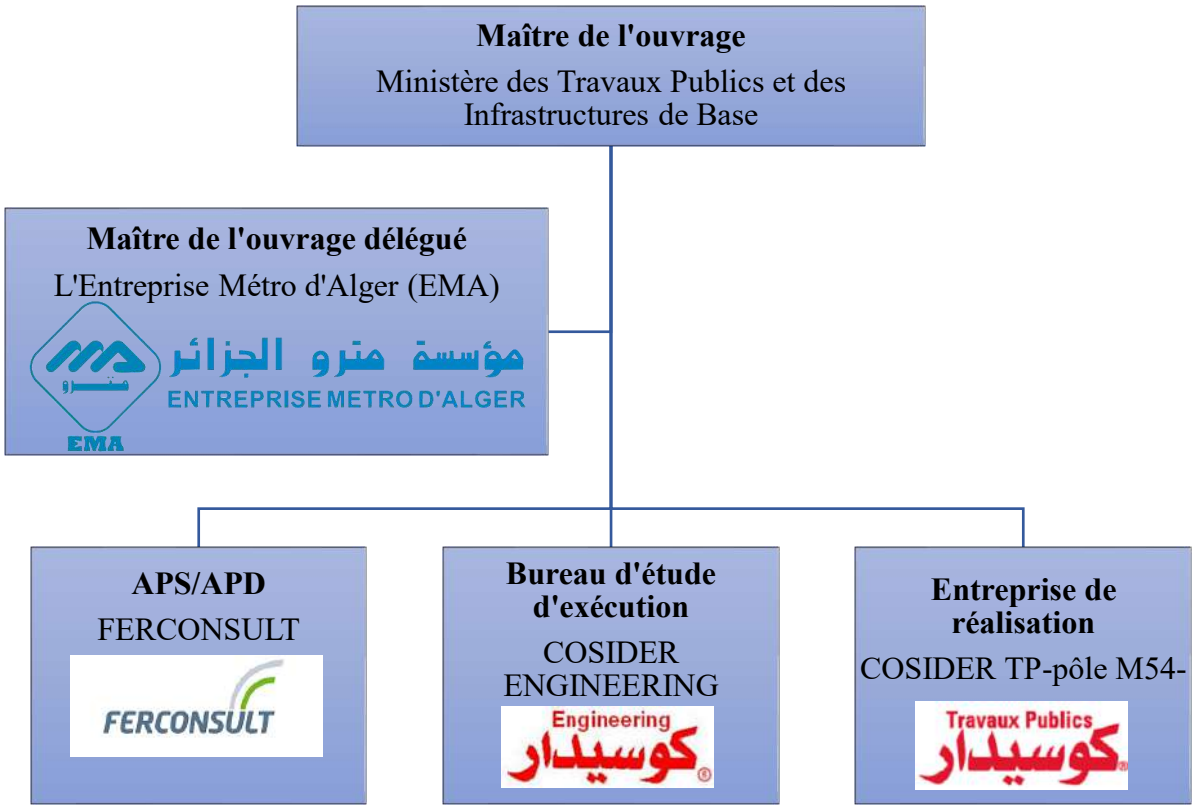


Figure II.2 : Plan de métro d'Alger.

II.4. ACTEURS DU PROJET DE L'EXTENSION « CHEVALLEY – BAB EL OUED – PLACE DES MARTYRS »



II.4.1. Le maitre de l'ouvrage délégué

L'Entreprise Métro d'Alger (EMA) est une société publique algérienne qui intervient en tant que maître d'ouvrage délégué du Ministère des Travaux publics et des Transports. Elle est responsable des études, la réalisation et l'exploitation d'un réseau de chemin de fer urbain, comprenant des infrastructures souterraines et en surface, dédié au transport public.

II.4.2. L'entreprise de réalisation

Cosider Travaux Publics : société par actions fondée en 1979 est la plus grande filiale du Groupe Cosider.

Cosider Travaux Publics est spécialisée dans la construction des grands ouvrages d'infrastructures publiques, notamment la réalisation des routes, autoroutes, les voies ferrées, les pistes d'aérodromes et les ouvrages d'art (pont et viaducs), ainsi que les ouvrages spéciaux (ouvrage souterrain et maritime).

II.4.3. Historique des études

II.4.3.1. Les études préliminaires (Avant-projet détaillé -APD)

FERCONSULT : Entreprise portugaise multidisciplinaire crée en 1991, elle est spécialisée dans le conseil, les études et les projets en ingénierie des transports, et opère aussi bien au niveau national qu'international, elle fait partie du groupement Ensitrans, Engenharia e Sistemas de Transporte, A.E.I.E. (E.E.I.G.), aux côtés de Metropolitano de Lisboa, E.P.E.,

Transports Métropolitains de Barcelona et Sener, Ingenieria Y Sistemas, dont elle détient 45 % des parts (Associação Portuguesa de Projectistas e Consultores (APPC), 2019) [3].

FERCONSULT offre une large gamme de services dans le domaine des transports, allant des études de faisabilité à la formation du personnel, en passant par le conseil en exploitation des systèmes de transport (Associação Portuguesa de Projectistas e Consultores (APPC), 2019) [3].

II.4.3.2. Le contrat de conception détaillé (Étude d'exécution)

COSIDER ENGINEERING, filiale du Groupe COSIDER depuis 2011, est spécialisée dans l'ingénierie et les études techniques. L'entreprise intervient dans divers domaines, dont le génie civil et les études architecturales, le génie mécanique et hydraulique, la géotechnique, la topographie, ainsi que les systèmes HVAC et les constructions métalliques. Elle dispose d'un laboratoire dédié au contrôle et aux essais des matériaux (béton, sols, produits hydrocarbonés).

II.5. DESCRIPTION DU TRONÇON DE 300 M ENTRE LA STATION TALEB ABDERRAHMANE ET TROIS HORLOGES

Le tronçon étudié dans ce mémoire fait partie de Lot 3 : Chevalley – Place des Martyrs. Il est compris entre la station de Taleb Abderrahmane et la station Trois Horloges, entre les Pk 38+837.159 et Pk 39+137.159. Ce tronçon comporte un tunnel de voie de 300 m ainsi qu'un puits de ventilation (PV 08). Le puits de ventilation est relié au tunnel de voie par un rameau de connexion de 65 m (c, 2014) [20].

II.5.1. Le tunnel de voie

La section transversale définie pour le tunnel de voie découle de la définition du contour géométrique qui circonscrit le gabarit ferroviaire adopté pour le métro, incluant les équipements et les autres installations nécessaires à la voie ferrée. En ces conditions, la section transversale a adopté un contour circulaire pour la voûte du tunnel avec un rayon de 4,51 m, ce qui confère une largeur intérieure utile de 9,02 m. Pour des raisons de comportement structurel, la section du tunnel est dotée de radier en forme de voûte inversée, avec un rayon de 7,3 m étant le rayon de transition égale à 1 m. (c, 2014) [20]

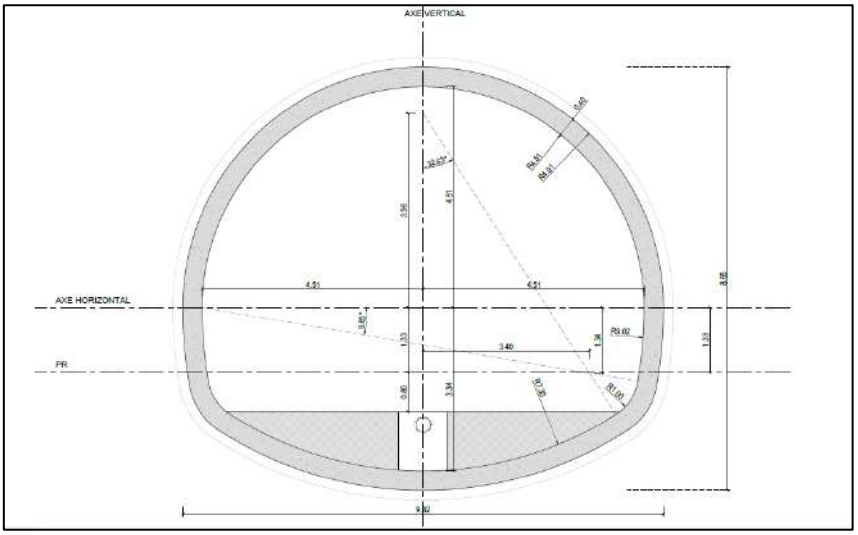


Figure II.3 : Tunnel de voie – Section transversale type.

II.5.2. Le puits de ventilation

Le puits de ventilation est un ouvrage souterrain qui permet en temps normal d'exploitation, la ventilation souterraine de la voie du métro. En situation d'incendie, il assure l'évacuation des usagers et facilite l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie.

Le puits de ventilation est entièrement constitué d'éléments planaires en béton armé, tels que le radier, la dalle intermédiaire, les dalles de couverture ainsi que les parois extérieures et intérieures. Les dalles comportent des ouvertures spécifiques permettant l'aménagement des zones d'escaliers et le passage des équipements de ventilation. La transmission des charges verticales des éléments structurels au terrain sous-jacent est assurée par les radiers.

La figure II.4 présente le puits de ventilation 08, qui fait partie des huit puits prévus dans le cadre du projet du Lot 3 du métro d'Alger reliant Chevalley à la place des Martyrs. Il est situé entre la station de Taleb Abderrahmane et la station Trois Horloges, au point kilométrique PK 38+940.208.

Le puits PV08 est constitué de trois parties principales : un local technique enterré, équipé d'un ventilateur et des locaux électriques, un puits vertical de géométrie circulaire, et un rameau de connexion qui assure la liaison entre le puits de ventilation et le tunnel de voie.

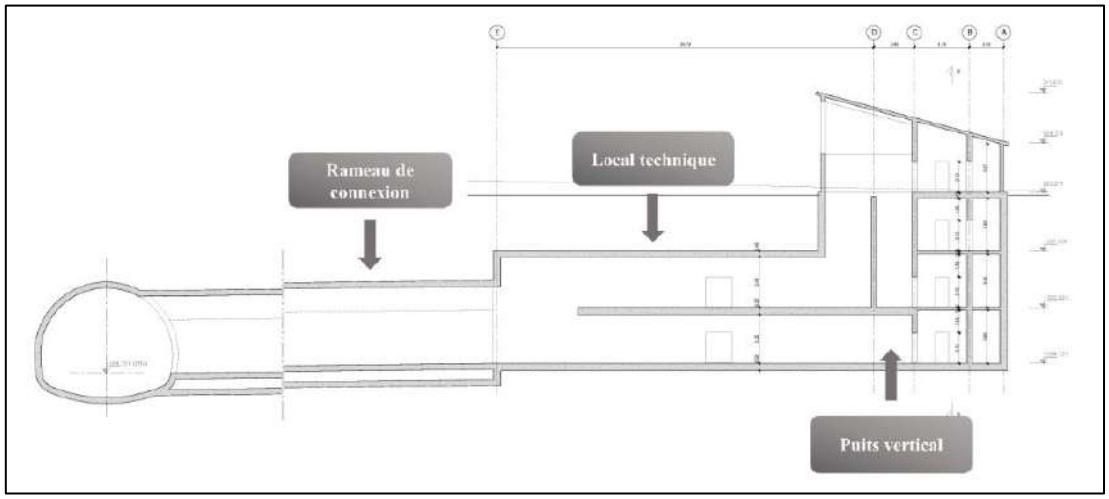


Figure II.4 : Vue en profil transversal du puits de ventilation PV08.

II.5.3. Le rameau de connexion

Le rameau de connexion matérialise la liaison entre le puits de ventilation n°08 et le tunnel de voie. Celui-ci aura une extension d'environ 65 m et une section de tunnel d'environ 34 m², garantissant la circulation de l'air ainsi qu'un passage entre la surface et le tunnel de voie.

La section d'excavation du rameau de connexion présente un contour circulaire de voûte avec un rayon de 3,8 m. La section du tunnel est dotée d'un radier en forme de voûte inversée, avec un rayon de 8,15 m, le rayon de transition étant égal à 1,6 m.

II.6. CONCLUSION

Le tronçon étudié dans ce mémoire constitue un segment du Lot 3 : Chevalley – Place des Martyrs, du métro d'Alger, s'inscrit dans un processus d'amélioration de l'efficacité du réseau de transport urbain de la capitale, situé entre la station Taleb Abderrahmane et la station Trois

Horloges, ce tronçon traverse une zone urbaine dense, caractérisée par une topographie complexe et des formations géologiques variées.

Pour mener à bien la réalisation de ce tronçon, une connaissance approfondie des contraintes associées au terrain est nécessaire, à savoir le tracé en milieu urbain marqué par une forte déclivité, ainsi que la topographie, les caractéristiques des formations géologiques et les conditions hydrogéologiques du terrain. Il est donc essentiel d'intégrer ces contraintes dès le début de la conception afin de mettre en place des mesures de précaution adaptées pour la gestion du risque de tassement de la surface. Cette méthodologie garantira l'intégrité et la sécurité des structures environnantes ainsi que la stabilité de l'ouvrage souterrain.

Le prochain chapitre portera sur la reconnaissance géotechnique. Cette étape permettra d'identifier les formations géologiques du terrain et les paramètres géotechniques des couches du sol traversées par l'ouvrage, d'analyser les données issues des campagnes de prospection et d'essais, et enfin, d'établir un modèle géologique-géotechnique fiable.

CHAPITRE III
ÉLABORATION DU MODÈLE GÉOTECHNIQUE

III.1. INTRODUCTION

La géotechnique est une branche clé de l'ingénierie civile qui a pour but d'étudier les sols, les roches et les nappes d'eau souterraine en tant qu'éléments influençant à la fois la stabilité et le bon fonctionnement des constructions provisoires ou définitives. Son objectif principal est de fournir des données concernant les propriétés et le comportement des sols et des roches qui sont indispensables à la conception et à la réalisation des ouvrages souterrains.

En effet, le choix conceptuel de tels ouvrages, notamment les méthodes d'excavation, les types de soutènement, le dimensionnement des structures constituant le revêtement définitif du tunnel, est en très grande partie basé sur les données fournies par l'étude géotechnique. Ces paramètres permettent d'optimiser la conception en fonction des propriétés physiques et mécaniques du sol, de la présence et de la répartition des eaux souterraines et de la stabilité géologique du site.

Le présent chapitre présente en premier lieu le contexte géologique de la zone d'implantation du tracé en analysant la stratigraphie du terrain afin d'avoir une idée de la nature des différentes formations traversées par l'ouvrage. Il aborde ensuite le contexte hydrogéologique, suivi d'une étude sismique ayant pour but de classer la sismicité de la région du projet selon le RPOA 2008. En second lieu, il présente les différents travaux de prospection et les résultats des essais in situ et en laboratoire effectués.

En résumé, l'objectif principal de ce chapitre est de :

- Identifier les différentes formations géologiques (unités géologiques) composant le volume de terrain concerné par le projet et déterminer la présence et les niveaux des eaux souterraines.
- Déterminer les propriétés physico-mécaniques des sols et des roches rencontrés.
- Établir un modèle géologique-géotechnique des différentes unités constituant le site en se fondant sur les données obtenues lors des campagnes d'investigations géotechniques de terrain et des essais réalisés in-situ et en laboratoire sur les échantillons prélevés.

III.2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

III.2.1. Contexte géologique

III.2.1.1. Géomorphologie

L'Algérie se divise en quatre grands domaines morphologiques du nord au sud :

- L'Atlas Tellien (le Tell), constitué de reliefs escarpés et de plaines littorales dont les plus riches d'Algérie sont la Mitidja au centre, le Chelif à l'ouest et le Seybouse à l'est. Ce domaine se divise en deux grands sous-domaines :
  - Le tell méridional (zone externe)
  - Le tell septentrional (zone interne) : bordé par la mer Méditerranée au nord et limité au sud par l'accident sud kabyle. Sa structure géologique est complexe (massifs cristallins internes ; formations paléozoïques ; dorsale calcaire ; flyschs ; bassin néogène post nappes).
  - Les Hauts Plateaux.

- L'Atlas Saharien forme une longue suite de reliefs orientés nord-est/sud-ouest, s'étendant de la frontière marocaine à celle de la Tunisie.
- Le Sahara qui recèle l'essentiel des ressources en hydrocarbures, est un désert formé de grandes étendues de dunes (Erg Oriental et Erg Occidental), de plaines caillouteuses (regs) et parsemé d'oasis que sont autant de centres urbains comme El Oued, Ghardaïa et Djanet. Le massif des Eglab à l'ouest et le massif du Hoggar à l'est forment, pratiquement, la limite méridionale du Sahara algérien. (Askri, Belmecheri, Benrabah, Boudjema, Boumendjel, Daoudi, Drid, Ghalem, Docca, Ghandriche, Ghomari, Guellati, Khennous, Lounici, Naili, Takherist,, Terkmani, 1995) [2]

La région traversée par le tronçon de l'extension du métro entre Place des Martyrs et Chevalley, objet de cette étude, se situe dans ce qui est communément appelé l'Atlas tellien, et géologiquement la chaine des Maghrébides. Les principaux domaines géomorphologiques de la région d'étude sont (C, 2015) [21]:

- Massif de Bouzaréah ;
- Cordon dunaire ;
- Le pièment sud du sahel ;
- La plaine littorale orientale ;
- Le plateau molassique ;
- Le sahel marneux ;
- La septentrionale de la Mitidja.

Le tracé traverse le massif de Bouzaréah, qui fait partie des massifs cristallins internes (Figure III.1).

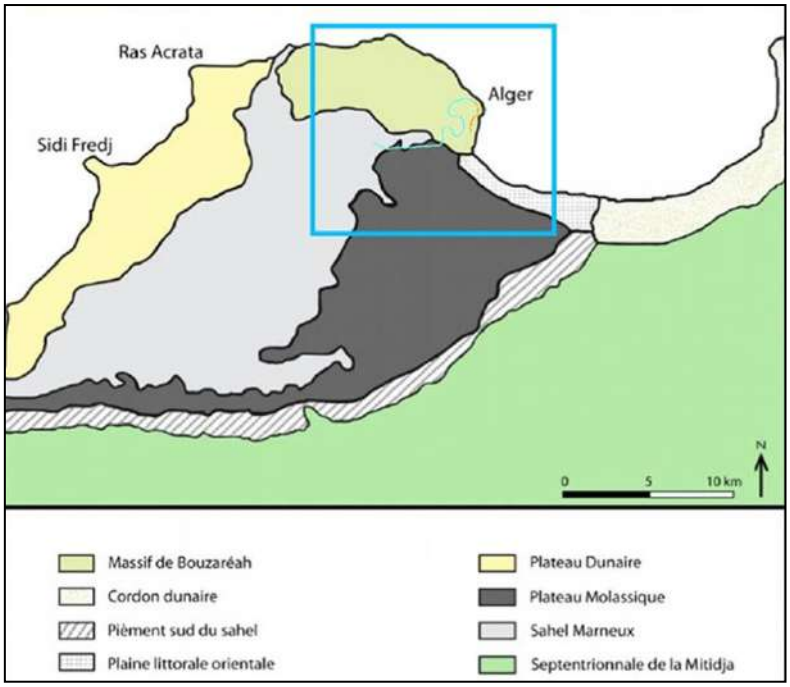


Figure III.1 : Ensembles morphologiques de la région - Implantation du tracé.

Le Massif de Bouzaréah (appelé également Massif d'Alger), forme un chaînon E-W de 20 km de longueur et de 6 km de largeur culminant à 407 m d'altitude. Il est situé à l'ouest d'Alger, en bordure de la Mer Méditerranée, limité au sud par le bassin de la Mitidja et à l'ouest par les dépôts discordants du Néogène. Sa structure est composée de plusieurs unités tectoniques superposées ou séparées par des contacts anormaux orientés E-W (Menad, 2012) [37].

III.2.1.2. Stratigraphie

Le tracé en étude traverse diverses formations géologiques, parmi lesquelles les roches métamorphiques du Massif d'Algérie qui ont une géologie complexe et, de ce fait, sont peu connues en termes de nature et de structure du substratum. Selon Royer (1937), ces terrains cristallophylliens du Massif d'Alger varient entre des grès et phyllades peu métamorphisés et des gneiss de type profond. Ces formations géologiques sont principalement constituées de trois types de roches métamorphiques : les schistes, les gneiss et les granulites gneissiques, avec parfois des amphibolites et des cipolins en proportions moindres. L'ensemble est très fréquemment traversé (recoupé) par des intrusions de pegmatites et d'aplites.

Les roches cristallophylliennes du Massif d'Alger, selon les travaux de Saadallah (1981), témoignent d'une histoire géologique complexe. Initialement, ces roches étaient des sédiments (argiles, calcaires, etc.) qui ont subi un métamorphisme intense sous l'influence d'un magma granitique très acide, les transformant en séricitoschistes ou quartzites à chlorite, à grenat, à sillimanite, en micaschistes plagioclasiques, en amphibolites feldspathiques, en gneiss œillés et en cipolins. Par la suite, ces roches ont été déformées par des processus tectoniques (écrasement, laminage).

La figure suivante présente l'implantation du tracé en étude sur un extrait de la carte géologique de l'Algérie, Chéragas.

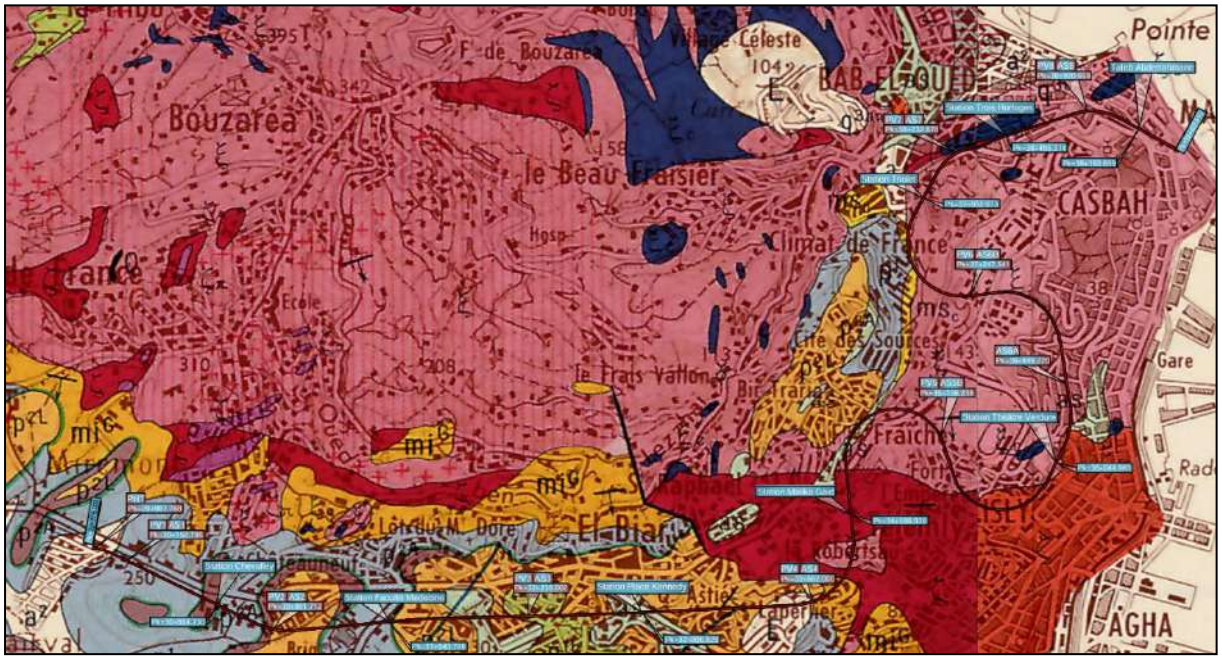


Figure III.2 : Extrait de la carte géologique de l'Algérie, Chéragas – implantation du tracé

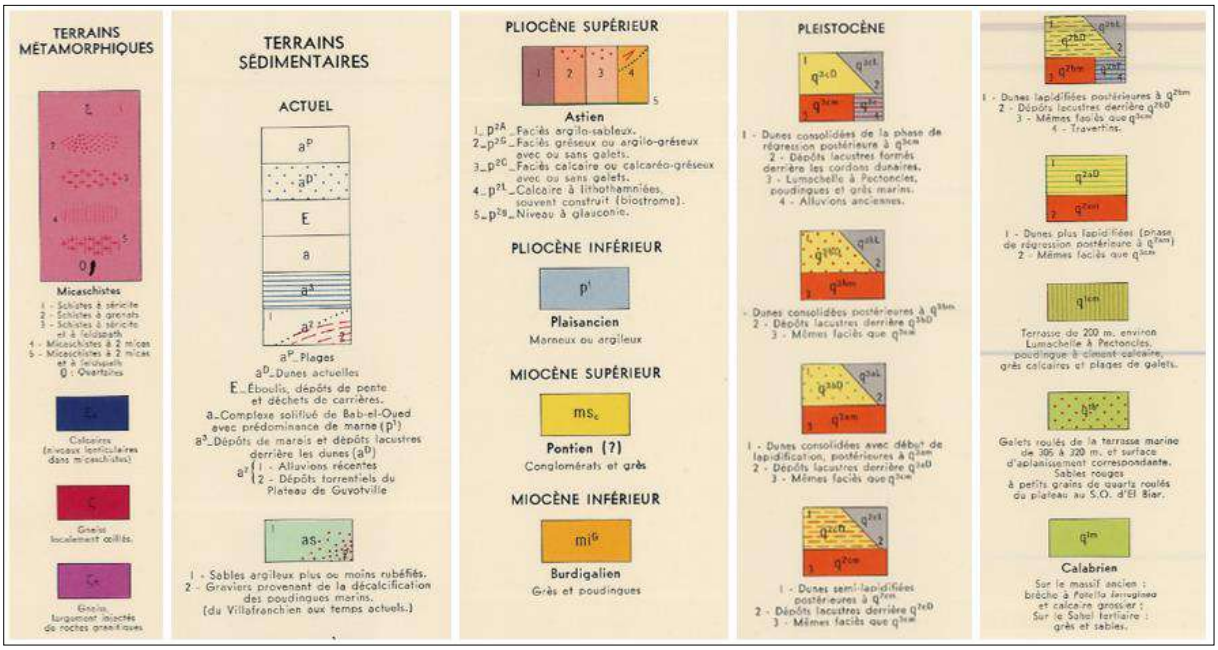


Figure III.3 : Légende de l'extrait de la carte géologique de l'Algérie, Chéragas

III.2.1.3. Tectonique

Le Massif d'Alger est structuré en sept unités tectoniques superposées et séparées par des contacts anormaux, souvent très nets, chacune ayant une composition pétrographique distincte, allant de marbres et schistes à des gneiss et amphibolites, reflétant ainsi les différentes phases de l'histoire géologique de la région.

La figure suivante montre les sept unités tectoniques du massif d'Alger.

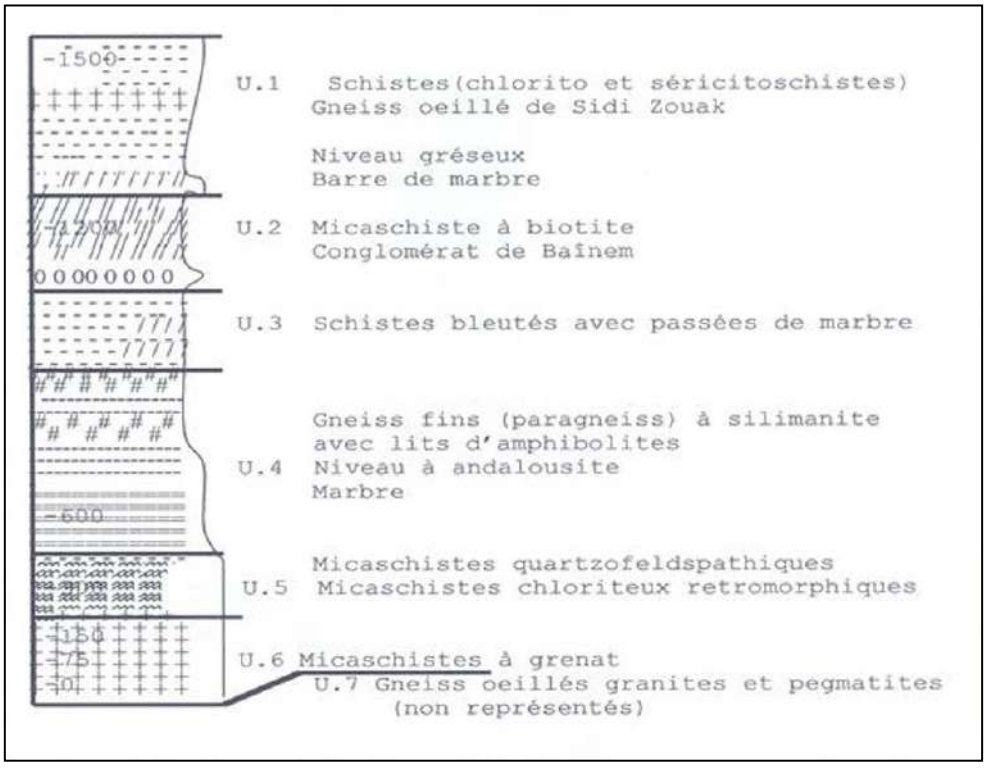


Figure III.4 : La série lithologique du massif d'Alger (Saadallah)

III.2.1.4. Lithostratigraphie

En 2005, une étude approfondie menée par le BRGM a été réalisée sur la région d'Alger, s'appuyant sur deux sources principales : la carte géologique d'Alger – Chéragas - à l'échelle 1 :50 000 et une collection de 90 rapports d'études géotechniques.

Cette analyse a permis de distinguer plusieurs lithologies au sein des mêmes formations géologiques, mais présentant des comportements géotechniques distincts. En effet, douze types d'affleurements géologiques ont été identifiés, englobant le substratum géologique, les formations superficielles et les dépôts anthropiques.

Ces entités seront présentées de manière séquentielle, des formations les plus anciennes (substrat géologique) aux plus récentes (formations superficielles, dépôts anthropiques).

Substrat géologique :

- Roches cristallines ou métamorphiques résistantes (RR)
- Schistes altérés (SA)
- Grès burdigaliens (GB)
- Limons à cailloutis pontiens (LC)
- Marnes plaisanciennes (MP)
- Calcaires astiens (CA)
- Argiles argilo-sableux ou gréseuses de l’Astien (AG)

Formations superficielles :

- Dunes grésifiées d’origine marine et/ou éolienne (DG)
- Sables d’origine marine et/ou éolienne (S)
- Argiles limoneuses d’origine fluviatile (AL)
- Colluvions de pente (CP)

Dépôts anthropiques :

- Remblais (R)

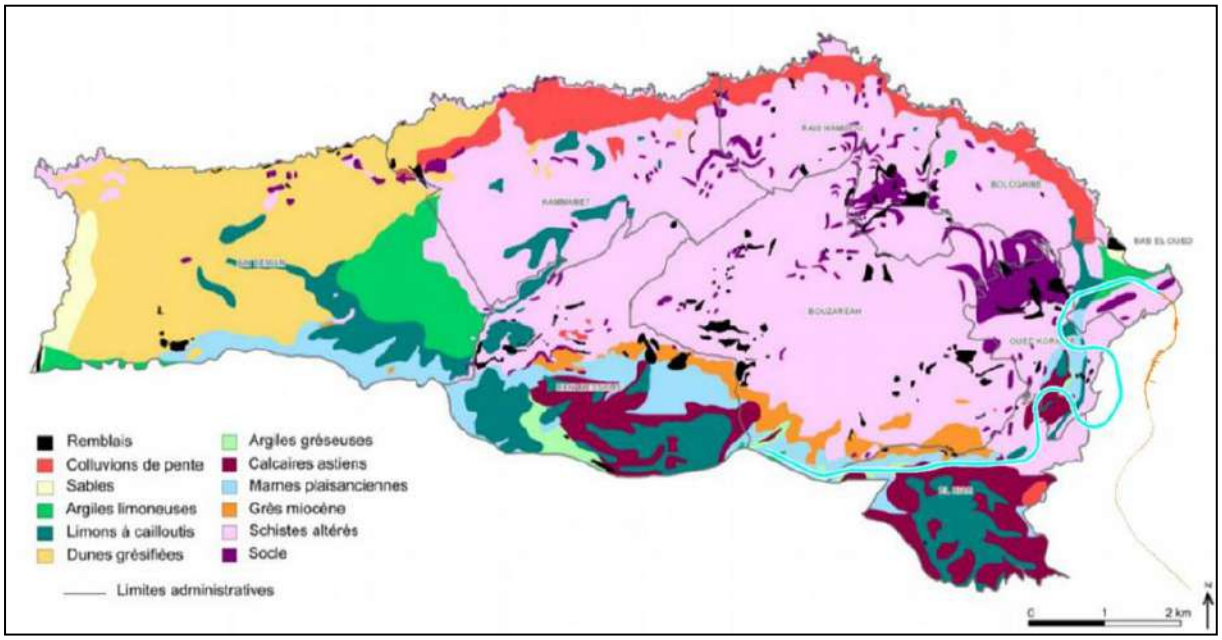


Figure III.5 : La carte lithologique du massif d'Alger (BRGM 2005)

D'après la carte lithologique précédente, on constate que les principales lithologies intersectées par le tracé objet de cette étude sont les suivantes :

Schistes altérés (SA) : ces terrains métamorphiques sont fortement tectonisés datant de l'ère primaire. Ils sont très étendus dans le massif, affleurant principalement au centre et à l'est, étant très sensibles aux phénomènes de glissement de terrain et de ravinement. Leur niveau d'altération superficiel peut atteindre 0,5 à 1 m, même davantage.(Menad, 2012) [37]

Argiles limoneuses d'origine fluviatile (AL) : elles sont présentes principalement dans les fonds de vallée et peuvent contenir des cailloutis et des petits blocs dérivés de l'érosion du socle (quartzites, schistes) puis transportés par les cours d'eau. Ce sont des formations spatialement localisées, récentes ou anciennes, mises en place aux débouchés de l'Oued Koriche (commune de Bab-el-Oued). En fait, les faciès sont plus complexes : il peut s'agir de sables argileux ou limoneux, d'argiles sableuses ou de limons, avec ou sans éléments grossiers. Des argiles vaseuses ainsi que des niveaux de graves peuvent même être observées. (Menad, 2012) [37]

III.2.2. Contexte hydrogéologique

III.2.2.1. Étude hydrogéologique

L'étude hydrogéologique présente une série d'étapes qui permettent d'analyser la présence et la distribution des eaux dans la zone d'étude. En amont de tout projet de construction, cette mesure détaillée est indispensable pour prévenir les risques liés à l'eau, tels que les inondations, les remontées capillaires ou bien les tassements de terrain, l'étude hydrogéologique permet également d'optimiser la conception des ouvrages souterrains en tenant compte des conditions hydrogéologiques locales.

III.2.2.2. Hydrogéologie de la zone du projet

Le tracé en étude, croise plusieurs formations géologiques, qui peuvent être classifiées en trois classes hydrogéologiques de Terrains (voir l'extrait de la carte hydrogéologique de la région d'Alger, à l'échelle 1 :200 000, Figure 1). (C, 2015) [21]

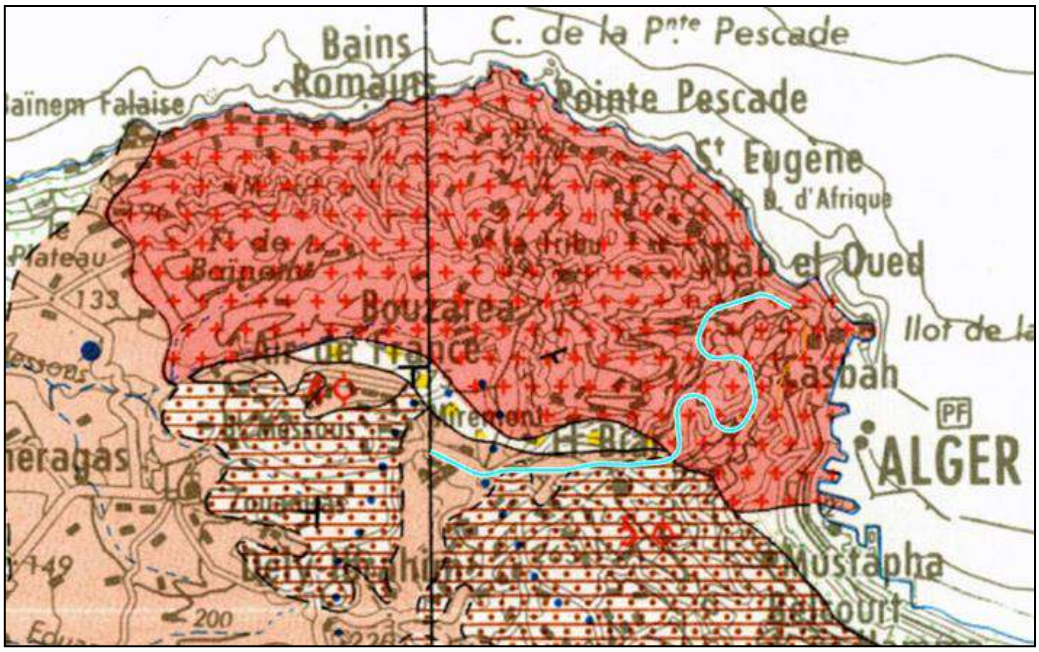


Figure III.6 : Extrait de la carte hydrogéologique de la région d'Alger – 1:200 000

Les classements hydrogéologiques de terrains (C, 2015) [21] :

Class I – Terrain à perméabilité élevée. Ressources en eau.

Class II – Terrain à perméabilité moyenne. Ressources en eau variables.

Class III – Terrain à perméabilité très faible. Pas de nappe d'eau souterraine.

La présence d'eau dans les terrains métamorphiques du massif de Bouzaréah, se manifeste sous la forme de résurgences (sources) ou de nappe aquifère. Exemple de puits domestiques dans les maisons de casbah. Il s'agit d'une eau localisée dans les fissures, diaclases et fractures qui peut s'accumuler dans les zones d'altération superficielle plus ou moins épaisses. (C, 2015) [21]

Tableau III.1 : Les classements hydrogéologiques de terrain

Stratigraphie	Symbologie	Classe	Lithologie	Hydrogéologie
Pliocène Supérieur (Astien)		I	Calcaires gréseux, calcaires construits, marnes jaune, sables.	Perméabilité variable.
Pliocène Inférieur (Plaisancien)		III	Marnes e argile bleues	Perméabilité très faible. Substratum de la nappe de l'astien
(*) Roches Métamorphiques		III	Schistes, micaschistes, gneiss	Aucun râle hydrogéologique.

(*) - Les Zones fissurées du massif de Bouzaréah

III.2.3. Contexte sismique

III.2.3.1. Aperçu sur la tectonique d'Algérie

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud-atlasique (C, 2015) [21] :

- Le nord du pays portant l'empreinte de la tectonique alpine.
- La Plateforme Saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée.

Le Nord de l'Algérie est délimité par les éléments suivants (C, 2015) [21] :

- Au sud, l'Atlas saharien, une chaîne de montagnes d'origine alpine.
- Au centre, des plateformes comme la Méséta Oranaise à l'ouest et le môle d'Ain Regada à l'est.

Dans la partie septentrionale, l'Atlas tellien est une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur. Des bassins néogènes tardifs comme le Chélif et le Hodna se sont installés sur ces nappes (C, 2015) [21].

La Plateforme Saharienne est constituée d'un socle précambrien recouvert de sédiments phanérozoïques transgressifs. Différents éléments tectoniques délimitent des bassins sédimentaires dans lesquels la lithostratigraphie est plus ou moins complète. (C, 2015) [21]

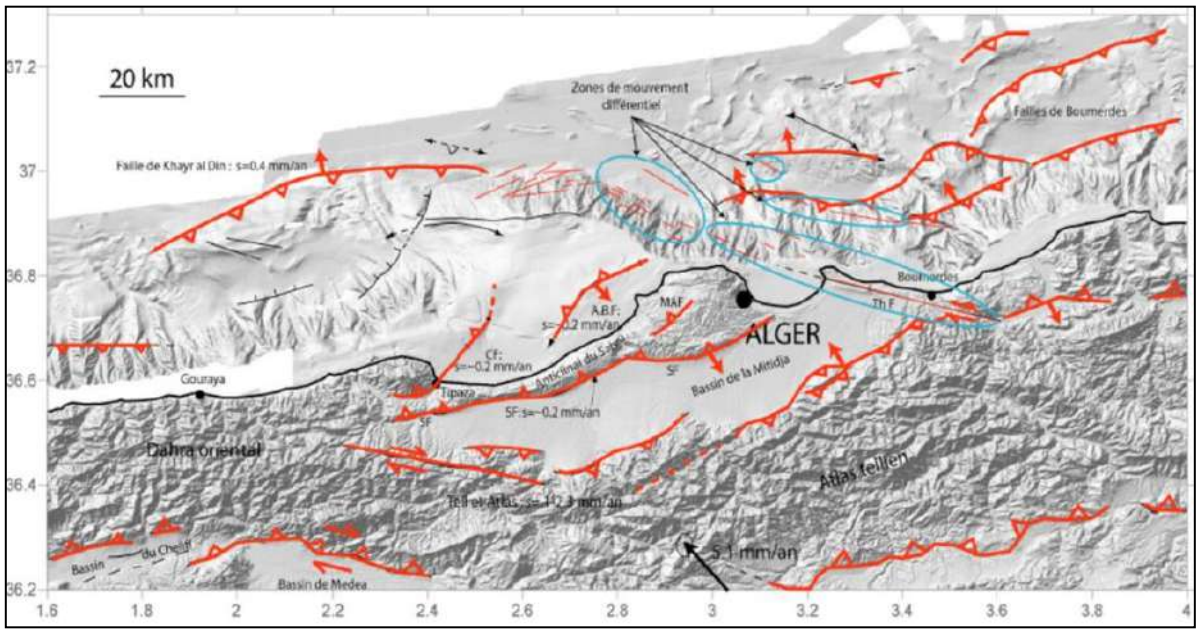
III.2.3.2. Contexte tectonique de la région d'Alger

La zone d'étude, localisée dans la ville d'Alger, fait partie de l'unité tectonique du nord de l'Algérie :

La région d'Alger fait partie du tell. Celui-ci fait partie de la zone de jonction entre les deux plaques et par conséquent, il est l'une des régions où les déformations sont des plus actives et où les séismes forts à modérés dus à la convergence se manifestent fréquemment

La Région d'Alger représente le segment central de la chaîne tellienne. Cette dernière se caractérise par un relief montagneux constituant ainsi une longue chaine de montagnes longeant le littoral méditerranéen.

En effet, cette zone appartenant à l'Atlas tellien est structurée en plis, plis –failles et chevauchements avec des composantes de déplacements latéraux et une direction de compression qui est NO-SE(N140) (Maghraoui et al ,1996). Les déformations sont localisées notamment dans les bassins pli-quaternaires intra montagneux et constituent les causes principales de l'occurrence des séismes. (Djeddi, 2013) [28]



En rouge, les principales failles ou plis de part et d'autre de la « prolongation en mer » de la faille de Thénia (**Th F**). **CF** : Faille du Chenoua, **SF** : Faille du Sahel, **MAF** : Faille de Mahelma, **ABF** : Faille d'Ain Benian.

Figure III.7 : Carte des structures actives de la région d'Alger (Djerouit 2009)

III.2.4. Aperçu sismique de la zone d'Alger

Le nord de l'Algérie est affecté par une importante activité sismique localisée généralement sur les bordures des bassins d'Âge mio-plio-quaternaire (C, 2015) [21]. La ville d'Alger a été détruite à plusieurs reprises par de violents séismes :

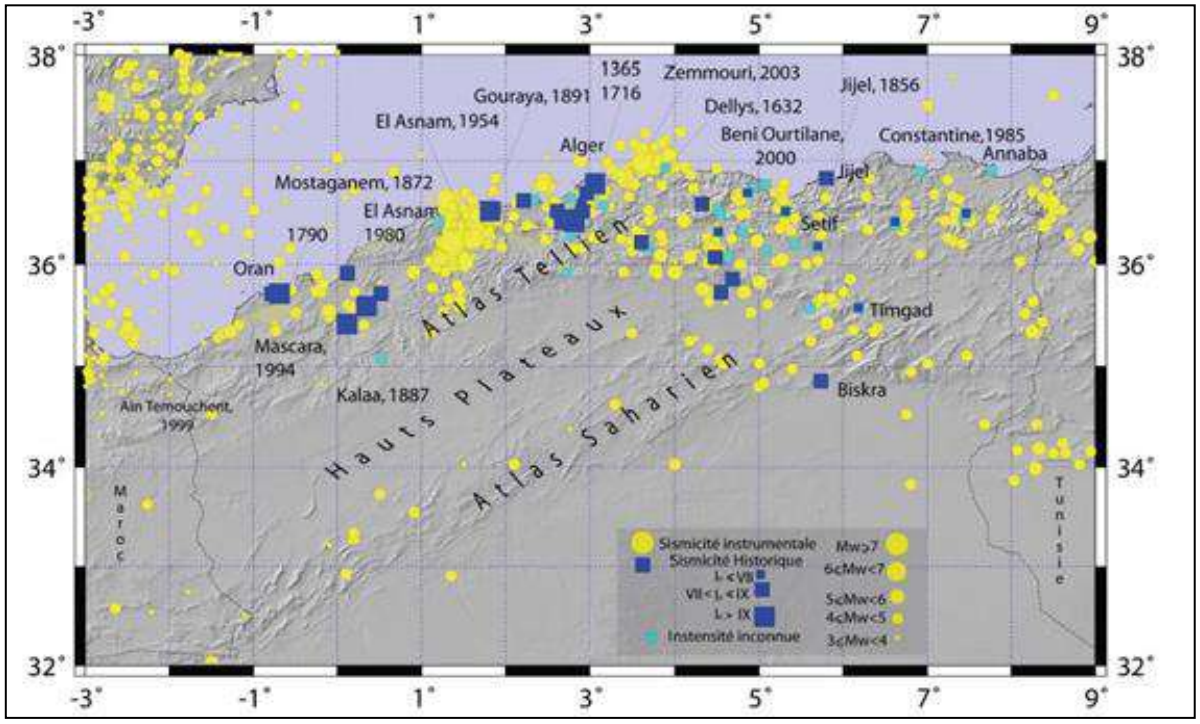


Figure III.8 : Carte de la sismicité historique de 1359 à 1895 (Harbi, 2006) et de la sismicité instrumentale du Nord de l'Algérie de 1900 à 2005 (source, Benouar, 1995 et ISC).

Tableau III.2 : Principaux séismes ressentis dans la ville d'Alger.

Lieu	Date	Intensité	Magnitude	Victimes	Observations
Alger	03/01/1365	X	---	Plusieurs	Destruction de la ville d'Alger
Alger	10/03/1673	---	---	---	---
Mitidja	03/02/1716	X	---	20 000	Destruction de la ville d'Alger (2/3 de la cité) et de Blida
Blida	02/03/1825	X	---	7000	Destruction de la ville de Blida
Gouraya	15/01/1891	X	---	30	---
Tipaza	29/10/1989	VIII	6.0	22	---
Boumerdes	21/05/2003	X	6.8	2300	Nombreux dommages structuraux entre la ville de Boumerdes et Alger

L'activité sismique de la région d'Alger est localisée essentiellement dans le bassin néogène de la Mitidja. On distingue trois zones sismogènes (Yelles-Chaouche, Boudiaf, Djellit, Bracene, 2006) [47] :

- **La région ouest d'Alger Cette région :**

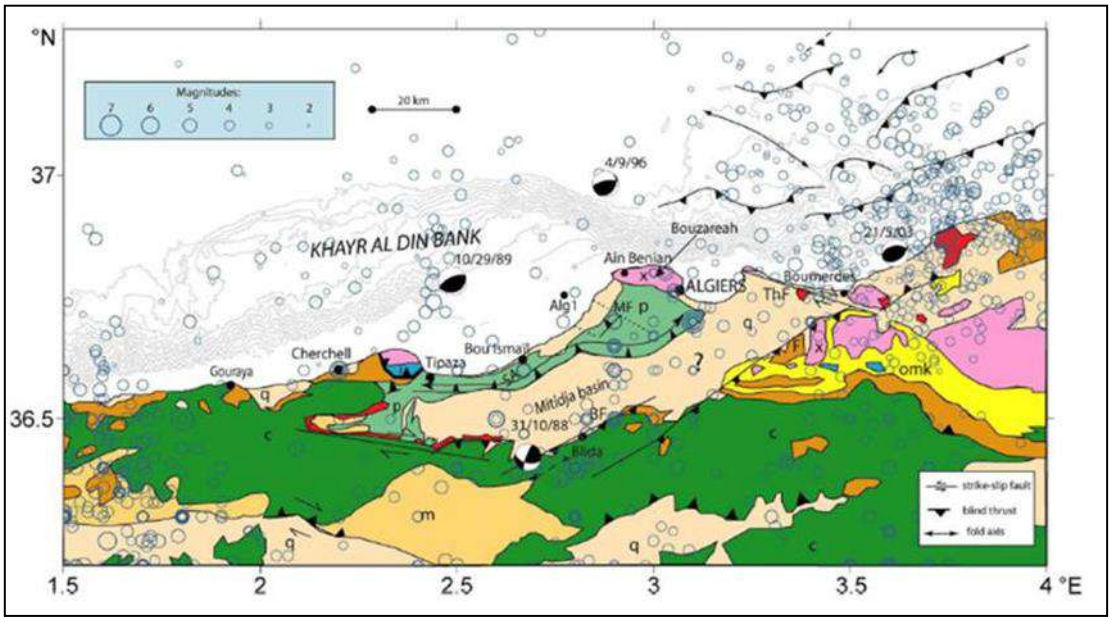
Où se sont produits les séismes du 29 octobre 1989 (Ms : 6,0) et du 4 septembre 1996 (Ms : 5,7), est marquée par la présence de l'anticlinal du Sahel, structure majeure de près de 60 km de longueur et d'orientation NE–SW. Cette région présente des déformations tectoniques récentes qui affectent les niveaux plio-quaternaires. Des décrochements de direction NW–SE, localisés principalement dans la région d'Attatba et de Mahelma, affectent l'anticlinal du Sahel (Yelles-Chaouche, Boudiaf, Djellit, Bracene, 2006) [47]

- **La région sud-algéroise :**

Est marquée par le chapelet de failles qui bordent la zone de contact entre le bassin de la Mitidja et le massif de Blida. Cette bordure montre des indices de déformations tectoniques affectant les niveaux plio-quaternaires. Ces déformations correspondent à des décrochements dextres ou à des chevauchements vers le nord, des niveaux crétacés sur les niveaux plus récents du Miocène et du Plio-Quaternaire. Elles sont associées à la sismicité historique importante de cette région (séismes de 1716 et de 1825) (Yelles-Chaouche, Boudiaf, Djellit, Bracene, 2006) [47].

- **La région est d'Alger :**

Le récent séisme de Boumerdes du 21 mai 2003 (Mw : 6,8) est l'expression de la sismicité parfois importante qui se manifeste dans cette région. Ce séisme a permis de mettre en évidence l'activité de la faille marine de Zemmouri, longue de près de 50 km, localisée entre Dellys et Boudouaou el Bahri et de direction NE–SW (Yelles-Chaouche, Boudiaf, Djellit, Bracene, 2006) [47].



S.A : anticlinal de Sahel **B.F**. : faille de blida **Th.F**.: faille de Thénia **X** : socle métamorphique

Figure III.9 : Carte structurale de la région d'Alger (modifiée d'après Yelles et al. 2005, Kieken,1962 ; Wildi,1983, et Boudiaf,1996), comportant aussi la sismicité instrumentale.

III.2.5. Classification sismique selon RPOA 2008

Selon les Règles Parasismiques Applicables Au Domaine Des Ouvrages d'Art RPOA 2008, Le territoire national est divisé en cinq (05) zones de sismicité croissante, définies sur la carte des zones de sismicité, soit :

- Zone 0 : Négligeable
- Zone I : Faible
- Zone IIa : Moyenne
- Zone IIb : Élevée
- Zone III : Très élevée

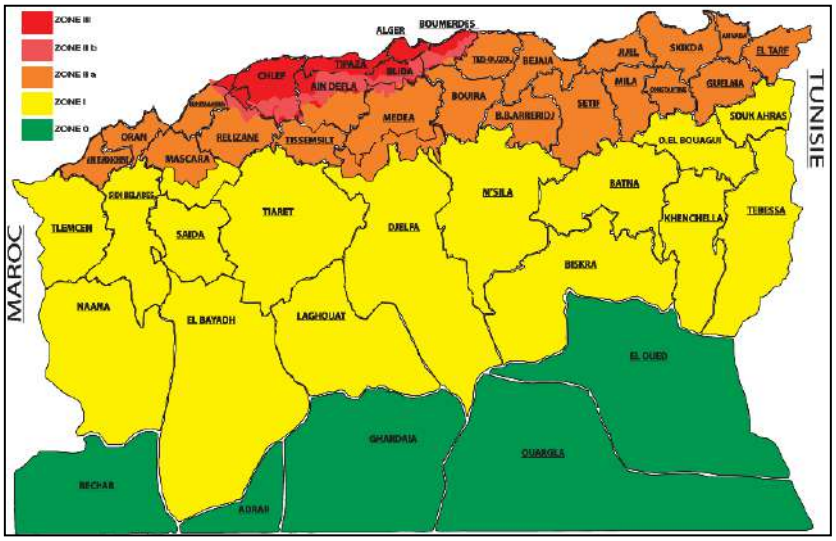


Figure III.10 : Zonage sismique de l'Algérie.

- **Classification des tunnels :**

Groupe 1 : Tunnels stratégiques :

Ce groupe recouvre les tunnels stratégiques devant rester circulables après avoir subi l'action sismique ultime réglementaire, soit :

- Les tunnels autoroutiers.
- Les tunnels sur routes nationales.
- Les tunnels ferroviaires et de métro.

Groupe 2 : Tunnels importants :

Dans ce groupe sont classés les tunnels qui se trouvent sur les chemins de wilaya, chemins communaux ou autres voies.

Les tunnels classés dans le groupe 2 pourraient être surclassés d'un rang si leur endommagement provoquerait des dommages à un bâtiment, équipement ou installation d'importance moyenne a vitale.

Les valeurs du coefficient d'accélération de la Zone A ont été révisées comme suit :

Groupe	Zone Sismique			
	I	IIa	IIb	III
1a	0,15	0,25	0,30	0,40
1b	0,12	0,20	0,25	0,30
2	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,07	0,10	0,14	0,18

Dans le cas de notre projet et selon le zonage sismique : la région étudiée est classée en tant que zone sismique III, correspondant à une sismicité élevée. Le tunnel en tant qu'ouvrages de grande importance appartient au groupe 1 (Tunnel de métro). Sur la base de ces deux informations, le coefficient d'accélération sismique est égal à **A=0,4g**.

III.3. ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

Le processus de l'étude géotechnique est basé sur deux principales parties qui sont les investigations in-situ (sondages carottés, sondages pressiométriques, sondages au pénétromètre statique ou dynamique, mais aussi essais in-situ tels que SPT, essais Lefranc, Lugeon, ...) ainsi que des essais en labo pour évaluer les propriétés physiques et mécaniques des sols et des roches. L'ensemble de ces résultats obtenus permet d'établir un modèle géologique-géotechnique détaillé, qui détermine les méthodes d'excavation et le type de soutènement nécessaires pour assurer la stabilité des ouvrages.

III.3.1. Campagne d'investigation

Afin de cerner les caractéristiques géologiques et géotechniques des terrains traversés par le tracé de l'extension du LOT 3 du métro d'Alger et d'établir un modèle géologique-géotechnique fiable, trois campagnes de prospection géotechnique ont été menées :

- **Première campagne (1984) :**

Ces investigations ont été réalisées au titre des études de faisabilité du projet « Métro d'Alger études de conception et d'ingénierie, Ligne 1 Phase 2 Géotechnique et Reconnaissance des Réseaux ».

Ces travaux initiaux ont comporté des forages mécaniques à la percussion et/ou à la rotation, des essais in situ (perméabilité de type Lugeon) et des essais en laboratoire (granulométrie, sédimentation, densités sèches et humides, limites d'Atterberg, teneur en eau, essais de cisaillement, triaxiaux, œdométriques, essais Cerchar, etc.).

- **Deuxième campagne (2014) :**

Confiée à l'entreprise Trevi Algérie, les investigations géotechniques réalisées dans le cadre de l'étude d'avant-projet détaillé (APD) par Trevi, ont combiné des sondages de reconnaissance avec prélèvement d'échantillons intacts, des essais in situ et en laboratoire, et la mise en place de piézomètres pour le suivi des eaux souterraines.

Par la suite, deux campagnes complémentaires ont été engagées pour approfondir les connaissances du site :

- **Troisième campagne (2019) :**

Confiée à l'entreprise Cosider travaux publics, Pole T29A.

Les investigations ont été menées à plusieurs points stratégiques du site, en fonction de l'implantation du tracé et de la configuration du terrain, pour analyser la stratification du sol, la nature des matériaux et la présence d'eaux souterraines. Les résultats obtenus ont ensuite été utilisés pour formuler des hypothèses sur les conditions géotechniques du site.

Ce plan montre l'emplacement des forages mécaniques effectués au cours des campagnes de reconnaissance, qui ont permis de recueillir les données nécessaires à la création d'un modèle géologique-géotechnique.

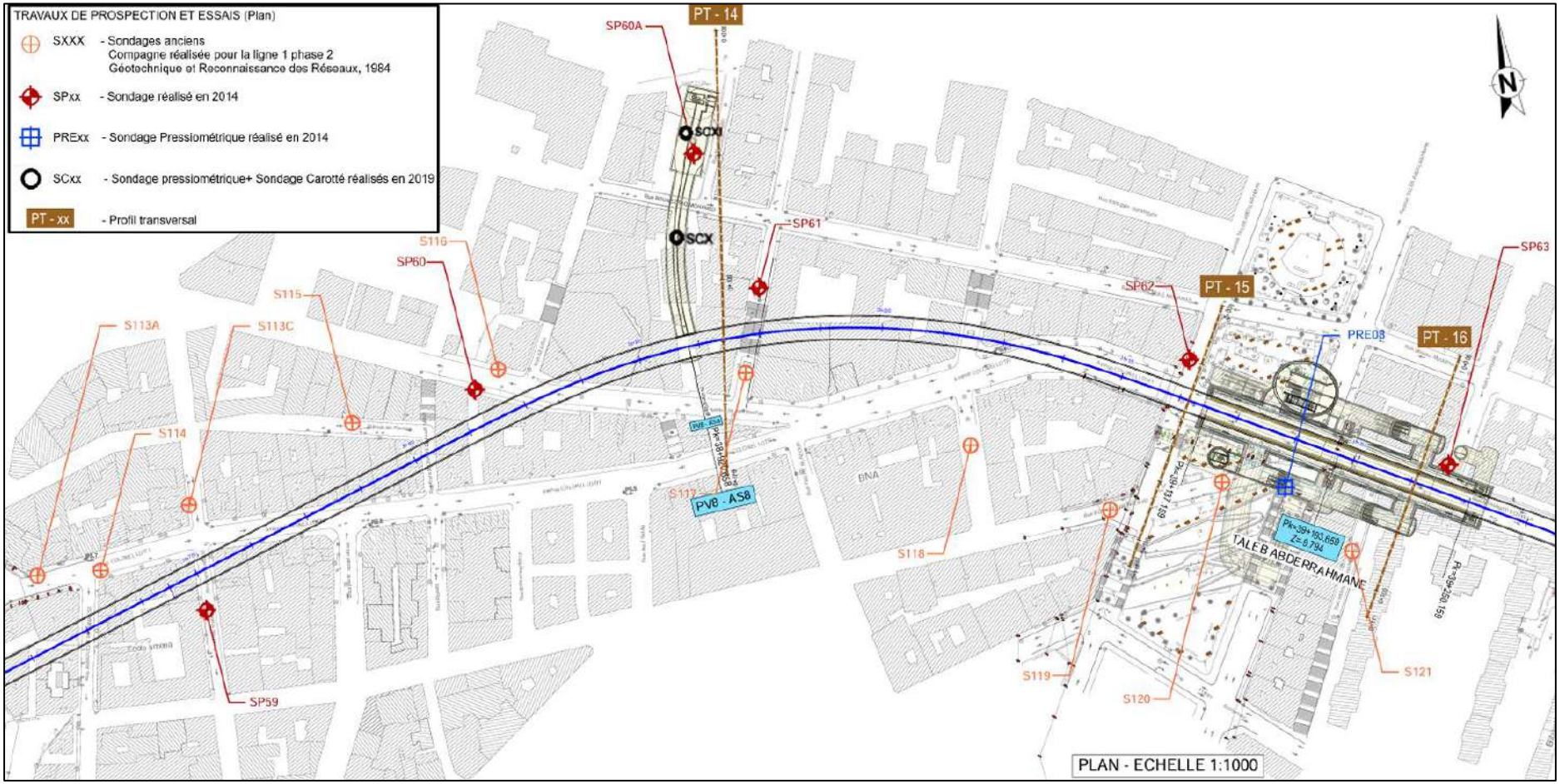


Figure III.11 : Localisation des sondages mécaniques exécutés au cours des différentes campagnes.

III.3.1.1. Sondages

La campagne de 1984 a comporté quatre sondages rotatifs à carottier avec récupération. En 2014, quatre sondages du même type, mais équipés de piézomètres, ont été effectués. Finalement, en 2019, deux sondages carottés ont été réalisés.

Le tableau ci-dessous récapitule les sondages mécaniques exécutés dans le cadre des différentes campagnes de prospection.

Tableau III.3 : Récapitulatif de la localisation des Sondages.

	Sondage	X	Y	Profondeur (m)
Campagne de 1984	S116	504838.5990	4071741.1264	35
	S117	504937.8907	4071723.5349	31
	S118	505023.6740	4071680.1884	35
	S119	505107.3271	4071632.275	30
Campagne de 2014	SP60	504828.0086	4071734.5817	28
	SP60A	504931.21	4071813.98	20
	SP61	504948.7888	4071756.4822	28
	SP62	505117.1271	4071699.9253	31
Campagne de 2019	SCX	504919.8599	4071785.9913	40
	SCXI	504928.8114	4071822.1394	40

L'ensemble des résultats obtenus, comprenant les descriptions lithologiques détaillées de chaque sondage avec indication des profondeurs atteintes et des unités géologiques reconnues, est présenté en Annexe 1**.**

Voici les principales unités litho stratigraphiques identifiées le long du tracé :

Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des conditions stratigraphiques

Stratigraphie		Symbologie	Lithologie	Localisation
Récent		R	Remblais	À la surface, sur le long de tout le tracé.
Quaternaire		Q_A	Argile brune a rougeâtre passages à argile vaseuse	Couches en surfaces sans importance pour l'excavation
		Q_S	Sable moyen brun, noirâtre	
Tertiaire	Pliocène (Plaisancien)	TM	Marne gris bleu ou gris foncé	Pourra conditionner ponctuellement les excavations de PV8 et le rameau
	Miocène (Pontien/ Burdigalien)	TB	Poudingue et Grès dur, parfois friable.	Couche sans importance pour l'excavation, très superficielle.
Primaire		S_A	Zones d'Altération de Schistes, Quartzites (QZ), calcaires métamorphiques	Le socle primaire coupe principalement l'excavation

	S	Schistes, Quartzites (QZ), calcaires métamorphiques	
	γ	Gneiss largement injectés de roches granitiques ou granite	

III.3.1.2. Essais pressiométriques PMT

Afin d'évaluer le comportement du sol sous contrainte, des essais pressiométriques Ménard de type APGEO ont été effectués. Le principe de ces essais consiste à insérer une sonde cylindrique à l'intérieur du trou de sondage puis à appliquer des niveaux progressifs de pression tout en mesurant la déformation des parois de la sonde. Les résultats obtenus permettent de tracer un diagramme pression/volume. À partir de ce dernier, on peut déterminer le module pressiométrique du sol étudié, une donnée essentielle pour évaluer la déformabilité du sol.

Ce diagramme montre les différentes phases de déformation du sol : une phase linéaire représentant le comportement élastique des sols, suivie d'une phase plastique avec des déformations irrécupérables, et enfin la phase de rupture. La pression à partir de laquelle le terrain subit des déformations irrécupérables (comportement plastique) est appelée pression de fluage (PF), tandis que la pression à laquelle le sol entre en rupture est désignée sous le terme de pression limite (PL).

Deux essais pressiométriques Ménard ont été effectués lors de la campagne d'investigation de 2019. Le tableau suivant présente leur localisation. Les résultats des sondages pressiométriques sont exposés en Annexe 2**.**

Tableau III.5 : Récapitulatif de la localisation des essais pressiométriques effectués.

	Sondage Pressiométrique	**X**	**Y**	**Longueur (m)**
Campagne de 2019	SPX	504919.8599	4071785.9913	40
	SPXI	504928.8114	4071822.1394	40

III.3.1.3. Essais de Perméabilité du Type Lugeons

Les résultats des essais lugeons sont les suivants :

Sondage	**PK**	**Profondeur**	**U. L**	**Observation**	**Lithologie**
S118	39+051	20,00 - 25,00	9	Avant Claquage du terrain	Schiste ardoirise gris, injecté de quartzite blanchâtre
		25,00 - 30,00	16	-	
		30,00 - 35,00	5	-	
S117	38+942	8,00 - 11,00	5	-	Schiste quarzeux bleu vert fortement injecté de quarzite
		26,00 - 31,00	5	-	Schiste quarzeux bleu vert fortement injecté de quarzite
S116	38+857	10,60 - 15,60	1,5	-	Schiste ardoirise gris bleu

- Les résultats obtenus ont été classés (Quiñones-Rozo, 2010) [39]:

Tableau III.6 : Classification lugeons

Valeur UL	Description de la perméabilité
$<$ 1 UL	Très faible
1 – 5 UL	Faible
5 – 15 UL	Modéré
15-50	Moyen
50 – 100 UL	Élevée
$>$ 100	Très élevée

III.3.2. Essais en laboratoire

Les échantillons intacts et remaniés de sol recueillis lors des sondages seront envoyés en laboratoire pour réaliser une série d'essais visant à déterminer les caractéristiques des matériaux et leurs propriétés mécaniques. Les principaux essais en laboratoire à réaliser incluent :

- Densités et teneur en eau : pour évaluer la compacité et l'humidité du sol.
- Essais mécaniques (compression simple) : pour évaluer la résistance et la déformabilité du sol sous différentes contraintes.
- Ces essais de compression uniaxiale ont permis de déterminer la charge de rupture des échantillons et leur module de déformabilité, en mesurant les déformations.
- Essais de Cerchar : pour évaluer la dureté et l'abrasivité du sol.

III.3.3. Résultats des essais en laboratoire

III.3.3.1. Échantillon de terrains métamorphiques

Sondage S	PK	Échantillon Prof.	Lithologie	W (%)	γ_h (KN/m^3)	γ_d (KN/m^3)
S119	39+113	17.50 – 17.70	Gneiss (pendage 65º)	1	27.1	26.8
		19.00 – 19.15	Schiste ardoirise gris bleu (pendage 20º)	0.7	27.2	27
		22.50 – 22.80	Schiste ardoirise gris bleu (pendage 60º)	0.5	27.5	27.1
		25.30 – 25.55	Schiste ardoirise gris bleu (pendage 60º)	0.2	27.5	27.4
		27.60 – 27.80	Schiste ardoirise gris bleu (pendage 60º)	0.5	27.4	27.2

III.3.3.2. Essai de compression simple

Sondage SP	PK	Échantillon Prof.	Lithologie	Compression simple (MPa)	Classe RC	Descriptifs
SP60	38+831	14,75 - 14,95	Schiste satiné grisâtre	11,9	RC5	Faible
		15,70 - 15,90	Schiste satiné grisâtre	11,9	RC5	Faible
		22,30 - 22,50	Schiste satiné grisâtre	23,9	RC5	Faible
		19,60 - 19,80	Schiste satiné grisâtre	25,9	RC4	Moyenne
		24,55 - 24,80	Schiste satiné grisâtre	47,6	RC4	Moyenne
SP61	38+950	3,70 - 3,90	Calcaire Cristallin grisâtre	42,8	RC4	Moyenne
		14,20 - 14,50	Schiste satiné grisâtre	10	RC5	Faible
		15,30 - 15,50	Schiste satiné grisâtre	8	RC5	Faible
SP62	39+122	23,15 - 23,40	Carotte fissuré	-	-	-
		27,50 - 27,70	Granite	43,8	RC4	Moyenne

Sondage S	PK	Échantillon Prof.	Lithologie	E (MPa)	RC (MPa)	Classe RC	Descriptifs
S119	39+113	25,30 - 25,55	Schiste ardoirise gris bleu (pendage 60º)	-	16,8	RC5	Faible

NB:

- Il est important de noter que les résultats des essais sont conditionnés par la présence de fissures et de fractures dans les échantillons, ce qui peut influencer les valeurs obtenues.
- Les échantillons de roche ont été classés selon la norme AFTES.

Tableau III.7 : Roches (Classification AFTES 2003).

Classes	Termes descriptifs de résistence	σ_c (MPa)
RC1	Extrêmement élevée	> 200
RC2	Très élevée	100 - 200
RC3	Élevée	50 - 100
RC4	Moyenne	25 - 50
RC5	Faible	5 - 25
RC6	Très Faible	1 -5
RC7	Extrêmement faible	< 1

III.3.3.3. Essais de Cerchar (Dureté et l'Abrasivité)

Sondage (N°)	PK	Échantillon Prof. (m)	Lithologie	Abrasivité Point Cerchar			
				Valeurs Obtenus	Moyenne	A_{IN}	
S119	39+133	17,50 - 17,70	Gneiss	2,0 - 2,3	2,2	$A_{IN}2$	Roche très abrasive
		19,00 - 19,15	Schiste ardoisier gris bleu	1,7 - 2,3	2	$A_{IN}3$	Roche abrasive
		22,50 - 22,80	Schiste ardoisier gris bleu	1,5 - 2,0	1,7	$A_{IN}3$	Roche abrasive
		25,30 - 25,55	Schiste ardoisier gris bleu	0,6 - 3,3	1,9	$A_{IN}3$	Roche abrasive
		27,60 - 27,80	Schiste ardoisier gris bleu	2,4 - 1,2	1,8	$A_{IN}3$	Roche abrasive

Sondage (N°)	PK	Échantillon Prof. (m)	Lithologie	Dureté Point Cerchar			
				Valeurs Obtenus	Moyenne	DU	
S119	39+133	17,50 - 17,70	Gneiss	6 ; 31 ; 20	19	DU5	Roche tendre
		19,00 - 19,15	Schiste ardoisier gris bleu	9 ; >200* ; 32 ; 16 ;15	18	DU 5	Roche tendre
		22,50 - 22,80	Schiste ardoisier gris bleu	60*; 20 ; 28	24	DU 4	Roche moyennement dure
		25,30 - 25,55	Schiste ardoisier gris bleu	38 ; 17 ; 35	30	DU 4	Roche moyennement dure
		27,60 - 27,80	Schiste ardoisier gris bleu	10 ; 12 ; 30	17	DU 5	Roche tendre

NB :

- L'abrasivité d'une roche est déterminée par sa composition minéralogique, notamment la proportion de quartz, ainsi que par la cohésion entre les grains et leurs dimensions. Selon la Norme P 94-430-1, l'indice AIN est obtenu à partir de l'essai Cerchar-Ineris de rayure avec une pointe. Le résultat est exprimé par un indice d'abrasivité qui caractérise l'aptitude d'une roche à user un outil de désagrégation.(C, 2015) [21]

Les classes d'abrasivité des roches, définies à partir de cet indice, sont présentées dans le tableau suivant :

Classes	Valeurs de l'indice d'Abrasivité A_{IN}	Termes Descriptifs D'Abrasivité
A_{IN} 1	>4,0 *	Roche extrêmement abrasive
A_{IN} 2	2,0 – 4,0	Roche très abrasive
A_{IN} 3	1,0 – 2,0	Roche abrasive
A_{IN} 4	0,5 – 1,0	Roche peu abrasive
A_{IN} 5	< 0,5	Roche très peu abrasive
(*) – Le quartz et les pierres précieuses présentent des valeurs supérieures à 6		

- La résistance à la pénétration d'un foret, dans des conditions normalisées, permet de caractériser la dureté d'une roche. Cette méthode d'essai est particulièrement pertinente pour les roches à grains fins et de résistance moyenne à faible.
- Les classes de dureté, définies selon les normes appliquées par Cerchar-Ineris, sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Classes	Valeurs de Dureté	Termes Descriptifs de Dureté
DU 1	> 120	Roche extrêmement dure
DU 2	80 – 120	Roche très dure
DU 3	40 – 80	Roche dure
DU 4	20 – 40	Roche moyennement dure
DU 4	5 – 20	Roche tendre
DU 5	< 5	Roche très tendre

III.3.4. Calcul des paramètres géotechniques

Le tronçon étudié, qui fera l'objet de la modélisation BIM, est une section de 50 mètres située entre le PK 38+930 et le PK 38+980. Les principales unités géotechniques considérées : les remblais, les formations quaternaires argileuses et sableuses, le calcaire, le socle primaire ainsi que sa zone altérée, sont définis sur la base des résultats du sondage géotechnique S61.

Le calcul des paramètres géotechniques (cohésion, angle de frottement interne, module d'élasticité, poids volumique et coefficient de Poisson) est réalisé pour chacune de ces unités. Les caractéristiques des remblais sont estimées sur la base du retour d'expérience et des données disponibles. Pour les unités d'argile et du sable, les paramètres sont obtenus par application de formules de corrélation issues des résultats d'essais pressiométriques. En ce qui concerne les unités de calcaire, le socle primaire et socle altéré, les propriétés mécaniques sont déterminées à l'aide du logiciel RocData, en s'appuyant sur les résultats des essais de laboratoire et des essais in situ disponibles.

III.3.4.1. Détermination des paramètres géotechniques des remblais

Paramètres géotechniques	Valeur
Poids volumique γ (KN/m^3)	17
Cohésion C (KPa)	5
Angle de frottement φ (°)	20
Module de déformation E (MPa)	10
Coefficient de poisson ν	0.4
Coefficient de poussée de terres au reposK_0	0.6

- Le coefficient de poussée de terrain au repos K0 pour les remblais est calculé par la formule de Jaky (1948) : $K_0 = 1 - \sin(\varphi)\,(1 + \frac{2}{3}\sin\varphi)$

III.3.4.2. Détermination des paramètres géotechniques des formations quaternaires (QA et QS) par corrélations pressiométriques

En l'absence d'essais pressiométriques réalisés dans le tronçon étudié du tunnel de voie, les paramètres géotechniques des formations quaternaires ont été estimés à partir des résultats des essais pressiométriques SP10 et SP11, effectués respectivement au niveau du rameau de connexion et du puits de ventilation PV 08.

À partir des résultats des essais pressiométriques présentés en Annexe 2 et en appuyant sur les valeurs types issues de l'interprétation figurant dans les deux tableaux ci-dessous (Fasc.62), nous pouvons établir une description des propriétés des unités géotechniques QA et QS rencontrées lors de ce sondage. En effet, des moyennes pondérées ont été calculées pour les modules pressiométriques (Em) et les limites élastiques pressiométriques (PL), correspondant respectivement aux différentes unités identifiées.

Tableau III.8: Classification des sols d'après PL (Fasc.62).

CLASSE DE SOL		DESCRIPTION	PRESSIOMETRE P_l (MPa)
ARGILES, LIMONS	A	Argiles et limons mous	< 0,7
	B	Argiles et limons fermes	1,2 - 2,0
	C	Argiles très fermes à dures	> 2,5
SABLES, GRAVES	A	Lâches	< 0,5
	B	Moyennement compacts	1,0 - 2,0
	C	Compacts	> 2,5
CRAIES	A	Molles	< 0,7
	B	Altérées	1,0 - 2,5
	C	Compactes	> 3,0
MARNES MARNO-CALCAIRES	A	Tendres	1,5 - 4,0
	B	Compacts	> 4,5

Tableau III.9 : Classification des sols selon le rapport Em/PLM.

E_m/p_{LM}	Soil type
< 5	Remolded soil
5–8	Underconsolidated or slightly remolded clays
8–12	Normally consolidated clays
12–15	Slightly overconsolidated clays
> 15	Overconsolidated clays
6–8	Immerged sands and gravels
> 10	Sands, dry and compact sands, and gravels

Les résultats obtenus après calcul sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III.10 : Récapitulatif des résultats de l'essai pressiométrique Ménard selon chaque sondage.

Sondage	Profondeur (m)	Unité	Lithologie	EM (MPa)	PL (MPa)	Description	EM/PL	Interprétation
SP10	3-8.8	Q.S	Sable moyen graveleux peu caillouteux	51.056	2.183	Moyennement compacts	23.39	Surconsolidé
	8.8-18.7	Q.A	Argile limoneuse-marneuse peu sableuse et peu graveleuse	59.076	2.817	Très fermes à dures	20.971	Surconsolidé
	18.7-26	Q.S	Sable moyen à grossier, à matrice argilo-limoneuse, contenant de faibles proportions de graviers	109.15	3.74	Compacts	29.212	Surconsolidé
SP11	4-8.35	Q.S	Sable moyen graveleux consolidé	19.549	1.273	Moyennement compacts	15.36	Surconsolidé
	8.35-12.7	Q.A	Argile peu graveleuse peu caillouteuse	53.8	2.95	Très fermes à dures	18.24	Surconsolidé

- L'unité du sable identifiée comme sable moyen graveleux peu caillouteux, située entre 3,00 m et 8,80 m de profondeur dans le sondage SP10, présente des valeurs de module pressiométrique EM et de pression limite PL nettement plus élevées que celles mesurées pour l'unité sable moyen graveleux consolidé dans le sondage SP11 (de 4,00 m à 6,85 m), bien que les profondeurs soient comparables. En l'absence d'essais complémentaires sur cette unité dans le sondage SP10 permettant de valider la fiabilité des valeurs obtenues, les résultats du sondage SP11 sont jugées plus représentatives du comportement global de cette unité sableuse.

Tableau III.11 : Récapitulatif des résultats de l'essai pressiométrique Ménard

Unité	Lithologie	EM(MPa)	PL(MPa)	Description	EM/PL	Interprétation
Q.S	Sable moyen graveleux consolidé	19.549	1.273	Moyennement compacts	15.36	Surconsolidé
Q.A	Argile, peu sableuse, localement graveleuse à faiblement caillouteuse	57.465	2.858	Très fermes à dures	20.11	Surconsolidé

- **Estimation du poids volumique**

Le choix des poids volumiques utilisés dans cette étude repose sur les valeurs typiques communément admises dans la littérature géotechnique.

Paramètres	Sables	Argiles
γ	18 kN/m^3	10 à 20 kN/m^3
γ_d	14 à 18 kN/m^3	10 à 20 kN/m^3
γ_{sat}	19 à 22 kN/m^3	19 à 22 kN/m^3
γ_s	26 à 30 kN/m^3	26 à 30 kN/m^3
γ'	9 à 12 kN/m^3	9 à 12 kN/m^3
n	0,25 à 0,50	0,20 à 0,80
e	0,5 à 1	0,3 à 1
w	1 à 15 %	10 à 20 %

D'où on prend : $\gamma_{Sable} = 18\ KN/m^3$ et $\gamma_{Argile} = 20\ KN/m^3$

- **Calcul de la cohésion**
  - Cohésion drainée pour les sols non cohésifs

Les sols non cohésifs, tels que les sables et les graviers, tirent leur résistance au cisaillement du frottement interparticulaire et non d'une véritable cohésion. (Terzaghi, Peck, Mesri, 1996) [44]

Donc la cohésion pour l'unité de sable est nulle : C'=0

  - Cohésion non drainée pour les sols cohésifs

Pour déterminer la cohésion non drainée de l'unité d'argile, on utilise la corrélation proposée par Ménard, (1978) :

- $\mathrm{Pl} - \mathrm{P_0} < 0.3\ \mathrm{MPa}\ ;\ \mathrm{cu} = (\mathrm{Pl} - \mathrm{P_0}) / 5.5$
- $0.3\ \mathrm{MPa} < \mathrm{Pl} - \mathrm{P_0} < 1\ \mathrm{MPa}\ ;\ \mathrm{cu} = (\mathrm{Pl} - \mathrm{P_0}) / 12 + 0.03$
- $1\ \mathrm{MPa} < \mathrm{Pl} - \mathrm{P_0} < 2.5\ \mathrm{MPa}\ ;\ \mathrm{cu} = (\mathrm{Pl} - \mathrm{P_0}) / 35 + 0.85$

Avec P_0 =0,8 Pl

Donc :

P_0 =0,8 × 2.858 = 2.286 ; 0.3 MPa $< 0.572 <$ 1 MPa ; cu $=$ 0.572 / 12 $+$ 0.03=0.078 MPa

Unité	Lithologie	PL (MPa)	Description	Cohésion (C)(KPa)
QS	Sable moyen graveleux consolidé	1.793	Moyennement compacts	0
QA	Argile, peu sableuse, localement graveleuse à faiblement caillouteuse	2.858	Très fermes a dures	78

- **Calcul de l'angle de frottement (φ)**

La corrélation utilisée entre l'angle de frottement (φ) et les résultats de l'essai pressiométrique Ménard est :

Ménard, in Baguelin et al. (1978) : $\varphi = 4{,}0\,.\,log_2\left(\frac{pl}{2{,}5}\right) + 24$

D'où : $\varphi = 13{,}3\,.\,log_{10}\left(\frac{pl}{2{,}5}\right) + 24$

Unité	Lithologie	PL (KPa)	Description	Angle de frottement (φ)
QS	Sable moyen graveleux consolidé	1273	Moyennement compacts	33.40°
QA	Argile, peu sableuse, localement graveleuse à faiblement caillouteuse	2858	Très fermes a dures	38.073°

- **Calcul du module de déformation (E)**

En utilisant les résultats des essais pressiométriques de type Ménard, la formule du module de déformation est la suivante :

$$E = E_M/\alpha$$

Tel que : α, coefficient rhéologique dépend du type de sol (Briaud, 1992), déterminer dans le tableau ci-dessous :

Soil type	Peat		Clay		Silt		Sand		Sand and gravel	
	E/p_L^*	α	E/p_L^*	α	E/p_L^*	α	E/p_L^*	α	E/p_L^*	α
Over-consolidated			> 16	1	> 14	2/3	> 12	1/2	> 10	1/3
Normally consolidated	For all values	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Weathered and/or remoulded			7-9	1/2		1/2		1/3		1/4
Rock	Extremely fractured α = 1/3				Other α = 1/2			Slightly fractured or extremely weathered α = 2/3		

Unité	Lithologie	EM (MPa)	Description	α	E (MPa)
QS	Sable moyen graveleux consolidé	19.549	Surconsolidé	1/2	39.098

QA	Argile, peu sableuse, localement graveleuse à faiblement caillouteuse	57.465	Surconsolidé	1	57.465

- **Estimation de coefficient de poisson (v)**

L'estimation de coefficient de poisson est basée sur les intervalles typiques proposés par Bowles (1986), Kulhawy et Mayne (1990), Lambe et Whitman (1979), pour différents types de matériaux :

Tableau III.12 : valeurs typiques de coefficient de poisson.

Material	Poisson's ratio
Saturated clays (undrained)	0.5
Saturated clays (drained)	0.2–0.4
Dense sand	0.3–0.4
Loose sand	0.1–0.3
Loess	0.1–0.3
Ice	0.36
Aluminum	0.35
Steel	0.29
Concrete	0.15

Unité	Coefficient de poisson (v)
Sable	0.33
Argile	0.34

- **Calcul de coefficient de poussée de terrain au repos K_0**
  - Le coefficient de poussée de terrain au repos K_0 est calculé pour l'unité de sable par la formule de Jaky (1948) : $K_0 = 1 - \sin(\varphi)\ (1 + \frac{2}{3}\sin\varphi)$
  - Le calcul de coefficient de poussée de terrain au repos K_0 pour l'unité d'argile dépend de son état de consolidation, dans notre cas, l'unité d'argile selon le rapport EM/PL est surconsolidée. En l'absence de données expérimentales directes pour le tronçon étudié (œdomètre ou historique de charge), une valeur de OCR = 2 a été adoptée, conformément aux plages typiques proposées par Terzaghi et al. (1996) et Mayne (2007), la formule utilisée pour calculer le de coefficient de poussée de terrain au repos K_0 est celle de Brooker and Ireland (1965) ; European Committee for Standardization (1994) :

$$K_0 = (1 - \sin\varphi)\sqrt{OCR}$$

Unité	Angle de frottement φ	Coefficient de poussée de terrain au repos K_0
Sable	33.40°	0.4
Argile	38.073°	0.542

III.3.4.3. Détermination des paramètres géotechniques du calcaire - des socles (S) et les socles altérés (SA)

- Les choix des valeurs des paramètres géomécaniques tels que le Geological Strength Index (GSI), le facteur lithologique (mi) , le facteur de perturbation D, ainsi que le ratio (MR) ont été effectués sur la base des abaques et tableaux présentés en **Annexe 3**.

- **Logiciel RocData**

RSData est une boîte à outils polyvalente pour l'analyse des données de résistance des roches et des sols, ainsi que pour la détermination des enveloppes de résistance et d'autres paramètres physiques (Rocscience, 2021) [40].

Les résultats du calcul des paramètres géotechniques obtenus par logiciel ROCK DATA sont illustrés dans l'Annexe 4.

- Le coefficient de poussée de terrain au repos K_0 est calculé pour les roches selon AFTES par la formule suivante : $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$

Unité	Poids volumique γ (KN/m^3)	Cohésion C (KPa)	Angle de frottement φ (°)	ν	K_0	Module de déformation E (MPa)	Resistance (MPa)
Calcaire	25	85	55.18	0.3	0.43	20000	40
Socle altéré (SA)	27	42	37.78	0.35	0.54	3675	10.5
Socle (S)	27	94	51.41	0.3	0.43	12825	28.55

III.3.4.4. Tableau récapitulatif

Tableau III.12 : Tableau récapitulatif des paramètres géotechniques des unités.

Unité	Profondeurs (m)	γ (KN/m^3)	C (KPa)	φ (°)	E (MPa)	ν	K0
Remblai	0-1	17	5	20	10	0.4	0.6
Argile	1-3.7 ; 8.3-10.4	20	78	38.073	57.465	0.34	0.542
Calcaires	3.7-7	25	85	55.18	20000	0.3	0.43
Sable	7-8.3 ;10.4-14	18	0	33.40	39.098	0.33	0.4
Socle altéré	14-19.3	27	42	37.78	3675	0.35	0.54
Socle	19.3-28	27	94	51.41	12825	0.3	0.43

III.3.5. Interprétation des résultats

III.3.5.1. Interprétation géologique générale du tracé (PK 38+837.159 à PK 39+137.159)

Après l'analyse et l'interprétation des sondages et autres essais, tant in situ qu'en laboratoire, réalisés lors des différentes campagnes de reconnaissance géologique et géotechnique, il a été constaté que le tracé étudié, situé entre les PK 38+837.159 et 39+137.159, se développe sur des terrains métamorphiques du Massif d'Alger, avec des couvertures variant de 14 m à 22 m.

Les terrains métamorphiques se caractérisent par une haute hétérogénéité et anisotropie, formant un modèle géologique complexe. Ce modèle est caractérisé par une énorme variabilité de géomatériaux au long des sondages, incluant des passages de calcaires métamorphiques, schistes, quartzites métamorphiques et probablement un granite rose clair à texture granulée, avec des phénocristaux de quartz et plagioclase. Tout au long du profil longitudinal, des zones potentielles de discontinuités structurelles ont été signalées.

Les principales unités stratigraphiques qui conditionnent l'excavation de ce tracé sont les formations suivantes : les remblais récents (R) présents en surface sur l'ensemble du tracé, les argiles brunes à rougeâtres avec des passages à argiles vaseuses(QA), les sables moyens bruns à noirâtres(QS), les poudingues et grès durs du Miocène(TB), les marnes gris bleu ou gris foncé du Pliocène (TM) qui pourront conditionner ponctuellement les excavations de PV8, et enfin, le socle primaire (S), composé de schistes, quartzites (QZ), calcaires métamorphiques, et gneiss largement injectés de roches granitiques ou granite (γ), ainsi que les zones d'altération de schistes (SA) constituées d'argile, sable et cailloutis.

III.3.5.2. Interprétation des résultats des essais in situ et des essais de laboratoire réalisés

Les résultats des essais pressiométriques indiquent une variation significative des propriétés géotechniques en fonction de la profondeur. Les premières couches superficielles montrent des sols modérément compacts à fermes, avec des valeurs de rigidité variant de modérées à fortes. Cependant, ces sols, bien que compacts, peuvent encore subir des déformations sous charges élevées. À partir de 25 mètres de profondeur, la rigidité augmente de manière marquée, suggérant la présence de formations rocheuses denses et peu compressibles. Néanmoins, des hétérogénéités importantes dans les résultats des sondages révèlent des différences notables.

Du point de vue hydrogéologique, les essais de perméabilité montrent une faible à moyenne perméabilité dans les couches profondes, indiquant des sols et roches consolidés. Cependant, une zone de perméabilité élevée a été identifiée entre 25 et 30 mètres de profondeur, suggérant la présence de fractures ou de failles, ce qui pourrait entraîner des infiltrations d'eau.

Les tests de laboratoire révèlent des matériaux à faible porosité et une densité élevée. Les résistances à la compression varient selon la lithologie, les schistes satinés ayant une résistance modérée, tandis que et le calcaire cristallin présente une résistance plus élevée. En termes d'abrasivité, les matériaux sont globalement abrasifs, Par ailleurs, les essais de dureté montrent que les matériaux se classent dans les catégories tendres à moyennement dures, ce qui suggère que, bien que l'excavation puisse être relativement facile, l'usure des outils sera significative.

III.3.5.3. Interprétation géotechnique du tronçon étudié en BIM (PK 38+930 à PK 38+980)

Le profil géotechnique rencontré, composé d'une alternance marquée entre remblais, argiles, calcaires, sables, et formations rocheuses altérées puis saines, introduit une variabilité mécanique significative le long du tracé. Cette hétérogénéité, caractérisée par la succession de matériaux meubles et cohésifs (remblai, QA, QS), de niveaux plus compétents (calcaire) et de substrats rocheux plus profonds (SA et S), influence directement les conditions de creusement. Chaque transition entre couches induit des changements des propriétés mécaniques, ce qui complique la prévision du comportement du terrain sous l'effet du soutènement et du relâchement de contraintes. Par exemple, le passage des argiles plastiques aux calcaires rigides, puis aux sables non cohésifs, engendre des contrastes de déformation et de stabilité pouvant provoquer des tassements différentiels, et des mouvements d'eau dans les matériaux perméables comme les sables. Ces variations requièrent une adaptation continue des méthodes d'excavation, de soutènement, et de gestion des eaux.

III.3.6. Profil géologique

Le profil géologique est présenté dans la figure III.12.

III.3.7. Profil géotechnique

La figure III.13 présente le profil géotechnique.

III.4. CONCLUSION

L'étude géotechnique réalisée dans le cadre de ce projet a permis de déterminer les différentes caractéristiques et paramètres des formations géologiques rencontrées. Cette étude repose sur l'exploitation des données issues de la campagne de reconnaissance, incluant les sondages carottés rotatifs, les essais pressiométriques et de perméabilité, complétés par une série d'essais d'identification physique et mécanique effectués en laboratoire sur des échantillons prélevés à diverses profondeurs.

En raison du manque de résultats d'essais, une analyse complémentaire a été menée à partir des données bibliographiques disponibles et à l'aide de corrélations empiriques. À cet effet, les paramètres géotechniques estimés doivent être considérés avec beaucoup de précautions.

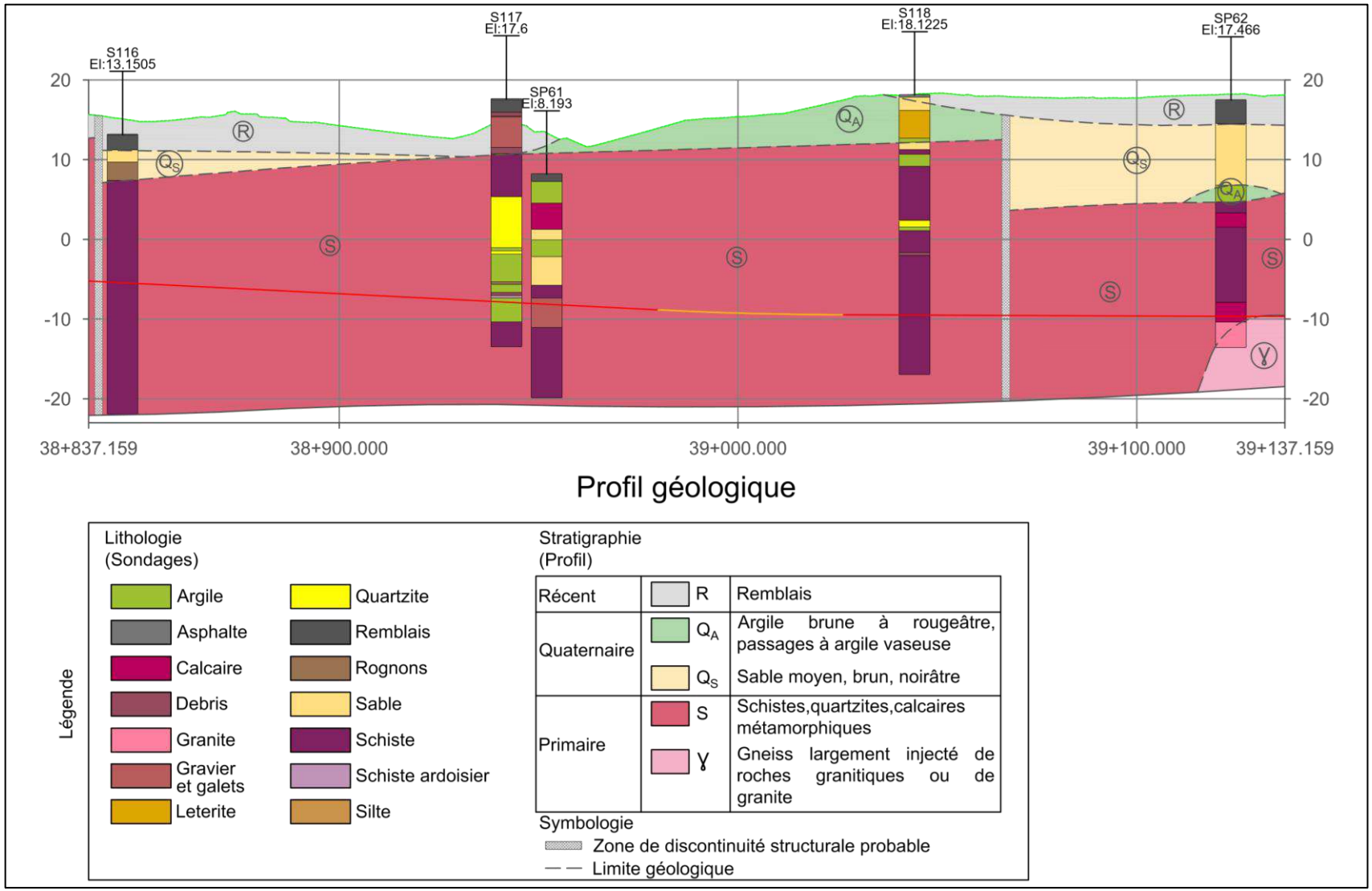


Figure III.12 : Profil géologique

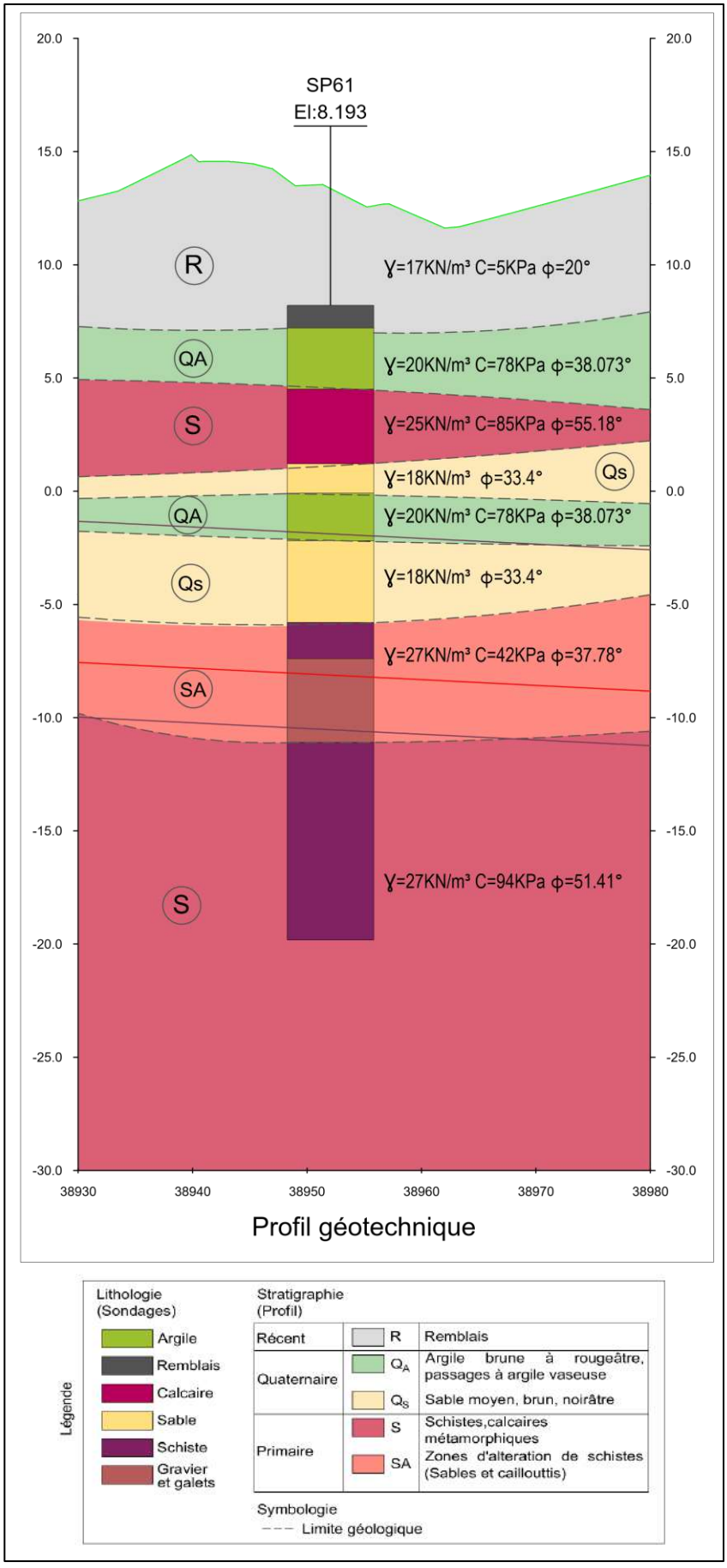


Figure III.13 : Profil géotechnique

CHAPITRE IV
ÉLABORATION DE LA MAQUETTE 3D

IV.1. INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, nous proposons un flux de travail BIM visant à modéliser un tronçon de tunnel de métro de l'extension Place des Martyrs – Bab El Oued – Chevalley, situé dans une courbe d'un rayon de 300 m, entre les PK 38+930 et 38+980. Ce workflow sera ainsi présenté, depuis l'acquisition des données contextuelles jusqu'à la génération d'un modèle détaillé.

L'accent sera mis sur l'exploitation des atouts spécifiques de chaque logiciel utilisé, à savoir : Civil 3D, InfraWorks, Inventor Professional, et Revit, ainsi que sur l'interopérabilité entre eux. Ces logiciels, tous issus de la suite logicielle Autodesk, font l'objet d'une présentation détaillée en annexe 5.

Le schéma ci-après synthétise le workflow mis en œuvre dans ce chapitre pour l'élaboration de la maquette BIM du tunnel.

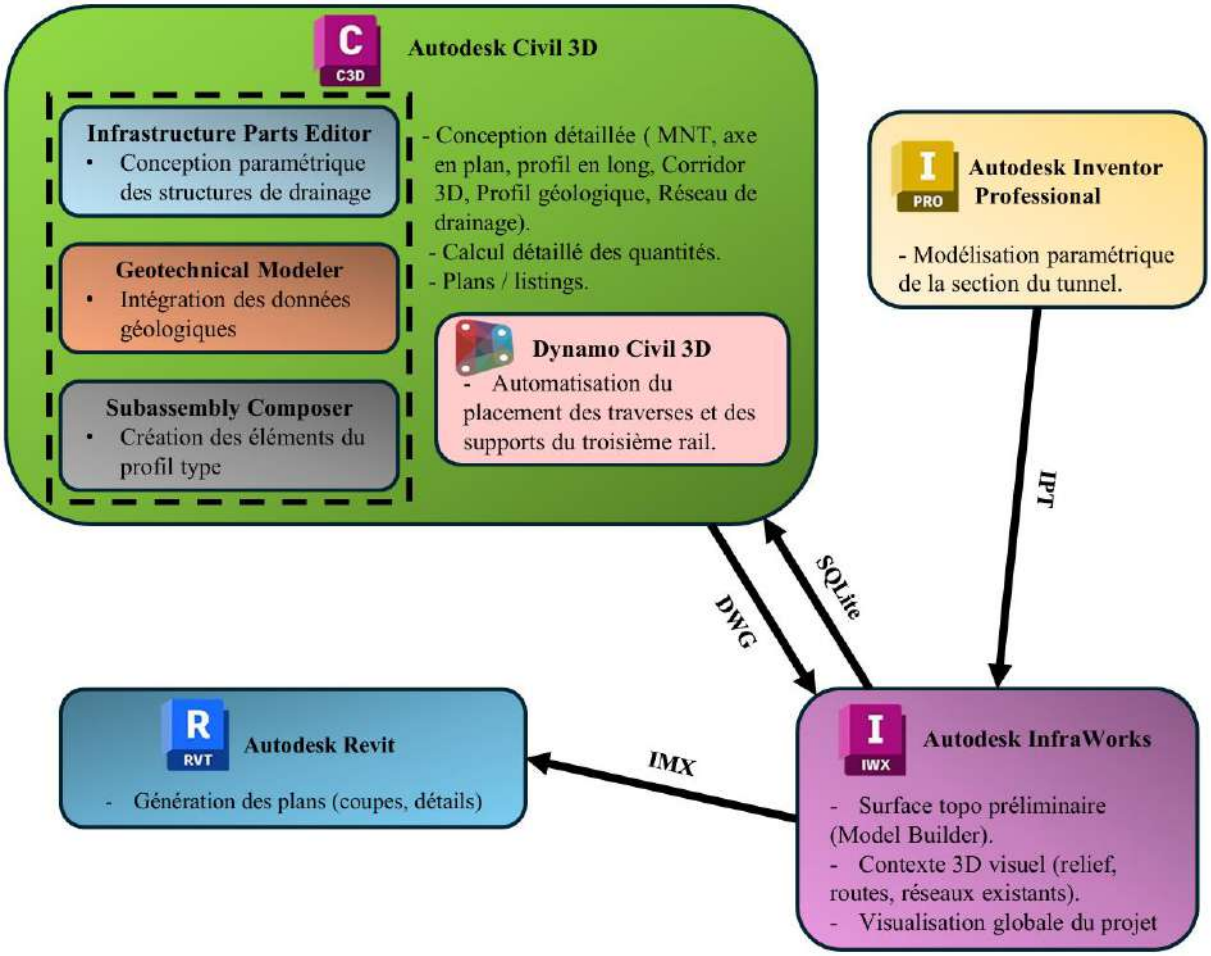


Figure IV.1 : Workflow général pour la modélisation BIM du tunnel.

IV.2. FLUX DE TRAVAIL (WORKFLOW) BIM POUR LA MODÉLISATION DU TUNNEL

IV.2.1. Préparation des données topographiques

IV.2.1.1. Importation préliminaire depuis InfraWorks

La première étape a consisté à générer un modèle 3D contextuel dans Autodesk InfraWorks

à l'aide de l'outil Model Builder. Après délimitation manuelle de la zone d'étude sur l'interface cartographique et sélection du système de coordonnées projetées (voir Figure IV.2), l'outil a agrégé automatiquement des calques de données géospatiales via le cloud pour créer un modèle composite de la zone spécifiée.

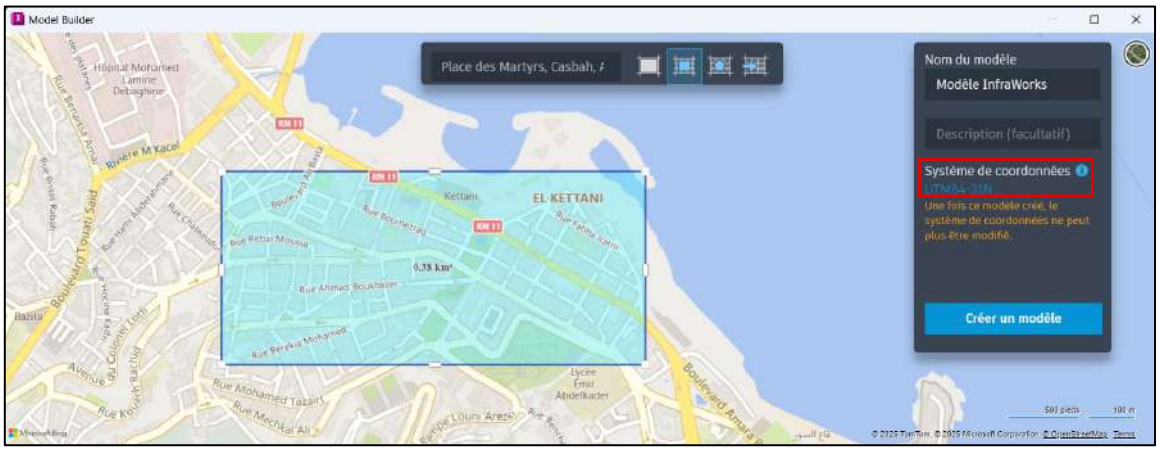


Figure IV.2 : Délimitation de la zone d'étude dans Model Builder (source : capture d'écran InfraWorks).

Le modèle généré comprend :

- Des données d'élévation issues des SRTMGL1 à 30 mètres de résolution (Shuttle Radar Topography Mission), combinées à une imagerie satellite Microsoft Bing Maps drapée sur le terrain du modèle ;
- Le relief naturel et les éléments anthropiques (bâtiments, végétation) ;
- Les réseaux hydrographiques (rivières, lacs) et viaires (routes, chemins), extraits des bases de données OpenStreetMap (OSM) ;
- Des bâtisses 3D génériques (volumétries simplifiées) issues des données OSM ;



Figure IV.3 : Modèle 3D contextuel généré dans InfraWorks (relief, réseaux, bâtiments).

La surface MNT d'InfraWorks a été importée dans Civil 3D (Figure IV.4) via l'onglet dédié à l'interopérabilité, qui facilite l'échange de données entre les deux logiciels.



Figure IV.4 : Surface MNT importée dans Civil 3D

IV.2.1.2. Utilisation du levé topographique haute précision

Même si le modèle InfraWorks a fourni un contexte visuel initial, les imprécisions inhérentes aux données ouvertes (résolution SRTMGL1 à 30 m, positionnement approximatif des éléments OSM) ont rendu nécessaire le recours à un levé topographique in situ, réalisé par des géomètres.

Ce levé, fourni sous forme d'un semis de points XYZ, a été adopté comme base pour créer une surface dans Civil 3D, précise et fidèle aux réalités du terrain, et qui garantit une précision centimétrique essentielle pour la conception détaillée du tunnel.

IV.2.2. Création de la Surface dans Civil 3D

La surface topographique a été générée dans Civil 3D selon les étapes suivantes :

- Configuration du système géodésique en WGS84/UTM Zone 31N.

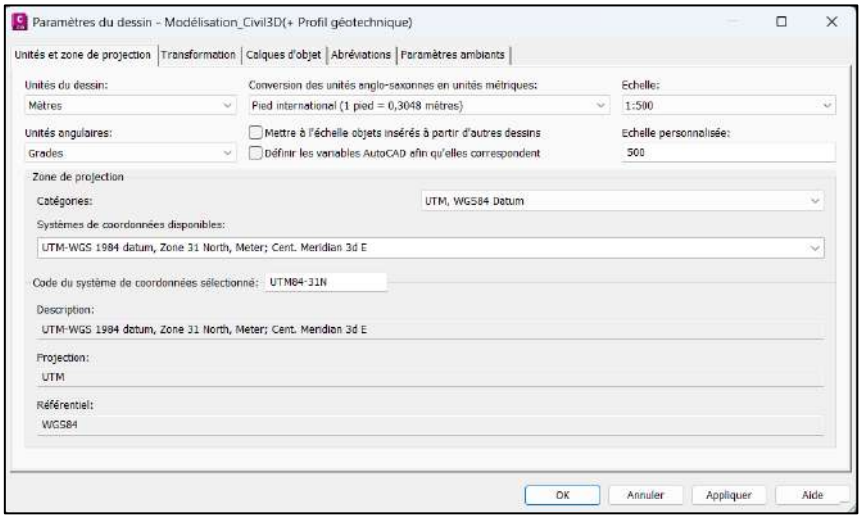


Figure IV.5 : Configuration du système de coordonnées WGS 84 / UTM Zone 31N dans Civil 3D.

- Importation du fichier texte (.txt) après définition du format des colonnes (X, Y, Z) et vérification des unités (mètres)

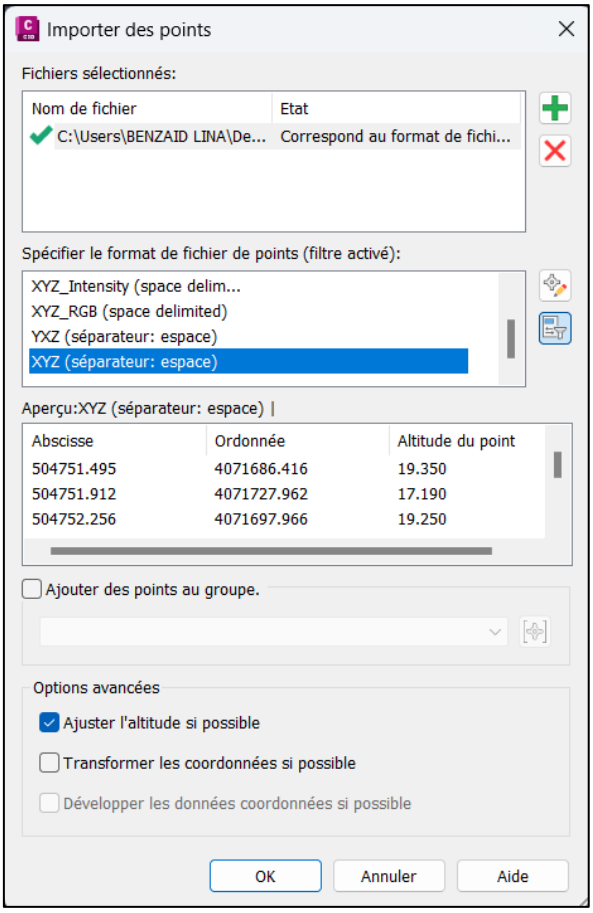


Figure IV.6 : Configuration de l'import des points XYZ dans Civil 3D.

- Nettoyage des données par suppression des points aberrants (végétation, artefacts)
- Génération du modèle numérique de terrain (MNT) à l'aide de l'outil "Créer une surface à partir d'un groupe de points"

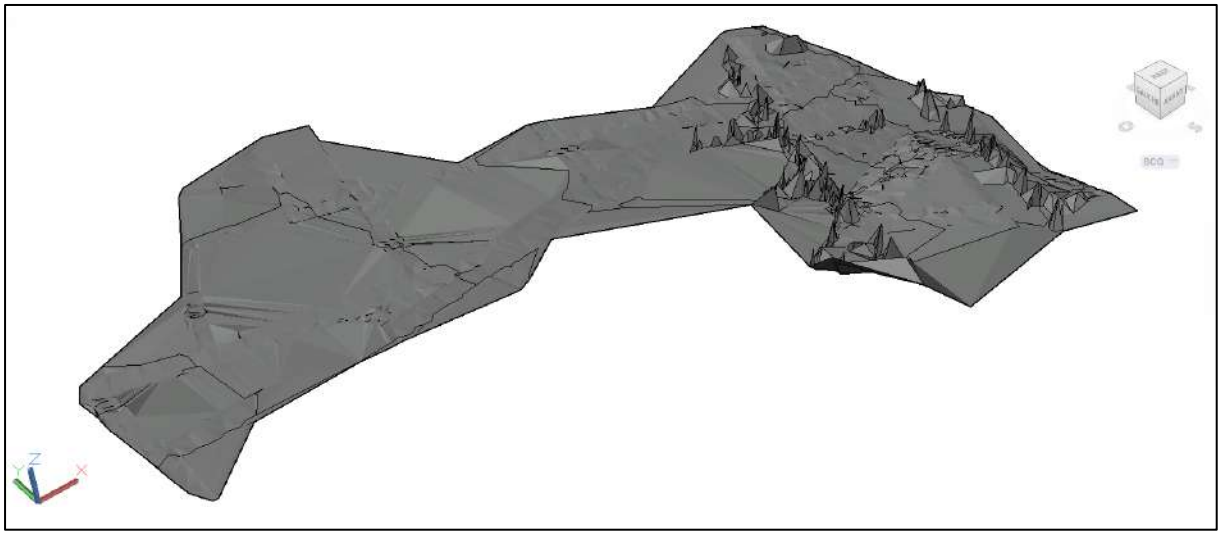


Figure IV.7 : Surface MNT brute avec pics aberrants.

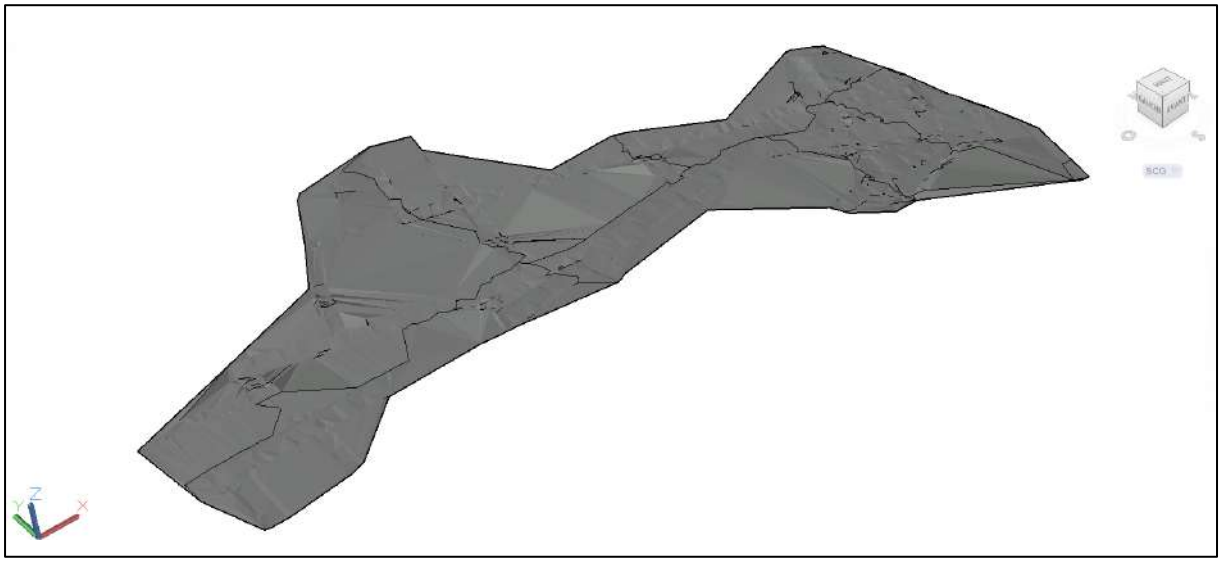


Figure IV.8 : surface MNT finale, après suppression des points aberrants.

IV.2.3. Intégration des données géologiques et géotechniques

L'extension « Geotechnical Modeler » de Civil 3D a été utilisée pour modéliser les différentes couches géologiques du site. Cette solution permet de générer une base de données géologique à partir de deux fichiers CSV structurés :

- Localisation des forages (Location Details.csv) ;
- Stratigraphie (Field Geological Descriptions.csv) ;

Pour garantir une importation réussie des données, les noms des fichiers (Location Details.csv et Field Geological Descriptions.csv), ainsi que les en-têtes de colonnes, doivent être strictement respectés, conformément à l'encodage détaillé dans les tableaux 01 et 02 de l'Annexe 5. Tout écart entraînera l'échec de la génération de la base de données géologique.

Une fois importés, les sondages apparaissent positionnés avec précision sur le modèle 3D du terrain (Figure IV.9), permettant une analyse visuelle immédiate de la répartition géologique du site.

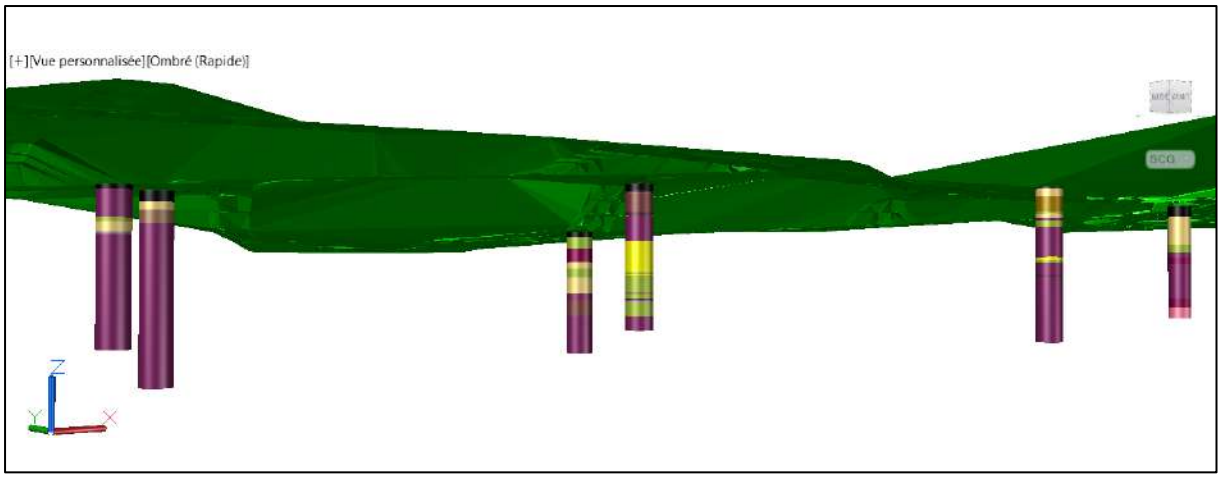


Figure IV.9 : Visualisation des sondages importés dans Civil 3D.

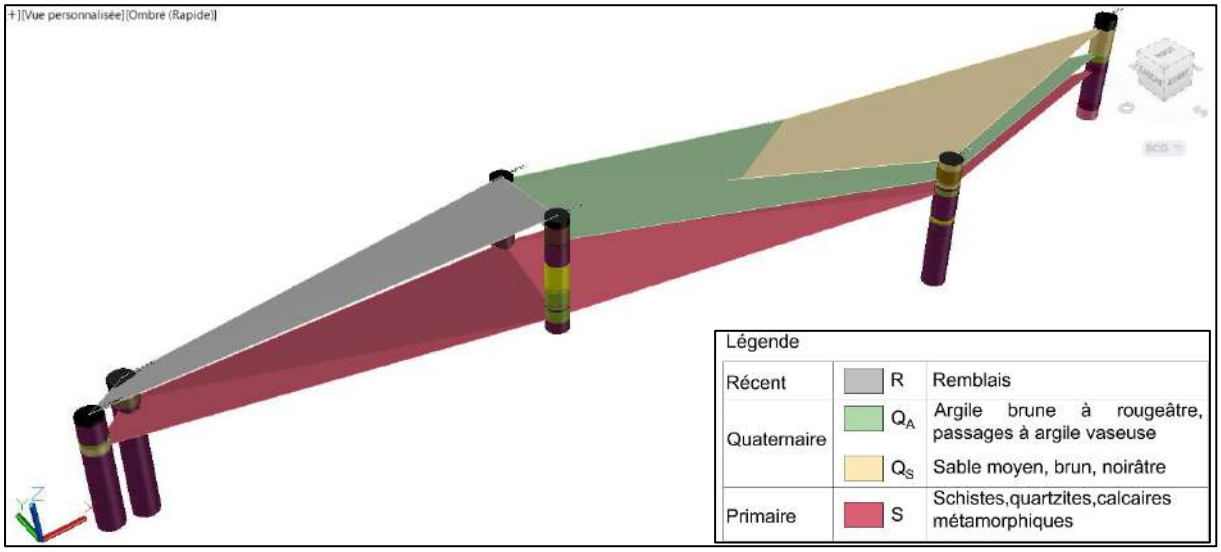


Figure IV.10 : Visualisation des strates géologiques interpolées.

IV.2.4. Définition de l'Axe en Plan, du Profil en Long et du Profil Type

IV.2.4.1. Définition de l'Axe en Plan (Tracé en Plan)

L'alignement horizontal du tunnel a été tracé dans AutoCAD Civil 3D à partir du listing de la géométrie de l'axe en plan (voir Tableau 03 de l'Annexe 5), contenant les coordonnées (X, Y), les rayons de courbure et les points kilométriques (PK) de référence.

L'outil « Créer un alignement à partir de polygone » a permis de tracer l'axe en plan du tunnel. La Figure suivante illustre l'alignement final, annoté avec les points kilométriques (PK) et le rayon de courbure.

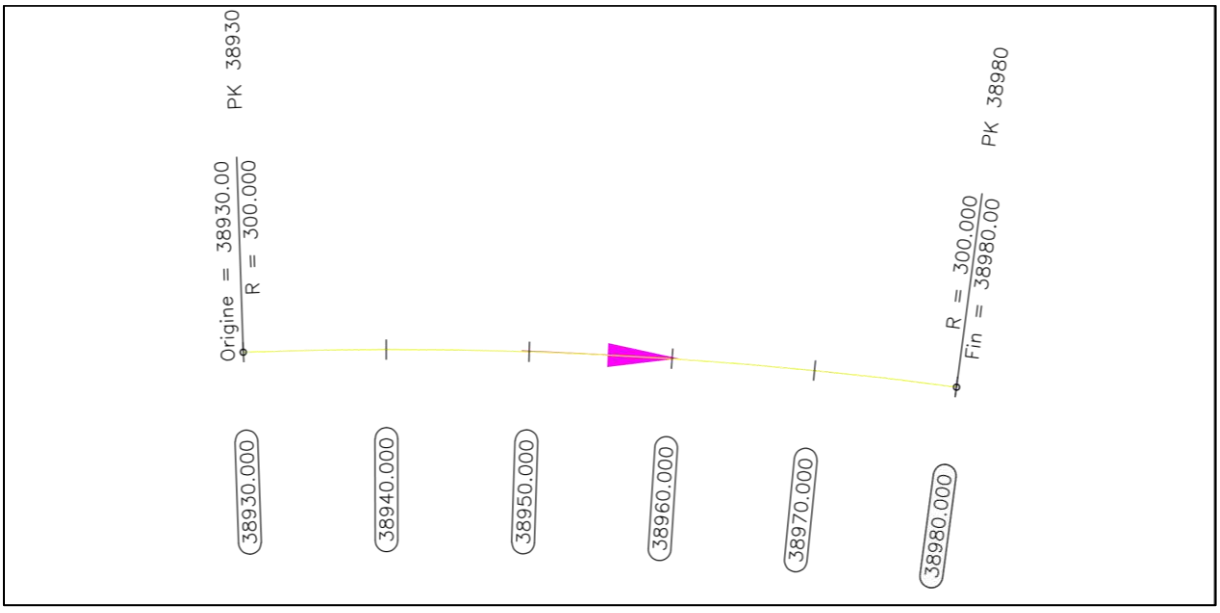


Figure IV.11 : Visualisation de l'axe en plan de tunnel dans Civil 3D.

IV.2.4.2. Élaboration du Profil en Long

Le profil en long a été généré dans AutoCAD Civil 3D à l'aide de l'outil « Créer une ligne de profil en long de surface ». La ligne rouge du projet a été conçue comme une droite inclinée

avec une pente constante de -2,524 %, conformément aux données du listing extraites du Tableau 04 de l'Annexe 5.

Les cotes de référence ont été définies manuellement :

- Point de départ : PK 38+930, altitude -7,565 m ;
- Point d'arrivée : PK 38+980, altitude -8,827 m.

Le profil en long correspondant est présenté dans la Figure 01 de l'Annexe 5.

IV.2.4.3. Création du Profil Type

- Modélisation de l'élément de profil type dans Subassembly Composer.

Bien que la bibliothèque d'AutoCAD Civil 3D propose par défaut des éléments de profil type prédéfinis pour les routes et les voies ferrées, elle ne propose pas de composants prédéfinis adaptés aux sections fermées de tunnels, nécessitant l'usage d'Autodesk Subassembly Composer. Cet outil, dédié à la création d'éléments de profil type personnalisés, offre une flexibilité avancée pour répondre aux spécificités du projet.

La géométrie du tunnel a été définie dans l'interface graphique de Subassembly Composer par l'assemblage successif d'éléments de base (points, links, curves, shapes), comme illustré à la Figure IV.13. Ce processus linéaire repose sur une logique séquentielle, où chaque entité dépend de la création des précédents.

Des codes spécifiques ont été affectés aux liens et aux formes afin de faciliter leur identification et leur gestion dans les étapes ultérieures de la modélisation. En particulier, le contour extérieur du tunnel, divisé en partie supérieure (voûte) et inférieure (radier), a été structuré avec des codes distincts, permettant la génération ultérieure des surfaces et le calcul des volumes de matériaux, à savoir :

- « Top_Outside» pour les lignes de la voûte (Figure IV.12).
- « Datum_Outside » pour les lignes du radier (Figure IV.12).

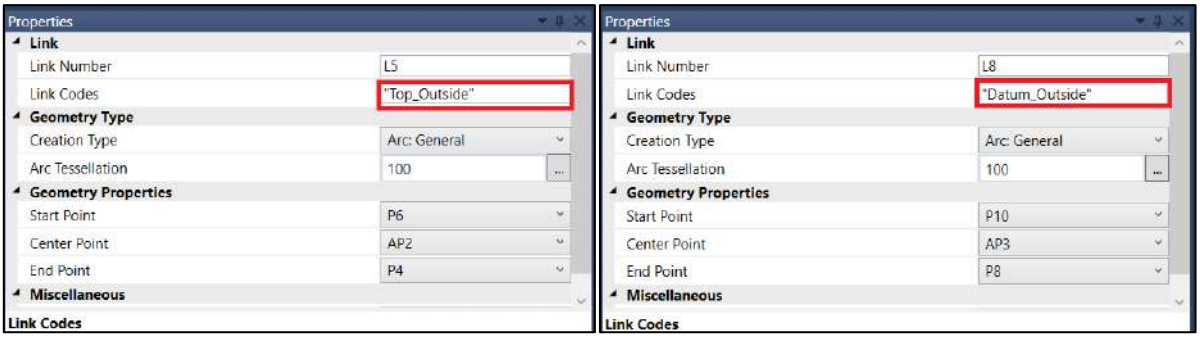


Figure IV.12 : Contour extérieur codé (voûte « Top_Outside » / radier « Datum_Outside »).

Les structures intérieures (dalles, rails, etc.) ont également été modélisées via l'outil selon une méthodologie similaire : en positionnant les points par leurs coordonnées, en les reliant entre eux, puis en définissant des surfaces et en attribuant des codes dédiés.

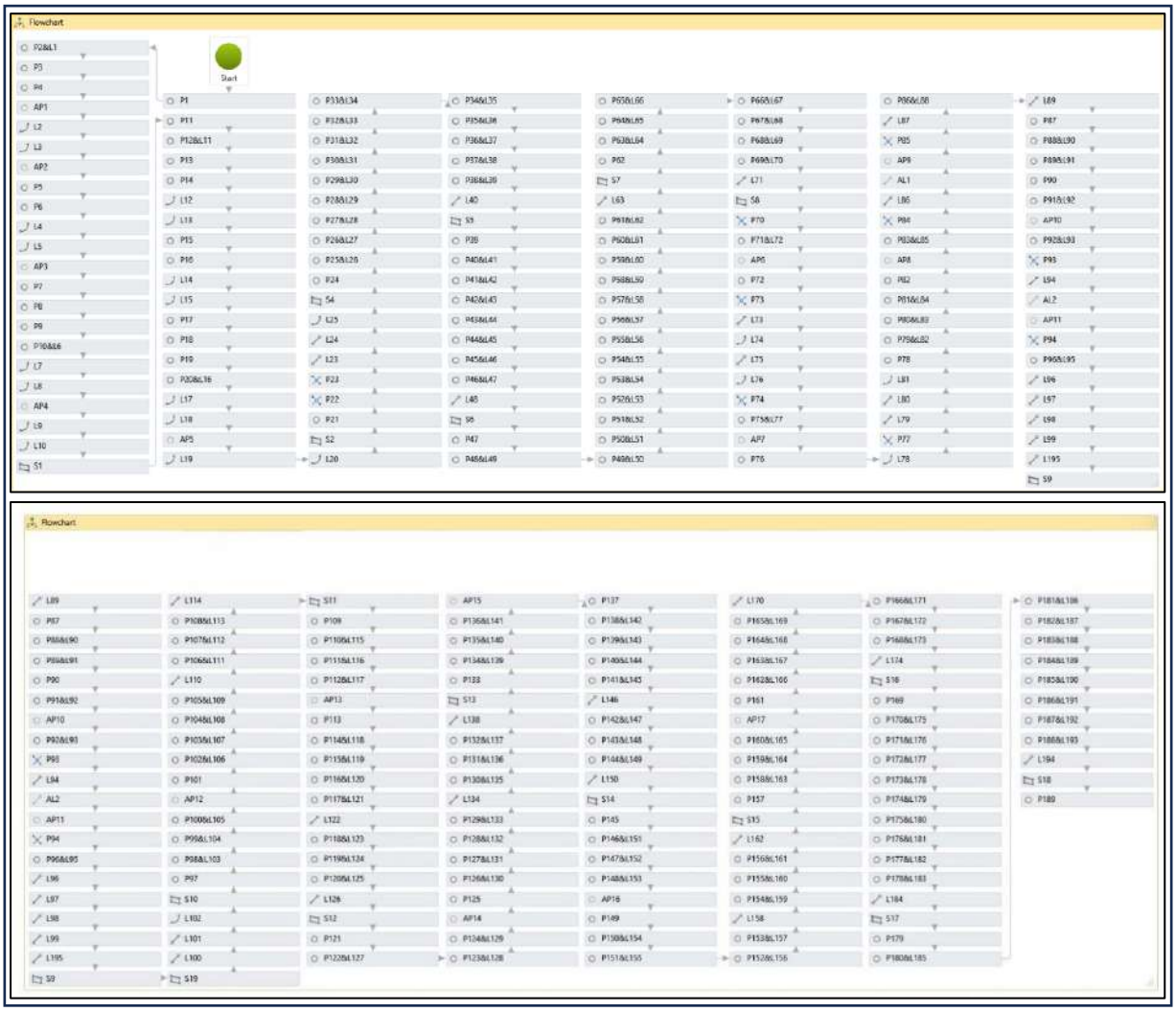


Figure IV.13 : Processus de création géométrique dans Subassembly Composer.

La Figure suivante présente l'élément de profil type final, modélisé sous Subassembly Composer.

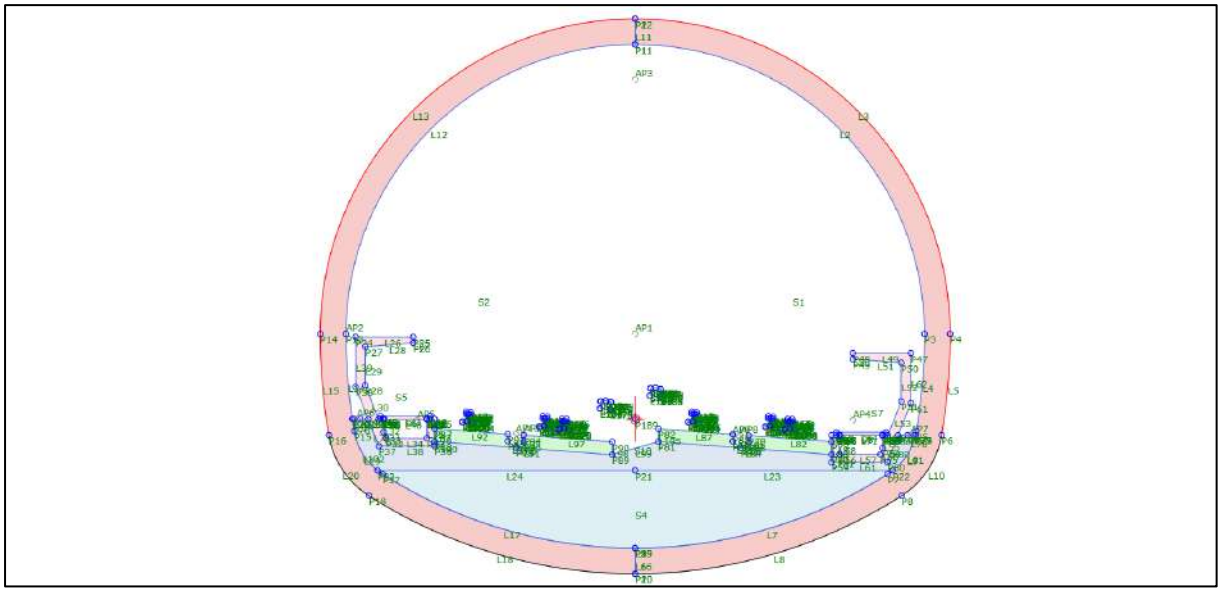


Figure IV.14 : Élément de profil type du tunnel créé avec Subassembly Composer.

- Export de l'élément de profil type dans Civil 3D

Une fois la géométrie définie et les codes attribués l'étape suivante consiste à enregistrer l'élément personnalisé au format (.pkt) afin qu'il puisse être intégré dans Autodesk Civil 3D.

Dans Civil 3D, on accède aux palettes d'outils, où l'on crée une nouvelle palette. Le fichier (.pkt) est ensuite importé dans cette dernière à l'aide de la commande « Importer des éléments de profil type ». Une fois l'importation effectuée, l'élément personnalisé devient disponible dans la palette nouvellement créée et peut être utilisé pour composer un profil type (Assembly).

Le profil type est ensuite créé via la commande « Créer un profil type », qui permet d'insérer une ligne de base sur laquelle l'élément personnalisé importé depuis Subassembly Composer sera ajouté.

Le profil type de tunnel créé est illustré dans la figure suivante.

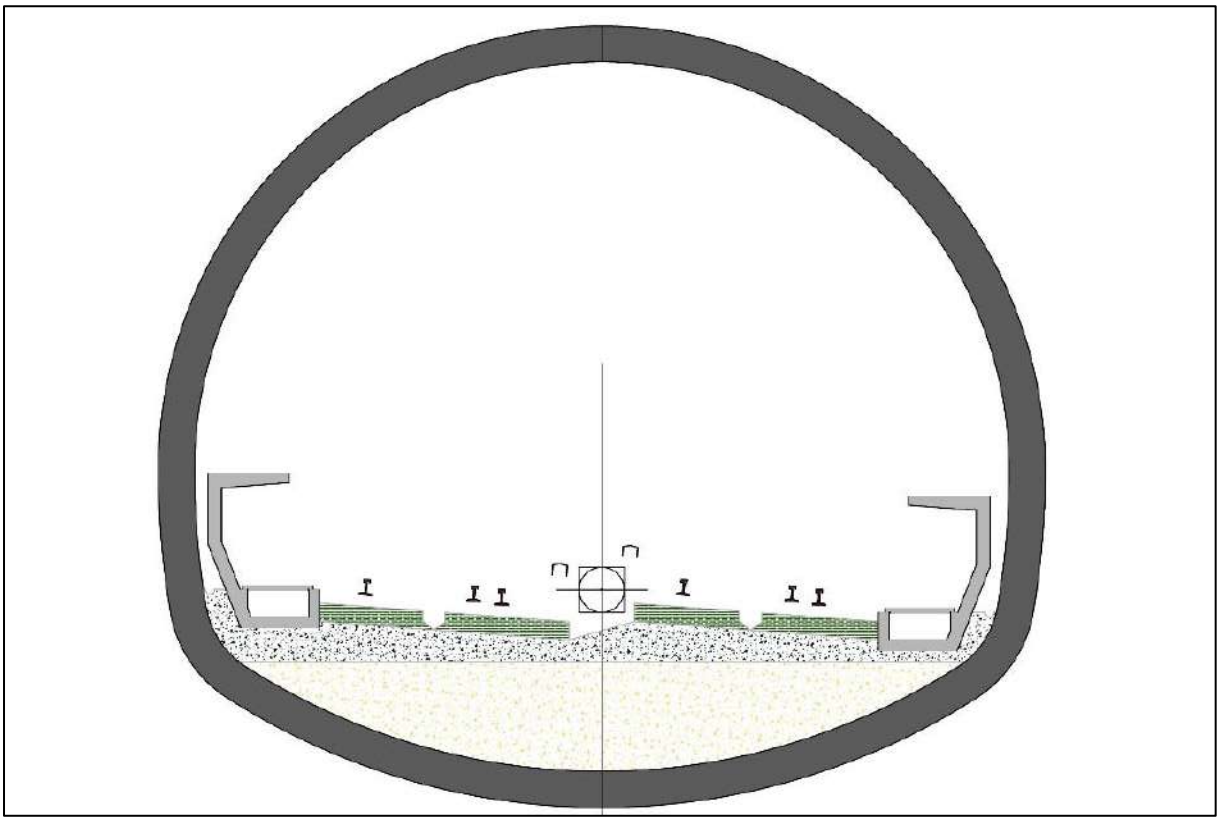


Figure IV.15 : Profil type créé dans Civil 3D à l'aide de l'élément conçu dans Subassembly Composer.

Remarque : Les traverses et les supports de rails de courant ne sont pas représentés dans le profil type ci-dessus, car dans Civil 3D, le profil type est conçu pour modéliser uniquement les éléments qui seront extrudés le long de l'axe du projet. Or, les traverses et les supports nécessitent un positionnement ponctuel, ce qui explique leur absence dans cette vue.

IV.2.5. Création du Corridor 3D dans le logiciel Civil 3D

La création de projet 3D (Corridor) dans Autodesk Civil 3D repose sur l'intégration paramétrique de trois composantes clés :

- L’axe en plan (géométrie horizontale).
- Le profil en long (altimétrie projetée).
- Le profil type (section transversale).

Ces éléments sont liés via un corridor, où le profil type est placé à des intervalles donnés (tous les 1 mètre) le long de l’axe du tunnel et de la ligne rouge du profil en long. Les points définissant le profil type sont interpolés le long de l’axe, générant ainsi des lignes caractéristiques 3D (feature lines). Ces derniers vont relier les profils types placés pour former un modèle tridimensionnel continu et précis du projet.

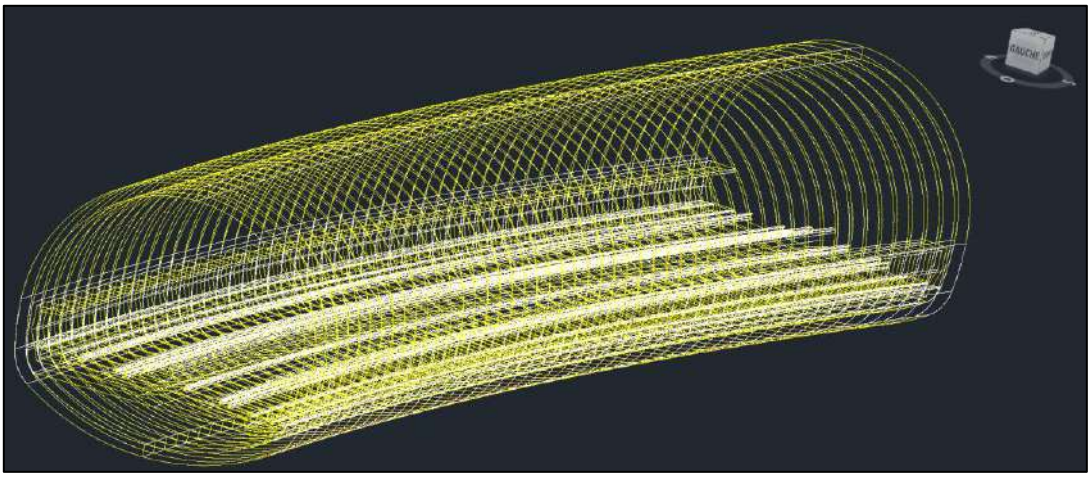


Figure IV.16 : Vue 3D du corridor du tunnel dans Civil 3D

Le logiciel génère également automatiquement les limites du tunnel en 2D, simplifiant l’édition des plans de construction et l’implantation des ouvrages annexes (Figure IV.17).



Figure IV.17 : Projection en plan des limites du tunnel

Après la création du corridor, les surfaces de la voûte et du radier ont été générées en exploitant les codes prédéfinis lors de la création du profil type (« Top_Outside » pour la voûte et « Datum_Outside » pour le radier). Cette opération s’effectue via le menu contextuel du corridor.

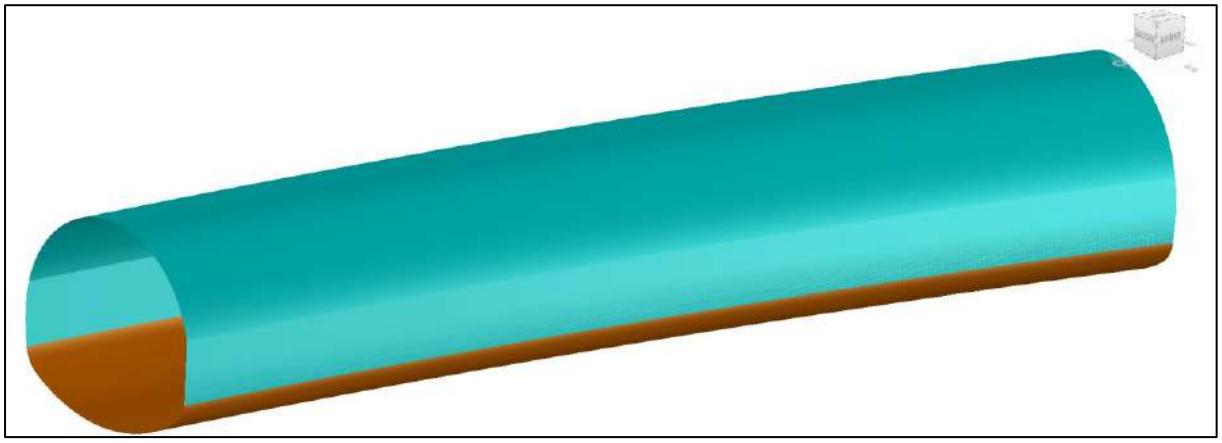


Figure IV.18 : Visualisation 3D des surfaces de la voûte (en bleu) et du radier (en marron), générées à partir du corridor.

Afin de visualiser ces surfaces, le logiciel permet d'intégrer celles de la voûte et du radier dans le profil en long, offrant une représentation claire de la position du tunnel par rapport au terrain naturel et permettant d'identifier les couches géologiques traversées (Profil géotechnique, Chapitre III).

IV.2.6. Modélisation du réseau d'assainissement

IV.2.6.1. Conception paramétrique des composants

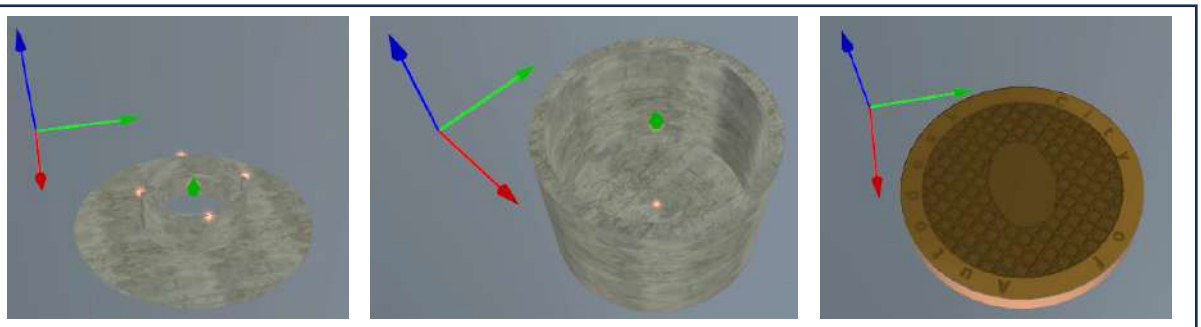
Vu que les dimensions des composants du réseau d'assainissement (regards et tuyaux) n'étaient pas disponibles dans les bibliothèques par défaut d'Autodesk Civil 3D, deux outils ont été utilisés : le générateur de composants « Part Builder » pour les tuyaux, et l'extension « Infrastructure Parts Editor » pour les regards.

- Structures de drainage (Regards)

Les regards ont été créés via l'extension « Infrastructure Parts Editor », qui permet de personnaliser la structure de drainage conformément aux spécifications du projet.

Dans cette extension, une structure de drainage se compose de trois éléments principaux où chaque composant appartient à une famille de composants paramétrable en dimensions et matériaux selon les besoins fonctionnels.

Les familles de composants (part families) sont : les structures de surface (surface structures), les structures souterraines (underground structures) et les grilles/couvercles (covers or grates).



a) surface structure b) underground structure c) cover

Figure IV.19 : Composants d'une structure de drainage

La procédure a consisté à choisir le catalogue des structures de drainage, à modifier les attributs de chacune des trois composantes des familles sélectionnées, puis à créer une nouvelle structure de drainage en intégrant les composants préalablement modifiés.

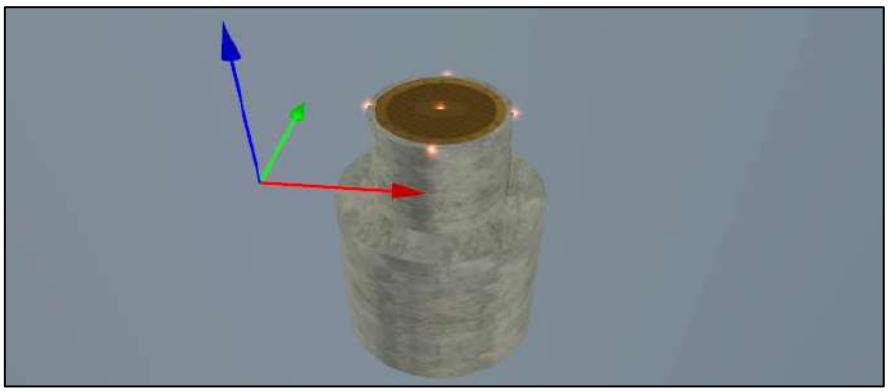


Figure IV.20 : La structure de drainage créée.

- Canalisations (Tuyaux PVC)

Concernant la tuyauterie en PVC, le générateur de composants a été utilisé afin de concevoir un composant sur mesure. Les tuyaux ont été paramétrés manuellement en spécifiant leurs caractéristiques géométriques, à savoir le diamètre intérieur de la canalisation (400 mm) ainsi que l'épaisseur de paroi (20 mm), conformément aux spécifications techniques du projet.

IV.2.6.2. Création du réseau gravitaire

Une fois les composants (regards et tuyaux) créés via « Part Builder » et « Infrastructure Parts Editor », la modélisation du réseau gravitaire a été réalisée dans Autodesk Civil 3D.

Pour cela, le catalogue du réseau de canalisations a d'abord été défini, suivi de la création d'une liste de composants. Les tuyaux PVC et les regards préalablement créés ont été ajoutés à cette liste, avec attribution des propriétés géométriques de chacun (diamètre intérieur de 400 mm et épaisseur de paroi de 20 mm pour les tuyaux, dimensions spécifiques pour les regards). Ce paramétrage est illustré dans la (Figure 02, Annexe 5).

Le réseau a été créé en alignant les tuyaux et les regards sur l'axe du tunnel à l'aide de la commande « Outils de création de réseau de canalisations ». Les regards ont été positionnés tous les 15 mètres (PK 38+932.461, PK 38+947.461, PK 38+962.461, PK 38+977.461), tandis que les canalisations ont été connectées en suivant la pente constante (-2.62 %). Le modèle 3D du réseau résultant est présenté dans la Figure suivante.

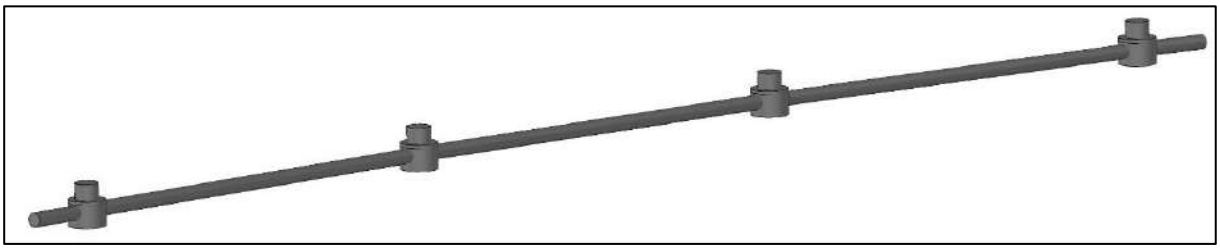


Figure IV.21 : Réseau d'assainissement en 3D.

Pour vérifier la cohérence altimétrique, le réseau a été intégré au profil en long existant via la commande « Dessiner des composants dans la ligne de profil en long ».

La Figure 03 (Annexe5) montre le profil en long avec :

- Les surfaces de voûte et de radier du tunnel
- La ligne rouge du projet
- Le terrain naturel
- Le réseau de canalisations, annoté avec les cotes clés

Cette étape a permis de vérifier l'implantation correcte du réseau d'assainissement et de valider l'absence d'interférence avec la structure du tunnel.

IV.2.7. Création des tabulations et profils en travers

La modélisation du corridor et du réseau d'assainissement étant finalisée, l'étape suivante consiste à exploiter les données pour générer des documents techniques exploitables : définition des tabulations (Sample Lines), génération des profils en travers et calcul des quantités (voir chapitre VIII)

IV.2.7.1. Création des tabulations (Sample lines)

Les tabulations sont des lignes perpendiculaires à l'axe du corridor, où chaque ligne porte un nom unique, définies à intervalles réguliers (10 mètres dans ce projet) pour marquer l'emplacement des profils en travers et paramétrer la largeur des profils en travers à droite et à gauche de l'axe selon les spécifications du projet. Les tabulations sont créées via la commande « Create Sample Lines » et stockées dans un groupe associé à l'axe du projet. Une fois définies, elles servent de base pour générer les profils en travers.

IV.2.7.2. Génération des profils en travers (Cross Sections)

Les profils en travers sont des coupes transversales générées automatiquement aux emplacements des tabulations. Chaque profil donne des informations clés telles que la surface déblayée (apparaît comme une surface hachurée), le PK correspondant, ainsi que la couverture du tunnel.

La Figure IV.22 présente un exemple de profil en travers au PK38+980, tandis que l'ensemble des profils générés est consultable en Annexe 5.

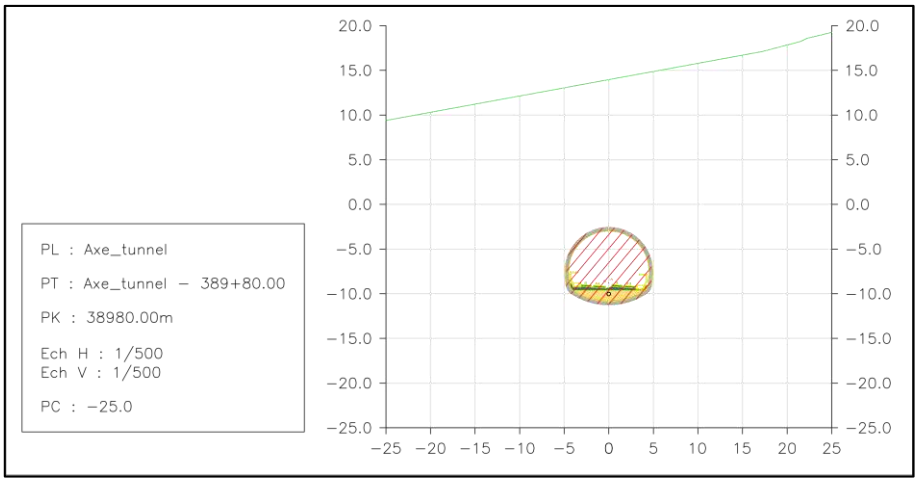


Figure IV.22 : Profil en travers au PK 38+980

IV.2.8. Interopérabilité BIM : Export du modèle Civil 3D et configuration dans InfraWorks

Une fois qu'on a finalisé la conception détaillée dans Civil 3D, l'étape suivante consiste à lier le modèle Civil 3D au modèle de base InfraWorks – préalablement généré via l'outil « Model Builder » – en tant que source de données.

Le processus d'importation débute par l'ouverture du logiciel InfraWorks. On sélectionne « Sources de données » >>« Ajouter un fichier source de données » à partir de l'onglet « Gérer », puis on choisit le type de fichier que l'on souhaite importer. Après la sélection du fichier .dwg, une fenêtre s'ouvre (Figure IV.23) pour gérer les entités à importer : surfaces, réseau d'assainissement et alignements.

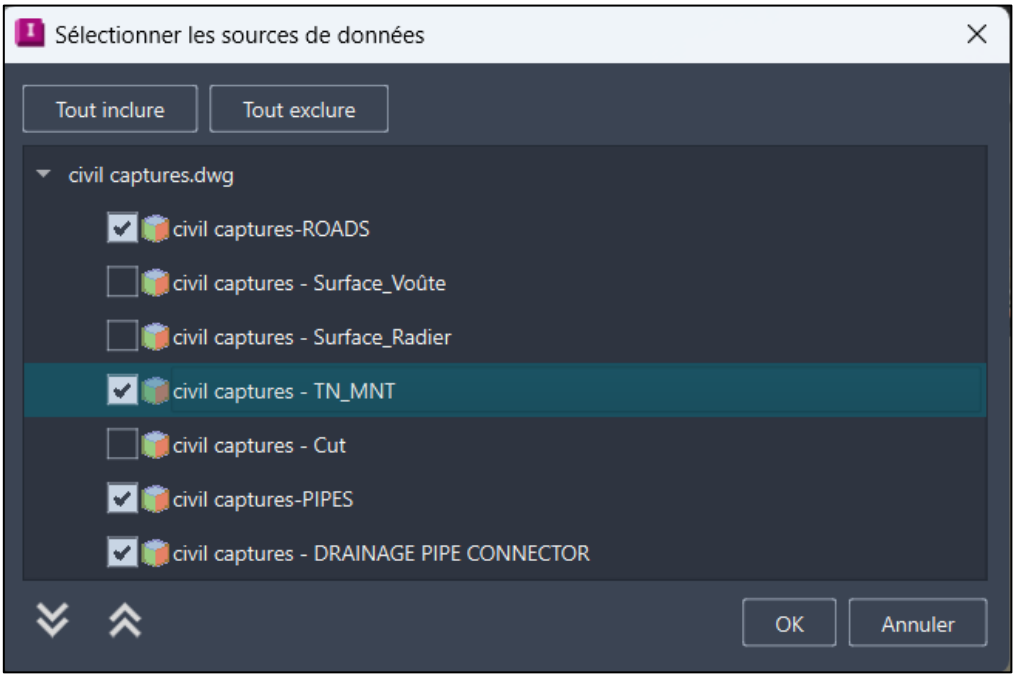


Figure IV.23 : Fenêtre de sélection des entités à importer depuis un fichier DWG Civil 3D.

Après les étapes citées ci-dessus, une configuration des sources de données est nécessaire. Concernant la catégorie "Routes", nous avons sélectionné « Route composée » plutôt que « Route composée du projet 3D », ce qui a permis d'exclure les surfaces de corridor, non souhaitées à ce stade du workflow, tout en conservant l'alignement de l'ouvrage.

Une fois l'alignement configuré, la commande « Ajouter une structure : Tunnel » permet d'insérer l'ouvrage sur la route composée importée.

Il est important de noter que la définition des limites du tunnel, à cette étape, s'effectue à l'aide de curseurs situés dans la zone de dessin. Ceux-ci permettent de spécifier avec précision les abscisses curvilignes de début et de fin, ce qui permet de déterminer automatiquement la longueur du tunnel.

Le tunnel généré par défaut dans InfraWorks (illustré à la Figure IV.24) présente une section transversale rectangulaire standard. Pour répondre aux exigences géométriques du projet, une modélisation paramétrique d'une section personnalisée a été réalisée dans Autodesk Inventor, comme détaillé dans la section suivante.

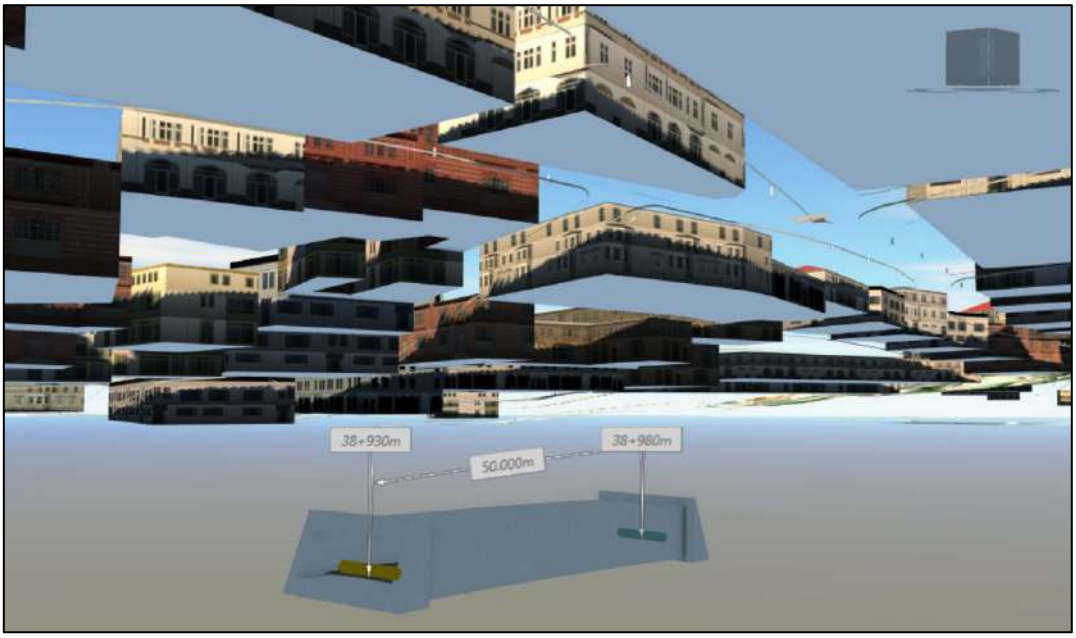


Figure IV.24 : Tunnel généré dans InfraWorks via la commande « Ajouter une structure : Tunnel ».

IV.2.9. Conception de la section du tunnel dans Autodesk Inventor

Une fois le tunnel ajouté à une route composée, il est possible de modifier ses attributs et sa géométrie dans la zone de dessin pour répondre aux exigences géométriques du projet.

Bien qu'un certain nombre de composants paramétriques de tunnels soient disponibles dans la palette de styles par défaut d'InfraWorks, la section spécifique à notre projet n'y figure pas.

Comme mentionné précédemment, la solution c'était le recours au logiciel Autodesk Inventor Professional, avec lequel on a créé un modèle paramétrique personnalisé représentant le composant de tunnel à utiliser dans InfraWorks.

Le processus de création dans Inventor est le suivant : tout d'abord, une esquisse bidimensionnelle est réalisée, intégrant les différents éléments géométriques représentant le profil en travers du tunnel, selon les dimensions spécifiques du projet, ensuite, cette esquisse est extrudée pour obtenir la modélisation 3D de la section. (Figure IV.25)

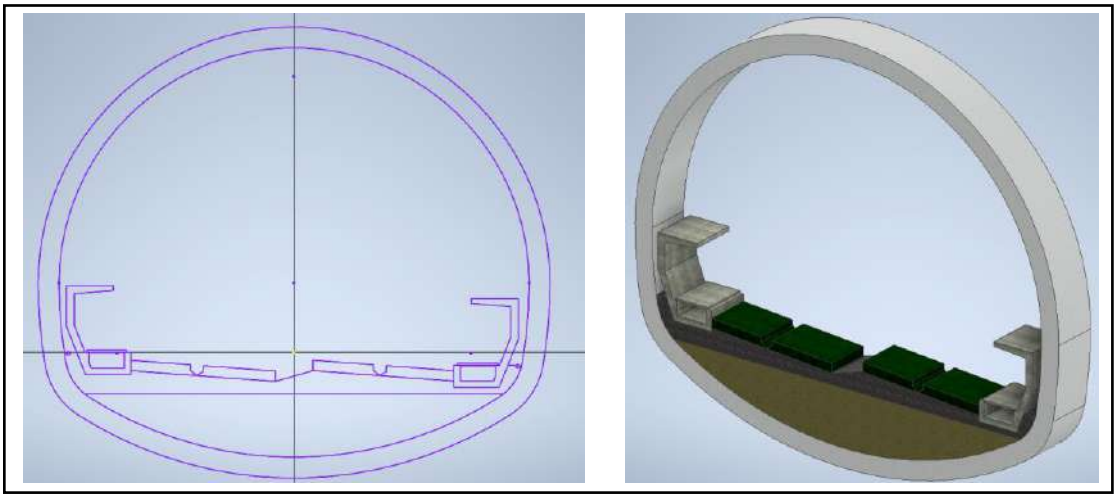


Figure IV.25 : Conception de la section du tunnel dans Inventor : esquisse 2D et extrusion 3D.

IV.2.10. Export du modèle 3D personnalisé depuis Inventor et intégration dans InfraWorks

Le modèle créé dans Inventor est ensuite exporté vers InfraWorks à l'aide du module Autodesk Inventor Infrastructure Modeler (Infrastructure Part Shape Utilities). Ce dernier permet d'exporter des modèles paramétriques à partir d'Inventor afin de les utiliser dans la conception d'ouvrages dans InfraWorks (Figure IV.26).

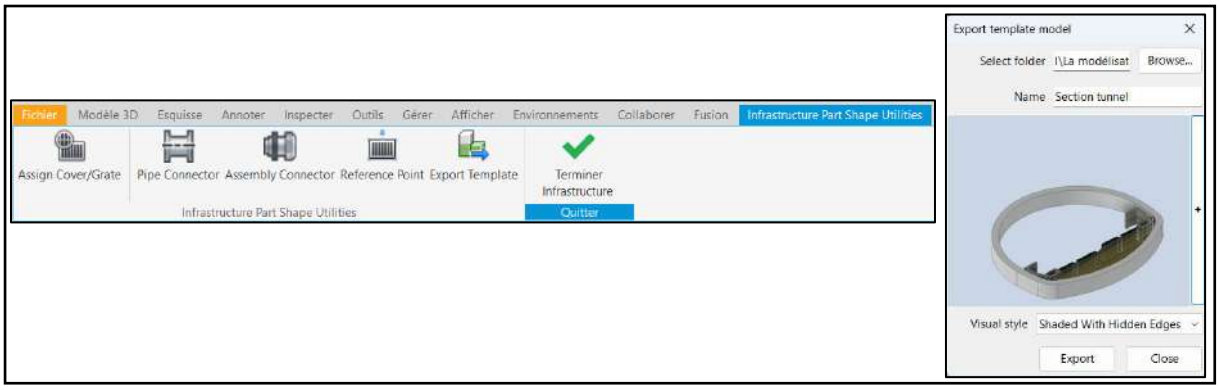


Figure IV.26 : Export du modèle paramétrique depuis Autodesk Inventor via le plugin Infrastructure Part Shape Utility.

Une fois le modèle exporté au format .IPT, le composant personnalisé est ajouté au catalogue de tunnels en naviguant vers Gérer > Palette de styles > Modèles paramétriques > Tunnel > Ajouter un nouveau style.

Il est important de mentionner que les attributs « Domaine », « Type de composant » et « Type de tunnel », dans l'onglet (Détails du modèle) d'un nouveau composant paramétrique de tunnel, doivent être spécifiés lors de l'ajout du modèle pour pouvoir l'utiliser dans InfraWorks (Figure IV.27).

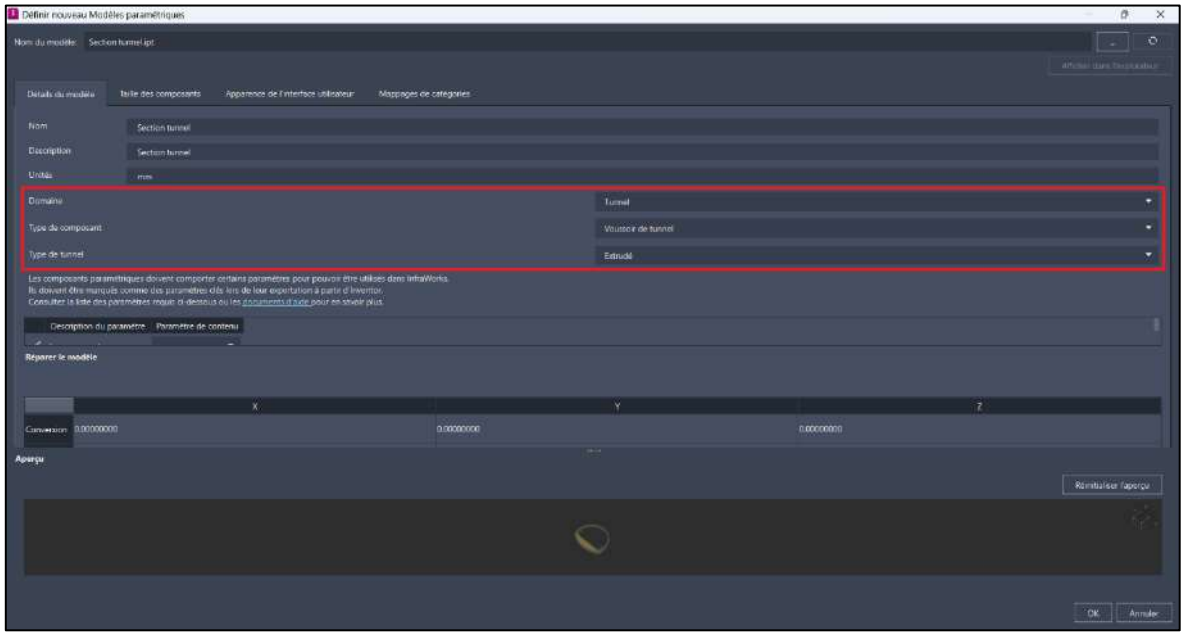


Figure IV.27 : Configuration des attributs du nouveau composant paramétrique de tunnel.

IV.2.11. Affectation de la section personnalisée au tunnel dans InfraWorks

Une fois la section personnalisée ajoutée à la palette de styles d'InfraWorks, un double-clic sur le tunnel permet de sélectionner la zone concernée. Les attributs de l'objet sélectionné figurent dans un groupe de fonctions (pile).

Dans la pile, la section du tunnel est modifiée en lui attribuant le nouveau composant personnalisé (Figure IV.28). Ce dernier est extrudé le long du tracé pour générer la géométrie du tunnel.

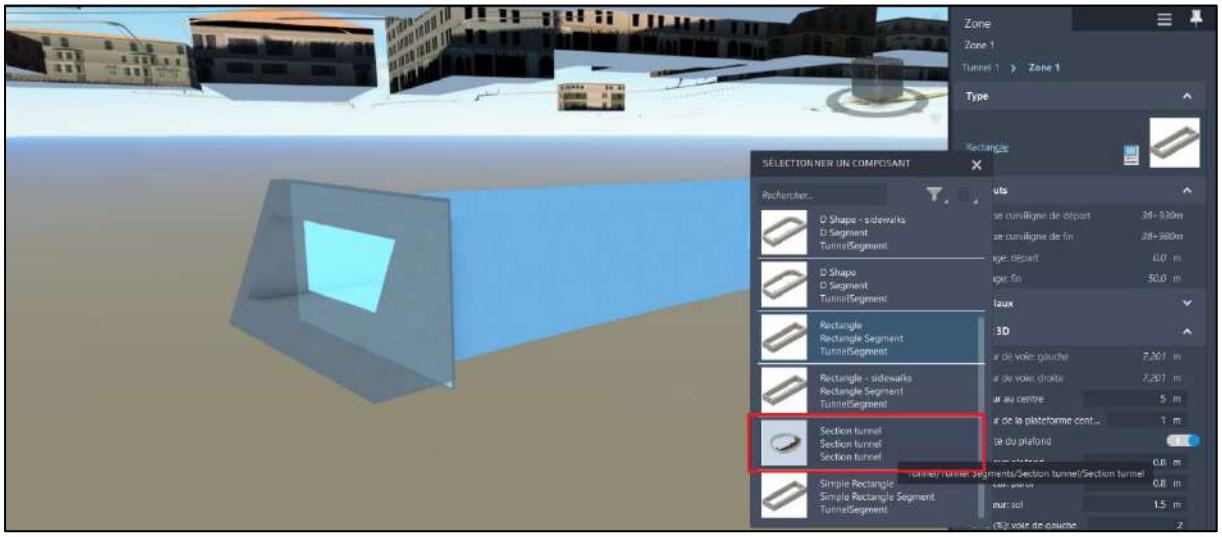


Figure IV.28 : Affectation du composant paramétrique personnalisé à la section du tunnel.

Les objets dans la zone de dessin se mettent à jour automatiquement lors des modifications des attributs dans la pile.

Enfin, les portails générés par défaut (ajoutés lors de la création d'un tunnel sur une route composée) sont supprimés pour respecter les spécifications du projet. La figure suivante illustre le tunnel après affectation du composant personnalisé et suppression des portails.

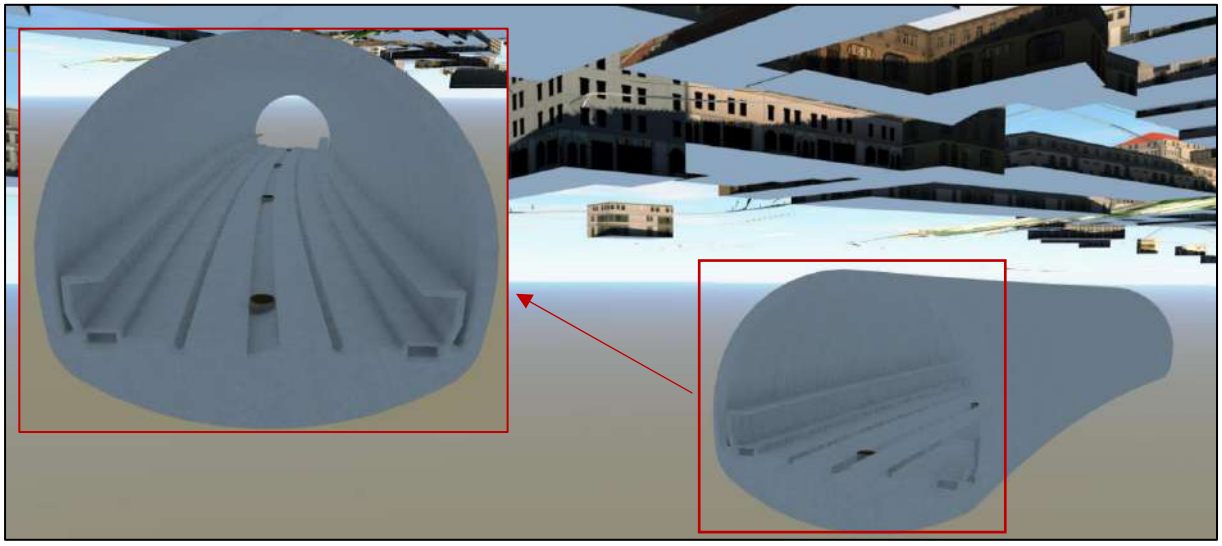


Figure IV.29 : Le tunnel personnalisé dans InfraWorks après affectation du composant issu d'Inventor et suppression des portails.

IV.2.12. Exportation du modèle vers Revit pour coordination et documentation BIM

Cette étape du workflow vise à envoyer le modèle depuis InfraWorks vers Autodesk Revit, dans le but de faciliter la coordination interdisciplinaire (structure, MEP, architecture) et de générer la documentation BIM du projet.

Pour cela, on a utilisé la commande native d'InfraWorks « Publier les ouvrages » (Figure IV.30). Cette dernière génère un fichier contenant des données de modèle InfraWorks au format IMX.



Figure IV.30 : Exportation du modèle de tunnel depuis InfraWorks vers Revit via la commande « Publier les ouvrages».

Dans Revit, les étapes suivantes sont réalisées :

- Création d'un nouveau projet en sélectionnant un gabarit adapté aux infrastructures de travaux publics.
- Définition des unités du projet en mètres (via Gérer > Paramètres du projet > Unités).
- Importation du fichier IMX via l'onglet « Compléments » > « Importer des structures de génie civil ».

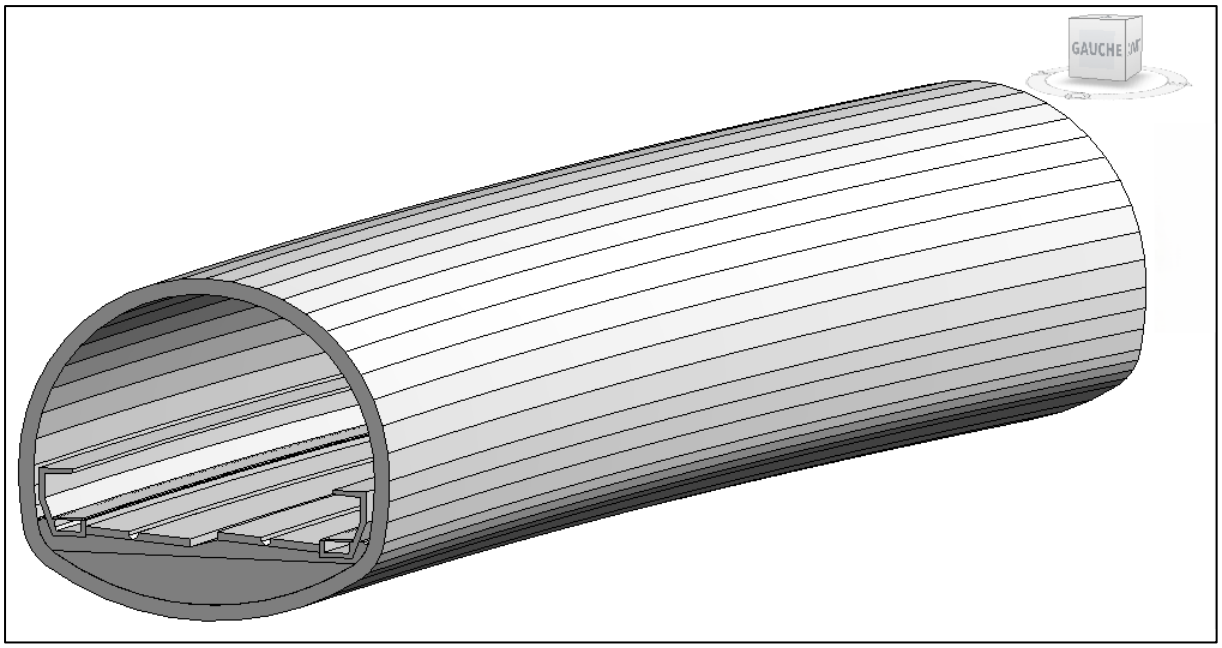


Figure IV.31 : Visualisation du tunnel importé dans Revit

IV.2.13. Finalisation du Modèle dans Civil 3D

Une fois qu'on a terminé la conception de l'ouvrage dans Civil 3D et InfraWorks et qu'on a créé des plans de détail et des documents techniques dans Civil 3D et Revit, revenons maintenant à Civil 3D afin d'enrichir le LOD (Level of Detail) du modèle et d'intégrer des éléments non transférables lors des exports inter-plateformes.

Dans cette dernière étape du flux de travail, des composants comme les traverses et les supports du troisième rail sont ajoutés au modèle. Parallèlement, l'extraction des solides 3D permet la visualisation globale du tunnel et la validation du projet.

IV.2.13.1. Automatisation du Placement des Blocs via Dynamo Civil 3D

Contrairement aux éléments extrudés du profil type (voûte, radier, …), les traverses et les supports de rail de courant nécessitent un positionnement ponctuel et dynamique selon un espacement régulier. Leur insertion manuelle, fastidieuse et sujette aux erreurs d'alignement, a conduit à l'exploitation de la puissance d'automatisation de Dynamo Civil 3D.

Pour cela, la première étape a consisté à modéliser quatre blocs : Traverses (côté gauche et droit) et supports de rail de courant (côté gauche et droit).

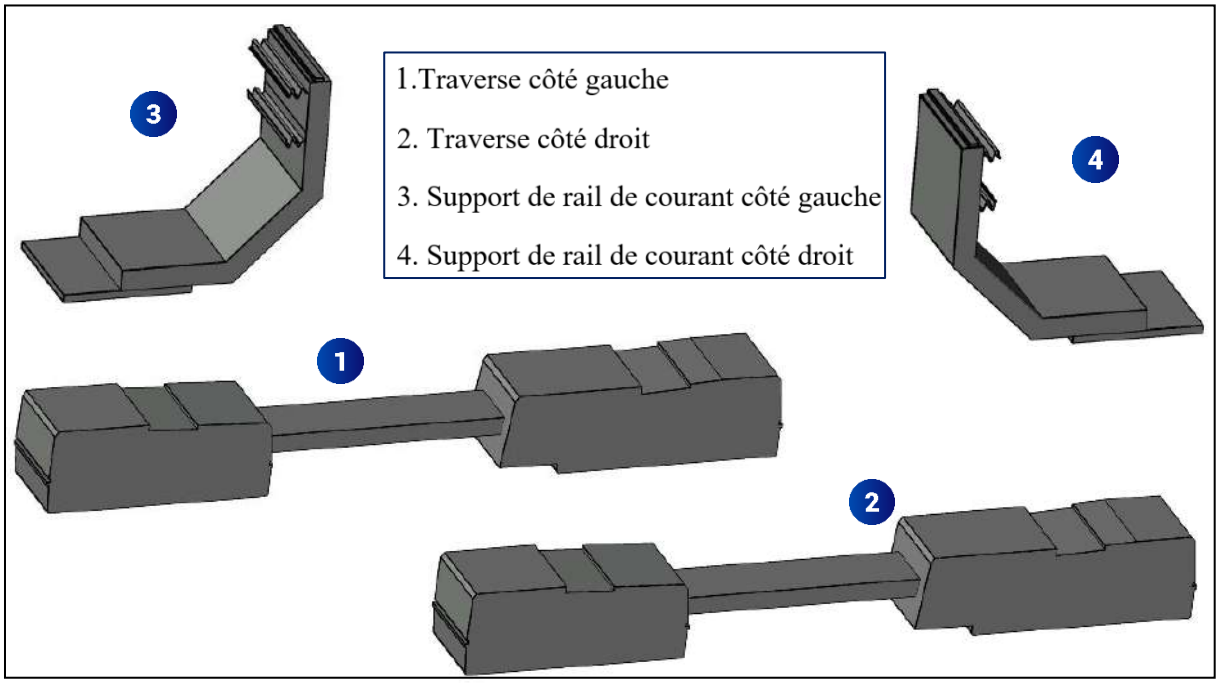


Figure IV.32 : Blocs modélisés (traverses et supports de rail de courant).

Un script Dynamo a ensuite été utilisé pour positionner ces éléments le long du corridor avec précision, en synchronisant leurs orientations avec : La courbure de l'axe en plan (rayon de 300 m) et les variations altimétriques du profil en long (pente de -2,524 %). Les résultats de l'exécution du script Dynamo sont illustrés dans les figures IV.33 et IV.34.

On mentionne que ce script s'inspire d'un exemple partagé par Autodesk sur son blog, intitulé "Dynamo for Civil 3D: Placing Objects along a Corridor" (Autodesk, 2020) [4]. Ce dernier présente une méthode de placement de blocs le long d'un corridor à l'aide de Dynamo, que nous avons intégrée dans notre workflow afin d'automatiser le positionnement de ces éléments répétitifs selon le tracé du tunnel.

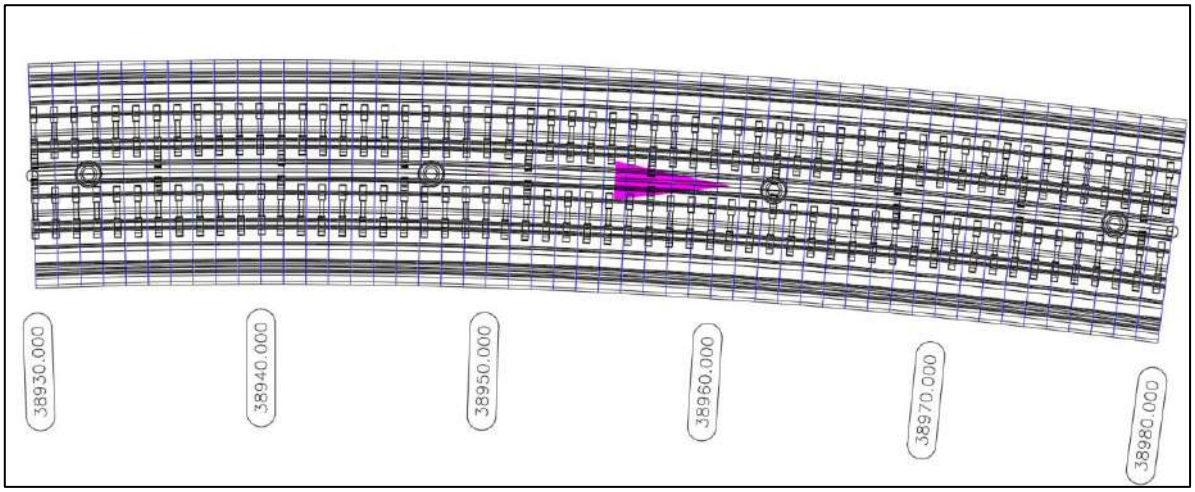


Figure IV.33 : Alignement automatique des traverses et supports de rail de courant – Vue en plan.

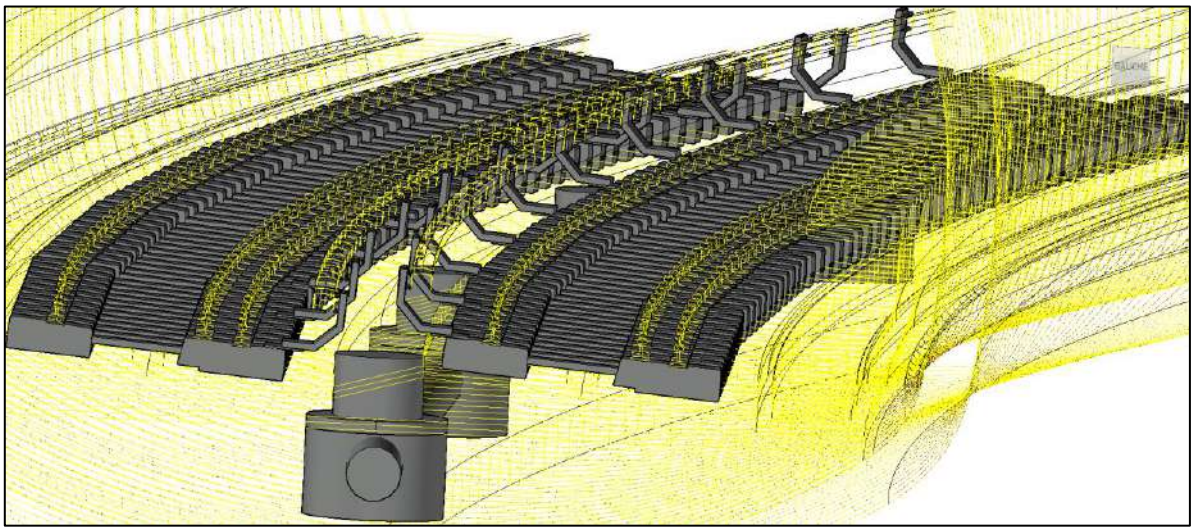


Figure IV.34 : Alignement automatique des traverses et supports de rail de courant – Vue 3D.

IV.2.13.2. Extraction des Solides 3D et Visualisation Globale

La commande « Extraire des solides de projet 3D » d'Autodesk Civil 3D permet d'extraire des entités AutoCAD (corps ou solides 3D) à partir des liens et formes du modèle de projet 3D, où les formes de profil type sont transformées en solides 3D, tandis que les liens génèrent des corps (Bodies). Conformément à la documentation officielle d'Autodesk Civil 3D, ces entités génériques facilitent l'analyse structurelle, la visualisation détaillée ou l'export vers d'autres applications ne pouvant pas interagir directement avec le modèle paramétrique natif.

Les solides 3D conservent les propriétés de masse (volume, inertie), exploitables via la commande « PROPMECA ». Par ailleurs, les solides sont organisés sur des calques nommés selon les codes des liens et formes, définis lors de la création du profil type dans « Autodesk Subassembly Composer ».

Le modèle 3D final, illustré en figure IV.35, intègre à la fois les entités extraites (Revêtement, béton de voie, béton de remplissage, etc.), le réseau de drainage modélisé antérieurement, ainsi que les composants positionnés automatiquement par le script Dynamo (traverses et supports de rail de courant).

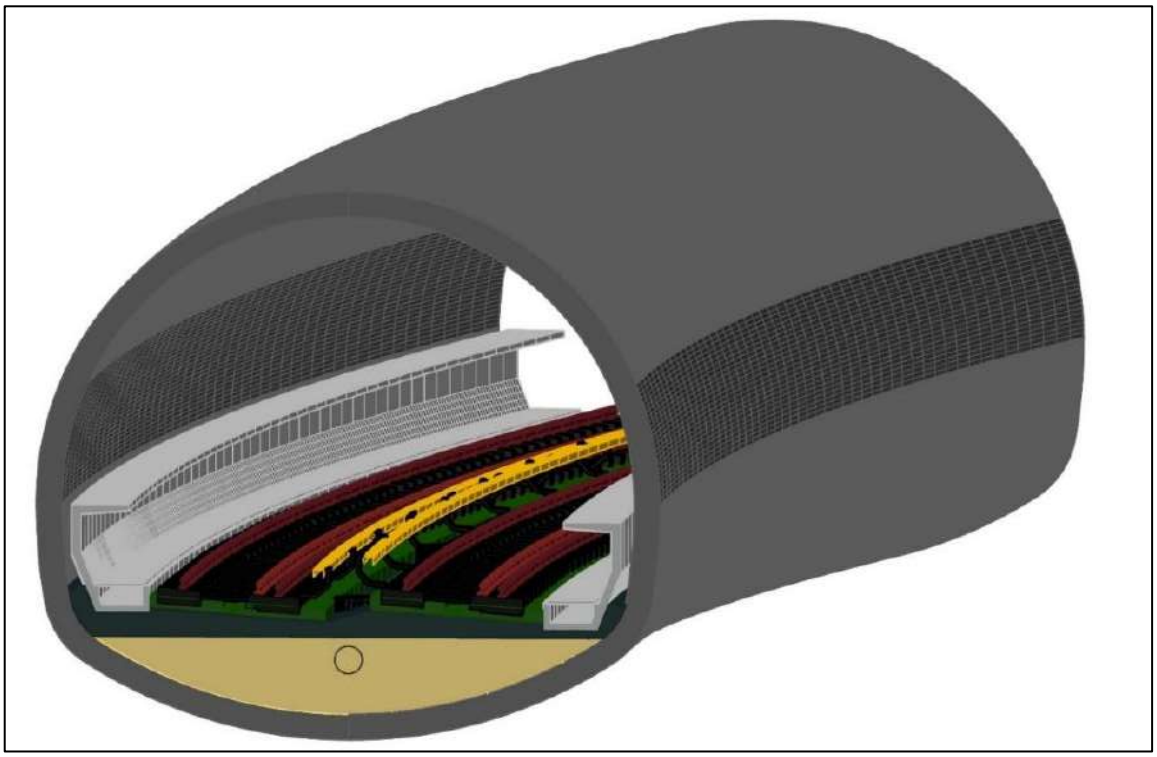


Figure IV.35 : Visualisation 3D du tunnel dans Autodesk Civil 3D intégrant les entités extraites, le réseau de drainage et les composants positionnés par Dynamo.

Dans le but de valider visuellement l'intégration des différents composants et contrôler la cohérence du design, la commande native « Visualisation3D » a été utilisée. Cette dernière affiche une vue 3D du modèle suivant une trajectoire prédéfinie (dans notre cas, la ligne rouge du projet a été prédéfinie).

Une fois cette commande activée, un onglet de visualisation 3D contextuel s'affiche, permettant de contrôler les paramètres suivants : les abscisses curvilignes, la vitesse de déplacement de l'affichage, le style visuel du modèle ainsi que la position de la caméra (décalage et hauteur de la cible, décalage et hauteur de l'œil).

Avec cette étape, nous marquons la dernière phase du workflow proposé dans ce chapitre : un modèle complet, cohérent et prêt pour une coordination interdisciplinaire avancée.

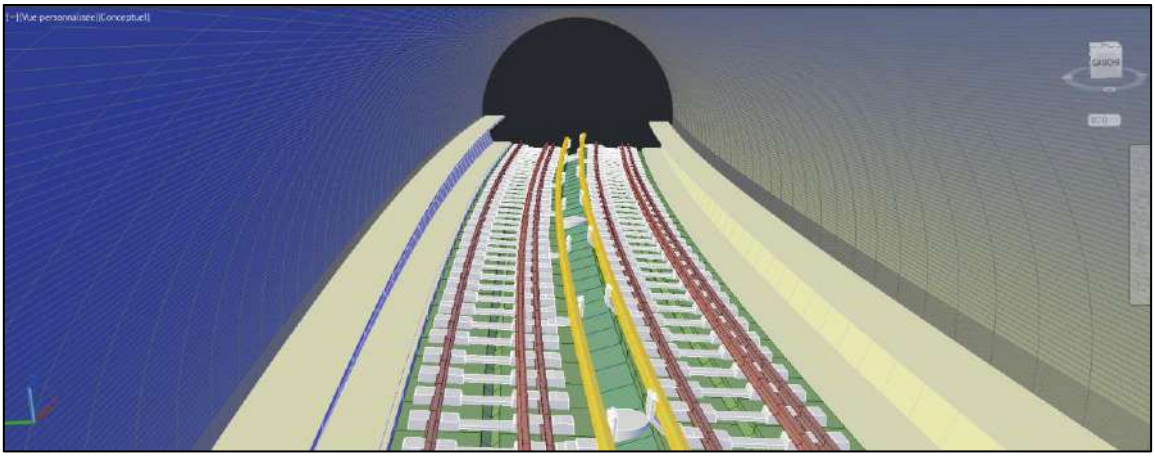


Figure IV.36 : Visualisation 3D du modèle via la commande « Visualisation3D » d'Autodesk Civil 3D.

IV.2.14. Synchronisation automatique du modèle entre Civil 3D, InfraWorks et Revit

Grâce à l'interopérabilité entre les différents logiciels employés dans ce flux de travail, l'échange de données est assuré dans les diverses phases du projet.

Toute modification ou tout changement dans le modèle de Civil 3D est appliqué au modèle publié dans InfraWorks, ainsi qu'au modèle publié dans Revit.

Dans InfraWorks, la mise à jour du modèle s'effectue à l'aide de la commande « Réimporter».

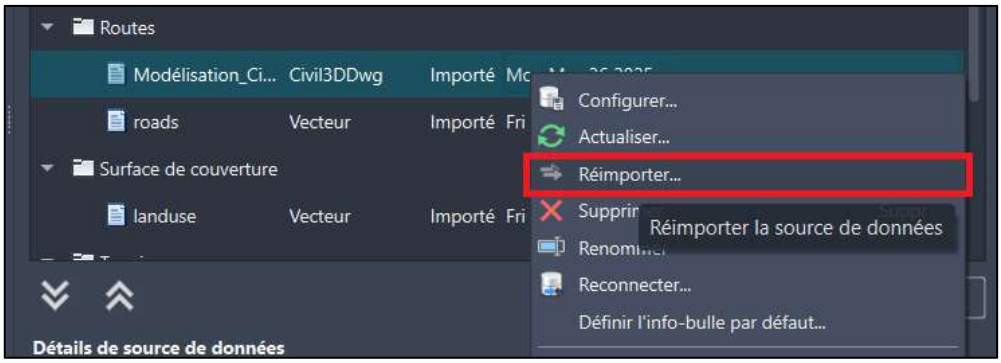


Figure IV.37 : Utilisation de la commande « Réimporter » dans InfraWorks pour synchroniser les données depuis Civil 3D.

Une fois le modèle mis à jour dans InfraWorks, il suffit de sélectionner le tunnel, puis d'utiliser la commande « Publier les ouvrages > Mettre à jour le modèle existant » (Figure IV.38) afin d'actualiser les données de l'ouvrage publié vers Revit.

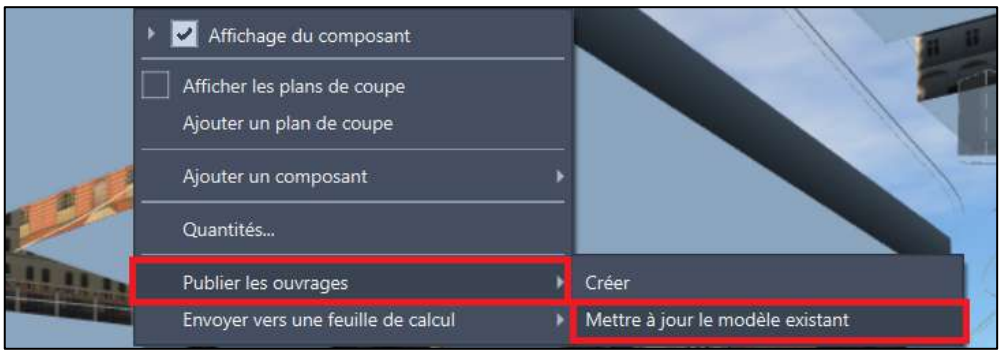


Figure IV.38 : Commande « Publier les ouvrages > Mettre à jour le modèle existant » dans InfraWorks.

IV.3. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté le workflow BIM mis en œuvre pour la création de la maquette de tunnel, depuis la modélisation du tracé dans Civil 3D jusqu'à l'intégration finale dans Revit, en s'appuyant sur un processus interopérable entre les logiciels Autodesk (Civil 3D, InfraWorks, Inventor, Revit). Le modèle obtenu constitue une base géoréférencée, prête pour une coordination collaborative interdisciplinaire.

Le chapitre suivant abordera la modélisation native dans Revit comme solution aux contraintes techniques rencontrées lors de l'import depuis InfraWorks. Cette démarche complémentaire garantira une exploitation complète du potentiel BIM.

CHAPITRE V
MODÉLISATION NATIVE DANS REVIT ET DÉTECTION DES CONFLITS

V.1. INTRODUCTION

Après avoir détaillé, dans le chapitre précédent, le flux de travail BIM proposé pour la modélisation d'un tronçon de tunnel, ce chapitre constitue la continuité de cette démarche.

Il présente, dans un premier temps, les limites du modèle Revit importé depuis InfraWorks, ainsi que les impacts de ces contraintes sur l'exploitation du modèle, en particulier dans les phases avancées du BIM telles que la planification 4D et le calcul des coûts 5D.

Dans un second temps, il expose les solutions mises en œuvre pour y remédier, notamment à travers la modélisation native dans Revit, basée sur des familles paramétriques adaptatives développées spécifiquement pour ce projet et des scripts Dynamo. Ce nouveau modèle est conçu pour une utilisation avancée dans les simulations temporelles et budgétaires.

Le chapitre aborde également la détection des conflits à l'étape de conception, essentielle pour garantir la cohérence du modèle avant sa phase d'exécution.

Le schéma ci-dessous présente le workflow adopté pour la mise à niveau du modèle Revit, en vue de son exploitation dans les phases avancées du BIM.

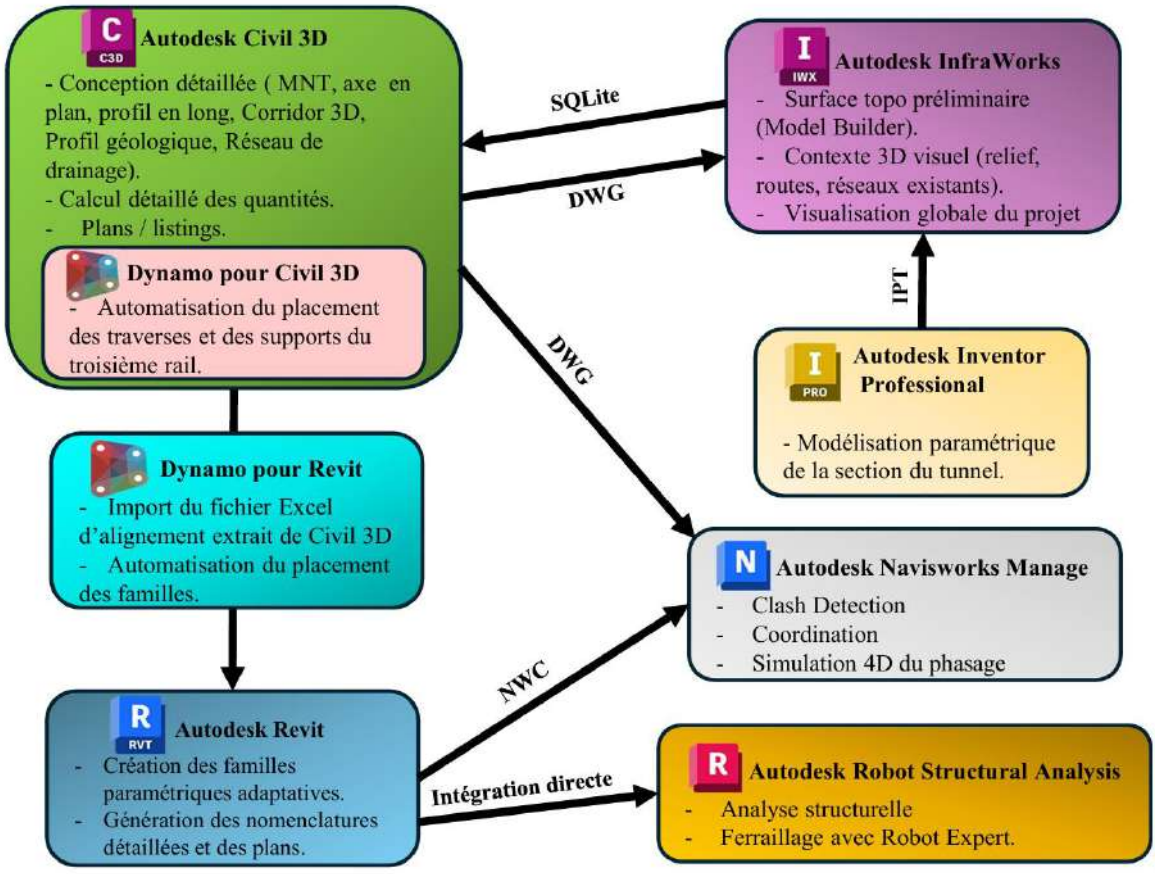


Figure V.1 : Workflow BIM utilisé pour la création de la maquette numérique.

Le modèle Revit, présenté dans le chapitre précédent, généré par export depuis InfraWorks, présente des limitations qui affectent l'exploitabilité du modèle dans les étapes ultérieures du projet.

Le plus grand problème réside dans le fait que le tunnel est importé dans Revit comme un seul

objet générique. En effet, l'export fusionne tous les composants du tunnel (revêtement, bétons de remplissage, équipements) en une seule entité non dissociable, par conséquent :

- Il est impossible de générer des nomenclatures pour évaluer séparément les volumes des matériaux utilisés dans le projet.
- Il est impossible de faire toute coordination BIM en 4D : à cause de la nature monolithique du modèle, il n'est pas possible de planifier par tronçons ou par séquences d'exécution dans Navisworks.

Une autre limitation importante, le fait que le modèle n'est pas constitué d'objets natifs Revit, il ne bénéficie donc pas des capacités paramétriques du logiciel. Toute modification ou adaptation du modèle dans Revit devient alors très limitée, voire impossible.

Pour contourner ces limitations, une nouvelle modélisation native Revit a été réalisée en six étapes structurées, comme présentées dans la section suivante.

V.2. MISE À NIVEAU DU MODÈLE REVIT

V.2.1. Extraction des points de projet depuis le corridor Civil 3D

Cette première étape consiste à exploiter les données du corridor créées dans Civil 3D dans le chapitre précédent.

Dans le logiciel C3D, la procédure suivante a été suivie : dans la fenêtre d'outils, onglet Boîte à outils, nous avons développé la section Projet 3D, puis sélectionné « Rapport de points de projet 3D » (Figure V.2).

Une boîte de dialogue s'ouvre alors. Il est nécessaire d'y sélectionner le projet 3D concerné, puis de définir l'abscisse curviligne de début et de fin, ainsi que le code de point souhaité ("P189"). Enfin, les colonnes à inclure dans le rapport sont choisies (Figure V.3).

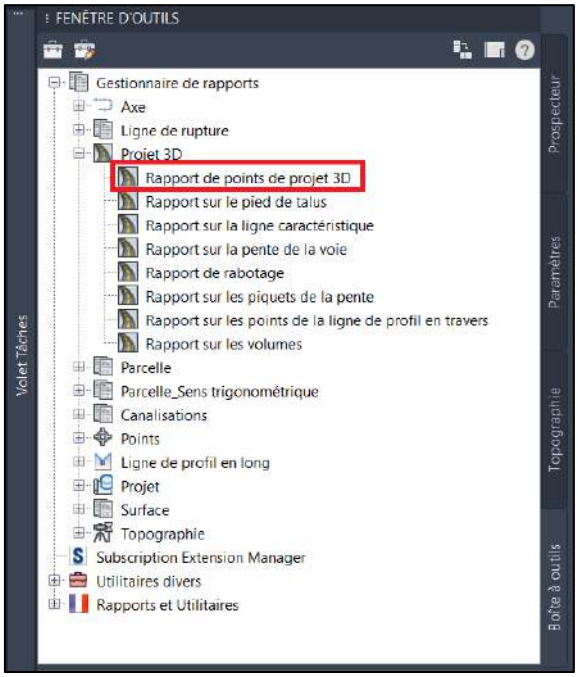


Figure V.2 : Accès à la commande « Rapport de points de projet 3D » dans la Boîte à outils – exportation des données de projet.

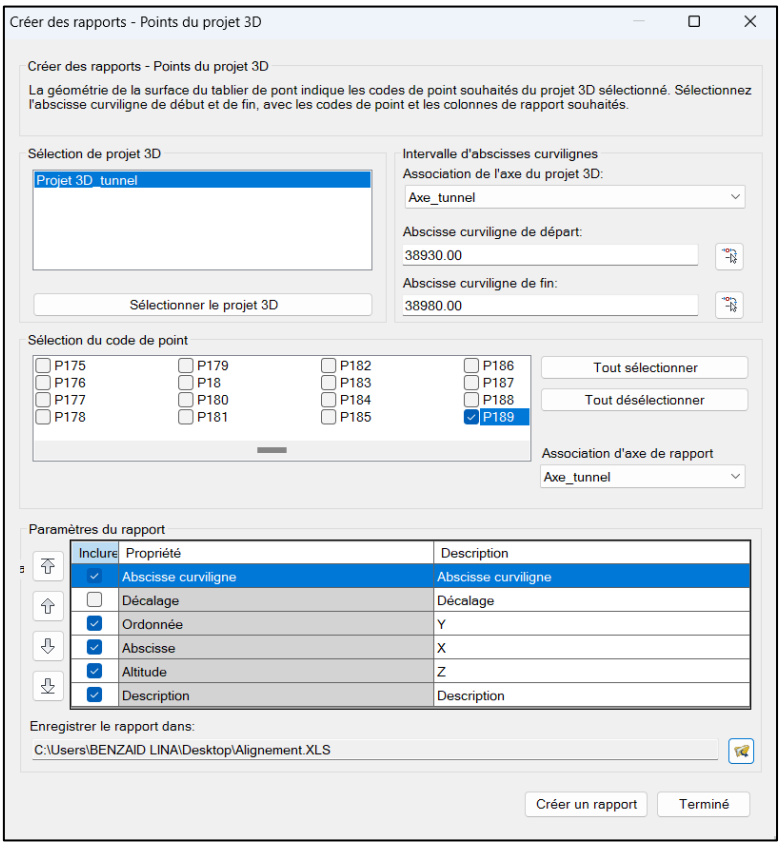
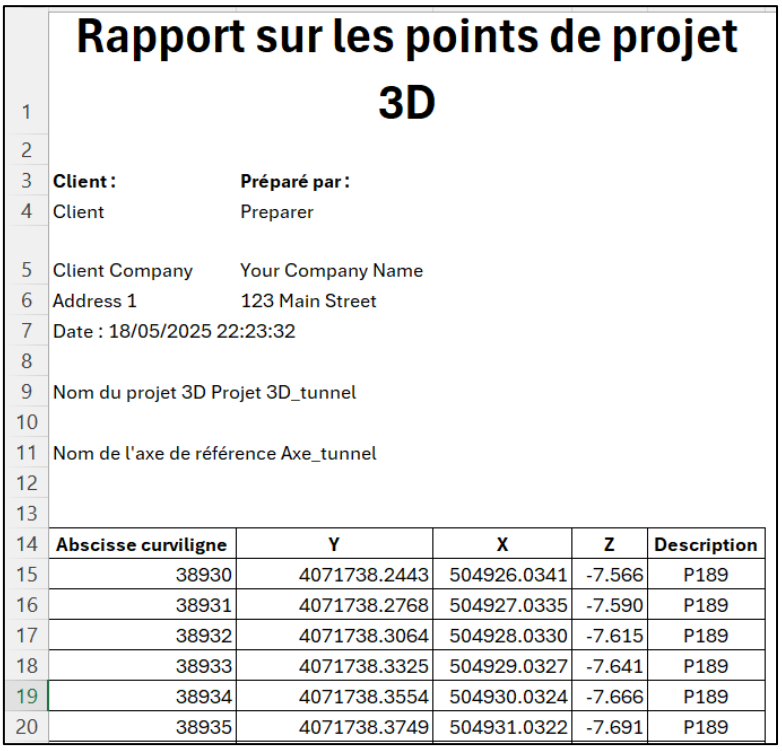


Figure V.3 : Boîte de dialogue du « Rapport de points de projet 3D » avec sélection des paramètres (projet 3D, abscisse curviligne, code de point, colonnes, etc)

Les données ont été exportées depuis Civil 3D au format Excel (.xlsx). Un exemple de sortie Excel est présenté dans la figure suivante.



Rapport sur les points de projet 3D

Client :	**Préparé par :**
Client	Preparer
Client Company	Your Company Name
Address 1	123 Main Street

Date : 18/05/2025 22:23:32

Nom du projet 3D Projet 3D_tunnel

Nom de l'axe de référence Axe_tunnel

Abscisse curviligne	Y	X	Z	Description
38930	4071738.2443	504926.0341	-7.566	P189
38931	4071738.2768	504927.0335	-7.590	P189
38932	4071738.3064	504928.0330	-7.615	P189
38933	4071738.3325	504929.0327	-7.641	P189
38934	4071738.3554	504930.0324	-7.666	P189
38935	4071738.3749	504931.0322	-7.691	P189

Figure V.4 : Exemple de sortie du rapport de points exporté au format Excel (.xlsx)

V.2.2. Création de familles paramétriques adaptatives

Contrairement aux catalogues riches disponibles pour le secteur du bâtiment, les familles adaptées aux ouvrages tels que les tunnels doivent être créées spécifiquement pour chaque projet. Pour cela, des familles Revit natives représentant les composants du tunnel ont été créées. Ces familles, nous les avons classées en trois catégories selon leur logique de placement dans le projet.

La première catégorie regroupe les familles à trois points adaptatifs, utilisées pour modéliser des éléments à section continue par extrusion (figure V.5). Ces familles incluent : la voûte, le radier, le béton de remplissage, le béton de remplissage de voie, le béton de voie, le système d'imperméabilisation, les passerelles ainsi que les rails. Grâce à leurs trois points adaptatifs, elles peuvent suivre précisément les variations du tracé.

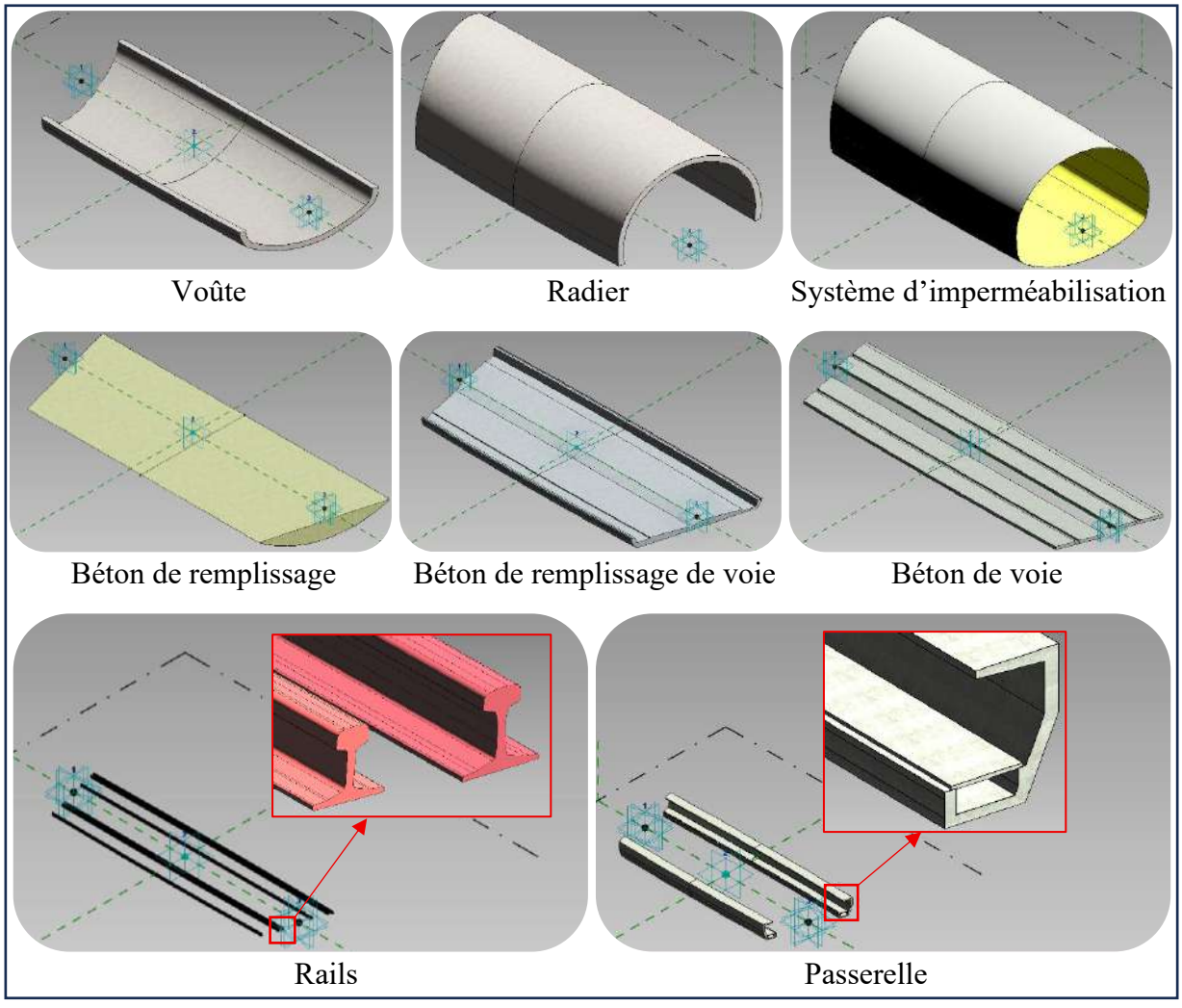


Figure V.5 : Illustration des familles Revit de la première catégorie – familles à trois points adaptatifs.

La deuxième catégorie est similaire à la précédente ; la seule différence réside dans le nombre de points adaptatifs : celle-ci en contient deux au lieu de trois (figure V.6).

La troisième catégorie concerne les familles à positionnement ponctuel, sans extrusion, qui sont placées à intervalles réguliers le long de l'axe (figure V.7). Il s'agit notamment des traverses et des supports de rail de courant.

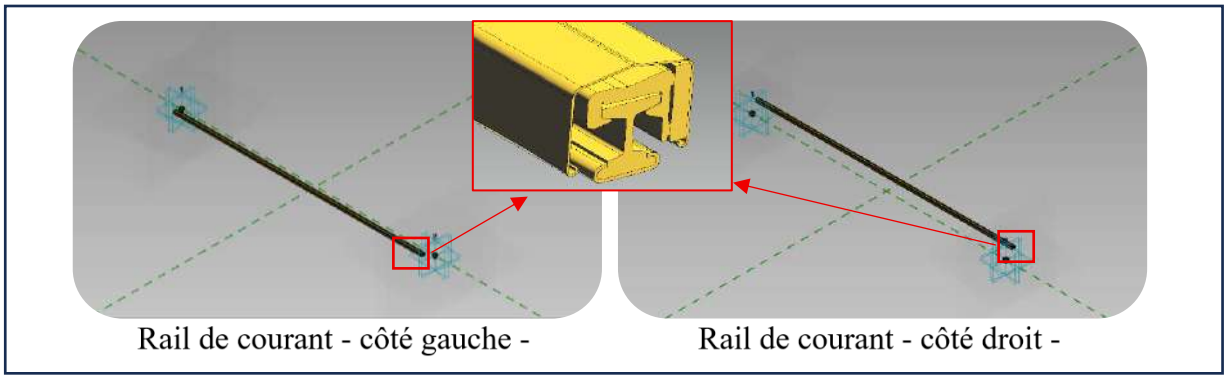


Figure V.6 : Illustration des familles Revit de la deuxième catégorie – familles à deux points adaptatifs.

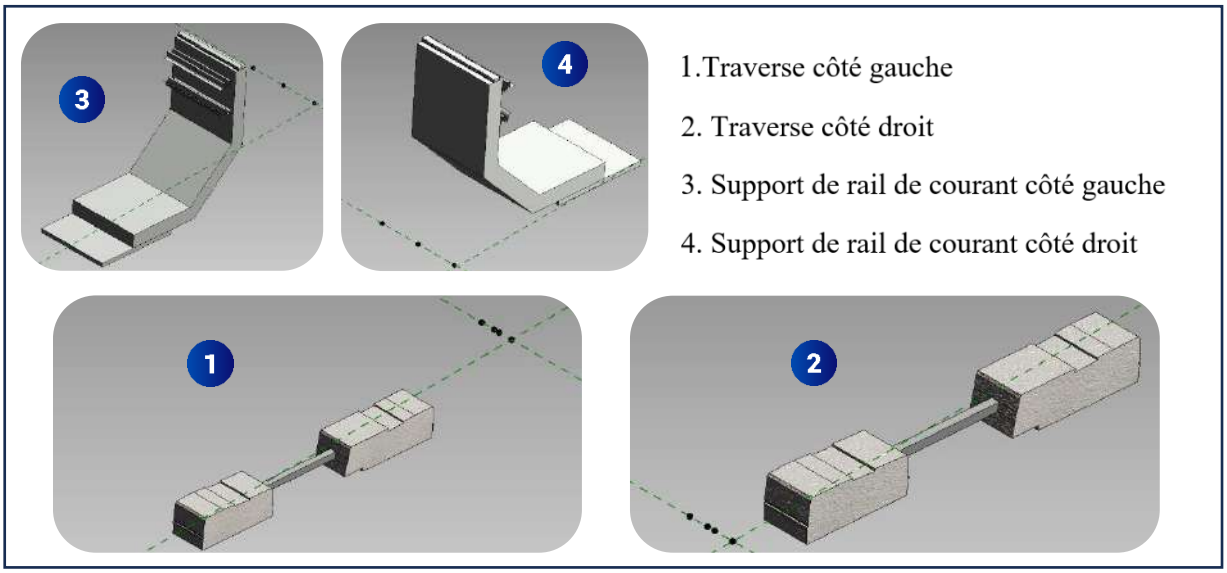


Figure V.7 : Familles Revit de la troisième catégorie – familles à positionnement ponctuel.

Toutes les catégories de familles citées ci-dessus ont été créées selon une méthodologie similaire : toutes utilisent le gabarit « Modèle générique métrique adaptatif » et suivent la même procédure de création de base. Cette procédure est illustrée ci-dessous par l'exemple de la famille de voûte, avec des variations spécifiques à chaque catégorie explicitement mentionnées à chaque étape.

Les étapes constituant le processus de création d'une famille sont :

Étape 01 : Création d'une famille « Voûte_01.rfa » basée sur le gabarit « Modèle générique métrique (adaptatif).rft ». L'unité de dessin est ensuite définie en mètres. La section 2D du tunnel (figure 04, annexe 05) est ensuite importée depuis Civil 3D via la commande « Importer CAO » dans l'éditeur de familles Revit, puis placée sur le plan de référence. À la suite de l'importation, seuls les éléments correspondant à la voûte sont conservés, les autres parties de la section étant supprimées afin de ne conserver que la géométrie nécessaire à la création de la famille.
Avant l'importation, il est impératif de filtrer les calques pour ne conserver que ceux nécessaires

à la création des familles, et de vérifier que les polylignes sont bien fermées, afin de pouvoir générer des volumes solides dans Revit par la suite.

Étape 02 : Chargement de la famille « Voûte_01.rfa » dans une nouvelle famille, enregistrée sous le nom « Voûte_02.rfa ». Cette dernière est basée sur le gabarit de famille « Modèle générique métrique (adaptatif).rft ». Un corps solide est ensuite créé à l'aide de la commande « Créer une forme – solide – ».

Étape 03 : Une autre famille, « Voûte_03.rfa », basée sur le même gabarit que les précédentes, est créée.

Pour les catégories 1 et 2, nous avons commencé par créer deux ou trois points (selon la catégorie de famille à développer), que nous avons ensuite rendus adaptatifs. Deux ou trois autres points de référence (selon la catégorie de famille à créer) sont ensuite créés et positionnés sur le plan horizontal des points adaptatifs.

Par contre, pour la catégorie 3, nous avons créé uniquement des points de référence (il n'est pas nécessaire de créer des points adaptatifs pour cette catégorie de familles).

Étape 04 : Attribution d'un paramètre de famille de type "angle" à chacun des points de référence, désignés par les noms : Rot_XY_A, Rot_XY_B / Rot_XY_C.

À noter : seules les catégories 1 et 2 sont concernées par cette étape.

Étape 05 : La famille « Voûte_02.rfa » est ensuite chargée dans la famille en cours et placée sur le plan vertical de chaque point de référence créé.

Étape 06 : Génération d'un volume à l'aide de la commande « Créer une forme – solide – ».

La figure suivante illustre les différentes étapes détaillées précédemment.

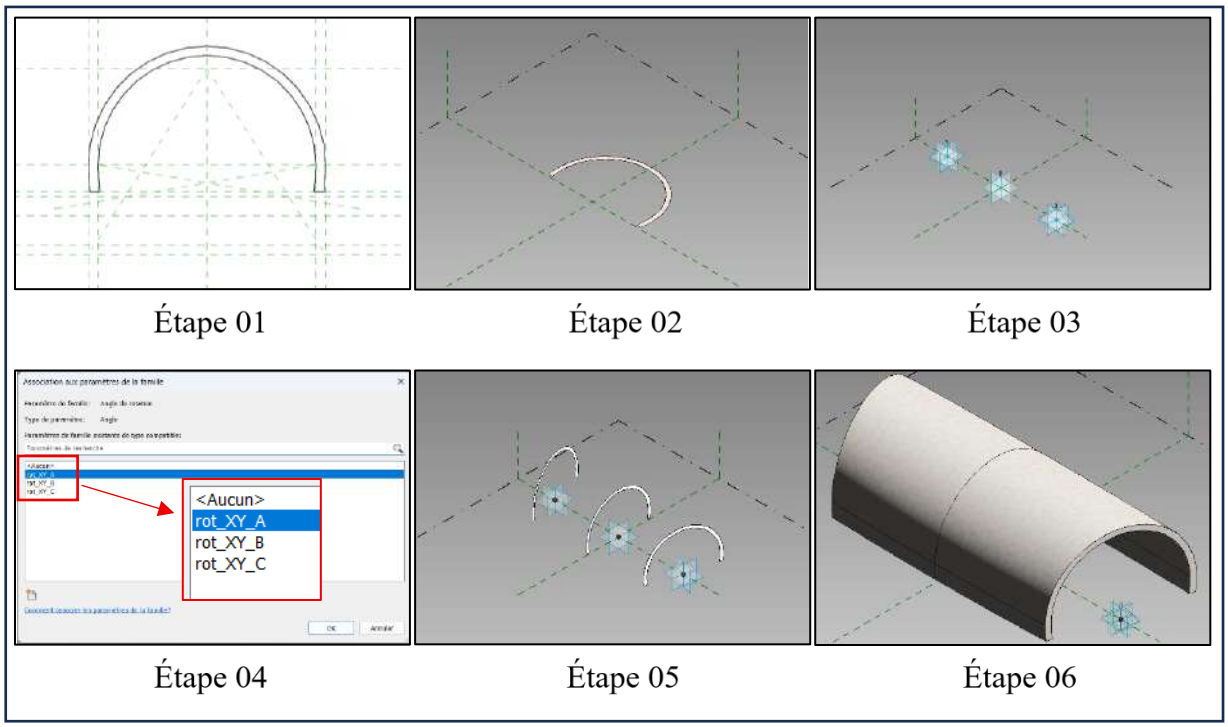


Figure V.8 : Étapes de création d'une famille générique métrique adaptative dans Revit (exemple de la famille Voûte)

Après la création des familles selon la méthodologie décrite ci-dessus, nous avons affecté un matériau à chaque famille, soit choisi parmi les options prédéfinies de la bibliothèque Revit, soit créé lorsqu'il n'était pas disponible par défaut. Ces matériaux définissent simultanément l'apparence visuelle de la famille (figure V.9) ainsi que ses caractéristiques physiques et mécaniques (figure V.10) : module de Young, coefficient de Poisson, module de cisaillement, densité …

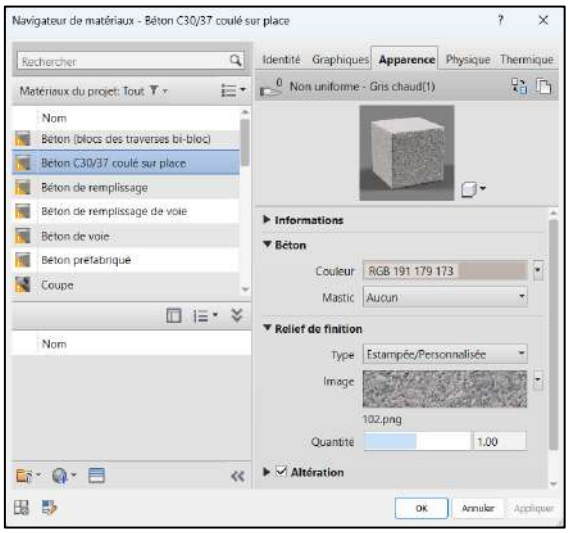


Figure V.9 : Attribution des propriétés graphiques au béton C30/37 - Onglet 'Apparence' du navigateur de matériaux.

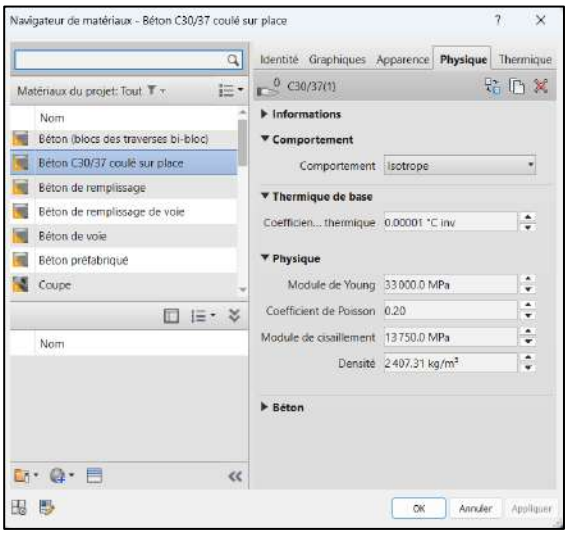


Figure V.10 : Définition des caractéristiques mécaniques du béton C30/37 - Onglet 'Physique' du navigateur de matériaux

V.2.3. Création du projet Revit et configuration initiale

On procède à la création d'un nouveau projet Revit en sélectionnant un gabarit métrique adapté au type d'infrastructure à modéliser (par exemple : Gabarit de construction .rte).

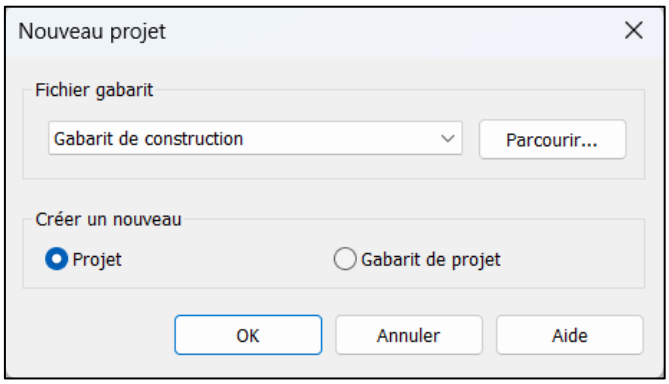


Figure V.11 : Création d'un nouveau projet Revit.

Une fois le projet ouvert, les unités de travail sont configurées en mètres afin d'assurer la cohérence avec les données importées depuis Civil 3D.

V.2.4. Géoréférencement du modèle Revit

Le géoréférencement constitue une étape essentielle du processus BIM. Il assure une localisation précise du projet, facilitant ainsi une interopérabilité efficace entre les différents logiciels BIM.

Il existe trois points à prendre en compte pour géoréférencer un projet dans Revit, comme montré dans le tableau suivant.

Tableau V.1 : Les trois points de référence pour le géoréférencement dans Revit(buildingSMART France—Mediaconstruct, 2020) [19]

Élément	Définition	Caractéristiques
Point d'origine 	- Le point 0,0,0 absolu du système de coordonnées de Revit. - Il s'agit de l'origine interne du modèle, utilisée pour la modélisation des éléments de la maquette.	- Inaliénable - Immuable - Non sélectionnable
Point de base 	- Point caractéristique du projet défini par l'auteur. - Utilisé pour positionner et orienter le projet.	- Sélectionnable - Modifiable
Point de topographie 	- Point utilisé pour le géoréférencement. Il correspond à la référence topographique réelle du site	- Sélectionnable - Modifiable

Pour géoréférencer notre projet, nous avons d'abord activé l'affichage des trois points mentionnés via l'outil « Visibilité/Graphisme ». Ensuite, en accédant à Gérer > Emplacement du projet > Coordonnées > Spécifier les coordonnées du point, nous avons sélectionné le point de base et saisi les coordonnées d'origine de notre ouvrage (figure V.12).

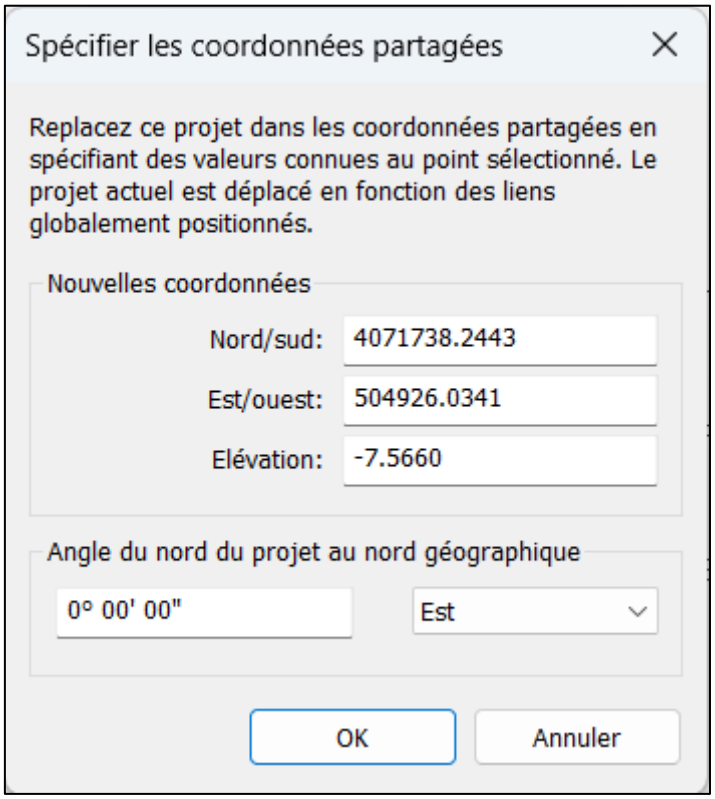


Figure V.12 : Saisie des coordonnées du point de base.

À la suite de cette opération, le point topographique se déplace, tandis que le point de base prend les nouvelles coordonnées définies. Le projet est ainsi géoréférencé.



Figure V.13 : Coordonnées finales du point de base après géoréférencement.

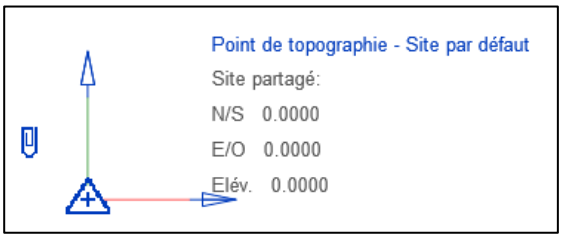


Figure V.14 : Coordonnées finales du point topographique après géoréférencement

V.2.5. Développement des scripts Dynamo

Conçu initialement pour le secteur du bâtiment, Revit présente une interface orientée vers les architectes, peu adaptée aux infrastructures linéaires complexes, à savoir les routes, les ponts, les tunnels. Cela rend leur modélisation particulièrement ardue dans l'environnement natif de Revit.

Cependant, grâce à Dynamo, un outil de programmation visuelle intégré à Revit, il devient possible d'aller beaucoup plus loin.

Grâce à ce plug-in, il est possible de manipuler des géométries complexes et de positionner précisément des familles, en s'appuyant sur des listes de coordonnées, par exemple issues de Civil 3D.

Dans ce cadre, nous avons développé plusieurs scripts Dynamo, en fonction de la catégorie de famille utilisée, permettant d'automatiser la modélisation du tunnel, à partir des données d'alignement extraites de Civil 3D.

Les scripts développés ci-après ont été conçus en s'appuyant sur le package « Dynabridge 0.0.6 ». Ce dernier contient des nœuds personnalisés développés par l'ingénieur polonais "Andrzej Samsonowicz", et est disponible en téléchargement via le Dynamo Package Manager, accessible directement depuis l'interface de Dynamo (figure V.15).

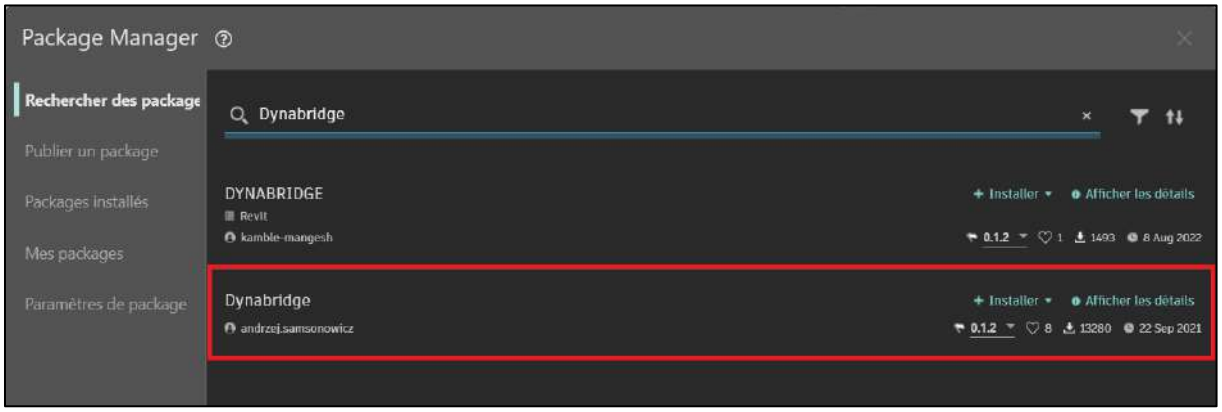


Figure V.15 : Téléchargement du package « Dynabridge 0.0.6 » via le Dynamo Package Manager.

Bien que ce package ait été principalement créé pour la modélisation des ponts, nous avons adapté ces nœuds de manière à les rendre applicables à la modélisation de notre tunnel.

À partir de cette logique, un package intitulé "Tunnel" a été développé. Il regroupe cinq nœuds personnalisés (custom nodes) spécifiquement conçus pour répondre aux exigences de notre cas d'usage.

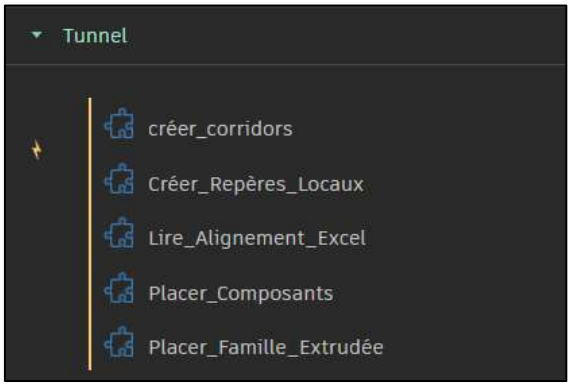


Figure V.16 : Environnement Dynamo - Le package "Tunnel" développé, constitué de cinq nœuds personnalisés pour la modélisation de tunnels.

Le nœud personnalisé « Lire_Alignement_Excel » permet d'importer les coordonnées d'alignement depuis une feuille Excel.

Ensuite, il transforme ces coordonnées afin de les adapter aux limites de modélisation de Revit. En effet, toutes les géométries d'un modèle Revit doivent se trouver à une distance maximale de 16 kilomètres (10 miles) de l'origine interne du modèle. Lorsque la géométrie est très éloignée de l'origine interne du modèle, la fiabilité et la précision de la représentation graphique des éléments diminuent (buildingSMART France—Mediaconstruct, 2020) [19]. (Figure V.17)

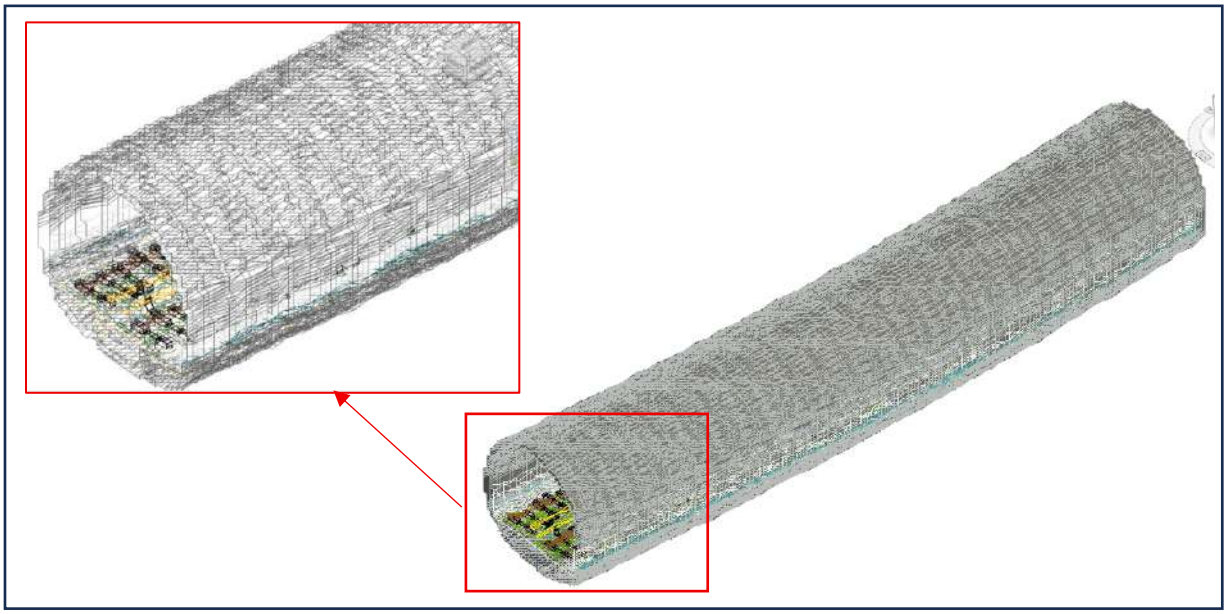


Figure V.17 : Problèmes de précision graphique liés à l'éloignement de la géométrie de l'origine interne du modèle.

En utilisant ce nœud, les coordonnées sont transférées vers le système de coordonnées du projet (où le point interne de Revit est défini comme origine), et les points sont placés correctement. La figure suivante montre ces points positionnés dans l'environnement de Dynamo.

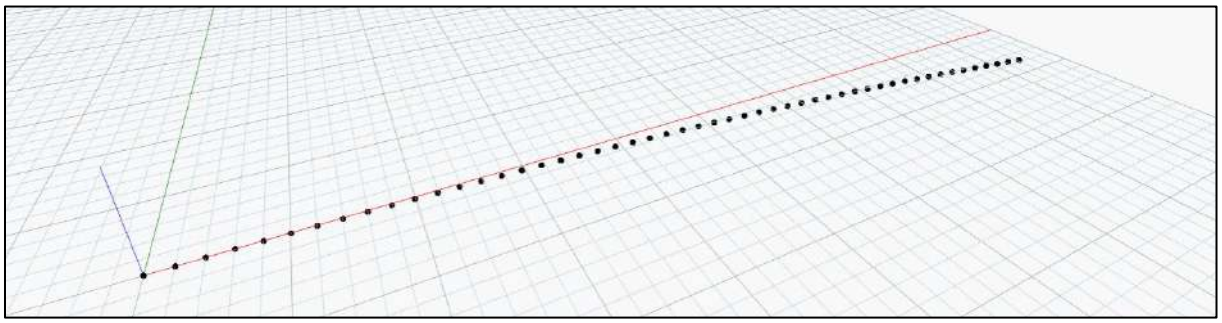


Figure V.18 : Positionnement des points d'alignement dans l'environnement 3D de Dynamo

Le deuxième nœud du package « Créer_Repères_Locaux » permet de générer des repères locaux à chaque point de l'alignement importé (voir figure V.19). Ces repères assurent le positionnement précis des familles adaptatives.

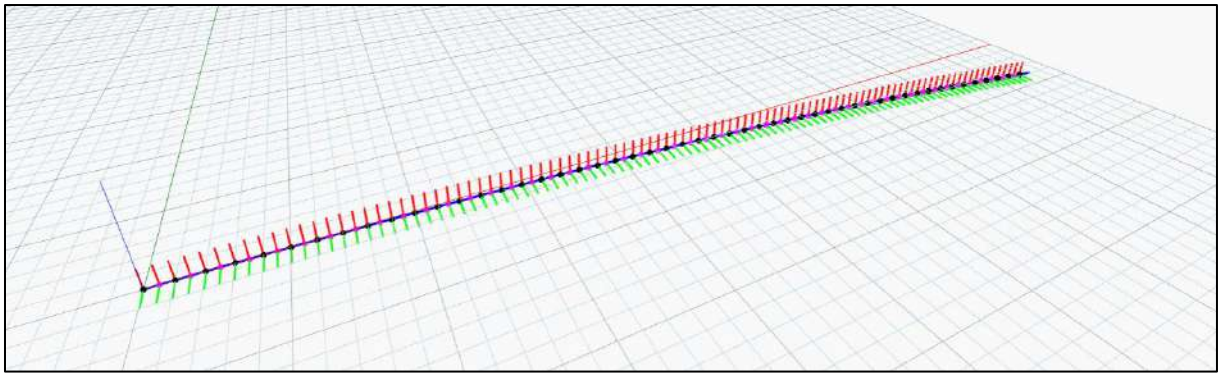


Figure V.19 : Repères locaux générés par le nœud « Créer_Repères_Locaux » dans Dynamo

Le nœud du package « Créer_Corridors » est identique à celui du package « Dynabridge ». Il permet de générer, pour chaque point importé depuis le fichier Excel, deux points (un à gauche et un autre à droite) définissant les limites du tunnel (figure V.20). La création de ces deux points supplémentaires s'appuie sur les repères locaux créés précédemment afin de déterminer leur orientation dans l'espace.

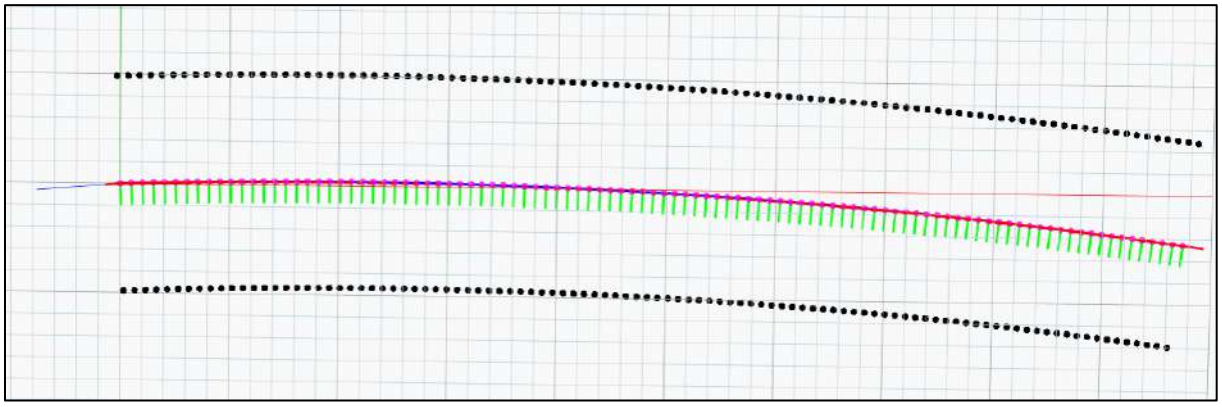


Figure V.20 : Création des limites gauche et droite du tunnel via le nœud « Créer_Corridors »

Le nœud personnalisé « Placer_Famille_Extrudée » est spécialement conçu pour placer les familles adaptatives des catégories 1 et 2.

Par contre, le nœud personnalisé « Placer_Composants » est dédié au placement des familles de la catégorie 3. Il est à noter que le script de ce nœud est principalement basé sur celui du nœud « Place Street Lamps » du package « Dynabridge ».

Une fois le package « tunnel » créé, nous avons utilisé ses nœuds pour concevoir des scripts. Le premier script mis en œuvre avait pour objectif de calculer les angles de rotation nécessaires à l'orientation correcte des familles adaptatives des catégories 1 et 2.

Ces angles sont indispensables pour générer une géométrie continue tout au long du tracé et pour éliminer les vides entre les familles. Une illustration de ces discontinuités est présentée dans la figure V.21.

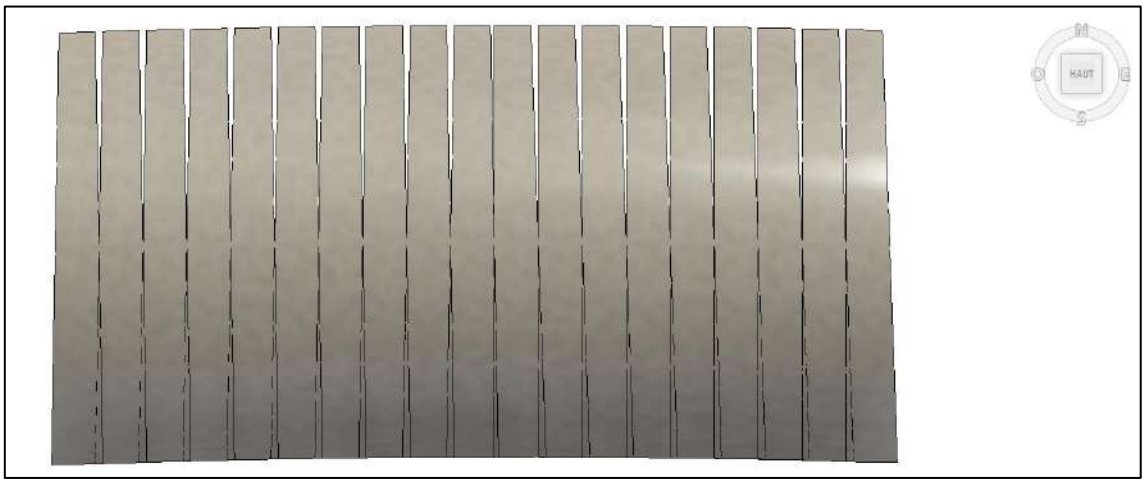


Figure V.21 : Illustration des vides entre les familles le long du tracé avant traitement par script

Les résultats de l'exécution de ce premier script sont exportés vers un fichier Excel. La figure suivante illustre un exemple de sortie obtenue après l'exécution du script.

	A	B	C
1	181.928757554364	181.864692660708	181.787917364818
2	181.787917364817	181.698426369842	181.596219789769
3	181.596219789769	181.493556269471	181.402728731382
4	181.402728731382	181.313636317852	181.216153094560
5	181.216153094560	181.116629442027	181.021426520461
6	181.021426520461	180.928247896170	180.834799559290
7	180.834799559290	180.739664852227	180.641431851159
8	180.641431851159	180.543633066480	180.449798841123
9	180.449798841123	180.355937539722	180.258039891432
10	180.258039891432	180.159850196312	180.065124071238
11	180.065124071238	179.971544887797	179.876809020463
12	179.876809020463	179.782083335160	179.688522114410
13	179.688522114410	179.593789790132	179.495559506991
14	179.495559506991	179.397707084041	179.304108805593
15	179.304108805593	179.210126112468	179.111123019046
16	179.111123019046	179.013215207111	178.922494067913
17	178.922494067913	178.832160456815	178.735431059267

partie3 | partie4 | partie5 | Angles3 | Angles2 | +

	A	B
1	181.928757554364	181.787917364818
2	181.787917364817	181.596219789769
3	181.596219789769	181.402728731382
4	181.402728731382	181.216153094560
5	181.216153094560	181.021426520461
6	181.021426520461	180.834799559290
7	180.834799559290	180.641431851159
8	180.641431851159	180.449798841123
9	180.449798841123	180.258039891432
10	180.258039891432	180.065124071238
11	180.065124071238	179.876809020463
12	179.876809020463	179.688522114410
13	179.688522114410	179.495559506991
14	179.495559506991	179.304108805593
15	179.304108805593	179.111123019046
16	179.111123019046	178.922494067913
17	178.922494067913	178.735431059267

partie3 | partie4 | partie5 | Angles3 | Angles2

Figure V.22 : Exemple de résultats obtenus après l'exécution du script (à gauche : angles de rotation des familles de la catégorie 1 ; à droite : angles de rotation des familles de la catégorie 2)

Une fois les angles de rotation calculés, la phase suivante consiste à préparer des feuilles Excel servant de sources de données externes pour le placement automatisé des familles adaptatives dans Revit.

Afin de réduire le temps de calcul, le tunnel a été divisé en cinq segments de 10 mètres chacun, nommés Partie 1 à Partie 5. Chaque segment correspond à une feuille Excel distincte. Dans chaque feuille sont regroupées les coordonnées X, Y, Z des points de placement, ainsi que les angles définis au préalable pour les familles des catégories 1 et 2.

La figure V.23 illustre la structure d'une feuille type (ici Partie 1). Les quatre autres suivent exactement le même format.

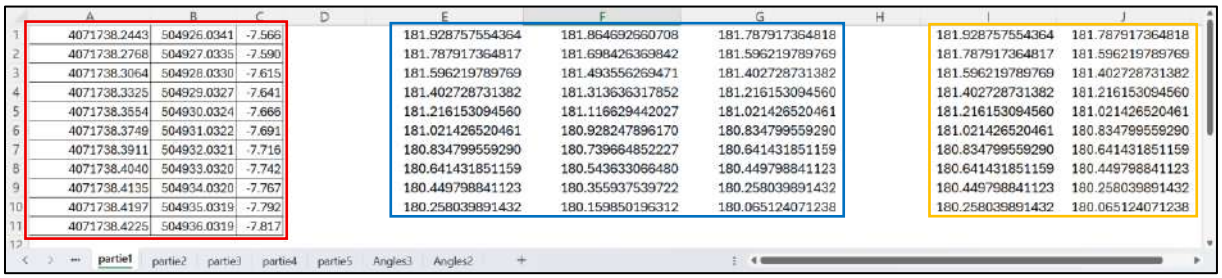


Figure V.23 : Exemple de feuille Excel pour la Partie 1 du tunnel, contenant les coordonnées (encadrées en rouge), les angles de rotation de la catégorie 1 (encadrés en bleu) et les angles de rotation de la catégorie 2 (encadrés en jaune).

Il est important de souligner que l'ordre des données dans ces feuilles est critique : toute modification dans l'agencement des lignes ou des colonnes affecte directement l'exécution du script et entraîne un mauvais positionnement des familles dans Revit.

Après la préparation des feuilles Excel, cette phase du processus consiste à utiliser ces données comme source d'entrée pour les scripts Dynamo chargés de placer automatiquement les familles adaptatives dans Revit.

Trois scripts distincts ont été développés, chacun correspondant à une catégorie de familles définie précédemment. Ces scripts exploitent les nœuds créés dans le package « tunnel ». Chaque script est présenté ci-dessous avec une description de son fonctionnement.

Script 1 – Placement des familles de la catégorie 1

Ce script gère le placement des familles à trois points adaptatifs (voûte, radier, béton de voie, etc.).

Il exploite les coordonnées et les angles de rotation issus des feuilles Excel pour positionner chaque famille avec précision dans Revit.

Script 2 – Placement des familles de la catégorie 2

Ce deuxième script est dédié aux familles linéaires à deux points adaptatifs, comme les rails de courant.

Il fonctionne sur le même principe que le précédent : lecture des données de position et d'orientation dans la feuille Excel, puis insertion dans le modèle Revit avec les bons paramètres.

Script 3 – Placement des familles de la catégorie 3

Ce dernier script concerne les familles à positionnement ponctuel, telles que les traverses et les supports du rail de courant, positionnées à intervalles réguliers le long du tracé du tunnel.

Pour effectuer ce placement, seules les coordonnées (X, Y, Z) sont extraites depuis la feuille Excel. Contrairement aux scripts des catégories 1 et 2, aucun angle de rotation n'est requis, car l'orientation des familles est automatiquement gérée par le nœud personnalisé « Placer_Composants », développé dans le package « tunnel ».

Ce nœud assure à la fois le positionnement précis des familles et leur orientation correcte en fonction de la géométrie du tracé, sans qu'il soit nécessaire de définir les angles de rotation au préalable dans le fichier Excel.

Cette approche garantit une implantation fiable des éléments ponctuels, tout en limitant les interventions manuelles.

À noter : lors de la création des scripts, des nœuds d'entrée ont été définis (figure V.24) afin d'apparaître comme paramètres configurables dans le Lecteur Dynamo (figure V.25), facilitant ainsi l'exécution des scripts directement depuis Revit.

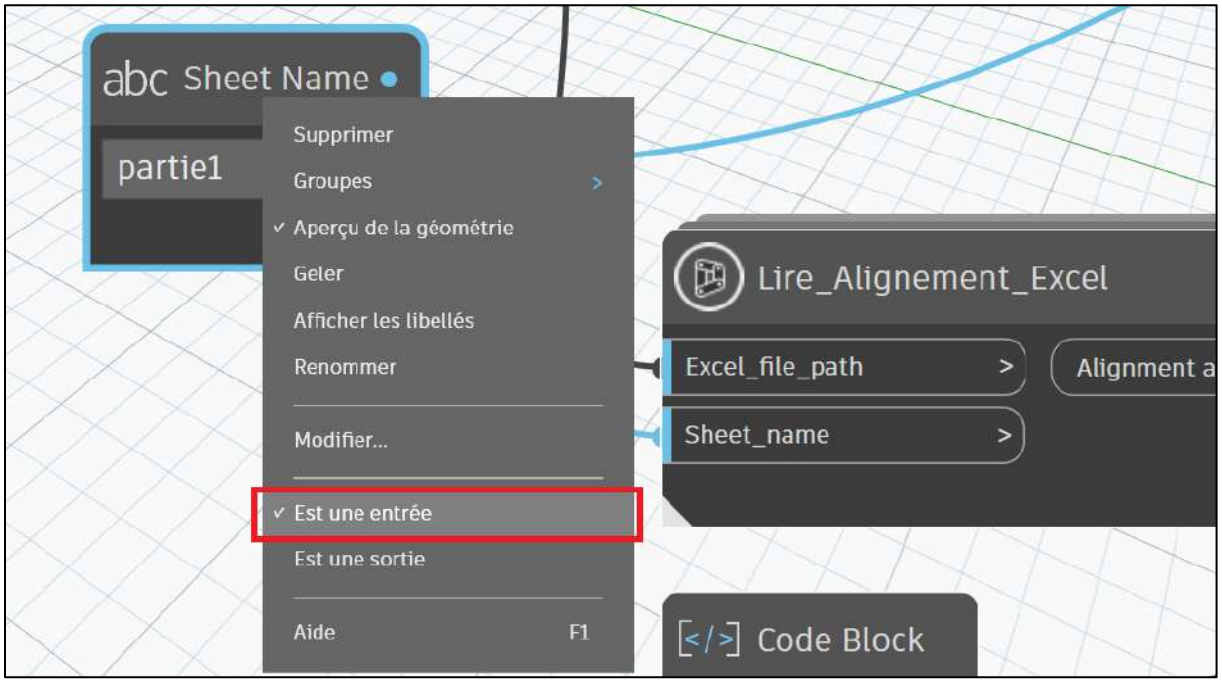


Figure V.24 : Exemple d'un nœud d'entrée configuré dans Dynamo lors de la création du script.

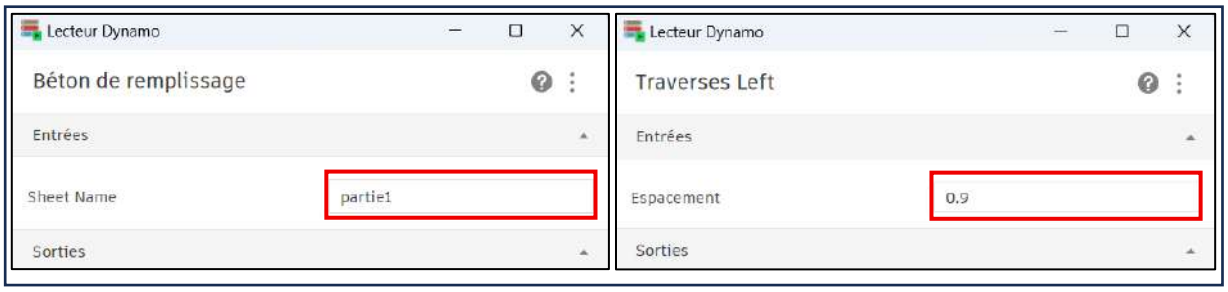


Figure V.25 : Interface du Lecteur Dynamo affichant les paramètres configurables.

V.2.6. Résultat de l'exécution des scripts Dynamo

L'exécution des scripts développés a été réalisée via le Lecteur Dynamo (figure V.26), qui permet d'exécuter des scripts directement depuis l'environnement Revit et de modifier rapidement les paramètres d'entrée sans avoir à ouvrir l'interface Dynamo pour éditer les scripts eux-mêmes, rendant le processus plus fluide et accessible.

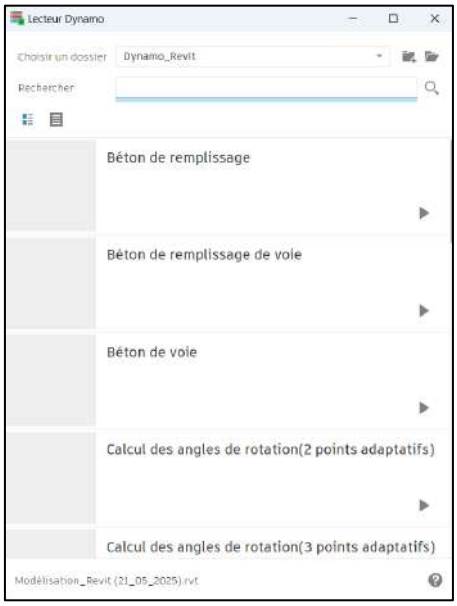


Figure V.26 : Interface du Lecteur Dynamo utilisée pour l'exécution des scripts.

L'exécution des scripts a conduit à un placement automatique et précis des familles adaptatives des trois catégories selon les données issues des feuilles Excel.

Le modèle final obtenu après l'exécution des scripts est présenté en figure V.27. On y observe une implantation cohérente et continue des différents éléments du tunnel, validant ainsi l'efficacité de la méthode développée.

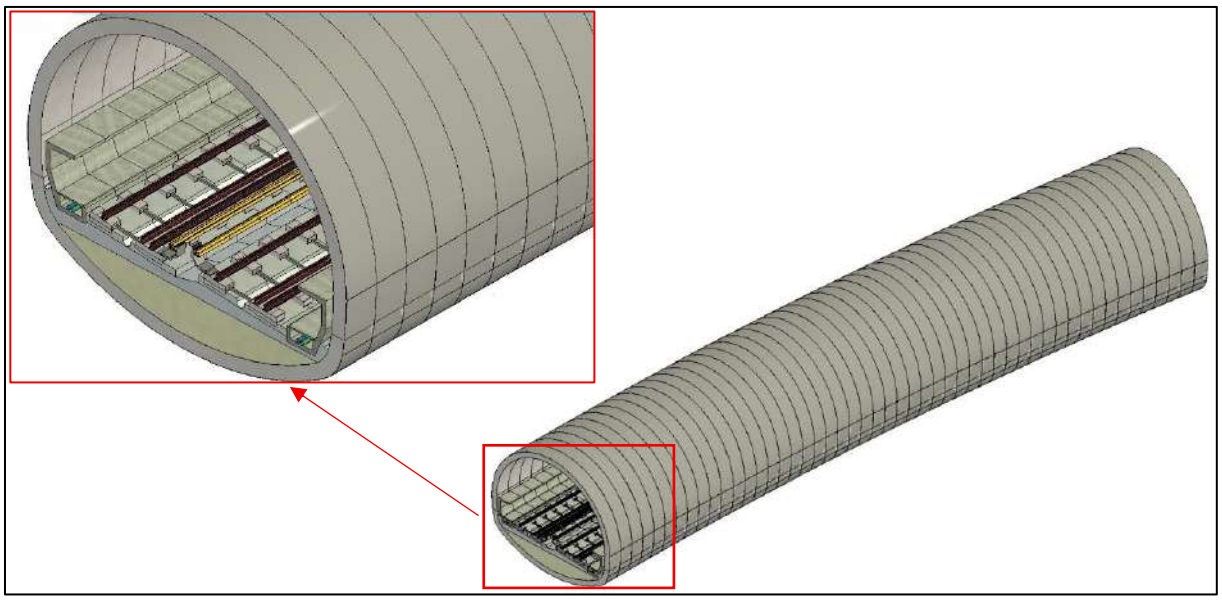


Figure V.27 : Modèle final du tunnel généré dans Revit à l'issue de l'exécution des scripts Dynamo.

V.3. DÉTECTION DES CONFLITS DANS NAVISWORKS MANAGE

Dans le but de valider la conception du modèle BIM et d'identifier d'éventuelles interférences entre les éléments avant la phase d'exécution du projet, un test de détection des conflits a été réalisé à l'aide du logiciel Navisworks.

Le test de (clash detection) a été réalisé spécifiquement dans les passerelles (multi-tubulaires) du tunnel, zones critiques où plusieurs réseaux cohabitent dans un espace restreint. L'objectif était de vérifier l'absence de conflits géométriques entre le câble électrique et la colonne sèche (dispositif de lutte contre l'incendie), deux éléments techniques installés dans un même volume réservé aux réseaux, où leur proximité pourrait générer des risques opérationnels en cas de mauvaise coordination.

Les étapes de ce processus sont organisées comme suit :

V.3.1. Exportation du modèle Revit

La première étape consiste à exporter le modèle Revit au format .nwc (Navisworks Cache). Cela se fait via l'onglet « Compléments », fenêtre « Externe », fonction « Outils externes > Navisworks 2025 ». Suite à ça, la boîte de dialogue « Exporter la scène sous … » s'ouvre, permettant d'entrer le nom du fichier et de configurer les paramètres d'export.

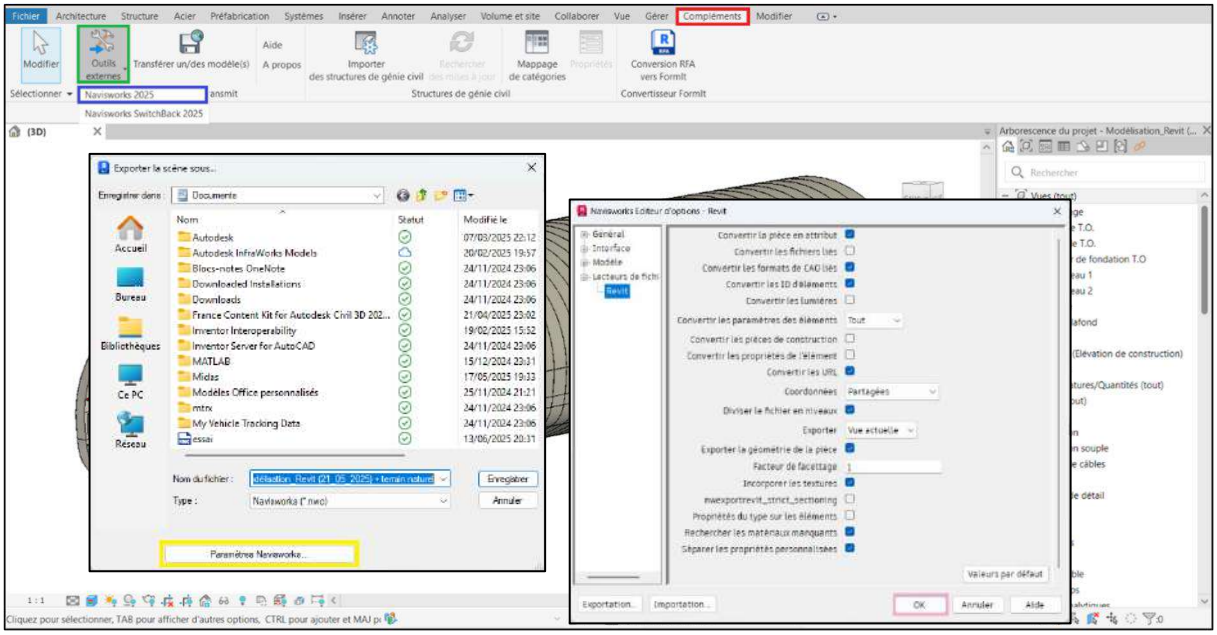


Figure V.28 : Exportation du modèle Revit vers Navisworks au format .nwc

À noter : l'utilitaire d'exportation NWC de Navisworks (plug-in Navisworks Exporters 2025) doit être préalablement installé.

Cette exportation permet de transférer l'ensemble des éléments modélisés dans Revit, tout en conservant la géométrie et les propriétés associées à chaque élément.

V.3.2. Importation dans Navisworks

Une fois le fichier .nwc exporté depuis Revit, il est importé dans Navisworks Manage pour procéder au test de détection des conflits.

L'importation se fait simplement via la commande « Fichier » > « Ouvrir », en sélectionnant le fichier .nwc correspondant au modèle.

Après importation, le modèle s'affiche dans la scène de Navisworks (figure V.29).

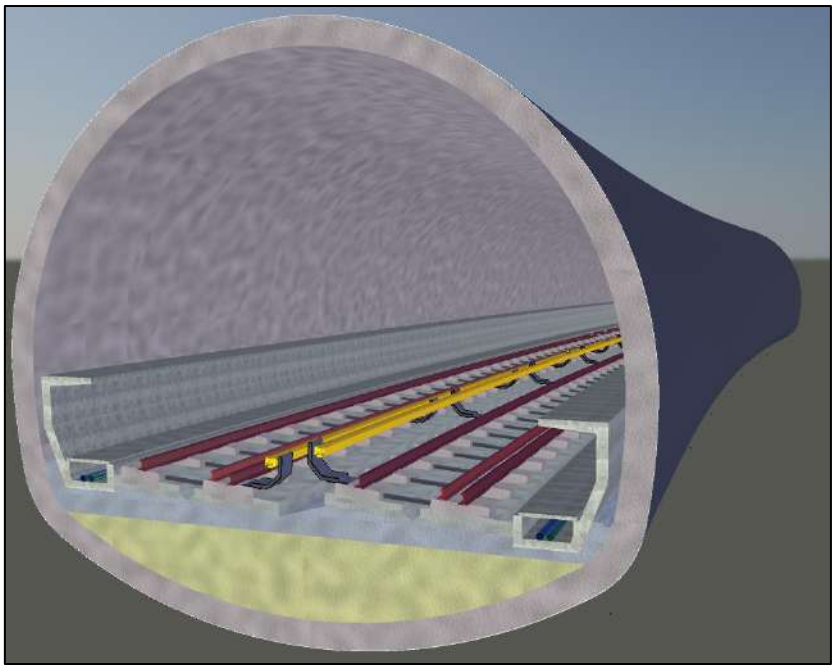


Figure V.29 : Modèle final du tunnel généré dans Revit, importé dans Navisworks.

V.3.3. Paramétrage du test de détection de conflits

La détection des conflits a été initiée par le lancement de la commande « Clash Detective > Ajouter un test ». Suite à cette action, la fenêtre Clash Detective s'ouvre, comportant quatre onglets(voir figure V.30).

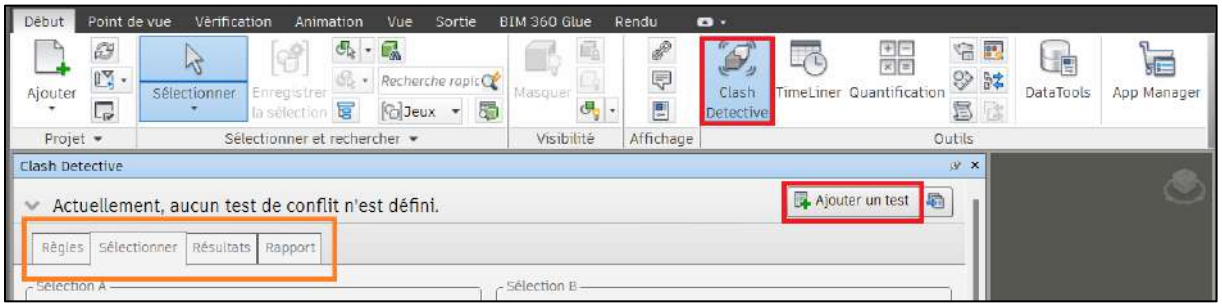


Figure V.30 : Accès à la commande « Clash Detective » et affichage de sa fenêtre dans Navisworks.

Dans l'onglet « Sélectionner », les deux ensembles d'éléments à comparer ont été définis :

- Sélection A : colonne sèche
- Sélection B : câble électrique

Les paramètres du test ont ensuite été configurés : une tolérance de conflit de 0 mm a été appliquée, avec un type de détection « Dur » (Hard Clash).

La figure suivante présente la configuration des sélections ainsi que les paramètres appliqués pour le test.

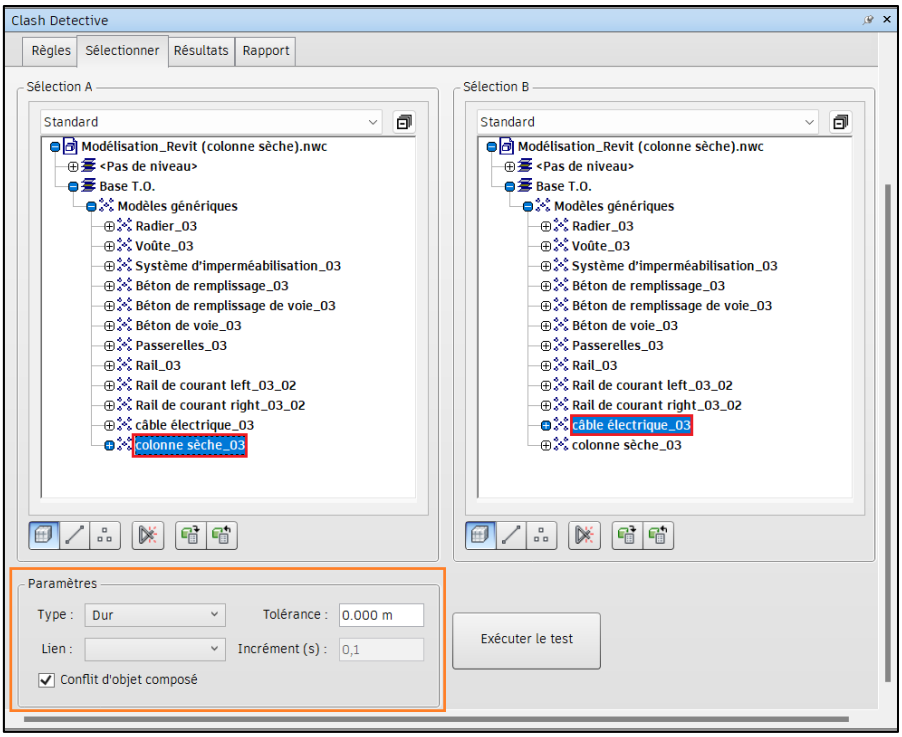


Figure V.31 : Configuration des sélections et des paramètres du test de détection des conflits dans Navisworks

V.3.4. Analyse des résultats

Une fois les paramètres définis, l'analyse a été lancée via le bouton « Exécuter le test ». L'onglet « Résultats » s'affiche alors automatiquement, présentant dans sa section supérieure le nombre total de conflits détectés ainsi que leur répartition par état (nouveau, actif, résolu, etc.). Une liste détaillée recense chaque conflit identifié (Figure V.32).

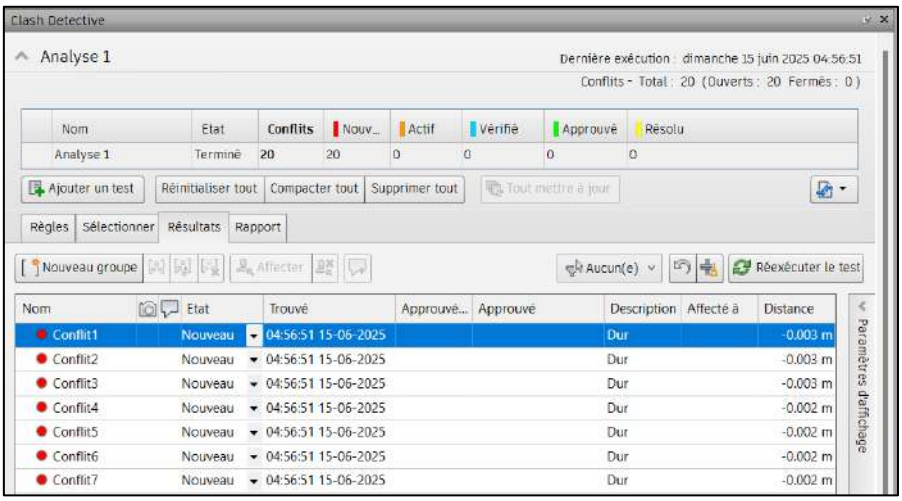


Figure V.32 : Affichage des résultats du test de détection des conflits

La visualisation des conflits détectés se fait par sélection individuelle dans cette liste. Chaque sélection centre automatiquement la vue 3D sur l'intersection problématique, avec surbrillance des éléments en conflit. Dans le cadre de cette simulation, 20 conflits ont été identifiés entre les câbles électriques et les colonnes sèches. La Figure V.33 illustre le conflit n°1 tel qu'il apparaît dans l'interface de visualisation.

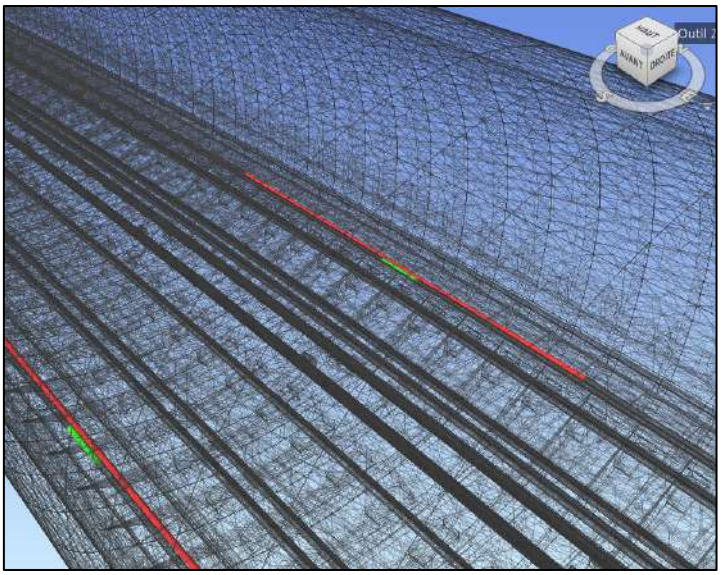


Figure V.33 : Illustration du conflit n°1 détecté entre câble électrique et colonne sèche

À l'issue de l'analyse, un rapport regroupant l'ensemble des conflits détectés est automatiquement généré. Ce rapport est ensuite exporté via la commande « Produire le rapport », accessible depuis l'onglet « Rapport ». Ce document est disponible en annexe 6.

Suite à cette analyse, il a été décidé de modifier la conception initiale en déplaçant la colonne sèche hors des passerelles, afin d'éviter toute interférence avec les câbles électriques. Le modèle du tunnel mis à jour, intégrant ce changement, est présenté dans la figure suivante.

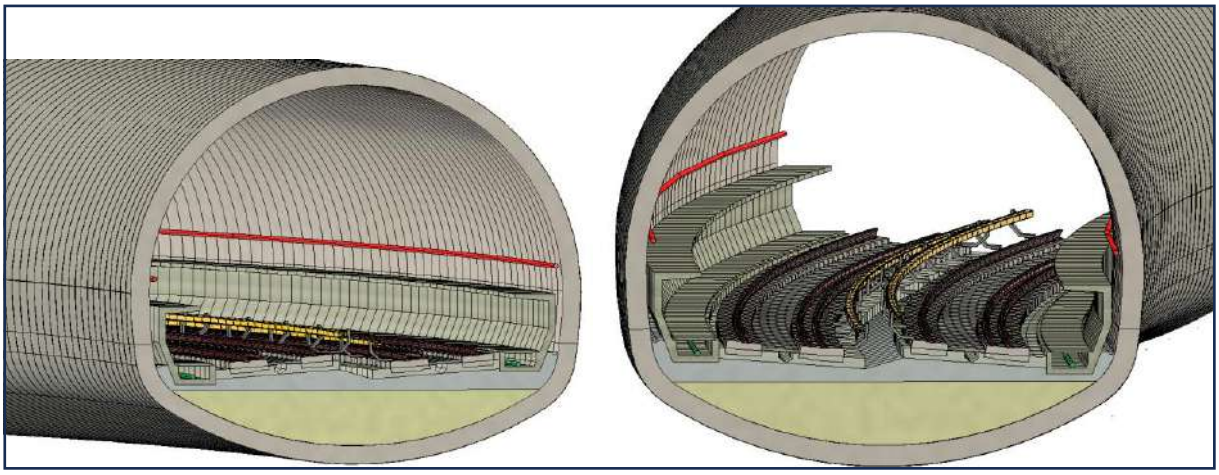


Figure V.34 : Modèle du tunnel mis à jour après déplacement de la colonne sèche hors des passerelles

V.4. CONCLUSION

La modélisation native dans Revit développée dans ce chapitre permet le passage de la dimension 3D du BIM vers les dimensions avancées de cette approche. En effet, le modèle généré est dissociable et interactif, ce qui lui permet de s'adapter parfaitement à la simulation du phasage de construction (BIM 4D) et à l'évaluation des coûts et quantités (BIM 5D).

Par ailleurs, les tests de détection des conflits menés en phase de conception de la maquette permettent d'identifier et de résoudre les éventuelles interférences entre les différents éléments avant le passage à la phase d'exécution.

CHAPITRE VI
MODÉLISATION ET ANALYSE STRUCTURELLE

VI.1. INTRODUCTION

Ce chapitre traite la stabilité géotechnique et structurelle tant pour le soutènement provisoire que pour le revêtement définitif du tunnel. Ainsi, la première partie vérifie la stabilité géotechnique des excavations du tunnel, avec une estimation des efforts qui se développent ; la deuxième partie quant à elle permet d'estimer les charges qui s'appliquent sur le revêtement définitif du tunnel, les efforts internes qui se développent, et enfin, le dimensionnement.

VI.2. MODÉLISATION ET VÉRIFICATION DU SOUTÈNEMENT PROVISOIRE

La vérification du soutènement provisoire est effectuée par la méthode du solide composite, à l'aide du logiciel d'éléments finis Midas GTS NX.

VI.2.1. Élaboration du modèle et paramétrage géotechnique et structurel

Le modèle géotechnique est établi sur la base des résultats du chapitre étude géotechnique. Le tunnel a été divisé à des tronçons de 1m pour permettre la représentation du phasage d'avancement.

Le soutènement provisoire considéré dans cette modélisation est constitué par des cintre HEB 140 avec couche de béton projeté de 25 cm. Des paramètres équivalents ont été considérés et qui ont été obtenu par la méthode de Carranza-Torres 2009 (voir le calcul en figure 01 Annexe 7).

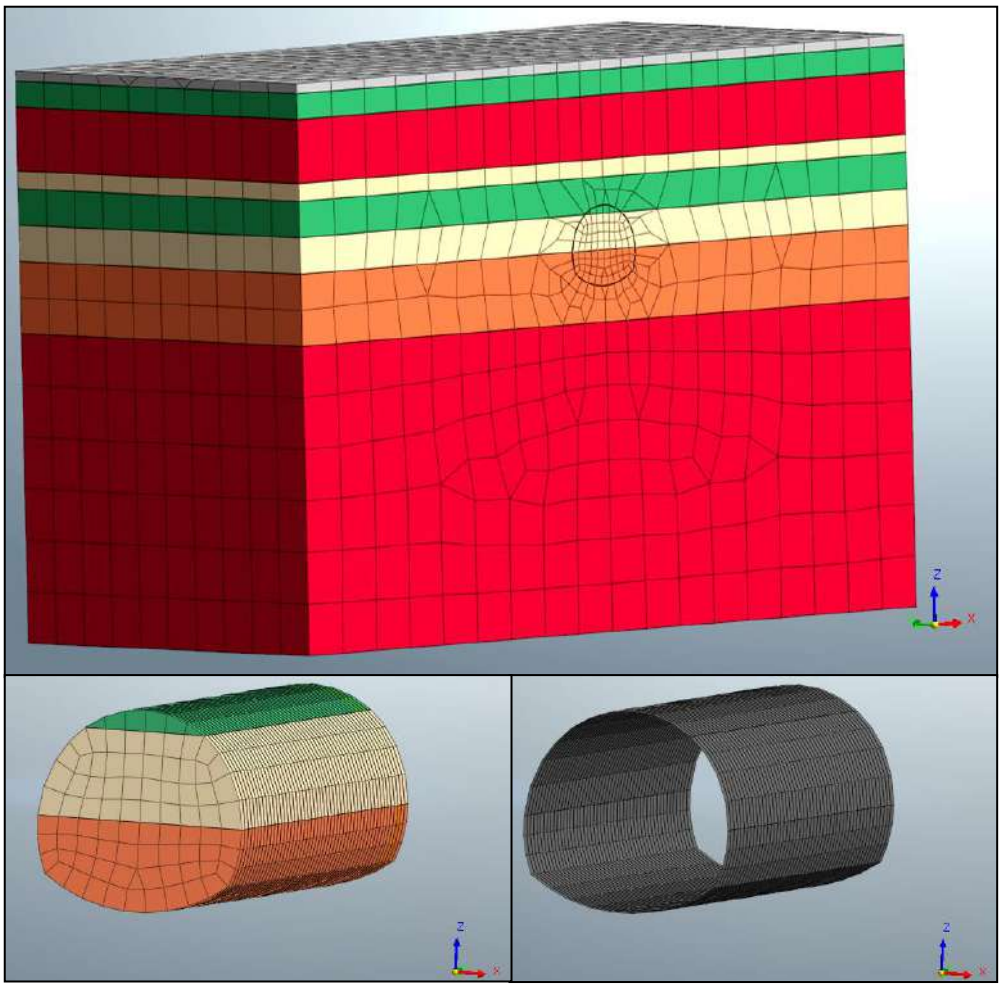


Figure VI.1 : Élaboration du modèle de calcul.

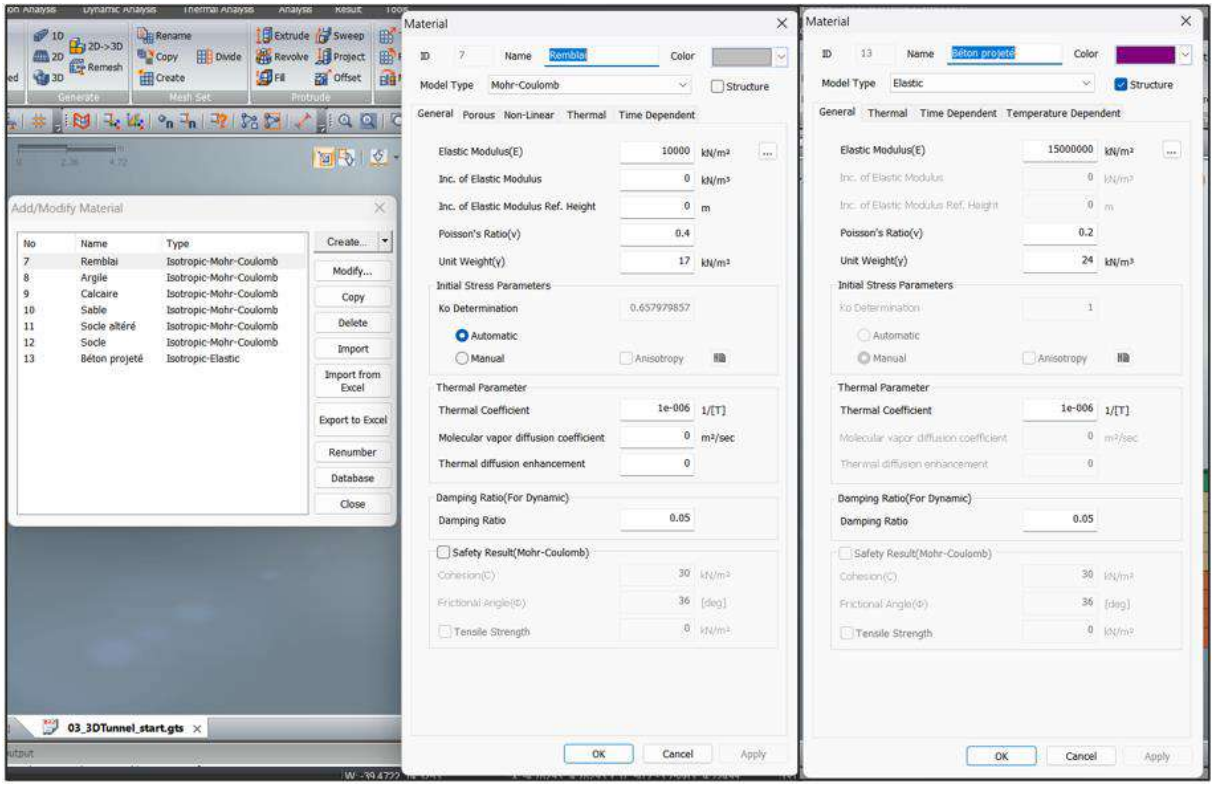


Figure VI.2 : Exemple de paramètres géotechniques et structurels intégré dans le calcul.

VI.2.2. Paramétrage du phasage de réalisation

Après l'élaboration du modèle de calcul, et l'exécution des différents maillages des éléments (terrain, soutènement), et l'adoption des conditions initiales (géostatiques) et des conditions aux limites du modèle, la modélisation du phasage de réalisation a été effectuée à l'aide de l'outil « Staged construction), ce phasage consiste au creusement de la calotte dans la première phase suivie par la mise en œuvre du soutènement provisoire, et à la 11e phase, le creusement du stross, suivi par une phase de pose de soutènement au niveau du stross.(Voir figure 02 annexe 7).

VI.2.3. Résultat

VI.2.3.1. Déplacement vertical

Les résultats obtenus ont révélé un déplacement vertical au niveau de la voûte de l'ordre de 2.4 cm au niveau de la clé de voûte, et d'environ 6.3 mm au niveau de la surface, comme illustré dans la figure 03 Annexe 7

VI.2.3.2. Déplacement horizontal

Les résultats obtenus ont révélé un déplacement au niveau de la voûte de l'ordre de 4.3 cm au niveau du rein du tunnel. Cette situation peut d'expliqué par la présence, dans cette zone, de terrain de très faibles caractéristiques géotechniques (le niveau de sables), (Voir figure 04 annexe 7).

VI.2.3.3. Déplacement au niveau du front d'excavation

Les résultats obtenus sont venus confirmer ceux des déplacements horizontaux sur la section transversale du tunnel. En effet, une extrusion de front assez conséquente a été enregistrée qui est de l'ordre de 72 cm. Cette valeur est expliquée aussi par les conditions de terrains, qui sont constitués par des sables. À cet effet, il est préconisé de réaliser, d'une part, un renforcement du front par des boulons de fibre de verre, et d'autre part, une protection de la voûte du tunnel par des enfilages/voûte parapluie. (Voir figure 05 annexe 7).

VI.2.3.4. Résultats des efforts internes

La modélisation effectuée a permis d'identifier, au niveau de la section transversale du soutènement provisoire, les efforts internes représentés dans la figure 06 Annexe 7, le tableau (VI.1) résume les efforts internes.

Tableau VI.1 : Résultats des efforts internes au niveau de soutènement provisoire

Les efforts internes	Valeur min	Valeur max
Effort normal	-933.00 KN/m	1006.00 KN/m
Moment fléchissant	-61.30 KN.m/m	16.2 KN.m/m
Effort tranchant	-82.60 KN/m	48.5 KN/m

VI.3. MODÉLISATION ET VÉRIFICATION DU REVÊTEMENT DÉFINITIF

L'étude structurelle du revêtement de tunnel débute par le calcul des charges appliquées selon deux approches classiques : la théorie de Terzaghi et la méthode des poids des terres. Elle examine ensuite la possibilité d'une interopérabilité entre Revit et Robot Structural Analysis Professional pour assurer la continuité du processus BIM présenté dans le chapitre V. La modélisation analytique sur Robot est détaillée à travers la création d'un modèle 2D pour une analyse par éléments finis. Enfin, une étude du ferraillage est effectuée à partir des résultats obtenus.

VI.3.1. Calcul des charges

VI.3.1.1. Détermination des charges verticales et horizontales agissant sur le revêtement du tunnel selon la théorie de TERZAGHI

La théorie de la voûte a été développée pour les tunnels creusés dans des matériaux granulaires secs et sans cohésion.

Elle suppose que la masse de sols entourant l'ouverture est en mouvement. Ce mouvement débute dès l'excavation et se poursuit pendant la construction du soutènement.

On suppose que le mouvement est suffisamment important pour créer une série de surfaces de glissement.

La largeur de la masse en mouvement au-dessus du sommet du tunnel est déterminée en supposant que la direction du mouvement du sol est inclinée à un angle ($45 + \frac{\varphi}{2}$) par rapport à l'horizontale (Terzaghi, 1946) [43].

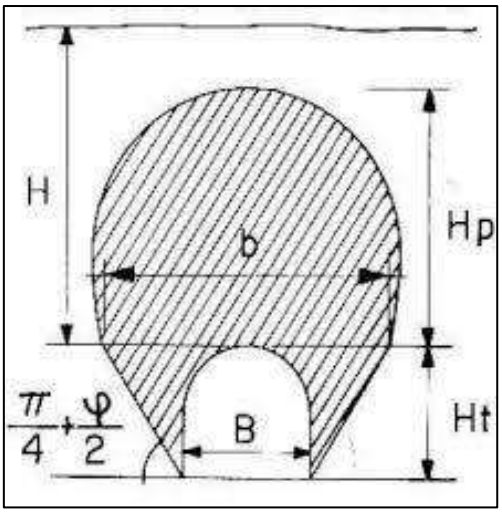


Figure VI.3 : Hypothèse de calcul de TERZAGI.

VI.3.1.2. Charge verticale active due au terrain encaissant

Selon la théorie de TERZAGHI (1943), la charge verticale s'exprime par la formule suivante :

$$P_V = \frac{B\,(\gamma - 2C/B)}{2\,tg\,\varphi}\left(1 - e^{\frac{-2H}{B}tg\,\varphi}\right) + \mathrm{q}\left(e^{\frac{-2H}{B}tg\,\varphi}\right);\ \mathrm{B} = \mathrm{b} + 2\,\mathrm{h}\,\mathrm{tg}\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$$

Avec :

H: profondeur entre la surface du sol et la clé de voûte du tunnel (m).

h : hauteur de la voûte du tunnel (m).

b : largeur de la base du tunnel (m).

B: largeur influencée au niveau du terrain (m).

q : surcharge en surface (kN/m²).

- Étant donné que le tracé du tunnel se situe en dessous de zones bâties et d'après la note de calcul M AL APD LT3 GCG STR NC TNL 000 0601 0, une surcharge uniforme de q=30 kN/m² a été considérée afin de représenter les charges induites par les constructions en surface.

- **Calcul du poids volumique moyen**

$$\gamma = \frac{\sum_i^n \gamma_i\, h_i}{h_{tot}}$$

- **Calcul de la cohésion moyenne**

$$C = \frac{\sum_i^n C_i\, h_i}{h_{tot}}$$

- **Calcul de l'angle de frottement moyen**

$$\varphi = tan^{-1}\left(\frac{\sum_i^n tan\,\varphi_i\ *\ h_i}{h_{tot}}\right)$$

Unité	$\boldsymbol{\gamma_i}$ (kN/m³)	$\boldsymbol{h_i}$(m)	$\boldsymbol{\varphi_i}$ (°)	$\boldsymbol{C_i}$(KPa)
Remblai	17	6.18	20	5
Argile	20	4.48	38.073	78
Sable	18	1.3	33.40	0
Calcaires	25	3.3	55.18	85
Terrain équivalent	19.71	15.25	36.68	43.33

Unité	$\boldsymbol{\gamma}$(kN/m³)	H(m)	$\boldsymbol{\varphi}$(°)	**c** (KPa)	b(m)	h(m)	q(KPa)	B(m)	$\mathbf{P_V}$(KPa)
Terrain équivalent 1	19.71	15.25	36.68	43.33	9.82	8.65	20	18.5	138.84

VI.3.1.3. Charge horizontale active due au terrain encaissant

D'après les travaux de TERZAGHI, la charge verticale s'exprime par la formule suivante :

$$P_h = 0.3\,\gamma\,(0.5\,m + h_p)\,; \quad h_p = \frac{b}{2\,\sin\varphi}$$

Avec :

m : hauteur du tunnel (m).

h_p : hauteur de noyau de détente (m).

Unité	$\boldsymbol{\gamma}$(kN/m³)	$\boldsymbol{h_i}$(m)	$\boldsymbol{\varphi}$(°)	**c**(KPa)
Sable	18	4	33.4	0
Socle altéré	27	4.65	37.78	42

Unité	$\boldsymbol{\gamma}$(kN/m³)	$\boldsymbol{\varphi}$(°)	**c** (KPa)	b(m)	m(m)	$\boldsymbol{h_p}$ (m)	$\mathbf{P_h}$(KPa)
Terrain équivalent 2	22.84	35.81	22.58	9.82	8.65	8.39	87.12

le profil géotechnique équivalent utilisé pour le calcul des charges selon la théorie de Terzaghi est présenté dans la figure 07 Annexe 7.

VI.3.2. Détermination des charges verticales et horizontales agissantes sur le revêtement du tunnel selon la méthode géostatique

Selon les recommandations de l'AFTES : Réflexion sur les méthodes usuelles de calcul du revêtement des souterrains, le champ de contrainte existant dans le terrain encaissant avant creusement de la galerie est appelé champ de contraintes géostatique. La composante verticale de la contrainte en un point est la contrainte géostatique verticale P_{V0} en ce point. Elle est égale à γ. h , γ étant le poids volumique du terrain en un point situé à la hauteur H au-dessus du tunnel. La contrainte géostatique horizontale dans le massif au repos avant toute perturbation due au creusement est égale a $P_{h0} = K_0\,P_{V0}$ ou K_0 est un coefficient souvent compris entre 0 et 1 (coefficient de poussée de terrain au repos).

VI.3.2.1. Charge verticale active due au terrain encaissant

- La charge verticale est calculée à la fois au niveau de la voûte (15.25 m) et au niveau de la naissance (20.17 m), afin d'évaluer les efforts transmis en partie supérieure du tunnel et sur les appuis latéraux.

Unité	Profondeur	γ(KN/m³)	H(m)	P_{V0}(KPa)
Remblai	0-6.18	17	6.18	**135.06**
Argile	6.18-8.88	20	2.7	189.06
Calcaire	8.88-12.18	25	3.3	271.56
Sable	12.18-13.48	18	1.3	294.96
Argile	13.48-15.25	20	1.78	330.56
Sable	15.25-19.18	18	3.93	401.3
Socle altéré	19.18-20.17	27	0.99	428.03

VI.3.2.2. Charge horizontale active due au terrain encaissant

- La charge horizontale est calculée au niveau de la voûte (15,25 m), au niveau de la variation du terrain (19,18 m) correspondant à la transition entre le sable et le socle altéré, ainsi qu'au niveau du radier.

Unité	Profondeur(m)	K_0	P_{V0}(KPa)	P_{h0}(KPa)
Sable	15.25	0.4	330.56	132.22
	19.18		401.3	160.52
Socle altéré	19.18	0.54	401.3	216.70
	23.9		528.74	285.52

VI.3.3. Calcul de la charge sous le radier selon TSIMBARIEVITCH

TSIMBARIEVITCH prend en considération la butée qui s'exerce sous le niveau du radier. Cette poussée peut être calculée en fonction des caractéristiques (φ et c) du terrain sous le radier, ainsi que de la poussée verticale P supporté par le sol au niveau du radier, de part et d'autre de celui-ci.

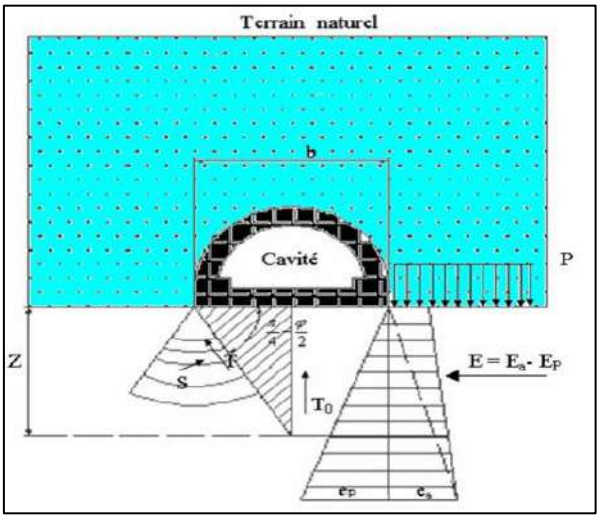


Figure VI.4 : Représentation des poussées sur le radier d'après TSIMBARIEVITCH.

À une profondeur Z sous le radier, les expressions de la poussée et de la butée s'écrivent respectivement comme suit :

$$E_a = (P + \gamma Z) . K_a - 2 . C . \sqrt{K_a}$$

$$E_p = \gamma Z . K_p - 2 . C . \sqrt{K_p}$$

$$K_a = tg^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$$

$$K_p = tg^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$$

$$P_{Vi} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i + q$$

Avec : K_a: Coefficient de poussée du terrain active.

K_p: Coefficient de butée.

Pour $E_a = E_p$ la profondeur z vaut :

$$Z = \frac{P K_a - 2C\left(\sqrt{K_p} - \sqrt{K_a}\right)}{\gamma (K_P - K_a)}$$

L'effort horizontal agissant dans le sens de l'excavation est : $E = E_a - E_p$

Les efforts ascendants sur le radier venant de deux côtés sont exprimés par la formule suivante :

$$T_0 = \frac{2 E}{\cos \varphi} \sin^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$$

La charge verticale T_0 doit être répartie sur la longueur Y, calculée par la formule suivante :

$$Y = \frac{Z}{\tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}$$

Vérification du non-soulèvement :

$$\sigma \leq \left[\frac{4 C}{(1 - \sin \varphi)}\right] (2 + \sin \varphi) \cos \varphi$$

Avec : $\sigma = \frac{T_0}{Y}$: La contrainte provoquée sous le radier

Unité	φ(°)	K_a	K_p
Terrain équivalent 2	35.81	0.12	8.16

Unité	Z(m)	P(KPa)	E_a(KPa)	E_p(KPa)	E(KPa)	T_0(KPa)	Y(m)	σ (KPa)
Socle	-1.88	528.74	-7.77	-951.24	943.47	330.31	-5.37	-61.51

Vérification du non-soulèvement :

$$\sigma \leq \left[\frac{4\,x\,94}{(1\,-\,\sin\,51.41)}\right](2+\sin 51.41)\cos 51.41$$

$$-61.51 \leq \ 2987.44$$

La condition étant vérifiée, aucun soulèvement du radier ne se produira.

VI.3.3.1. Évaluation des charges appliquées

La couche de calcaire reposant sur le sable est une surcharge non négligeable, ainsi, l'application de la méthode de TERZAGI pourrait fausser l'estimation du comportement réel du terrain. À cet effet, les résultats issus de la méthode géostatique sont retenus pour une évaluation plus représentative, le tableau VI.1 récapitule les charges appliquées au revêtement définitif du tunnel.

Tableau VI.2 : Tableau récapitulatif des charges appliquées au revêtement définitif du tunnel.

Charge active verticale (kPa)		Charge active horizontale (KPa)	
Voûte	Naissance	Sable	Socle altéré
330.56	428.03	132.22	216.70
		160.52	285.52

VI.3.4. Interopérabilité Revit - Robot Structural Analysis Professional

Une fois le tunnel modélisé dans Revit, conformément au workflow décrit dans le chapitre précédent, l'étape suivante a été d'exporter le modèle vers un outil d'analyse structurelle. Nous avons choisi d'utiliser Robot Structural Analysis Professional, également développé par Autodesk, afin d'assurer la compatibilité avec la suite logicielle.

VI.3.4.1. Modélisation d'un portique test dans Revit et exportation vers Robot Structural Analysis Professional

Dans un premier essai, un portique composé de deux poteaux et une poutre a été modélisé dans Revit comme illustré dans la (figure VI.4)

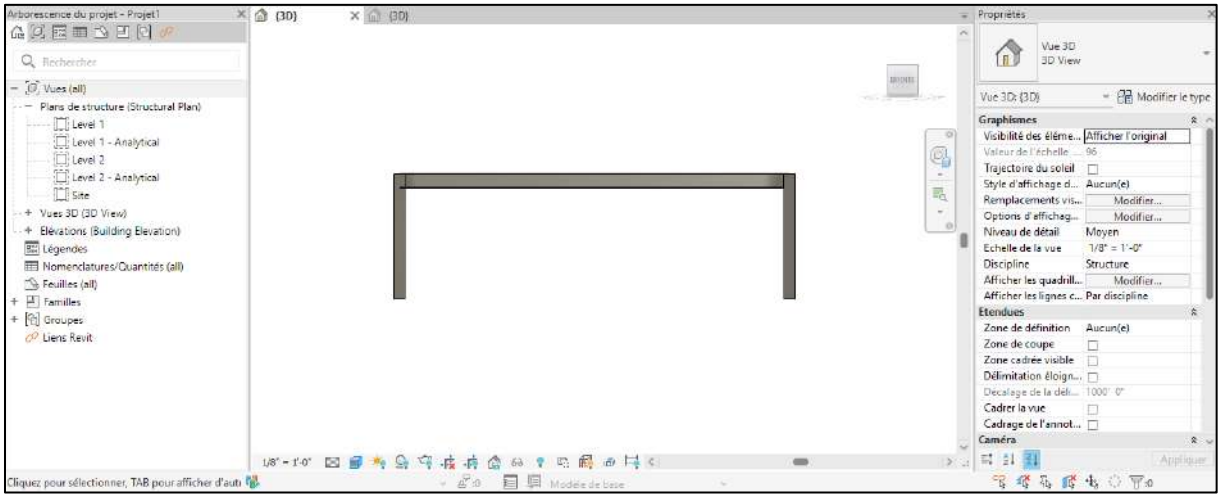


Figure VI.5 : Modélisation d'un portique test dans Revit.

Avant de pouvoir exporter le portique vers Robot Structural Analysis Professional, le modèle conçu doit être converti d'un modèle physique à un modèle analytique. Il est important de noter que :

- Un modèle physique est la structure telle qu'elle sera construite. Il inclut le type, les dimensions et les matériaux des éléments de la structure (poutres, poteaux, dalles, etc.). Ce modèle est principalement utilisé pour la documentation de construction et les vues architecturales.
- Un modèle analytique est une représentation simplifiée du modèle physique, utilisée pour l'analyse structurelle. Il est composé de lignes ou surfaces représentant les axes des éléments porteurs, auxquelles sont associées des propriétés de matériau, de géométrie et de charges qui, ensemble, constituent un système technique.

Pour permettre l'automatisation analytique à partir du modèle physique, on utilise la commande « Automatisation analytique » dans l'onglet « Analyser », après avoir sélectionné le modèle concerné.

En utilisant le modèle physique comme contexte, générez les éléments analytiques et connectez-les. Une fois le modèle analytique créé, il peut être mis à jour automatiquement en fonction des modifications apportées au modèle physique.

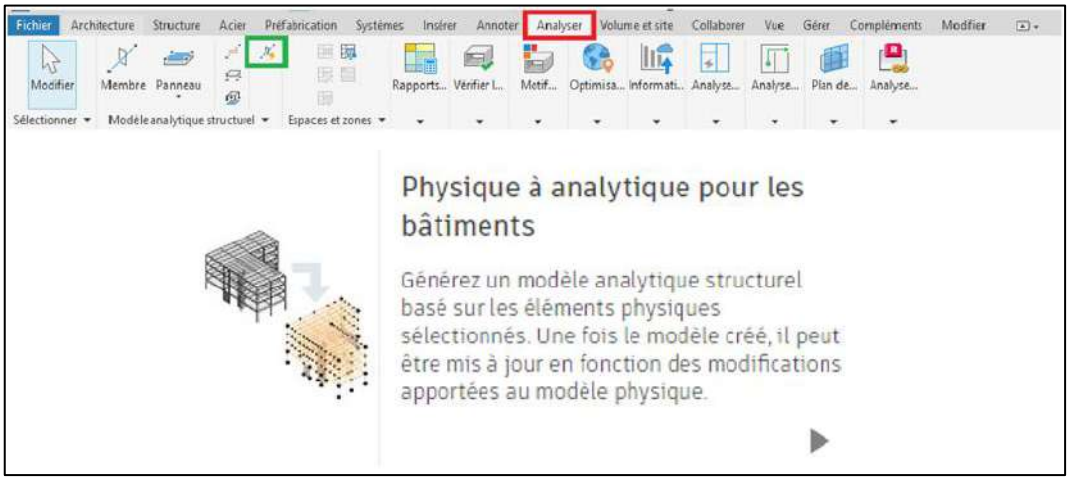


Figure VI.6 : La génération automatique du modèle analytique à partir du modèle physique

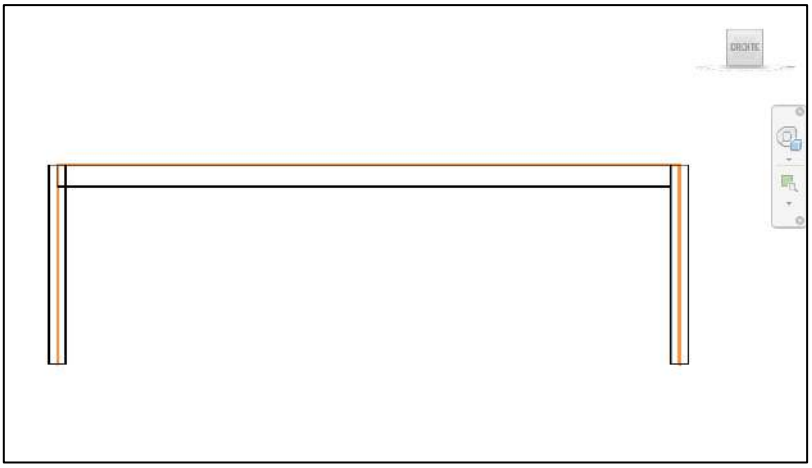


Figure VI.7 : Modèle analytique du portique.

Pour exporter le modèle analytique depuis Revit vers Robot Structural Analysis Professional, il est nécessaire d'installer au préalable l'extension « Extension d'intégration Revit et Robot Structural Analysis ». Elle assure la compatibilité entre les deux logiciels et permet le transfert des données analytiques (géométrie, matériaux …).

L'exportation se fait via l'onglet « Analyser », il suffit ensuite de cliquer sur la commande « Robot Structural Analysis » puis de sélectionner « Intégration avec Robot Structural Analysis ».

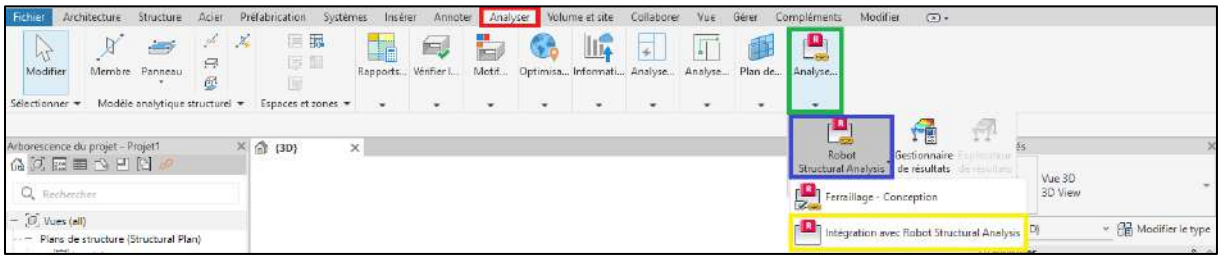


Figure VI.8 : Exportation du portique de Revit vers Robot Structural Analysis Professional.

Dans ce processus, il a été possible de transmettre les informations géométriques des éléments structuraux, ainsi que les caractéristiques physiques des matériaux, qui les composent, ce qui permet ensuite de poursuivre l'analyse structurelle. Le modèle importé de Revit vers Robot Structural Analysis Professional est présenté dans la figure08, Annexe 7.

VI.3.4.2. Exportation du modèle du tunnel vers Robot Structural Analysis Professional

Dans le but d'exporter le modèle du tunnel vers Robot Structural Analysis Professional, nous avons choisi de travailler sur un tronçon réduit de 10 mètres pour faciliter son traitement et son exportation. Plusieurs tentatives ont été effectuées pour transférer les données du modèle de Revit vers Robot Structural Analysis Professional.

Pour la première tentative, nous avons exporté le modèle par la commande « Intégration avec Robot Structural Analysis ». Cet essai a échoué, car le modèle physique n'a pas été converti en modèle analytique. De ce fait, Robot n'a pas reconnu le modèle comme valide et donc le fichier importé était vide.

La deuxième tentative a consisté à enregistrer le modèle dans des formats standards tels que IFC, DWG ou DXF, puis à les ouvrir dans Robot. Cette approche n'a pas non plus abouti : les fichiers ouverts étaient vides, Robot ne parvenant pas à interpréter les éléments structuraux.

La troisième tentative a impliqué l'enregistrement du modèle au format .SAT (ACIS), puis son ouverture dans Robot. L'inconvénient de cette méthode est que ce format n'exporte pas les propriétés des matériaux des éléments, qui doivent alors être saisis manuellement. Cette fois, le modèle a bien été reconnu au niveau géométrique. Cependant il n'a pas été possible de réaffecter manuellement les matériaux dans Robot, rendant la poursuite de l'analyse structurelle impossible dans ce flux de travail. (Voir figure 09, Annexe 7).

Ce constat met en lumière la limitation de l'automatisation analytique dans Revit, qui ne prend en charge que certains types d'éléments. Selon la documentation officielle d'Autodesk,

l'automatisation analytique dans Revit prend en charge que les éléments suivants (Autodesk, 2023) [8]:

- Poteaux porteurs (les poteaux architecturaux ne sont pas pris en charge).
- Murs
- Ossature (y compris celles qui font partie des systèmes de poutre ou des fermes).
- Sols

À noter que : les fondations ne sont pas prises en compte dans ce processus. Tous les autres éléments sont conservés dans la sélection, mais exclus du processus de création et de mise à jour du modèle analytique (Autodesk, 2023) [8].

Les sections de tunnel, en tant qu'objets complexes souvent modélisés à l'aide de familles génériques adaptatives métriques, ne sont pas compatibles avec cette génération automatique. Par conséquent, l'automatisation analytique pour les tunnels n'est pas disponible dans Revit, ce qui explique les échecs rencontrés lors de l'exportation vers Robot Structural Analysis Professional par les méthodes classiques.

VI.3.5. Modélisation analytique sur Robot Structural Analysis Professional

VI.3.6. Définition du modèle de calcul

Le type de projet « étude d'une coque » a été choisi pour modéliser la section 2D du tunnel en raison de sa polyvalence. Le modèle « coque » regroupe les fonctions des plaques, poutres, voiles et membranes dans une seule formulation, il permet de simuler les efforts de membrane, la flexion, le cisaillement ainsi que le comportement des structures minces.

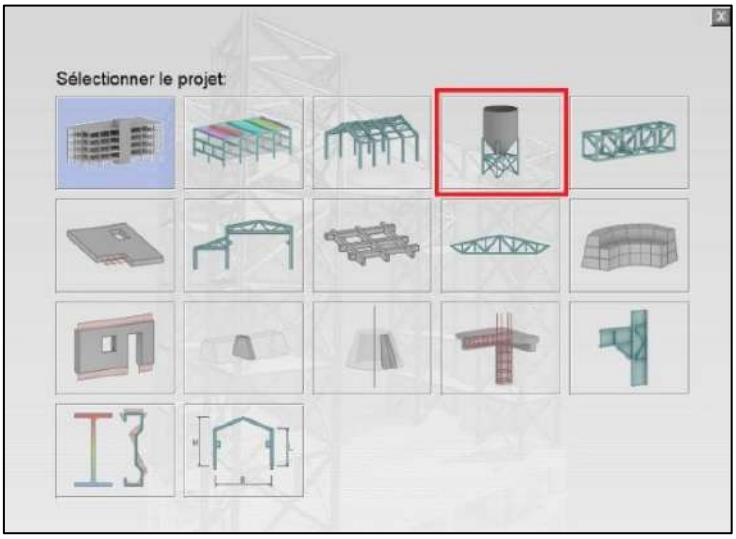


Figure VI.9 : Interface de sélection du « projet coque ».

VI.3.7. Modélisation géométrique de la section du tunnel

La modélisation de la section transversale du tunnel a commencé par la définition des lignes de construction via la commande « Définition des axes ». Les paramètres, tels que le repère cartésien, le point d'origine, la distance et le type de numérotation, ont ensuite été saisis, puis validés successivement à l'aide des commandes « Ajouter » et « Appliquer ». La liste des coordonnées créées s'est alors affichée dans la boîte de dialogue.

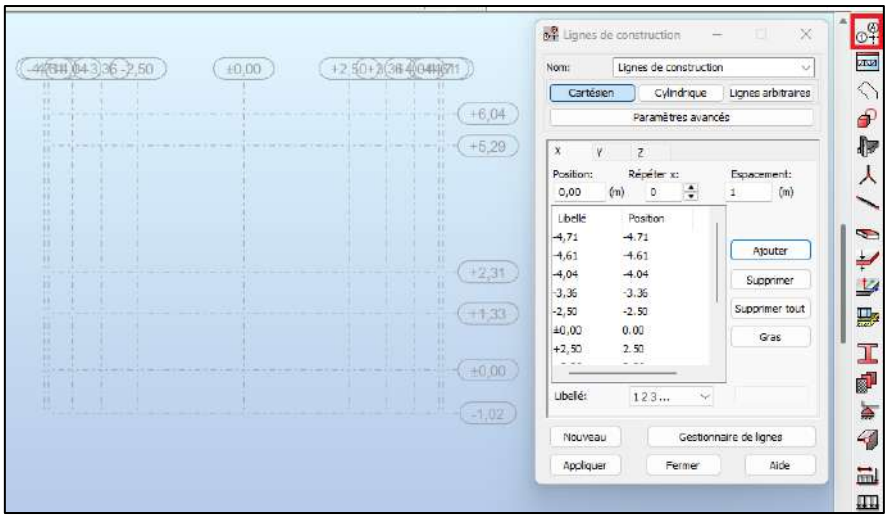


Figure VI.10 : Définition des lignes de construction.

L'étape suivante a consisté à dessiner la section transversale du tunnel à l'aide de la commande « Objets », puis « Arc ». Cette commande ouvre une boîte de dialogue structurée en quatre sections principales : Objet, Méthode de définition, Géométrie et Paramètres.

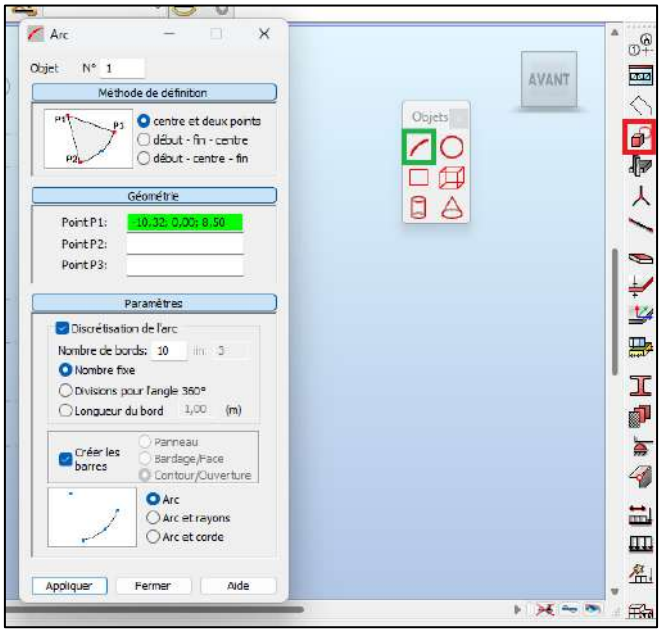


Figure VI.11 : Boîte de dialogue de la commande « Arc » utilisée pour le tracé de la section transversale du tunnel.

La section Méthode de définition permet de choisir la méthode de création de l'arc, ici fondée sur trois points (P1, P2, P3) définissant la courbure. La section Géométrie contient les champs de saisie des coordonnées de ces trois points. L'option Discrétisation de l'arc permet ensuite de définir le nombre de divisions de l'arc. Dans notre cas, l'option Nombre fixe a été sélectionnée afin d'imposer un nombre constant de divisions. Chaque élément dessiné a reçu une discrétisation propre, de manière à assurer une longueur d'élément uniforme, comprise entre 0,30 m et 0,34 m, dans le but d'avoir une section homogène.

La figure (VI.11) illustre la différence entre une section générée avec la discrétisation automatique (A) et une autre obtenue avec une discrétisation à nombre fixe (B). Cette dernière

présente une répartition plus régulière des mailles. Par ailleurs, l'activation de l'option « Créer les barres » a permis de convertir chaque arc en éléments de type barre. Le tableau (VI.2) présente, pour chaque élément de la section, la méthode de définition utilisée ainsi que les paramètres de discrétisation appliqués.

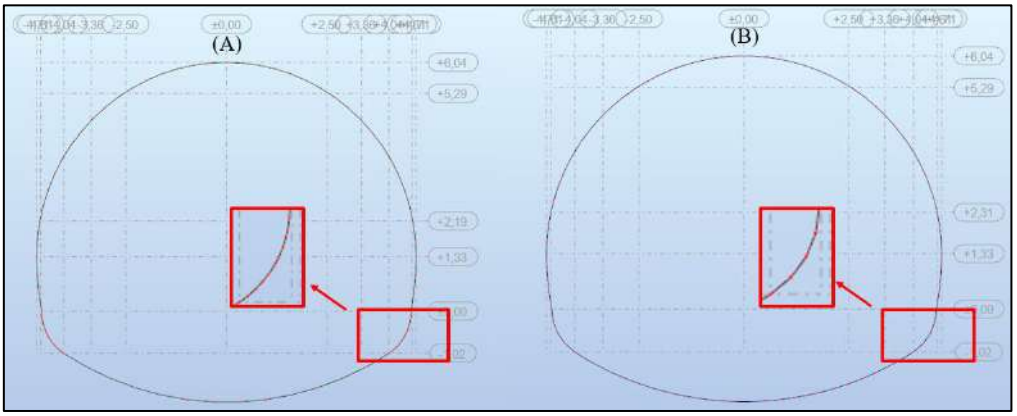
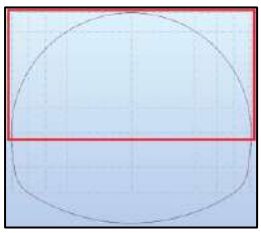
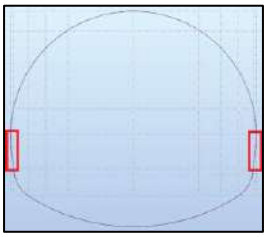
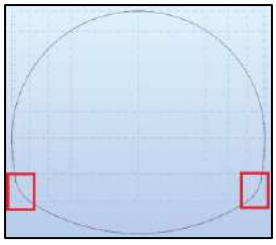
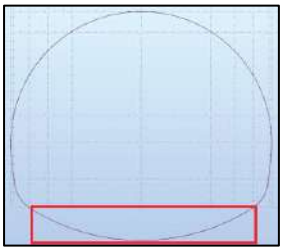


Figure VI.12 : Comparaison entre la discrétisation automatique (A) et la discrétisation à nombre fixe (B)

Tableau VI.3 : Méthodes de définition et paramètres de discrétisation des éléments de la section.

Élément	Méthode de définition	Discrétisation	Longueur des éléments de type barre
(A) 	Début-fin-centre	45	0.33
(B) 	Centre et deux points	4	0.33
(C) 	Centre et deux points	4	0.3

(D) 	Centre et deux points	25	0.34

VI.3.8. Affectation de la section

Le matériau et la section attribués par défaut ne correspondaient pas aux spécifications définies dans la note de calcul. Il a donc été nécessaire de les modifier. Pour ce faire, il a fallu accéder à l'éditeur graphique, puis sélectionner la commande « Profilés de barres » dans la barre d'outils verticale située à droite de l'interface. En cliquant sur l'icône correspondante, la boîte de dialogue Nouvelle section s'ouvre. Les dimensions de la section (100 × 40 cm) ainsi que le matériau (béton de classe C30/37) y ont été saisis, avant de valider l'opération en cliquant sur Ajouter.

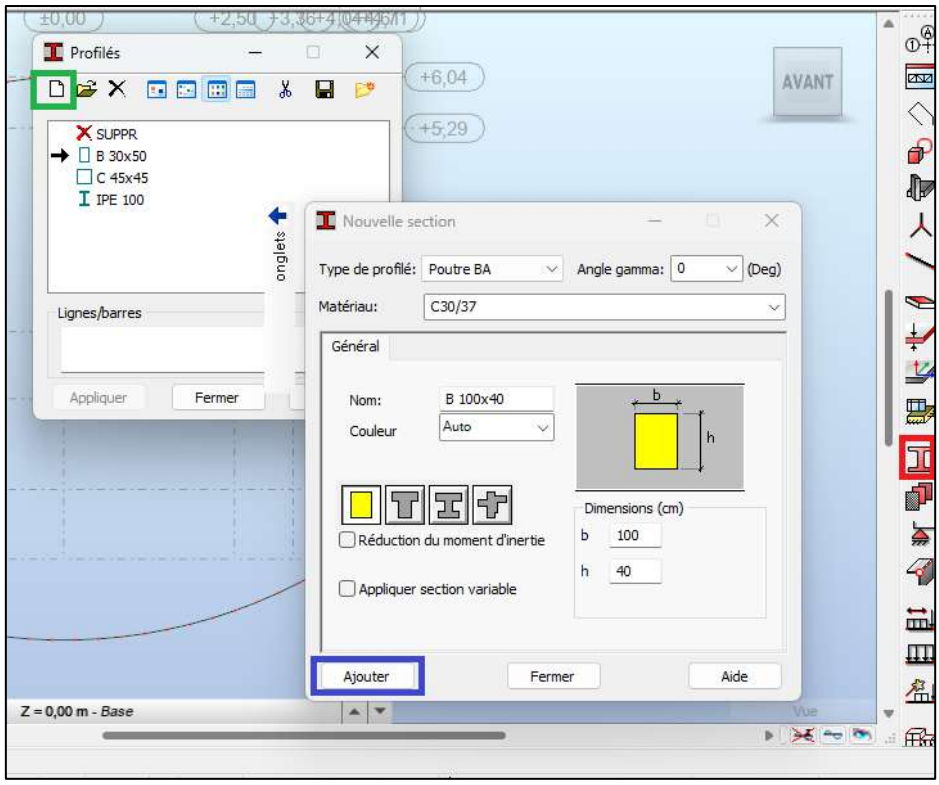


Figure VI.13 : Définition manuelle du matériau et de la section.

Pour attribuer le matériau et la section appropriés, les éléments constituant la section du tunnel ont été d'abord sélectionnés. Dans l'arborescence à gauche de l'interface, les propriétés de ces éléments ont ensuite été modifiées pour correspondre aux caractéristiques définies dans la note de calcul. Par ailleurs, le type d'élément a été modifié de "barre" à "poutre", pour prendre en compte les efforts normaux, les moments fléchissants et les efforts tranchants, conformément au mode de fonctionnement réel des arcs du tunnel qui sont sollicités en flexion et compression combinées.

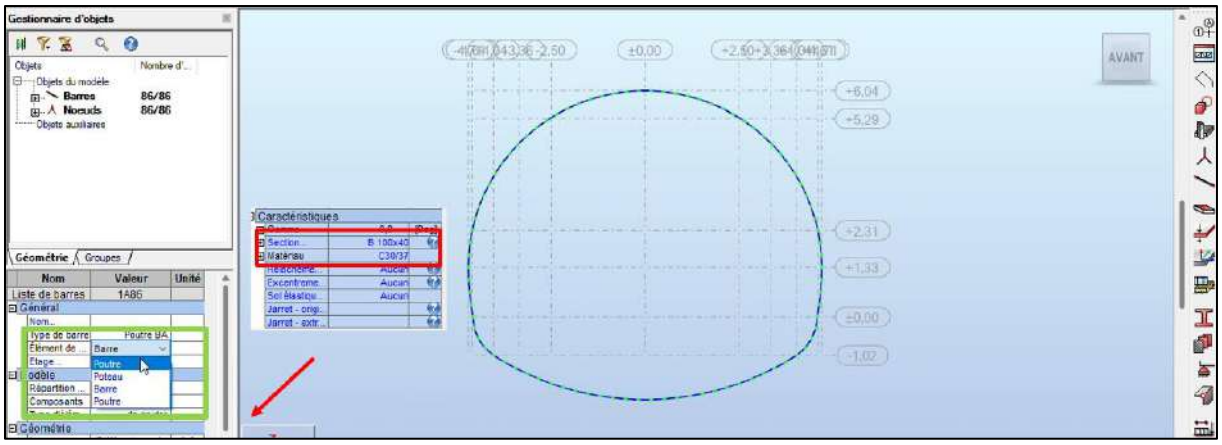


Figure VI.14: Affectation des propriétés mécaniques et modification du type d'élément en poutre pour les arcs de la section du tunnel.

VI.3.9. Conditions aux limites et modélisation des appuis

Pour intégrer l'interaction sol-structure dans la modélisation structurelle, il convient d'associer aux nœuds du modèle des appuis élastiques nodaux de type radial. Ces appuis, dont la raideur dépend des caractéristiques mécaniques du terrain, sont exprimés en unité de force par unité de déplacement. Le calcul de cette raideur s'appuie sur la formulation proposée par l'Association Française des tunnels et de l'espace souterrain (AFTES) :

$$K = \frac{E}{(1+\nu)R}\, e$$

Avec :

E : Module de déformation en (KPa).

R : Rayon du tunnel (pour les tunnels circulaires) en (m)

ν : Coefficient de poisson

e : discrétisation de l'arc

Le tableau ci-dessous représente la raideur du sol correspondant à chaque élément de la section du tunnel en fonction du rayon :

Tableau VI.4 : Calcul du coefficient de raideur

Élément	e(m)	Unité	h(m)	E (KPa)	ν	Rayon (m)	K(KN/m)
A	0.33	Sable	3.93	39098	0.33	4.91	1975.77
	0.33	Socle altéré	4.72	3.675×10^6	0.3	4.91	189996.87
B	0.33					9.42	99032.84
C	0.3					1.4	605769.23
D	0.34					7.7	124825.17

Pour l'affectation des appuis, chaque appui élastique radial a été défini individuellement à l'aide de la commande « Appui », en veillant à ce qu'il corresponde précisément à l'élément auquel il est associé. Les conditions de liaison appliquées sont les suivantes : le déplacement

selon l'axe Y ainsi que la rotation autour de l'axe X ont été bloqués, tandis que le déplacement selon l'axe Z et les rotations autour des axes Y et Z ont été laissés libres. Cette configuration se justifie par le fait que la modélisation est réalisée en 2D (plan ZX), et que les degrés de liberté hors plan n'ayant pas d'influence physique dans le cadre de l'analyse plane.

La raideur du terrain, préalablement calculée, a été affectée dans la direction UX. Enfin, pour garantir un comportement radial, chaque appui a été orienté en direction du centre de l'élément, la figure (VI.14) illustre le cas particulier de l'application de la raideur élastique du sable au niveau de la voûte. Les autres cas d'application des raideurs ont été traités de manière similaire et sont détaillés dans les figures 10–11 de l'annexe 7.

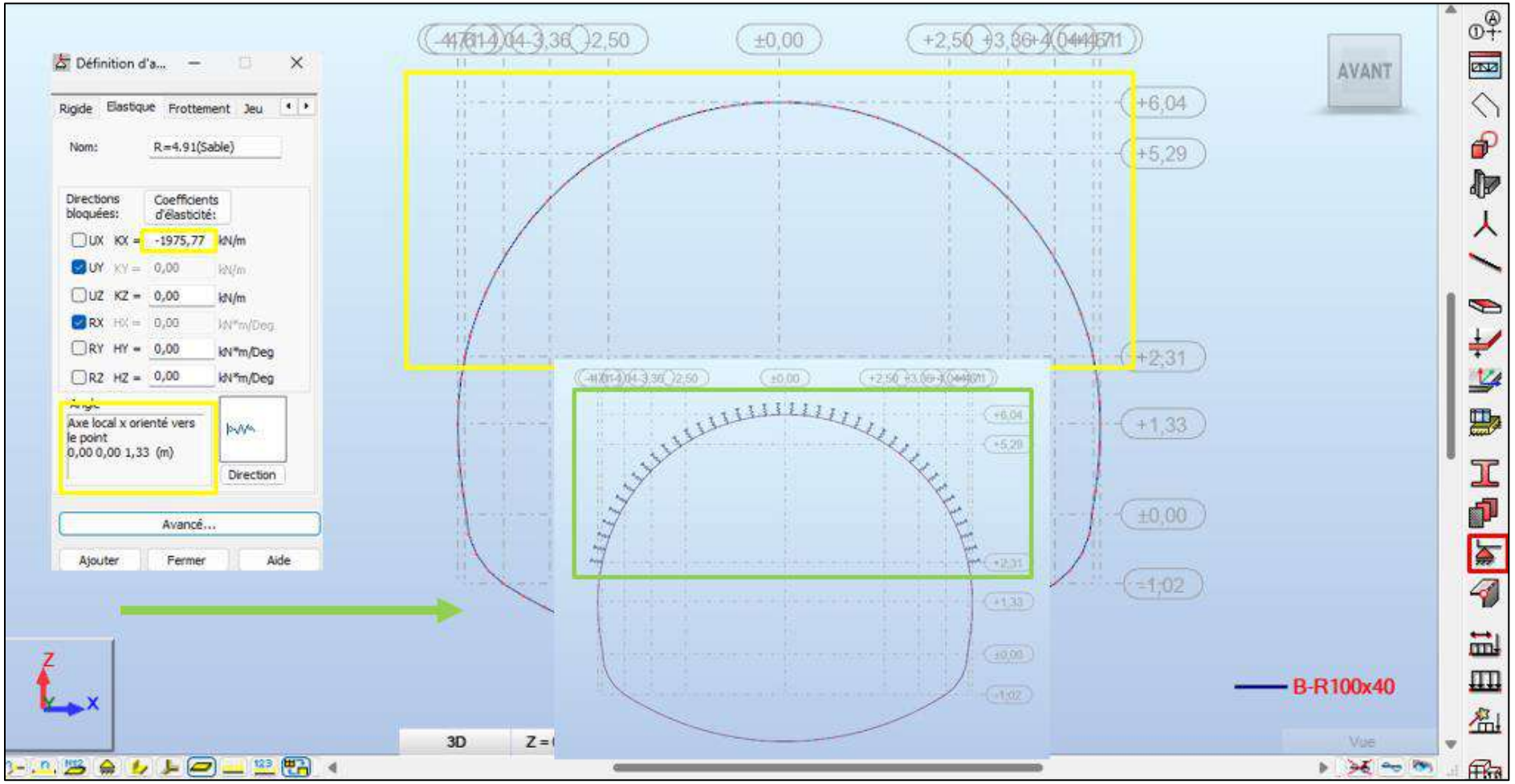


Figure VI.15 : Application de la raideur radiale du terrain

La figure (VI.15) illustre le modèle complet de la section transversale du tunnel, intégrant l'ensemble des appuis élastiques radiaux, orientés vers le centre de chaque élément, conformément aux conditions de modélisation définies.

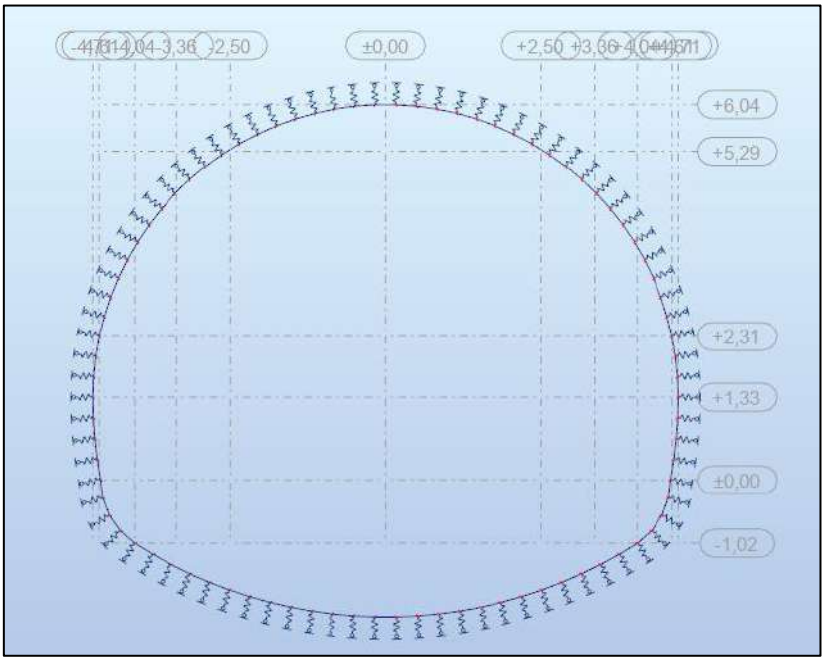


Figure VI.16 : Modèle de la section transversale du tunnel avec l'ensemble des appuis élastiques radiaux appliqués.

VI.3.10. Définition des charges et combinaisons de charges

Pour pouvoir appliquer les charges au revêtement du tunnel, il a d'abord fallu définir les cas de charge par le biais de la commande « Cas de charge ». Deux cas ont été définis : Poids propre du revêtement et Poids des terres (pression du sol latérale et surcharge verticale)

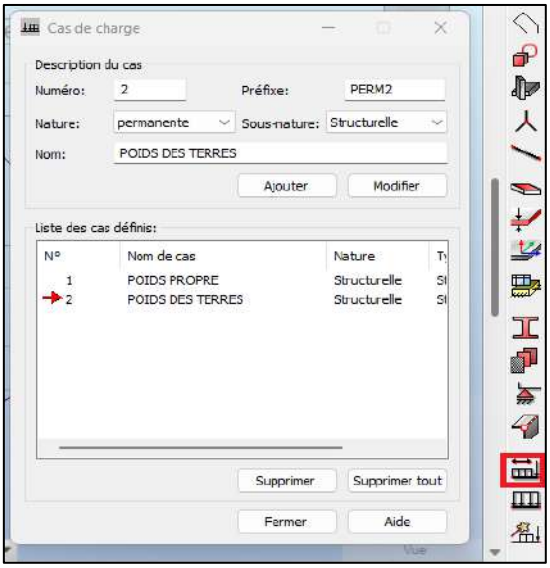


Figure VI.17 : Définition de cas de charge.

L'application des sollicitations au revêtement du tunnel a été effectuée par la commande « Définir des charges », ou en passant directement par l'onglet dédié aux éléments de type Barres.

Après sélection du type de charge approprié une boîte de dialogue permet la saisie des paramètres requis tels que l'intensité et la direction de la charge. L'application des charges sur la structure se fait en sélectionnant les éléments concernés dans la zone graphique.

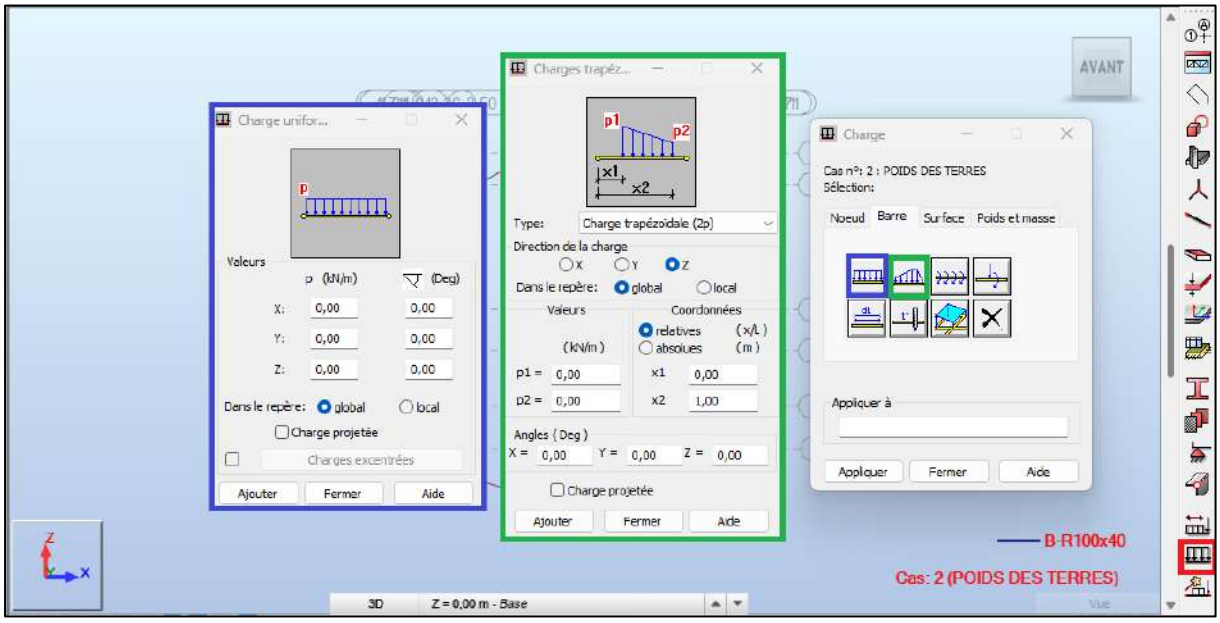


Figure VI.18 : Définition des charges appliquées au revêtement du tunnel.

Le choix d'appliquer des charges trapézoïdales s'explique par la variation des pressions du terrain encaissant avec la profondeur, tant latéralement que verticalement. Par ailleurs, l'utilisation de la charge uniforme sur le radier est adaptée aux contraintes réparties de manière régulière à la base de l'ouvrage.

La figure (VI.19) montre la modélisation du tunnel avec l'ensemble des charges appliquées, incluant les actions verticales sur la voûte et le radier, ainsi que les pressions latérales.

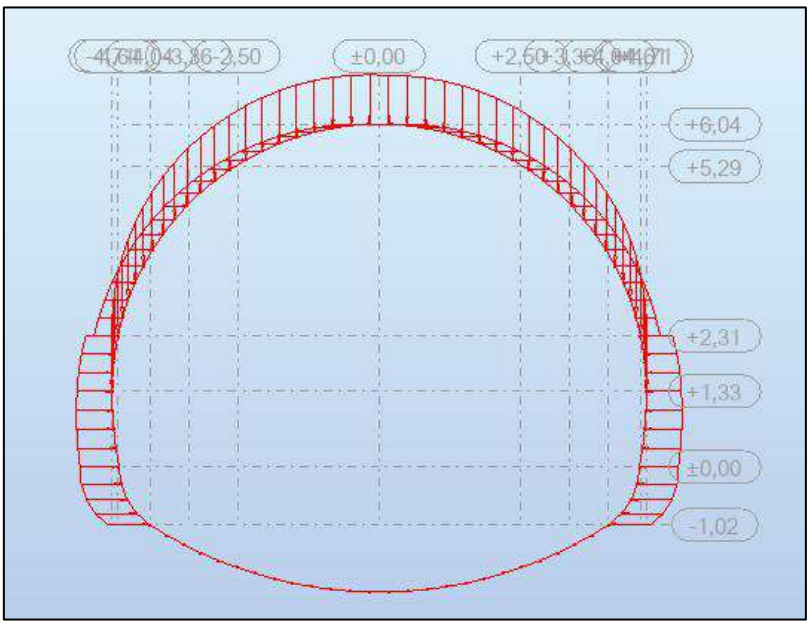


Figure VI.19 : Modélisation du tunnel avec l'ensemble des charges appliquées.

Les combinaisons de charges ont été définies manuellement conformément aux exigences de l'État Limite Ultime ELU (1.35G).

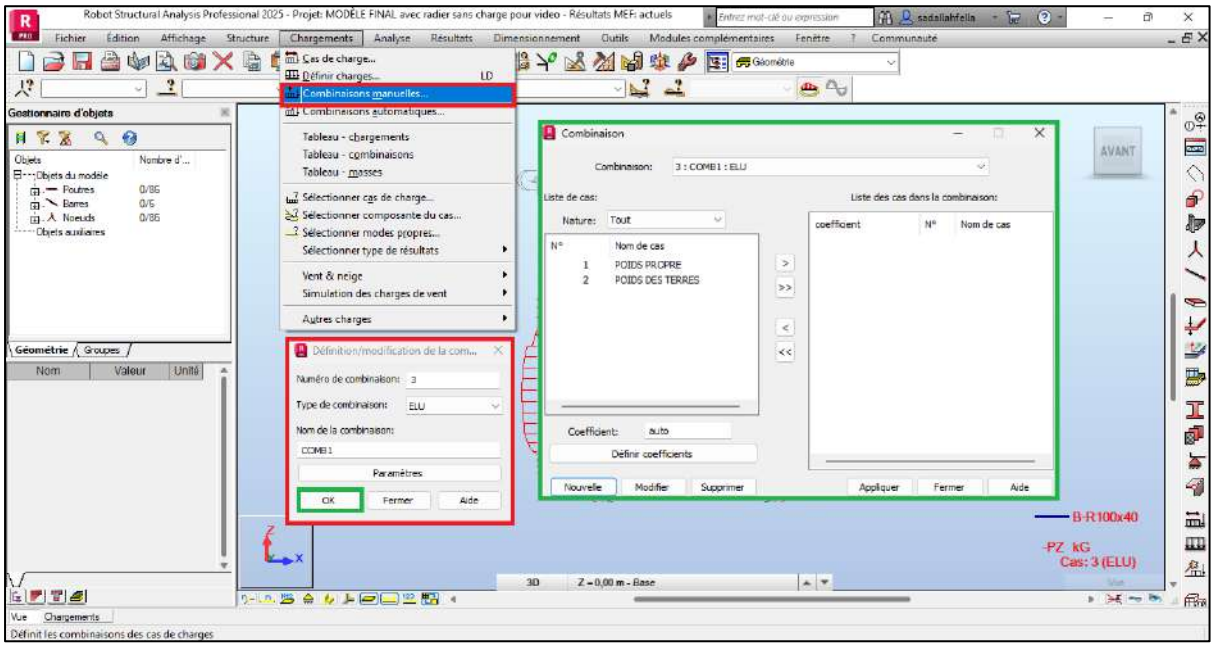


Figure VI.20 : Définition de combinaisons de charges.

VI.3.11. Résolution du modèle

Une fois le modèle entièrement paramétré et le type d'analyse sélectionné, la simulation a été lancée via la commande « Analyse » puis « Calculs » dans la barre de menus de Robot Structural Analysis. L'ensemble des résultats obtenus selon l'ELU est présenté dans la figure 17 de l'annexe 7.

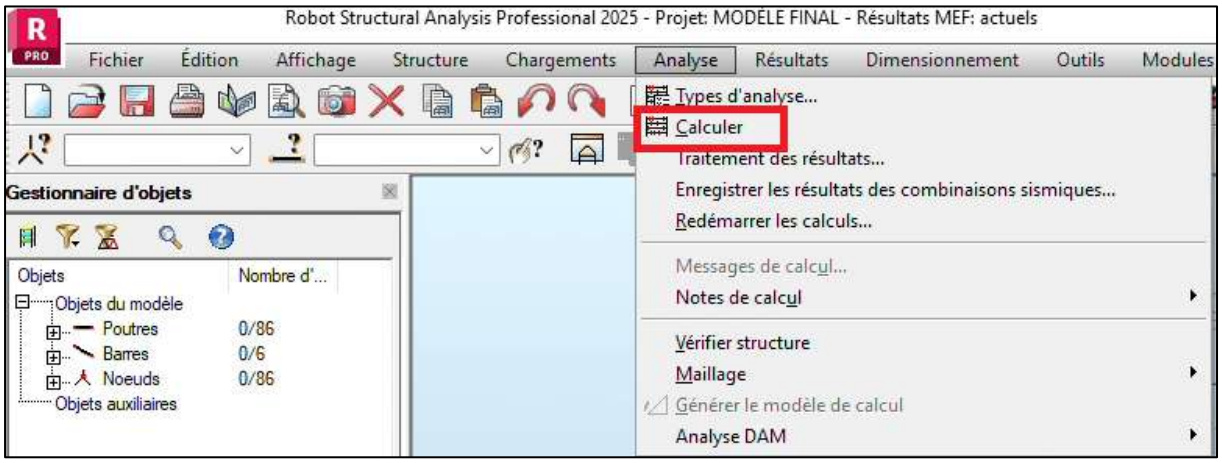


Figure VI.21 : Lancement de calcul.

Le tableau ci-dessous résume les résultats des efforts internes au niveau de revêtement définitif

Tableau VI.5 : Résultats des efforts internes au niveau de revêtement définitif

Les efforts internes	Valeur min	Valeur max
Effort normal	-1979.08 KN/m	4108.20 KN/m

Moment fléchissant	-535.05 KN.m/m	338.75 KN.m/m
Effort tranchant	-583.23 KN/m	699.95 KN/m

VI.3.12. Ferraillage du revêtement définitif

Le ferraillage se fait en flexion composé à L'ELU, pour une section divisée en deux parties, voûte et radier.

Les données de calcul sont les suivants :

- Condition de fissuration très préjudiciable.
- Type d'acier de haute adhérence.
- Limite élastique de l'acier : $f_e = 500$ MPa
- Résistance à la compression du béton : $f_{c28} = 30$ MPa
- Résistance à la traction du béton : $f_{t28} = 2.4\ MPa$

La section de calcul est la suivante :

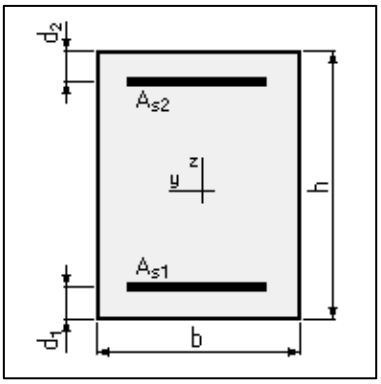


Figure VI.22 : Coupe transversale de la section de calcul.

Avec :

h = 40 cm ; b = 100 cm ; $d_1 = d_2 = 5\ cm$

Le ferraillage de la section a été déterminé à l'aide du logiciel Robot Expert BA 2010, un outil spécialisé dans le dimensionnement des ouvrages en béton armé. Dans un premier temps, il a été nécessaire de sélectionner le règlement de calcul à appliquer, à savoir le BAEL. Le type d'analyse a ensuite été précisé, en l'occurrence la flexion composée. Le logiciel permet également de prendre en compte les conditions de fissuration, conformément aux exigences normatives. Enfin, les caractéristiques des matériaux ainsi que les dimensions géométriques de la section (largeur, hauteur, enrobage) ont été renseignées.

Les rapports de ferraillage générés par Robot Expert BA 2010 sont présentés en annexe 7.

Tableau VI.6 : Efforts internes du revêtement.

	Effort normal N(KN)		Effort tranchant T(KN)		Moment fléchissant M(KN.m)	
Élément	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Voûte	4108.2	1979.08	699.95	-583.23	332.97	-535.05
Radier	4108.2	83.39	264.89	-477.04	1.18	-289.39

VI.3.13. Ferraillage longitudinal

Tableau VI.7 : Ferraillage longitudinal pour la voûte et le radier.

Élément	A_{s1}(cm²)	A_{s2} (cm²)	$A_s$min(cm²)	Ferraillage choisi			
				Lit intrados		Lit extrados	
Voûte	17.1	13.8	4.1	9HA16	18.09	9HA14	13.85
Radier	-	-	4.1	4HA12	4.52	4HA12	4.52

VI.3.14. Ferraillage transversal

À ce stade, la vérification de l'effort tranchant est effectuée, pour déterminer si le recours au ferraillage transversal est indispensable. Si la condition est vérifiée, aucune armature transversale ne sera requise pour la section considérée. Dans le cas contraire, un ferraillage transversal doit être prévu.

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_0\, d} \leq \overline{\tau_u}$$

Avec :

$\overline{\tau_u} = min\left(0.15\ \frac{f_{c28}}{\gamma_b}\ ;\ 4\ MPa\right)$ = 3000 KPa

b_0 : La largeur de l section (m)

d : La hauteur utile = 0.9 h = 0.36 m

γ_b = 1.5

Les résultats de la vérification de l'effort tranchant sont présentés dans le tableau VI.7.

Tableau VI.8 : Vérification de l'effort tranchant.

Élément	V_u(KN)	τ_u (KPa)	Condition
Voûte	699.95	1944.30	vérifiée
Radier	477.04	1325.11	vérifiée

La condition étant vérifiée, le ferraillage transversal n'est pas requis. Toutefois, afin de respecter les dispositions constructives minimales, une section d'armatures transversales est mise en place.

$$A_t \geq \frac{0.4\ S_t\ b_0}{f_e}$$

Avec :

S_t : Espacement : $S_t \leq min\,(0.9d\,;\,40cm)$ = 32.4 cm

On prend $S_t = 30\ cm$

Donc At = 2.4 cm² , ferraillage choisi : 4HA10, donc la section d'armature adopté : $A_t = 3.14\ cm^2$

Les figures (VI.22) a (VI.24) présentent le schéma de ferraillage.

VI.3.14.1. Ferraillage secondaire

Les armatures secondaires sont orientées le long de tunnel, en d'autres termes perpendiculaires aux armatures principales. Le calcul du ferraillage secondaire se fait suivant la formule suivante : $A_r = \frac{As}{4}$

Tableau VI.9 : Ferraillage secondaire pour la voute et le radier

Élément	A_{s1}(cm²)	A_{r1} (cm²)	Ferraillage choisi	A_{s2}(cm²)	A_{r2} (cm²)	Ferraillage choisi
Voûte	18.09	4.52	4HA12	13.85	3.46	3HA12
Radier	4.1	1.03	3HA8	4.1	1.03	3HA8

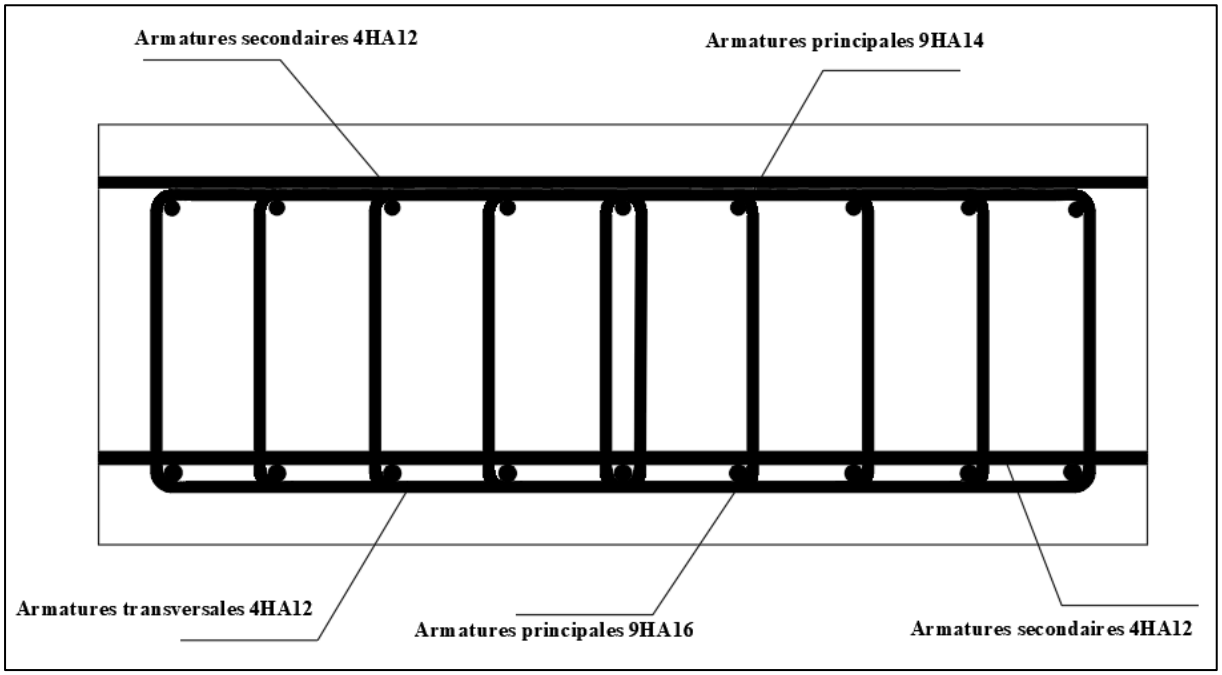


Figure VI.23 : Ferraillage de la voûte

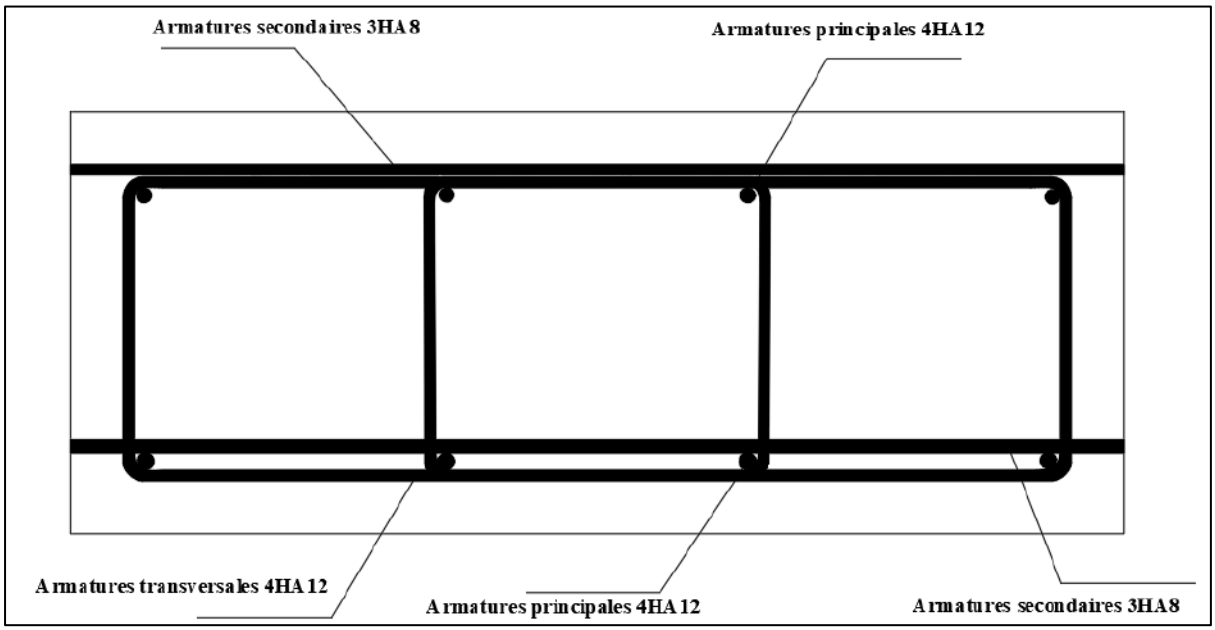


Figure VI.24 : Ferraillage du radier.

VI.4. CONCLUSION

Ce chapitre détaille la modélisation géotechnique et structurelle du tunnel.

Au stade de développement actuel, la série de logiciel Autodesk ne propose pas un outil interopérable pour la modélisation géotechnique des tunnels (2 D ou 3D), alors que pour la vérification structurelle, l'outil Robot d'Autodesk ne permet pas une interopérabilité pour les vérifications 3D de la structure définitive du tunnel. En effet, dans une logique d'intégration BIM, des tentatives ont été faites pour assurer l'interopérabilité entre Revit et Robot Structural Analysis. Bien que Revit présente un certain potentiel, cette expérimentation a permis d'identifier ses limites dans le cadre des projets d'infrastructure. En effet, les échecs rencontrés lors de l'exportation par les méthodes actuellement disponibles confirment que, l'adaptation de Revit aux projets linéaires complexes comme les tunnels reste partielle nécessite des ajustements spécifiques.

Par ailleurs, une modélisation a été effectué en 2D par le logiciel Robot Structural Analysis, permettant ainsi d'évaluer les efforts internes et les déplacements de la structure.

CHAPITRE VII

BIM 4D : SIMILATION DU PHASAGE CONSTRUCTIF

VII.1. INTRODUCTION

Dans la continuité du processus BIM mis en œuvre pour la création de la maquette numérique, et afin d'exploiter les capacités avancées de cette démarche, ce chapitre s'intéresse à l'intégration de la dimension temporelle du projet, dite "4D". Celle-ci consiste à associer le modèle 3D au calendrier des travaux, dans le but de simuler l'évolution du chantier dans le temps.

Le modèle 4D est développé dans Navisworks (logiciel dédié à la visualisation, coordination et simulation temporelle) en intégrant :

- Le modèle Revit (détaillé au chapitre V) constitué de familles adaptatives de structure et d'équipements.
- Le terrain naturel topographique et le réseau d'assainissement issus de Civil 3D.

Le schéma ci-dessous résume les étapes clés du processus de création du modèle BIM 4D.

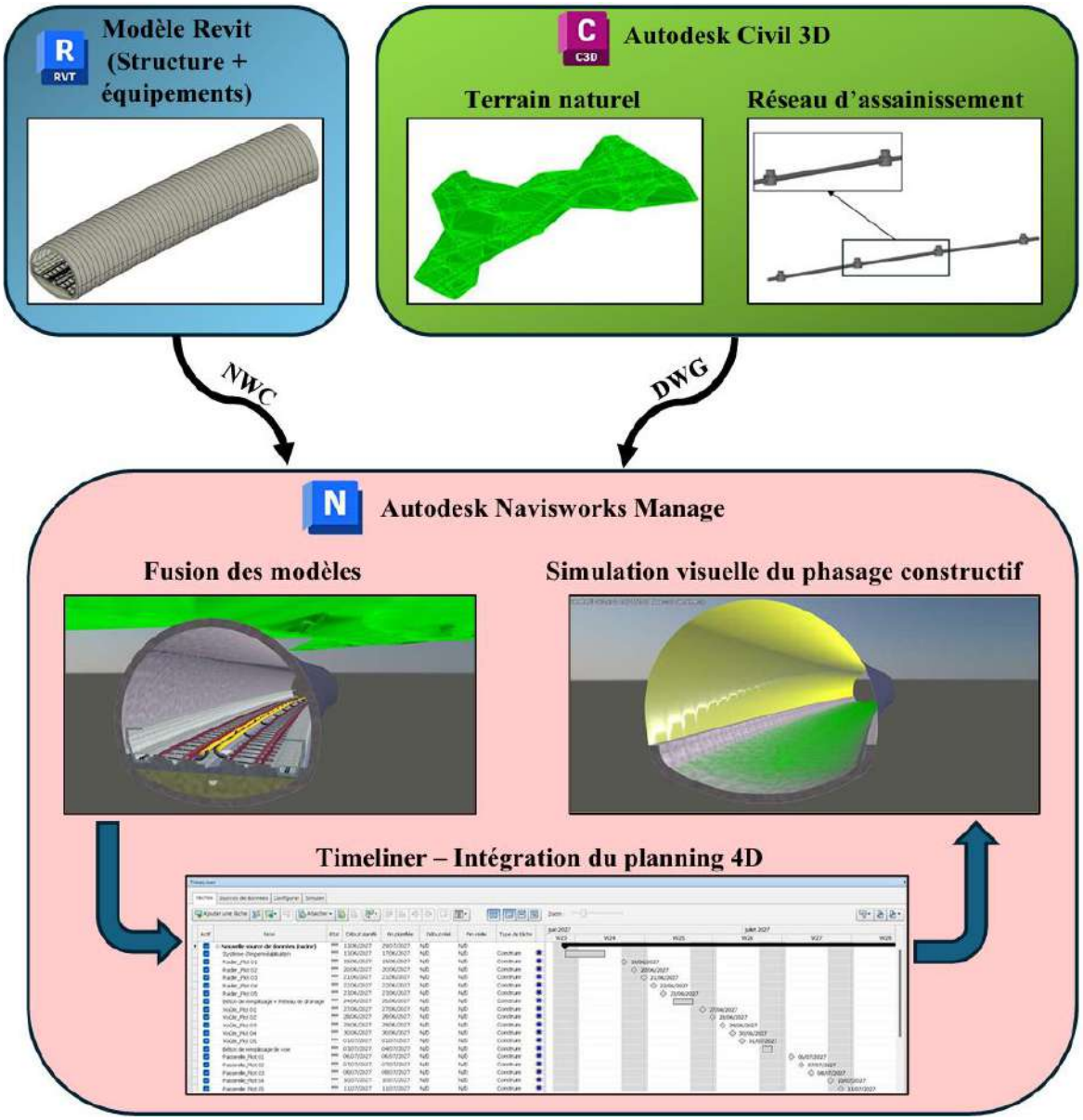


Figure VII.1 : Flux de travail pour la création du modèle BIM 4D dans Navisworks

Grâce à une simulation visuelle réaliste du déroulement du chantier, cette approche permet d'optimiser la coordination entre les disciplines, d'anticiper les conflits temporels (comme les chevauchements de tâches par exemple) et de faciliter la planification des travaux.

Ce chapitre présente la méthodologie adoptée pour la création du modèle 4D, depuis l'importation des différentes sources jusqu'à l'élaboration du phasage à l'aide de l'outil « TimeLiner ».

VII.2. CRÉATION DU MODÈLE 4D DANS NAVISWORKS

VII.2.1. Combinaison des modèles 3D

La première étape dans la mise en œuvre du modèle 4D consiste à réunir les différents modèles 3D du projet dans un environnement commun. Cette combinaison, réalisée dans Navisworks, permet d'obtenir une vision globale de l'ensemble des données du projet, facilitant ainsi la coordination entre les disciplines et la préparation de la phase de planification temporelle.

VII.2.1.1. Importation du modèle Revit

Après l'exportation du modèle Revit au format Navisworks Cache (.nwc), comme décrit dans la section V.3.1, le fichier est ajouté dans Navisworks via l'onglet « Début », dans la fenêtre « Projet », en utilisant la fonction « Ajouter / Ajouter » (Figure VII.2). Une fois cette opération effectuée, le modèle devient visible dans la scène de Navisworks.

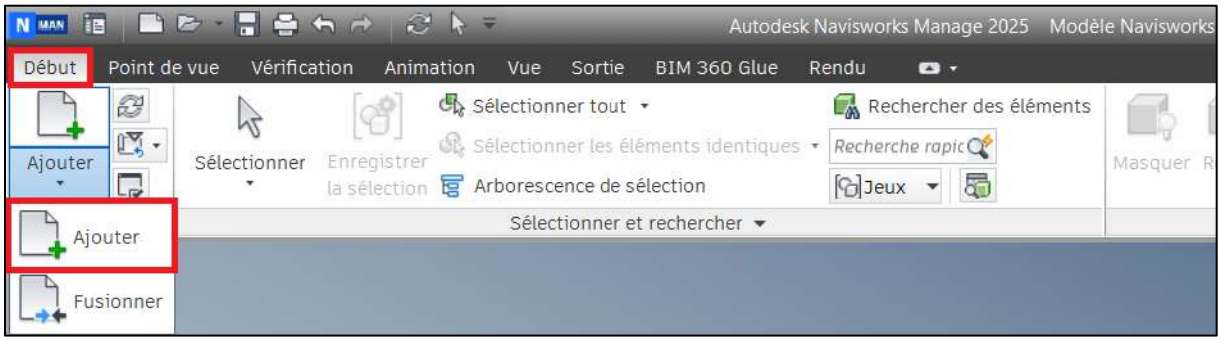


Figure VII.2 : Importation du modèle Revit (.nwc) dans Navisworks via la fonction « Ajouter ».

VII.2.1.2. Importation du modèle Civil 3D

En complément du modèle Revit, un fichier issu de Civil 3D est intégré dans Navisworks afin d'enrichir la maquette 4D. Celui-ci contient : le système de drainage et la surface topographique.

Avant l'importation, le fichier .dwg a été préparé dans Civil 3D afin de ne conserver que les objets nécessaires, évitant ainsi d'alourdir la scène dans Navisworks.

L'intégration s'effectue via la fonction « Ajouter » de la même manière que pour le modèle Revit.

Notons que le géoréférencement du modèle Civil 3D et du modèle Revit garantit un positionnement automatique précis des éléments importés dans Navisworks, assurant une congruence spatiale parfaite entre eux.

Cette cohérence est visuellement confirmée dans la Figure VII.3, qui montre le positionnement exact du réseau de drainage (issu de Civil 3D) à l'intérieur du tunnel modélisé sous Revit, sans aucun décalage, malgré leurs origines logicielles distinctes.

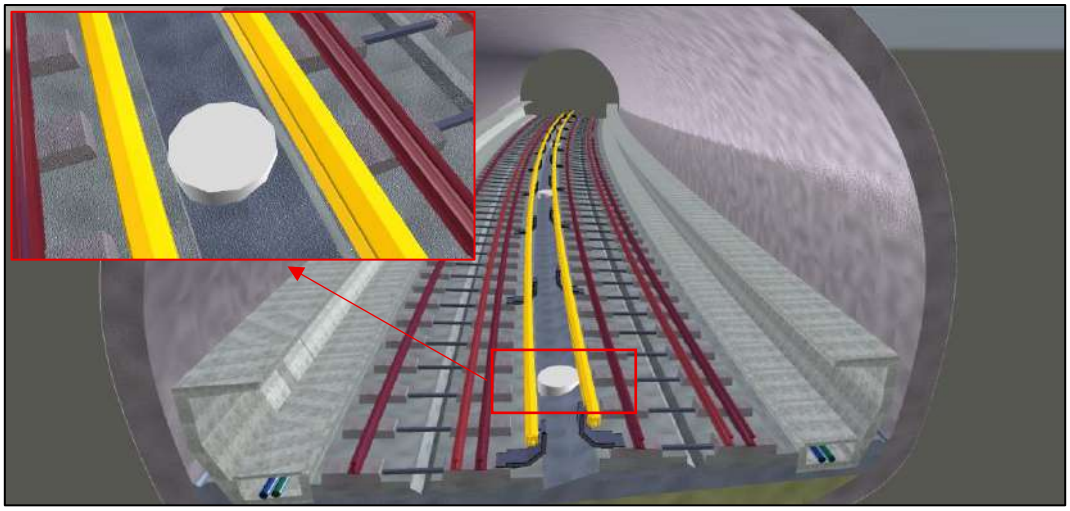


Figure VII.3 : Positionnement exact du réseau de drainage (Civil 3D) dans la structure du tunnel (Revit)

VII.2.2. Création des jeux de sélection

Afin de faciliter la gestion de la maquette, une étape préparatoire est nécessaire. Celle-ci consiste à structurer les objets du modèle 3D en groupes intelligents, appelés jeux de sélection, permettant ainsi une association structurée avec les tâches du planning.

Navisworks propose plusieurs méthodes de sélection des éléments. Dans le cadre de ce projet, deux approches principales ont été retenues :

- Depuis « l'arborescence de sélection » : elle offre une vue organisée de tous les objets constituant la maquette, classés par niveaux, familles et types (Figure VII.6). Cela facilite la sélection rapide d'objets similaires.
- À l'aide de la fonction « Rechercher des éléments » (voir figure VII.5, encadré bleu) : cette méthode permet d'identifier des objets dans la scène selon des critères définis, tels que le nom de la famille, le type d'objet ou d'autres propriétés.

  Une instruction de recherche est alors définie, composée d'une propriété (catégorie + nom de propriété), d'un opérateur conditionnel, et d'une valeur test. Un exemple de recherche ciblant les rails est présenté dans la figure suivante.

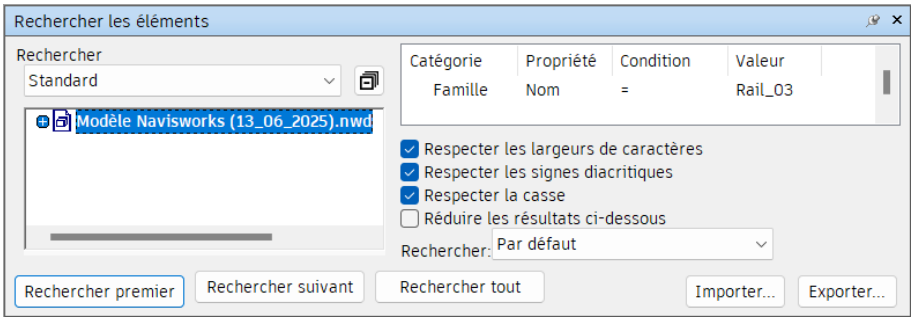


Figure VII.4 : Exemple d'instruction de recherche ciblant les rails dans Navisworks

Une fois les objets sélectionnés via l'une de ces méthodes, ils apparaissent en bleu dans la scène.

Pour enregistrer cette sélection, il suffit de cliquer sur « Enregistrer la sélection » dans l'onglet Début (voir figure VII.5, encadré rouge).

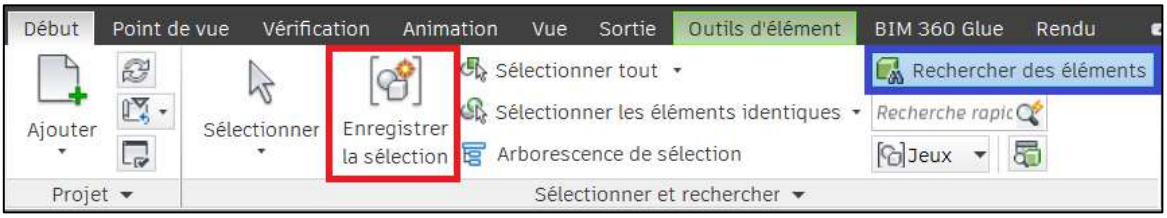


Figure VII.5 : Fonction « Enregistrer la sélection » (encadré rouge) et « Rechercher des éléments » (encadré bleu)

Le nouveau jeu de sélection est alors ajouté à la liste des jeux, et peut être renommé pour une meilleure lisibilité. La figure VII.7 illustre la fenêtre jeux, présentant les différents jeux créés.

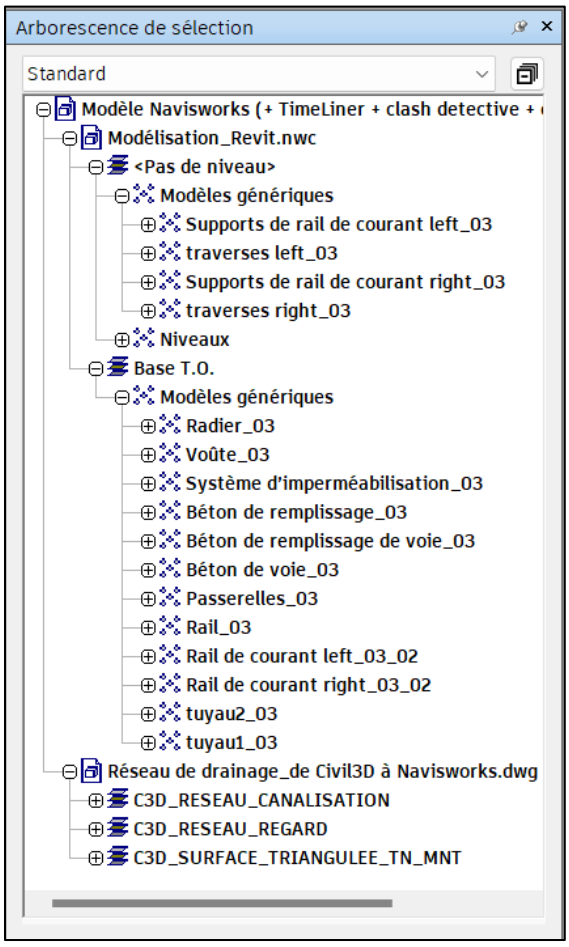


Figure VII.6 : Vue de l'arborescence de sélection dans Navisworks

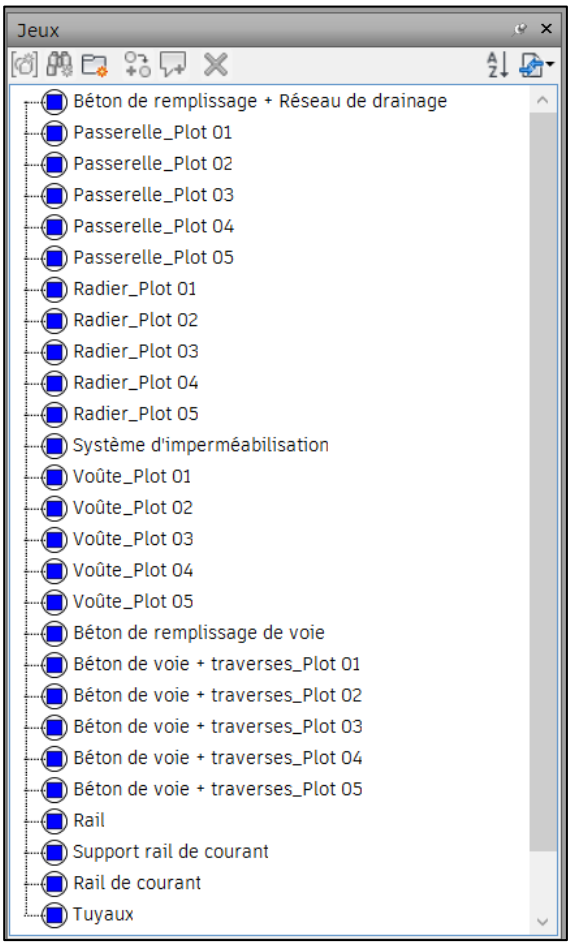


Figure VII.7 : Fenêtre jeux dans Navisworks affichant les jeux créés

VII.2.3. Création du planning des tâches

Dans cette étape, un planning détaillé des différentes phases est établi afin de structurer et organiser la séquence des opérations sur chantier. Conçu sous Excel, ce planning détaille pour chaque tâche l'ordre d'exécution, le nom, ainsi que les dates de début et de fin, sans oublier le type d'activité.

À noter : pour permettre l'association automatique entre les tâches du planning et les objets du modèle dans les étapes suivantes, il est essentiel que les noms des tâches dans le fichier Excel correspondent exactement aux noms des jeux de sélection créés dans Navisworks.

Le tableau ci-dessous présente ce planning, qui servira de base pour la simulation 4D.

Tableau VII.1 : Planning des tâches pour la simulation 4D

Ordre	Nom de la tâche	Date de début	Date de fin	Type de tâche
1	Système d'imperméabilisation	13/06/2027	17/06/2027	Construire
2	Radier_Plot 01	19/06/2027	19/06/2027	Construire
3	Radier_Plot 02	20/06/2027	20/06/2027	Construire
4	Radier_Plot 03	21/06/2027	21/06/2027	Construire
5	Radier_Plot 04	22/06/2027	22/06/2027	Construire
6	Radier_Plot 05	23/06/2027	23/06/2027	Construire
7	Béton de remplissage+Réseau de drainage	24/06/2027	26/06/2027	Construire
8	Voûte_Plot 01	27/06/2027	27/06/2027	Construire
9	Voûte_Plot 02	28/06/2027	28/06/2027	Construire
10	Voûte_Plot 03	29/06/2027	29/06/2027	Construire
11	Voûte_Plot 04	30/06/2027	30/06/2027	Construire
12	Voûte_Plot 05	01/07/2027	01/07/2027	Construire
13	Béton de remplissage de voie	03/07/2027	04/07/2027	Construire
14	Passerelle_Plot 01	06/07/2027	06/07/2027	Construire
15	Passerelle_Plot 02	07/07/2027	07/07/2027	Construire
16	Passerelle_Plot 03	08/07/2027	08/07/2027	Construire
17	Passerelle_Plot 04	10/07/2027	10/07/2027	Construire
18	Passerelle_Plot 05	11/07/2027	11/07/2027	Construire
19	Tuyaux	12/07/2027	12/07/2027	Construire
20	Béton de voie + traverses_Plot 01	13/07/2027	14/07/2027	Construire
21	Béton de voie + traverses_Plot 02	15/07/2027	17/07/2027	Construire
22	Béton de voie + traverses_Plot 03	18/07/2027	19/07/2027	Construire
23	Béton de voie + traverses_Plot 04	20/07/2027	21/07/2027	Construire
24	Béton de voie + traverses_Plot 05	22/07/2027	24/07/2027	Construire
25	Rail	25/07/2027	26/07/2027	Construire
26	Support rail de courant	27/07/2027	28/07/2027	Construire
27	Rail de courant	29/07/2027	29/07/2027	Construire

Une fois finalisé, ce fichier Excel est enregistré au format CSV, compatible avec Navisworks, afin d'être importé dans l'outil « TimeLiner » pour associer les tâches au modèle 3D et réaliser la simulation temporelle du chantier.

VII.2.4. Intégration du planning dans TimeLiner

L'outil « TimeLiner » d'Autodesk Navisworks permet de relier un modèle 3D à une nomenclature de construction externe, afin de générer une simulation visuelle intégrant les dimensions temporelle (et éventuellement budgétaire).

Ses principales fonctionnalités sont les suivantes :

- L'importation de nomenclatures depuis diverses sources externes (MS Project, Primavera, fichiers CSV,etc.).
- L'association des tâches de la nomenclature aux objets du modèle pour créer des simulations 4D.
- L'affectation de coûts aux tâches afin de suivre l'évolution budgétaire du projet.
- L'exportation d'images ou d'animations issues de la simulation.
- La synchronisation automatique en cas de modification du planning ou du modèle.

« TimeLiner » est accessible depuis l'onglet « Début », dans le groupe de fonctions Outils (Figure VII.8).



Figure VII.8 : Accès à l'outil « TimeLiner » depuis l'interface de Navisworks

Une fois ouvert, il se présente sous la forme d'une fenêtre composée de quatre onglets principaux, comme illustré dans la figure suivante.

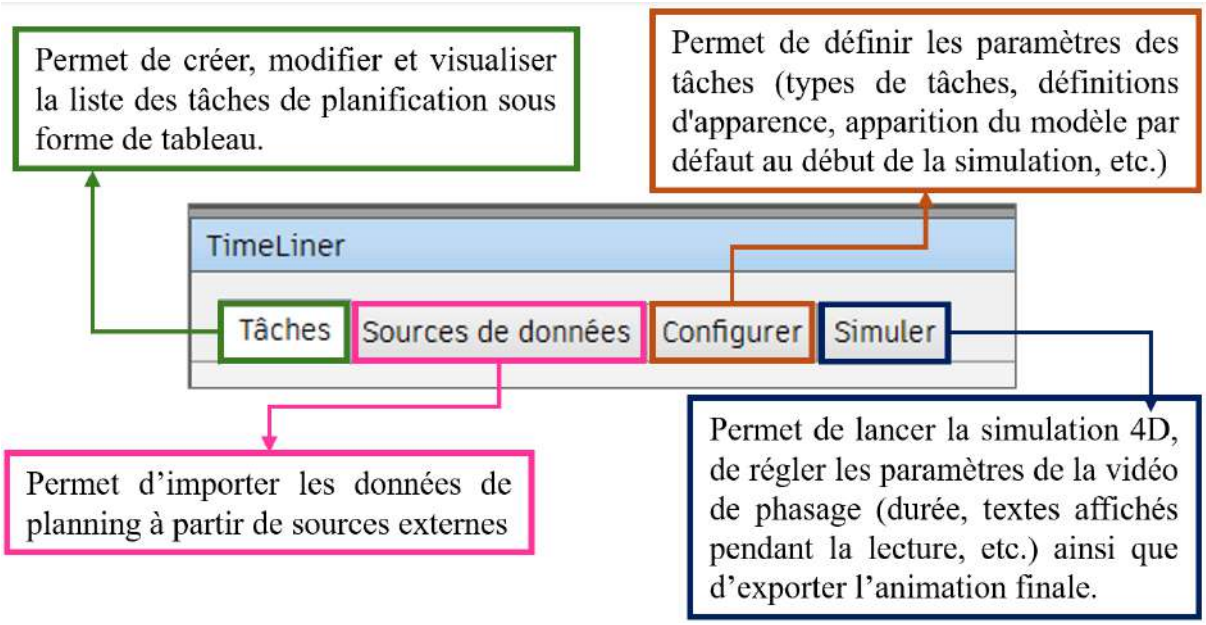


Figure VII.9 : Interface de l'outil « TimeLiner » avec ses quatre onglets principaux

L'utilisation de cet outil s'articule autour de plusieurs étapes successives, détaillées ci-après.

VII.2.4.1. Importation du fichier CSV

Pour lancer cette importation, on accède à l'onglet Sources de données dans la fenêtre TimeLiner. Depuis cette interface, il suffit de sélectionner l'option « Ajouter - Importer CSV » (Figure VII.10), puis de choisir le fichier à intégrer.

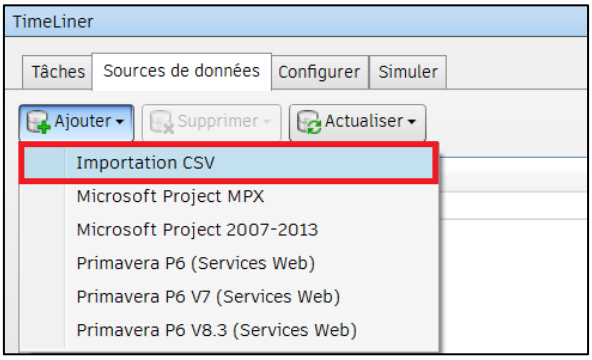


Figure VII.10 : Importation d'un fichier CSV via l'onglet « Sources de données » de TimeLiner

Suite à cette action, une fenêtre apparaît pour permettre la correspondance entre les champs du fichier Excel et les colonnes de Navisworks (figure VII.11).

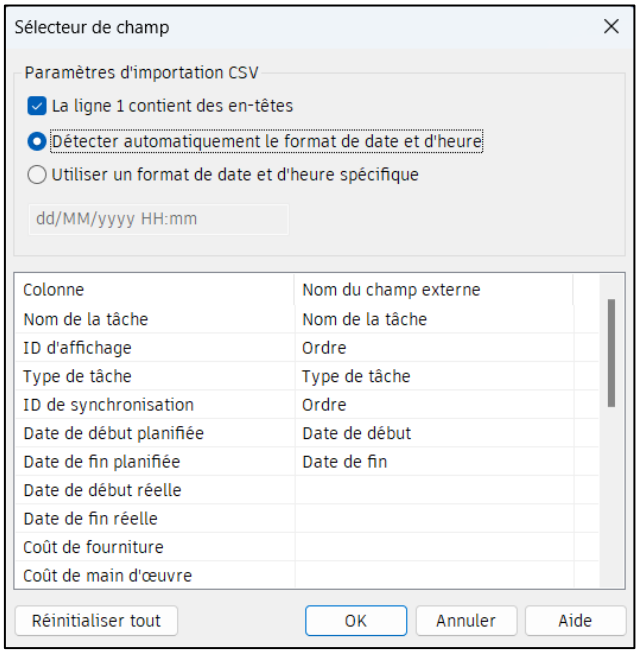


Figure VII.11 : Boîte de dialogue « Sélecteur de champ »

Il est ensuite nécessaire de reconstruire la hiérarchie des tâches entre le planning et le logiciel, à l'aide du menu contextuel (figure VII.12).

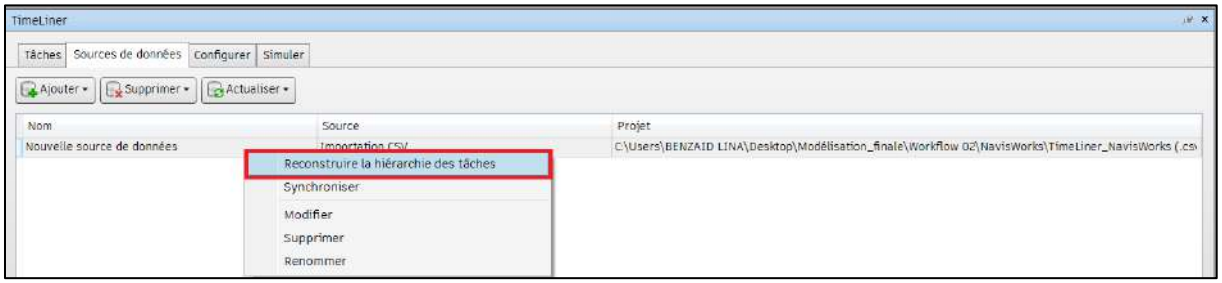


Figure VII.12 : Hiérarchisation des tâches via le menu contextuel dans TimeLiner

VII.2.4.2. Association automatique des jeux de sélection aux tâches

Après l'importation du fichier et la reconstruction de la hiérarchie des tâches, on revient à l'onglet Tâches dans TimeLiner, où l'ensemble des tâches du planning est affiché.

Cette étape consiste à associer les objets du modèle aux tâches. Il est possible d'attacher automatiquement les jeux de sélection aux tâches à l'aide de règles, à condition d'avoir les mêmes noms dans les jeux que dans les tâches.

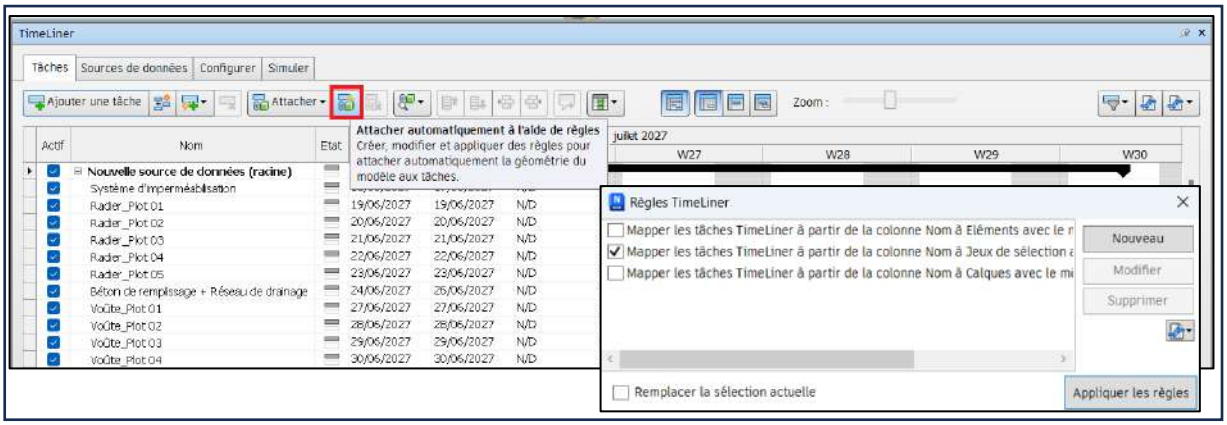


Figure VII.13 : Association automatique des jeux de sélection aux tâches via les règles dans TimeLiner

Pour les tâches non associées automatiquement, il est possible de les lier manuellement via le menu contextuel, comme montré dans la figure suivante.

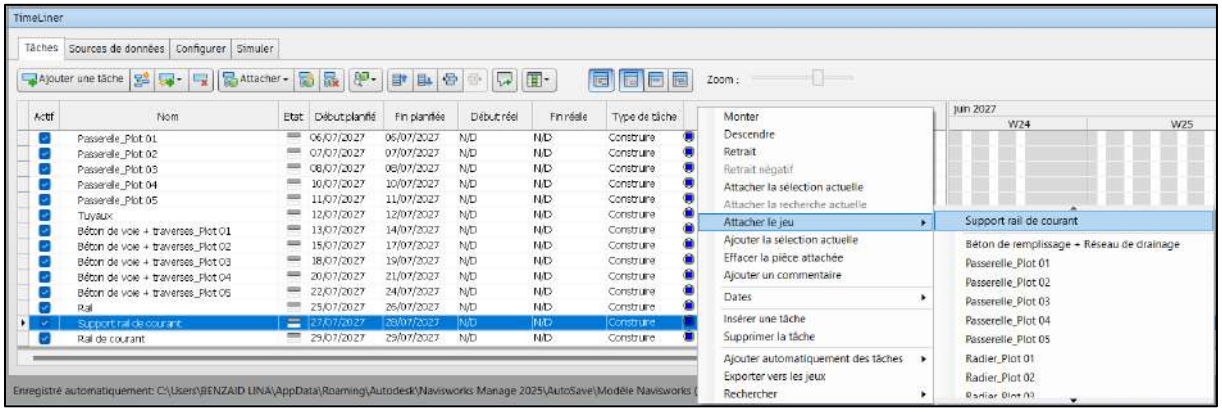
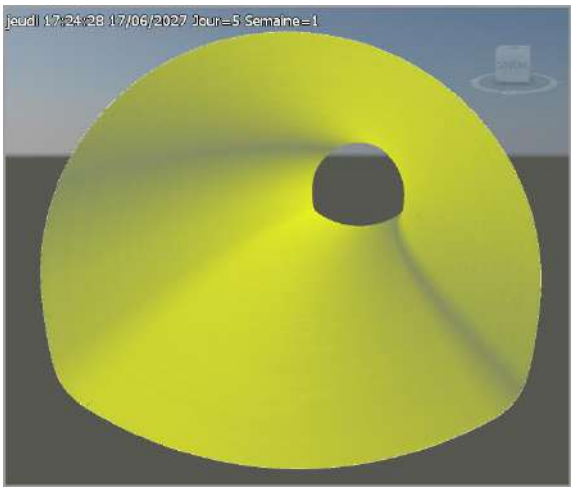


Figure VII.14 : Association manuelle d'un jeu à une tâche via le menu contextuel

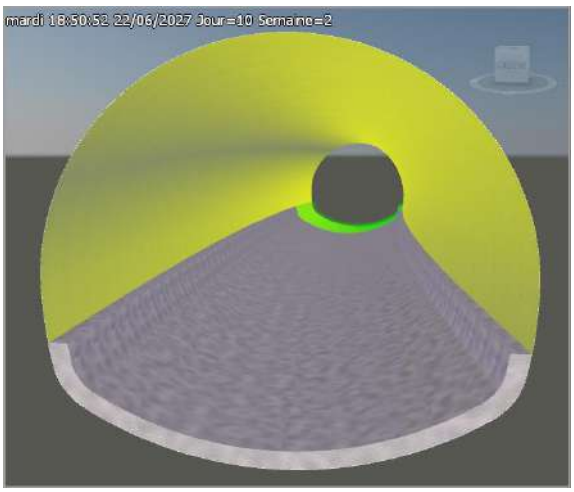
VII.2.4.3. Paramétrage et lancement de la simulation 4D

Une fois l'association des jeux de recherche aux tâches effectuée, il est possible de configurer l'apparence des objets durant le phasage en fonction du type de tâche défini. Cela se fait depuis l'onglet « Configurer ».

L'onglet « Simuler » permet ensuite de visualiser la séquence de construction et de régler les paramètres de la simulation 4D. On peut notamment y définir la durée totale de la vidéo, ainsi que le contenu des textes affichés à l'écran pendant la lecture. Cet onglet permet également d'exporter l'animation finale sous forme de vidéo. La figure suivante présente l'évolution du projet à travers les différentes séquences de construction simulées.



1. Système d'imperméabilisation



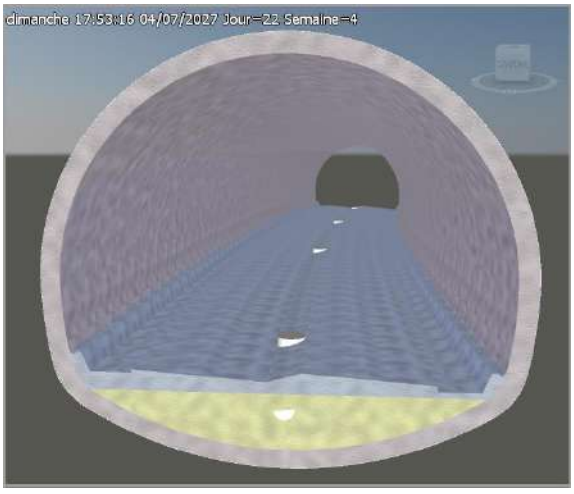
2. Radier



3. Béton de remplissage +
Réseau de drainage



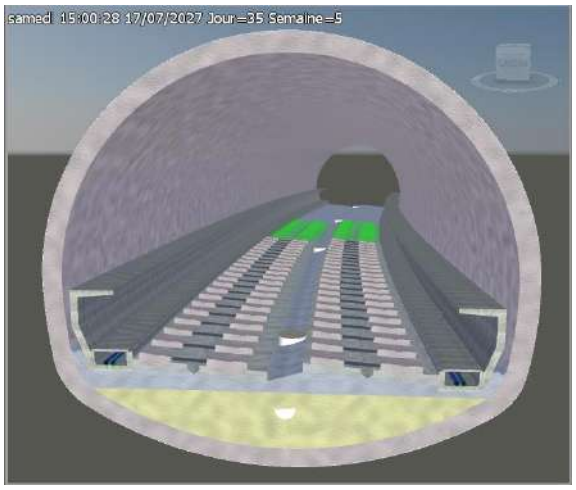
4. Voûte



5. Béton de remplissage de voie



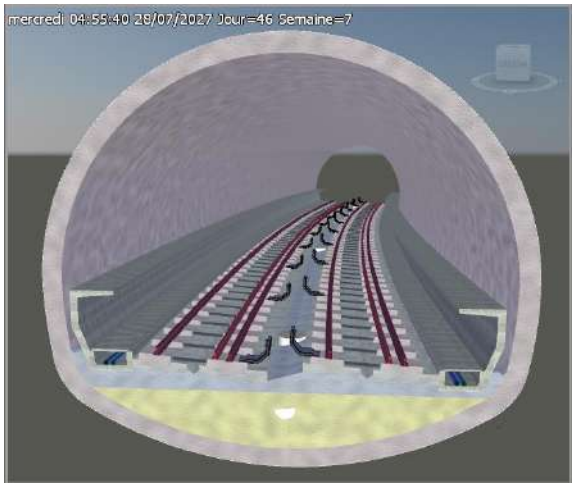
6. Passerelles + Câbles



7. Béton de voie + traverses



8. Rail



9. Support rail de courant



10. Rail de courant

Figure VII.15 : Séquences de construction simulées dans Navisworks via TimeLiner

VII.3. CONCLUSION

Ce chapitre a décrit le processus de création d'une maquette BIM 4D pour un tronçon de tunnel à l'aide du logiciel Navisworks, en mettant en lumière sa capacité à combiner des modèles provenant de divers logiciels dans un environnement unique.

L'intégration fluide des données multisources a permis d'ajouter une dimension temporelle au modèle 3D grâce à l'outil natif de Navisworks, « TimeLiner », qui s'est révélé déterminant pour transformer un planning théorique en une simulation visuelle interactive.

On peut dire que la modélisation 4D n'est pas une simple animation, mais un véritable outil d'aide à la décision : elle facilite la gestion des délais, anticipe les conflits spatio-temporels et aide à la planification. Elle constitue ainsi un complément essentiel à la gestion de projet.

CHAPITRE VIII
BIM 5D : ESTIMATION DES QUANTITÉS ET DES COÛTS

VIII.1. INTRODUCTION

La dimension 5D dans le BIM correspond à l'introduction de la dimension économique dans la maquette numérique. Elle permet d'associer aux éléments du modèle 3D, des coûts spécifiques, pour obtenir une estimation budgétaire précise des coûts de construction.

Ce chapitre présente l'application de cette dimension à travers l'utilisation de deux logiciels : Civil 3D et Revit. Dans Civil 3D, le calcul des quantités est réalisé selon deux méthodes. La première repose sur les codes associés aux composants du profil type définis dans le Subassembly Composer tel que décrit dans le chapitre IV, la seconde méthode utilise le « tableau de bord des volumes », qui exploite les données issues des surfaces différentielles créées. En revanche, dans Revit, le calcul des quantités repose sur la création de nomenclatures.

Cette étape marque une avancée majeure dans l'exploitation des maquettes numériques, en associant : la modélisation géométrique à la prévision économique. Ce processus permet une meilleure anticipation des coûts dès les phases amont du projet, et renforce la fiabilité des décisions prises par la maîtrise d'ouvrage.

VIII.2. EXTRACTION DES QUANTITES A PARTIR DE LA MAQUETTE BIM

L'extraction des quantités nécessaires à l'estimation des coûts, à partir de la maquette BIM, a été réalisée en parallèle à l'aide de deux logiciels : Autodesk Civil 3D et Autodesk Revit.

Dans ce qui suit, les méthodes d'extraction propres à chacun de ces outils sont présentées.

VIII.2.1. Extraction avec Autodesk Civil 3D

Le calcul des quantités des matériaux dans C3D peut se faire par deux méthodes :

La première méthode exploite les codes attribués aux éléments du profil type lors de sa création dans le « Subassembly Composer » (par exemple, « Top_Outside » pour la voûte, « Datum_Outside » pour le radier). Les surfaces et volumes associés à chaque code sont automatiquement extraits, ce qui permet d'estimer les quantités de chaque matériau.

Pour ce faire, un critère de métré est d'abord paramétré (Figure VIII.1), définissant les règles de calcul propres à chaque matériau.

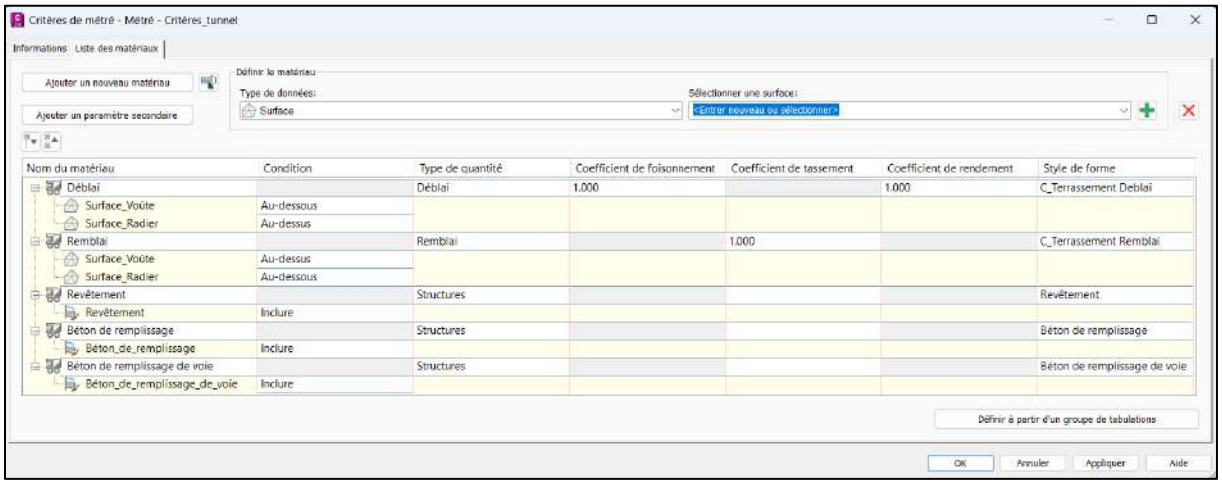


Figure VIII.1 : Paramétrage du critère de métré dans Civil 3D – Règles de calcul par matériau.

Ce critère est ensuite appliqué via l'outil « Calculer les matériaux » en sélectionnant le groupe de tabulations concerné et en lui attribuant le critère de métré paramétré au préalable. Une fois le calcul lancé une liste des matériaux est générée, accompagnée d'un rapport détaillé des quantités. Ce dernier affiche, en bas de tableau, le volume total cumulé par matériau. Le rapport généré intitulé « Rapport de matériau » est consultable en annexe 8.

La deuxième méthode repose sur l'utilisation du « tableau de bord des volumes », une commande conçue pour extraire automatiquement les données à partir des surfaces différentielles.

Cette commande analyse et calcule les volumes nets de remblai et déblai des surfaces différentielles créées (dans ce cas une surface différentielle a été définie entre la surface de la voûte et celle du radier du tunnel (voir la FigureVIII.2)) et dans les zones délimitées dans ces surfaces.

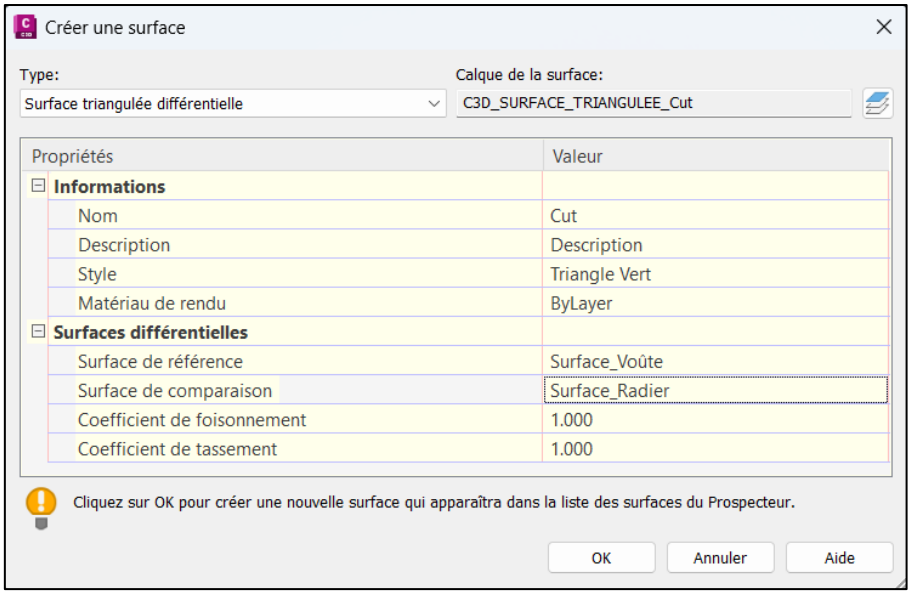


Figure VIII.2 : Création d'une surface différentielle entre (Surface_Voûte) et (Surface_Radier)

Un récapitulatif des volumes peut être inséré directement dans le plan (Figure VIII.3), offrant une visualisation immédiate des résultats. Les données complètes sont compilées dans un rapport structuré qui affiche les volumes totaux de remblais et déblais. Ce dernier, intitulé « Cut/Fill Report », est consultable en annexe 8.

Résumé de déblai/remblai

Nom	Facteur de déblai	Facteur de remblai	Aire 2D	Déblai	Remblai	Net
Cut	1.000	1.000	477.67m²	3410.57 M³	0.00 M³	3410.57 M³<Déblai>
Totaux			477.67m²	3410.57 M³	0.00 M³	3410.57 M³<Déblai>

Figure VIII.3 : Résumé de déblai/remblai

VIII.2.2. Extraction avec Autodesk Revit

L'extraction des quantités à partir de la maquette BIM créée dans Autodesk Revit repose sur l'utilisation des nomenclatures.

Une nomenclature est un tableau extrait d'une maquette numérique qui affiche les données des éléments modélisés, à savoir, dimensions, matériaux, volumes, surfaces,...

La création d'une nomenclature s'effectue via l'onglet « Vue », où le groupe de fonctions Créer donne accès à la liste déroulante Nomenclatures, puis à « Relevé de matériaux ». (Figure VIII.4)

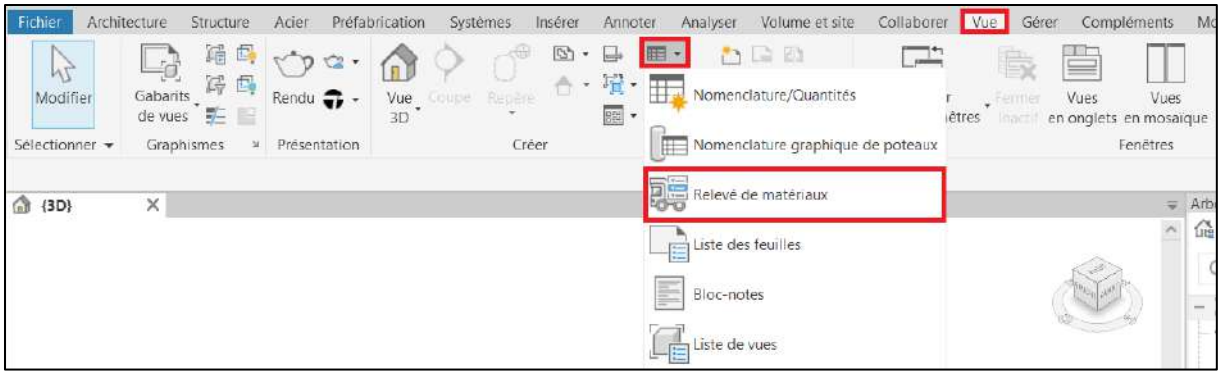


Figure VIII.4 : Création d'une nomenclature

À la suite de cette action, la boîte de dialogue des propriétés de la nomenclature s'ouvre. (Figure VIII.5)

Dans cette boîte de dialogue plusieurs propriétés doivent être configurées pour générer la nomenclature souhaitée. Elles concernent :

- la sélection des champs ;
- le filtrage des données incluses ;
- le tri et le groupement des données ;
- la mise en forme de la nomenclature ;
- la modification de son apparence.

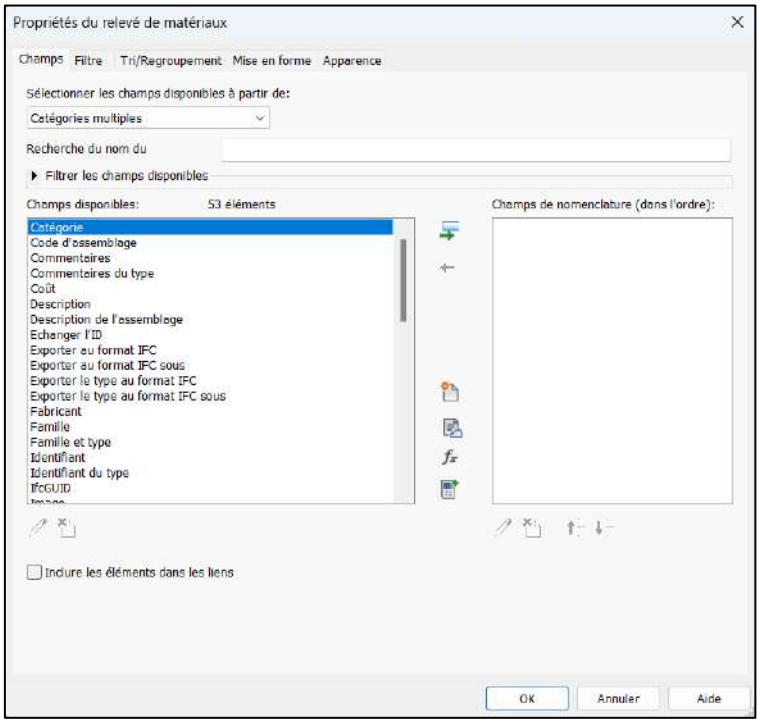


Figure VIII.5 : Boîte de dialogue « Propriétés du relevé de matériaux »

La sélection des champs s'effectue dans l'onglet « Champs » de la boîte de dialogue, à partir de la liste des champs disponibles. Cette étape permet de définir les informations qui seront extraites depuis la maquette BIM et affichées dans la nomenclature.

Dans l'exemple présent, les champs sélectionnés sont les suivants : matériau : Nom, matériau : Surface, matériau : Volume, Total.(Figure VIII.6)

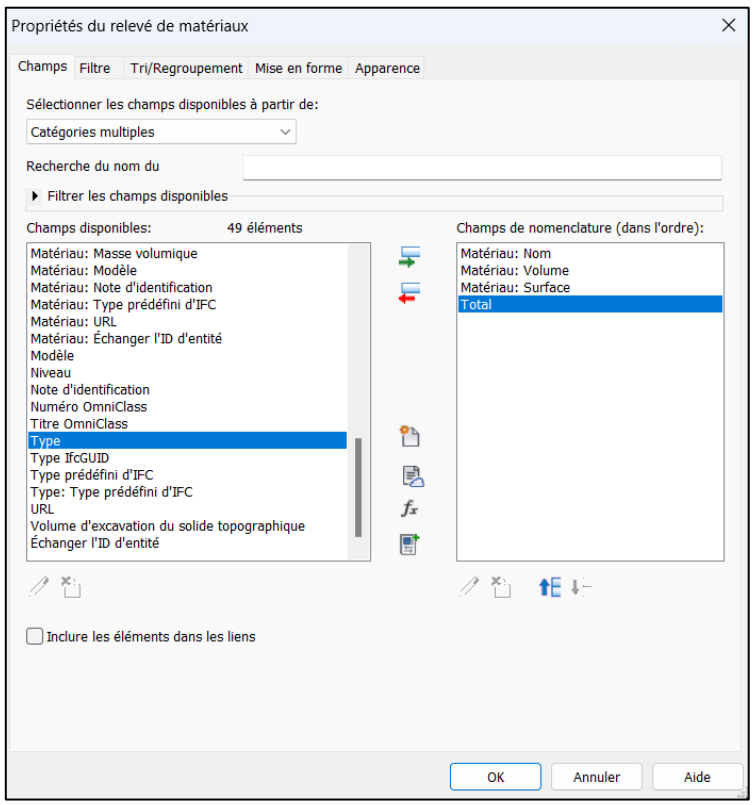


Figure VIII.6 : Champs sélectionnés dans l'exemple.

Une fois les champs sélectionnés et validés, la nomenclature est automatiquement créée. Elle s'ouvre dans une vue dédiée, comme illustré ci-dessous, et devient également accessible depuis l'arborescence du projet.

<Relevé de matériaux>

A	B	C	D
Matériau: Nom	Matériau: Volume	Matériau: Surface	Total
Béton (blocs des traverses bi-bloc	0.11 m³	3 m²	112
Béton C30/37 coulé sur place	<multiples>	<multiples>	100
Béton de remplissage	6.64 m³	30 m²	50
Béton de remplissage de voie	2.91 m³	25 m²	50
Béton de voie	1.02 m³	14 m²	50
Béton préfabriqué	1.05 m³	20 m²	50
Entretoise(Acier)	0.00 m³	0 m²	112
Géomembrane	0.00 m³	30 m²	50
Géotextile 500 g/m²	0.00 m³	30 m²	50
Rail de courant	0.01 m³	2 m²	100
Rail sécurité	0.01 m³	1 m²	50
Rails	0.03 m³	3 m²	50
Supports rail de courant (Acier)	0.01 m³	1 m²	20
Tuyau1	0.16 m³	6 m²	5
Tuyau2	0.02 m³	1 m²	50

Figure VIII.7 : Nomenclature générée affichée dans sa vue dédiée

Pour faciliter l'exploitation des données extraites, celles-ci sont exportées vers un fichier Excel. L'exportation s'effectue via l'option « Exporter < Rapports », puis « Nomenclature » (Figure VIII.8).

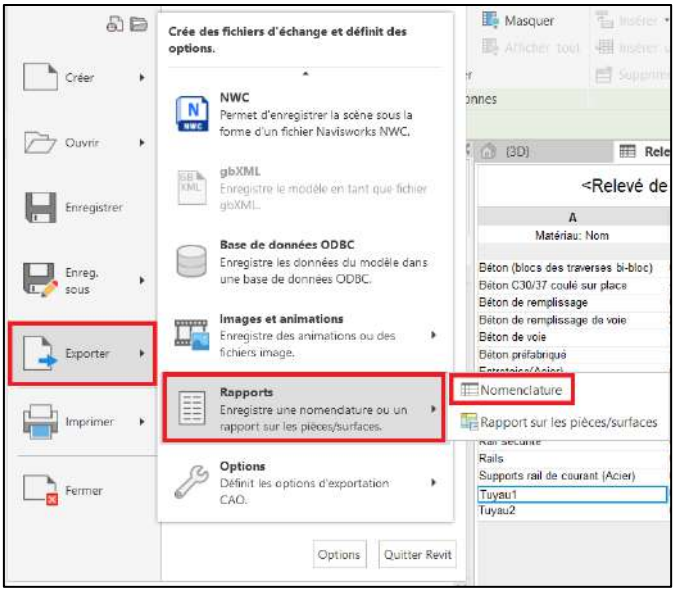


Figure VIII.8 : Exportation de la nomenclature depuis Autodesk Revit

Cette opération génère un fichier texte au format .txt. Ce fichier .txt est ensuite importé dans Excel. La Figure suivante illustre le fichier importé, qui peut être modifié selon les besoins à l'aide des fonctions d'Excel.

	A	B	C	D
1	Column1	Column2	Column3	Column4
2	Relevé de matériaux multicatégories			
3	Matériau: Nom	Matériau: Volume	Matériau: Surface	Total
4				
5	Béton (blocs des traverses bi-bloc)	0.11 m^3	3 m^2	112
6	Béton C30/37 coulé sur place	<multiples>	<multiples>	100
7	Béton de remplissage	6.64 m^3	30 m^2	50
8	Béton de remplissage de voie	2.91 m^3	25 m^2	50
9	Béton de voie	1.02 m^3	14 m^2	50
10	Béton préfabriqué	1.05 m^3	20 m^2	50
11	Entretoise(Acier)	0.00 m^3	0 m^2	112
12	Géomembrane	0.00 m^3	30 m^2	50
13	Géotextile 500 g/m^2	0.00 m^3	30 m^2	50
14	Rail de courant	0.01 m^3	2 m^2	100
15	Rail sécurité	0.01 m^3	1 m^2	50
16	Rails	0.03 m^3	3 m^2	50
17	Supports rail de courant (Acier)	0.01 m^3	1 m^2	20
18	Tuyau1	0.16 m^3	6 m^2	5
19	Tuyau2	0.02 m^3	1 m^2	50

Figure VIII.9 : Fichier de nomenclature importé dans Excel pour exploitation

VIII.3. ESTIMATION DES COÛTS

L'estimation des coûts est réalisée à partir des quantités extraites à l'aide des deux logiciels, Autodesk Civil 3D et Revit. Les prix unitaires ont été déterminés par une analyse cas par cas d'un marché existant, en considérant plusieurs facteurs, notamment l'inflation, les spécificités de ce projet, ainsi que les conditions économiques actuelles.

Ainsi, la 5D ne se limite pas à un simple outil de quantification, mais s'impose comme un pilier de la stratégie de pilotage de projet. Elle offre une vision globale du coût de l'ouvrage, essentielle pour garantir la performance financière et technique tout au long du cycle de vie.

Tableau VIII.1 : Estimation des coûts du projet

Description des travaux	Unités	Quantités (Revit)	Quantités (Civil 3D)	Prix unitaires (en DA)	Montants (en DA) -Revit-	Montants (en DA) -Civil 3D-
Système d'étanchéité du tunnel, constitué d'une géomembrane en PVC de 2,0 mm d'épaisseur et d'un manteau géotextile de 500 g/m², y compris les joints water stop et les bandes hydro-gonflantes, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires.	m²	1500	1485	15000	22500000	22275000
Fourniture et mise en œuvre de béton armé C30/37 EC2, y compris les sections d'armature du revêtement définitif, conformément aux plans, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires.	m³	563.16	568.9	40000	22526400	22756000
Fourniture et coulage de béton C20/25 en tunnel pour le remplissage du radier, y compris tous les travaux préparatoires et accessoires. (Béton de remplissage)	m³	332	329.83	15000	4980000	4947450
Fourniture et mise en œuvre de regards en béton de 0,60 m de diamètre pour le système de drainage, y compris le couvercle en béton armé de 0,05 m d'épaisseur, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires.	U	4	4	93700	374800	374800
Fourniture et pose de tube en PVC DN400 pour le drainage de la voie, y compris joint autobloquant avec anneau en caoutchouc, accessoires de raccordement, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires.	Ml	50	50	8580	429000	429000
Fourniture et coulage de béton C20/25 en tunnel, pour le remplissage du radier jusqu'à 0,10 m en dessous de la base de la traverse en béton, y compris tous les travaux préparatoires et accessoires. (Béton de remplissage de voie)	m³	145.5	146.28	15000	2182500	2194200
Fourniture et installation de passerelles en béton armé préfabriquées, y compris tous les travaux préparatoires et accessoires.	U	100	100	54000	5400000	5400000
Fourniture et pose de la colonne sèche, conformément au dessin de détail, y compris tous les travaux préparatoires et accessoires.	Ml	100	100	40000	4000000	4000000

Fourniture et pose des câbles électriques, conformément au dessin de détail, y compris tous les travaux préparatoires et accessoires.	Ml	100	100	50000	5000000	5000000
Fourniture et mise en place de traverses bibloc en béton, semelles de 9 mm et attaches Nabla, incluant tous les travaux préparatoires et accessoires.	U	112	112	30000	3360000	3360000
Fourniture et coulage de béton C30/37 dans la voie en tunnel, y compris 0,10 m de béton en dessous de la base des traverses, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires. (Béton de voie)	mlvs	50	50	60000	3000000	3000000
Fourniture et installation des rails de sécurité 54 E1 en tunnel, y compris les blocs de support des rails de sécurité en béton armé préfabriqué, les attaches, les plaques en acier, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires.	t	5.4	5.4	200000	1080000	1080000
Fourniture et installation des rails de roulement 60 E1 en tunnel, y compris les attaches, les plaques en acier, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires.	t	12.04	12.04	300000	3612000	3612000
Fourniture et installation des supports de rail de courant conformément au dessin de détail, y compris l'isolateur et les fixations, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires.	U	20	20	246300	4926000	4926000
Fourniture et installation de rails de courant composites acier/aluminium NO 5C, y compris les isolateurs, l'éclissage entre barres, le nivellement, la fixation, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires.	t	1.28	1.28	520000	665600	665600
Fourniture et montage de capot de protection pour rail de courant, incluant les rampes de raccordement, ainsi que tous les travaux préparatoires et accessoires.	Ml	100	100	21600	2160000	2160000
			Montant total (DA)		86 196 300	86 180 050

VIII.4. CONCLUSION

En conclusion, la dimension BIM 5D consiste à relier chaque élément de la maquette numérique aux données de coût et de quantité qui lui sont associées, offrant une lecture budgétaire plus précise.

Grâce à l'extraction des quantités en s'appuyant sur les fonctionnalités avancées des deux logiciels (Revit et Civil 3D), nous avons attribué à chaque entité extraite un coût unitaire, permettant ainsi d'estimer le devis quantitatif estimatif (DQE) de notre projet de tunnel.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au cours de notre projet de mémoire, nous avons modélisé un tronçon de tunnel, du PK 38+930 au PK 38+980 (Lot 3 du métro d'Alger) selon l'approche BIM. Le choix s'est porté sur l'utilisation de la suite logicielle d'Autodesk :

- Civil 3D et ses extensions pour la conception détaillée du tracé et l'évaluation des quantités ;
- Inventor Professional pour la modélisation paramétrique de la section du tunnel ;
- Revit pour la modélisation du tunnel à l'aide de familles adaptatives ;
- Navisworks pour la simulation du phasage constructif et la détection des conflits (clash detection) entre les différents éléments de la maquette ;
- Robot Structural Analysis Professional pour l'analyse structurelle du revêtement définitif du tunnel.

Dans ce travail, nous avons mis en évidence l'importance du BIM, considéré sans doute comme une méthode fiable pour la réalisation de projets de tunnels et d'ouvrages souterrains. Pour différentes raisons, le Building Information Modeling est aujourd'hui devenu primordial.

En premier lieu, la maquette BIM est en quelque sorte une ressource de connaissances partagées pour les informations relatives aux éléments du projet, constituant une base fiable pour la prise de décision.

En second lieu, le BIM assure la collaboration entre les différentes parties prenantes d'un projet, ainsi que le feedback entre les différents acteurs du secteur AEC (Architecture, Engineering, Construction). Cela est garanti par les divers formats d'échange de données de la maquette entre les logiciels (ex. : DWG, IMX, PKT, IPT, SQLite, etc.), rendant ainsi l'application interdisciplinaire du BIM de plus en plus ouverte et accessible.

De plus, le BIM prend en main le projet dans toutes ses phases du cycle de vie, c'est-à-dire de la conception initiale jusqu'à l'exploitation.

D'autre part, les tests de détection des conflits effectués dans la phase de conception servent à identifier les interférences entre les différents éléments de la maquette et à les résoudre par la suite, avant le passage à la phase d'exécution.

La création de la maquette BIM 4D est l'intégration de la dimension temporelle au modèle 3D. Cela permet de simuler le phasage constructif de l'ouvrage. Le BIM 4D n'est pas une simple visualisation, mais plutôt un outil de prévoyance de conflits spatio-temporels pour une meilleure planification.

Pour chaque projet on a besoin d'avoir une estimation de devis, cela est acquis par l'ajout de la dimension coût dans la maquette numérique.

Il est clair maintenant que la méthode BIM est un gain de temps pour une meilleure gestion des ressources.

Il est nécessaire de mentionner des limitations liées à l'exploitation de certains modèles importés depuis d'autres logiciels, notamment :

- le modèle Revit importé depuis InfraWorks : le modèle est monolithique et non dissociable empêchant le passage vers les dimensions avancées de cette approche , à savoir 4D et 5D. Cependant, le recours à d'autres outils comme celui de la programmation visuelle « Dynamo », a permis de combler le manque de modèle issu d'InfraWorks.
- Le modèle Robot importé depuis Revit : un modèle physique doit être converti en modèle analytique pour qu'il soit exportable dans le logiciel Robot , hélas Revit est juste conçu pour le transfert des éléments précis (murs, poteaux porteurs, ossatures). Bien que notre modèle Revit ait été créé à l'aide de familles génériques adaptatives, le transfert vers Robot a échoué.

BIBLIOGRAPHIE

[1] APS ALGÉRIE PRESSE SERVICE, *INAUGURATION DU METRO D'ALGER VF*, *calameo.com*, 2011, pp. 7.

[2] ASKRI, H. &, BELMECHERI, A. &, BENRABAH, B. &, BOUDJEMA A. &, BOUMENDJEL K. &, DAOUDI, M.&, DRID, M. &, GHALEM, T. &, DOCCA, A. M. &, GHANDRICHE H. &, GHOMARI, A. &, GUELLATI, N. &, KHENNOUS, M. &, LOUNICI, R. &, NAILI, H. &, TAKHERIST, D. & et TERKMANI, M. &, *Géologie de l'Algérie*, *Contribution de SONATRACH Division Exploration, Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement*, pp. 93, 1995.

[3] ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE PROJECTISTAS E CONSULTORES (APPC), 2019, *FERCONSULT - Consultoria, Estudos e Projectos de Engenharia de Transportes, S.A. – Fiche technique*, 24 juillet 2019,

[4] AUTODESK, *« Dynamo for Civil 3D: Placing Objects along a Corridor »*, [en ligne], 2020, Disponible à l'adresse : https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/tsarticles/ts/6tAaTkgVI20zCd0D23ODUm.html, [Consulté le 4 juin 2025].

[5] AUTODESK, *« Autodesk Civil 3D Help | About Dynamo for Autodesk Civil 3D | Autodesk »*, [en ligne], 2022, Disponible à l'adresse : https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2023/ENU/?guid=Civil3D_Dynamo_About_Dynamo_for_Autodesk_Civil_3D_html, [Consulté le 5 mai 2025].

[6] AUTODESK, *« Autodesk Civil 3D Help | Geotechnical Modeler | Autodesk »*, [en ligne], 2022, Disponible à l'adresse : https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2023/ENU/?guid=Geotechnical_Modeler, [Consulté le 5 mai 2025].

[7] AUTODESK, *« Autodesk Civil 3D Help | Subassembly Composer | Autodesk »*, [en ligne], 2022, Disponible à l'adresse : https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2023/ENU/?guid=SubAssembly, [Consulté le 5 mai 2025].

[8] AUTODESK, *« Aide | Automatisation analytique à partir de modèles physiques | Autodesk »*, [en ligne], 2023, Disponible à l'adresse : https://help.autodesk.com/view/RVT/2023/FRA/?guid=GUID-3901D6CC-A8A6-4984-92E4-E294E162C5A1, [Consulté le 4 juin 2025].

[9] AUTODESK, *« Qu'est-ce que Navisworks ? »*, [en ligne], 2023, Disponible à l'adresse : https://www.autodesk.com/fr/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/FRA/What-is-Navisworks.html, [Consulté le 31 mai 2025].

[10] AUTODESK, *« Téléchargement gratuit du visualiseur 3D Navisworks | Navisworks Freedom »*, [en ligne], 2023, Disponible à l'adresse : https://www.autodesk.com/fr/products/navisworks/3d-viewers, [Consulté le 31 mai 2025].

[11] AUTODESK, *« Autodesk Civil 3D Help | About Part Builder | Autodesk »*, [en ligne], 2024, Disponible à l'adresse : https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2025/ENU/?guid=GUID-9960087B-C2A7-4932-9217-67FEF7955631, [Consulté le 31 mai 2025].

[12] AUTODESK, *« Autodesk Civil 3D 2025 | Connaître les prix et acheter le logiciel Civil 3D »*, [en ligne], 2024, Disponible à l'adresse : https://www.autodesk.com/fr/products/civil-3d/overview, [Consulté le 5 mai 2025].

[13] AUTODESK, *« Autodesk InfraWorks 2025 | Connaître les prix et acheter le logiciel officiel »*, [en ligne], 2024, Disponible à l'adresse : https://www.autodesk.com/fr/products/infraworks/overview, [Consulté le 5 mai 2025].

[14] AUTODESK, *« Autodesk Revit | Connaître les prix et acheter une licence officielle du logiciel Revit »*, [en ligne], 2024, Disponible à l'adresse : https://www.autodesk.com/fr/products/revit/overview, [Consulté le 5 mai 2025].

[15] AUTODESK, *« Robot Structural Analysis Professional | Téléchargement et prix »*, [en ligne], 2024, Disponible à l'adresse : https://www.autodesk.com/fr/products/robot-structural-analysis/overview, [Consulté le 5 mai 2025].

[16] AUTODESK, *« Fonctionnalités d'Inventor | Nouvelles fonctionnalités 2026 | Autodesk »*, [en ligne], 2025, Disponible à l'adresse : https://www.autodesk.com/fr/products/inventor/features, [Consulté le 31 mai 2025].

[17] AUTODESK, *« Help | About the Parts Editor | Autodesk »*, [en ligne], 2025, Disponible à l'adresse : https://help.autodesk.com/view/INFMDR/ENU/?guid=InfraWorks_DataExchange_NotInTheCollection_ExchangeDataWithAutodeskInventor_AboutThePartsEditor_html, [Consulté le 31 mai 2025].

[18] BALASUBRAMANIAN A., *Tunnels-types and importance*, *ResearchGate*, 14 mars 2014.

[19] BUILDINGSMART FRANCE—MEDIACONSTRUCT, *guide-Géoréférencement de projets BIM-Eléments méthodologiques : notions de base, cas d'usage et outils*, , avril 2020.

[20] C Jorge, 2014, *LOT 3 : PLACE DES MARTYRS – BAB EL OUED – CHEVALLEY. Avant-projet détaillé (A.P.D.) – Mission C : Lot 10 - Génie civil général. Volume 2 : Ouvrages en ligne – Tunnel – Structure. Note technique*, 15 novembre 2014,

[21] C Jorge, 2015, *LOT 3 : PLACE DES MARTYRS – BAB EL OUED – CHEVALLEY, AVANT PROJET DÉTAILLÉ (A.P.D.), MISSION C : LOT 10 - GÉNIE CIVIL GÉNÉRAL, NOTE TECHNIQUE, VOLUME 1 – GÉNÉRAL, GÉOLOGIE ET GÉOTECHNIE*, 31 janvier 2015,

[22] CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS, *Dossier pilote des tunnels: génie civil*, Bron : Centre d'études des tunnels, ISBN 978-2-11-084743-0, 1998.

[23] CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS, *Dossier pilote des tunnels: génie civil - Section 5 : étanchement et revêtement*, Bron : Centre d'études des tunnels, Dossier pilote des tunnels, ISBN 978-2-11-084743-0, 1998.

[24] DE LA FUENTE Manuel, TAHERZADEH Reza, SULEM Jean, NGUYEN Xuan-Son et SUBRIN Didier, *Applicability of the Convergence-Confinement Method to Full-Face Excavation of Circular Tunnels with Stiff Support System*, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 52, n° 7, pp. 2361-2376, DOI 10.1007/s00603-018-1694-8, juillet 2019.

[25] DEBABI Reda, *Le Metro D'alger*, *calameo.com*, 1 ére édition, janvier 2017, pp. 18.

[26] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR UNTERIRDISCHES BAUEN E. V." (DAUB), 2019, *Digital Design, Building and Operation of Underground Structures – BIM in Tunnelling*, mai 2019,

[27] DJAMEL Chafa, *« El Harrach par métro »*, *Le Temps d'Algérie*, 26 mars 2009, pp. 15.

[28] DJEDDI Mabrouk, *SISMICITE DE LA REGION D'ALGER ANALYSE ET SYNTHESE DES CONNAISSANCES ACTUELLES*, *ResearchGate*, pp. 40, 2013.

[29] DYNAMO BIM, *Learn*, *Dynamo BIM* [en ligne], 2021, Disponible à l'adresse : https://dynamobim.org/, [Consulté le 5 mai 2025].

[30] FABOZZI S., CIPOLLETTA G., CAPANO E., ASPRONE D., DELL'ACQUA G. et BILOTTA E., Édité par : PEILA Daniele, VIGGIANI Giulia et CELESTINO Tarcisio, *BIM-FEM interoperability for the modelling of a traditional excavated tunnel*, *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*, 1, CRC Press, pp. 785-794, ISBN 978-0-429-42444-1, 2019.

[31] KLINC Robert, GABRŠČEK Dani, ČESNIK Jure, ŽIBERT Marko, HOSTNIK Martin et LOGAR Janko, *Development of a Semiautomatic Parametric Method for Creation of an I-BIM Model of a Tunnel for Use in FEM Software*, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 2021, n° 1, pp. 8843277, DOI 10.1155/2021/8843277, 2021.

[32] KONTOTHANASIS Panayotis, KROMMYDA Vicky et ROUSSOS Nikolaos, Édité par : SAKELLARIOU Michael, *BIM and Advanced Computer-Based Tools for the Design and Construction of Underground Structures and Tunnels*, *Tunnel Engineering - Selected Topics*, ISBN 978-1-78985-465-7, 2020.

[33] LUNARDI Pietro, *Design and Construction of Tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*, Springer Science & Business Media, 2008.

[34] MAIDL Bernhard, THEWES Markus et MAIDL Ulrich, *Handbook of Tunnel Engineering I: Structures and Methods*, John Wiley & Sons, ISBN 978-3-433-60351-2, 2013.

[35] MAIDL Bernhard, THEWES Markus et MAIDL Ulrich, *Handbook of Tunnel Engineering II: Basics and Additional Services for Design and Construction*, John Wiley & Sons, ISBN 978-3-433-03049-3, 2014.

[36] MARTIN François et SAÏTTA Adrien, *Mécanique des Roches et Travaux Souterrains : Cours et exercices corrigés*, 8e édition, 2012.

[37] MENAD Wahiba, *Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : cas de la partie ouest du Grand Alger*, thèse de doctorat sous la direction de Gilles Arnaud-Fassetta, Université Paris-Diderot - Paris VII, 2012.

[38] PANET Marc et SULEM Jean, *Convergence-confinement method for tunnel design*, Cham : Springer, Springer tracts in civil engineering, 2022.

[39] QUIÑONES-ROZO, Camilo (P.E), *LUGEON TEST INTERPRETATION, REVISITED*, , 2010.

[40] ROCSCIENCE, *RSData | Strength and Stress Analysis of Rock and Soil Materials*, [en ligne], 2021, Disponible à l'adresse : https://www.rocscience.com/software/rsdata, [Consulté le 12 mai 2025].

[41] SANTO R., CONCEIÇÃO M., MOHAMED A., MAHIEDDINE I. et HAOUCHINE M., *Algiers metro – Extension E. Beaulieu Station, a case study*, , pp. 1872-1880, DOI 10.1201/9781003348030-225, 12 avril 2023.

[42] SHARAFAT Abubakar, KHAN Muhammad Shoaib, LATIF Kamran et SEO Jongwon, *BIM-Based Tunnel Information Modeling Framework for Visualization, Management, and Simulation of Drill-and-Blast Tunneling Projects*, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 35, n° 2, pp. 04020068, DOI 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000955, mars 2021.

[43] TERZAGHI Karl, *Rock Defects and Loads on Tunnel Supports*, Harvard University, Graduate School of Engineering, 1946.

[44] TERZAGHI Karl, PECK Ralph B. et MESRI Gholamreza, *Soil mechanics in engineering practice*, 3. ed, New York : Wiley, ISBN 978-0-471-08658-1, 1996.

[45] TPF- CONSULTORES DE ENGENHARIA E ARQUITETURA, S.A., 2021, *Ouvrages Géotechniques*, juin 2021,

[46] TREVI ALGÉRIE, 2020, *The Algiers Metro a modern means of transport*, 2020,

[47] YELLES-CHAOUCHE AbdelKrim, BOUDIAF Azzedine, DJELLIT Hamou et BRACENE Rabah, *La tectonique active de la région nord-algérienne*, *Comptes Rendus. Géoscience*, Vol. 338, n° 1-2, pp. 126-139, DOI 10.1016/j.crte.2005.11.002, 1 janvier 2006.

ANNEXE 1

Résultats des sondages : données lithologiques et stratigraphiques en fonction de la profondeur.

ANNEXE 1 : Résultats des sondages : données lithologiques et stratigraphiques en fonction de la profondeur

Sondage	Profondeur atteinte par les sondages (m)	Lithologie	Stratigraphie	Profondeurs moyennes (m)
SP60	28 m	Remblais	R.x	0 - 0.8
		Schiste verdâtre, ocre à rougeâtre sur les fractures et des argiles rougeâtres	Socle kabyle	0.8 - 5.6
		Argiles ocre à débris de schiste verdâtre	Socle kabyle	5.6 - 6.4
		Sable fin à moyen noirâtre	Socle kabyle	6.4 - 8
		Conglomérat a galets argileux de calcaire	Socle kabyle	8 - 8.5
		Schiste verdâtre a bancs centimétriques de quartz (0.5a 7 cm) ocre verdâtre aux niveaux des fractures	Socle kabyle	8.5 - 15.7
		Schiste grisâtre satiné à surface savonneuse (talcs) et des bancs centimétriques de quartz (0.5 à 6cm)	Socle kabyle	15.7 - 28
S116	35m	Asphalte	R.x	0-0.15
		Remblai	R.x	0.15-2
		Sable	Q.s	2-3.5
		Rognons	Q.s	3.5-5.8
		Schiste	Socle kabyle	5.8-35
SP60A	20m	Remblais (débris de brique et sable fin)	R.x	0 – 6.2
		Grés grossier	Q.s	6.2 - 6.4
		Sable jaunâtre fin à moyen	Q.s	6.4 - 7
		Gravier et galets	Q.s	7 - 9
		Marne grisâtre plastique	T.M	9 - 20
S117	31m	Asphalte	R.x	0-0.17
		Remblai	R.x	0.17-1.7
		Débris	R.x	1.7-2.2
		Silt	Q.s	2.2-2.3
		Gravier et galets	T.B	2.3-6.1
		Débris	T.B	6.1-6.9
		Argile	T.A	6.9-7
		Schiste	Socle kabyle	7-12.3
		Quartzite	Socle kabyle	12.3-18.7
		Argile	Socle kabyle	18.7-19.1
		Quartzite	Socle kabyle	19.1-19.5
		Argile	Socle kabyle	19.5-23
		Rognons	Socle kabyle	23-23.3
		Argile	Socle kabyle	23.3-24.3
		Debris	Socle kabyle	24.3-24.7
		Schiste ardoisier	Socle kabyle	24.7-25
		Argile	Socle kabyle	25-28
		Schiste	Socle kabyle	28-31
SP61	28m	Remblais	R.x	0 - 1
		Argile vaseuse noirâtre sableuse et graveleuse	Q.A	1 - 3.7
		Calcaire cristallin grisâtre à cavité de dissolution et géode de calcite et des galets de calcaire dans une matrice argileuse ocre	Socle kabyle	3.7 - 7
		Sable fin ocre légèrement argileux	Socle kabyle	7 – 8.3

ANNEXE 1 : Résultats des sondages : données lithologiques et stratigraphiques en fonction de la profondeur

		Argile rougeâtre sableuse à gravier de schiste altéré	Socle kabyle	8.3 - 10.4
		Sable moyen à grossier jaune rougeâtre	Socle kabyle	10.4 - 12.3
		Sable fin silteux rougeâtre légèrement argileux	Socle kabyle	12.3 - 14
		Schiste rouge grisâtre, plus au moins riche en calcaire	Socle kabyle	14 - 15.6
		Graviers et galets de schiste dans une matrice argilo-sableuse	Socle kabyle	15.6 - 19.3
		Schiste satiné grisâtre riche en oxyde de fer au niveau des fractures et des passages métriques des schistes graveleux et argile grisâtre	Socle kabyle	19.3 - 28
S118	35m	Asphalte	R.x	0-0.34
		Sable	Q.s	0.34-2
		Latérite	Q.A	2-5.5
		Argile	Q.A	5.5-6
		Sable	Q.s	6-6.9
		Schiste	Socle kabyle	6.9-7.5
		Argile	Socle kabyle	7.5-9
		Schiste	Socle kabyle	9-15.8
		Quartzite	Socle kabyle	15.8-16.6
		Argile	Socle kabyle	16.6-17.1
		Schiste	Socle kabyle	17.1-19.8
		Debris	Socle kabyle	19.8-20.2
		Schiste	Socle kabyle	20.2-35
SP62	31m	Remblais	R.x	0 - 3
		Sable moyen brun noirâtre à grossier, légèrement argileux	Q.s	3 - 10.7
		Argile vaseuse sableuse et graveleuse	Q.A	10.7 - 12.8
		Schiste satiné grisâtre bancs centimétriques (0.5 à 3 cm) de quartz, calcite, et des oxydes de fer au niveau des fractures et argile	Socle kabyle	12.8 - 14.2
		Calcaire grisâtre à oxyde de fer et argile rougeâtre au niveau des fractures	Socle kabyle	14.2 - 16
		Schiste satiné à toucher soyeux et savonneux et développement de talcs entre la schistosité et des bans centimétriques de quartz et de calculé (entre 0.5 à 5cm) et des passages décimétriques d'argiles (produit d'altération)	Socle kabyle	16 - 25.4
		Calcaire grisâtre à joints stillolitique, matière charbonneuse et pyrite dans les fractures	Socle kabyle	25.4 - 27.9
		Probablement un granite rose clair à texture granulée et des phénocristaux de quartz et plagioclase	Socle kabyle	27.9 - 31
SCX	40m	Remblai	R.x	0-3
		Sable moyen graveleux peu caillouteux de couleur marron à marron foncé	Q.S	3-8.8
		Argile marneuse plastique peu limoneuse grisâtre	Q.A	8.8-15

ANNEXE 1 : Résultats des sondages : données lithologiques et stratigraphiques en fonction de la profondeur

		Argile limoneuse peu graveleuse avec présence de matière organique de couleur marron foncé a rougeâtre	Q.A	15-17
		Argile limoneuse peu sableuse compacte friable de couleur gris verdâtre	Q.A	17-18.7
		Sable argilo-limoneux de couleur brunâtre à marron	Q.s	18.7-22
		Sable moyen a grossier peu limoneux peu graveleux de couleur marron a marron foncé	Q.s	22-26
		Alternance de schiste fragmenté de graviers et sable grossier noirâtre	Socle kabyle	26-31
		Schiste fissuré altéré par endroit de couleur bleuâtre a grisâtre	Socle kabyle	31-40
SCXI	40m	Remblai	R.x	0-4
		Sable moyen consolidé graveleux par endroit brunâtre a marron	Q.s	4-6.85
		Galets à matrice argilo-limoneux brunâtre	Q.s	6.85-8.35
		Argile peu graveleuse peu caillouteuse grisâtre	Q.A	8.35-12.7
		Marne plastique grisâtre	TM	12.7-25.5
		Marne plastique gris verdâtre	TM	25.5-40

ANNEXE 2

Résumé des résultats des essais in situ réalisés dans plusieurs études – PMT.

ANNEXE 2: Résumé des résultats des essais in situ réalisés dans plusieurs études – PMT

Sondage pressiométrique	Prof (m)	E (MPa)	P0	PL (MPa)	PF (MPa)	E/PL
SPX	3	2.645	0.29	0.372	0.360	7.11
	4.5	100.949	0.4	3.592	2.409	28.10
	6	38.306	0.2	1.629	1.104	23.52
	7.5	62.323	0.2	3.139	1.663	19.85
	9	75.559	0.3	3.178	1.971	23.78
	10.5	43.623	0.3	2.281	1.559	19.12
	12	40.828	0.36	2.277	1.550	17.93
	13.5	39.147	0.3	2.134	1.481	18.34
	15	47.519	0.54	2.537	1.677	18.73
	16.5	50.921	0.3	2.112	1.268	24.11
	18	115.937	0.48	5.2	3.313	22.30
	19.5	51.635	0.42	2.184	1.367	23.64
	21	65.224	0.48	2.456	1.697	26.56
	24	142.748	0.6	5.136	5.136	27.79
	25.5	177.002	0.84	5.170	5.170	34.24
	27	164.020	0.6	5.183	5.183	31.65
	28.5	168.168	0.6	5.197	5.197	32.36
	30	184.002	0.84	5.218	5.218	35.26
	31.5	168.148	0.84	5.211	5.211	32.27
	33	176.053	0.9	5.247	5.247	33.55
	34.5	186.122	0.9	5.241	5.241	35.51
	36	199.463	0.96	5.275	5.275	37.81
	37.5	202.709	0.98	5.292	5.292	38.30
	40	190.364	0.98	5.314	5.314	35.82
SPXI	3	10.638	0.15	0.758	0.531	14.03
	4.5	20.050	0.19	0.922	0.593	21.75
	6	20.781	0.2	1.502	0.802	13.84
	7.5	17.816	0.18	1.396	0.905	12.76
	9	32.452	0.27	1.986	1.121	16.34
	10.5	68.892	0.4	3.527	2.372	19.53
	12	60.045	0.375	3.335	2.349	18.00
	13.5	43.036	0.36	2.663	2.049	16.16
	15	66.284	0.48	2.575	1.796	25.74
	16.5	59.959	0.5	3.053	1.938	19.64
	18	50.706	0.3	2.612	1.576	19.41
	19.5	61.328	0.54	2.606	1.898	23.53
	21	99.873	0.6	4.149	2.906	24.07
	22.5	89.887	0.75	4.197	2.839	21.42
	24	85.966	0.6	4.261	2.774	20.18
	25.5	106.149	0.8	4.996	3.462	21.25
	27	77.918	0.8	3.653	2.337	21.33
	28.5	111.864	0.8	3.966	2.498	28.21
	30	102.828	0.85	4.313	2.678	23.84
	31.5	88.984	0.85	4.284	2.819	20.77
	33	80.810	0.68	3.955	2.834	20.43
	34.5	45.957	0.6	3.644	2.475	12.61
	36	82.382	0.68	3.935	2.991	20.94
	37.5	79.914	0.92	3.667	2.522	21.79
	39	71.966	0.72	3.610	2.494	19.94

ANNEXE 3

Abaques et tableaux de sélection des paramètres géomécaniques (GSI, mi, D, MR) des calcaire, socle altéré et socle.

ANNEXE 3: Abaques et tableaux de sélection des paramètres géomécaniques (GSI, mi, D, MR) des calcaire, socle altéré et socle

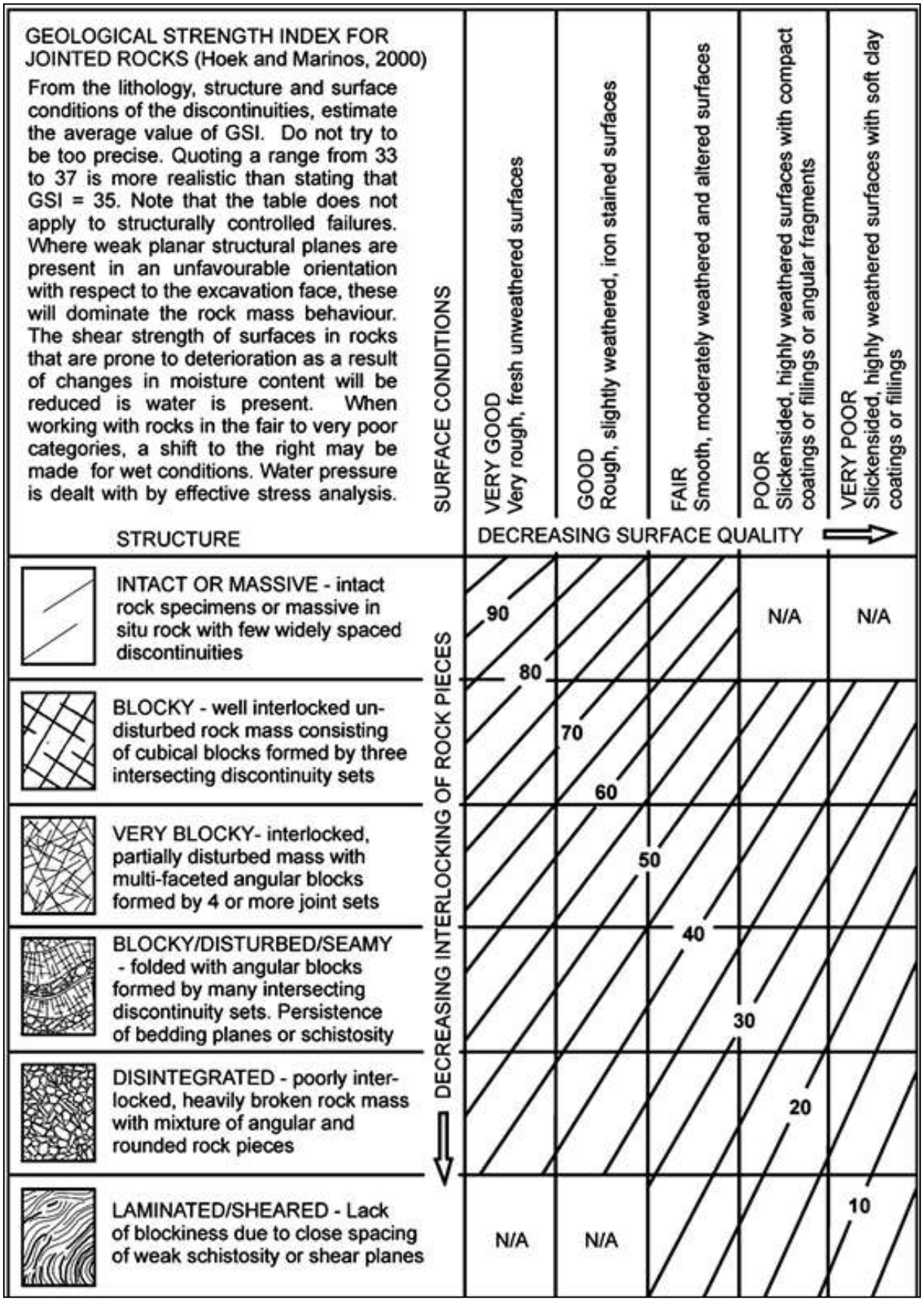


Figure 01 : Abaque : la valeur de la constante GSI.

Table 2. Values of the constant m_i for intact rock, by rock group. Note that values in parenthesis are estimates

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19	Siltstone 9	Claystone 4
				—Greywacke— (18)		
	Non-Clastic	Organic		—Chalk— 7		
				—Coal— (8–21)		
		Carbonate	Breccia (20)	Sparitic Limestone (10)	Micritic Limestone 8	
		Chemical		Gypstone 16	Anhydrite 13	
METAMORPHIC	Non-foliated		Marble 9	Hornfels (19)	Quartzite 24	
	Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite 25–31	Mylonites (6)	
	Foliated*		Gneiss 33	Schists 4–8	Phyllites (10)	Slate 9
IGNEOUS	Light		Granite 33		Rhyolite (16)	Obsidian (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
			Diorite (28)		Andesite 19	
	Dark		Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalt (17)	
			Norite 22			
	Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)	

*These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

Figure 02 : Valeurs types du constant mi .

ANNEXE 3: Abaques et tableaux de sélection des paramètres géomécaniques (GSI, mi, D, MR) des calcaire, socle altéré et socle

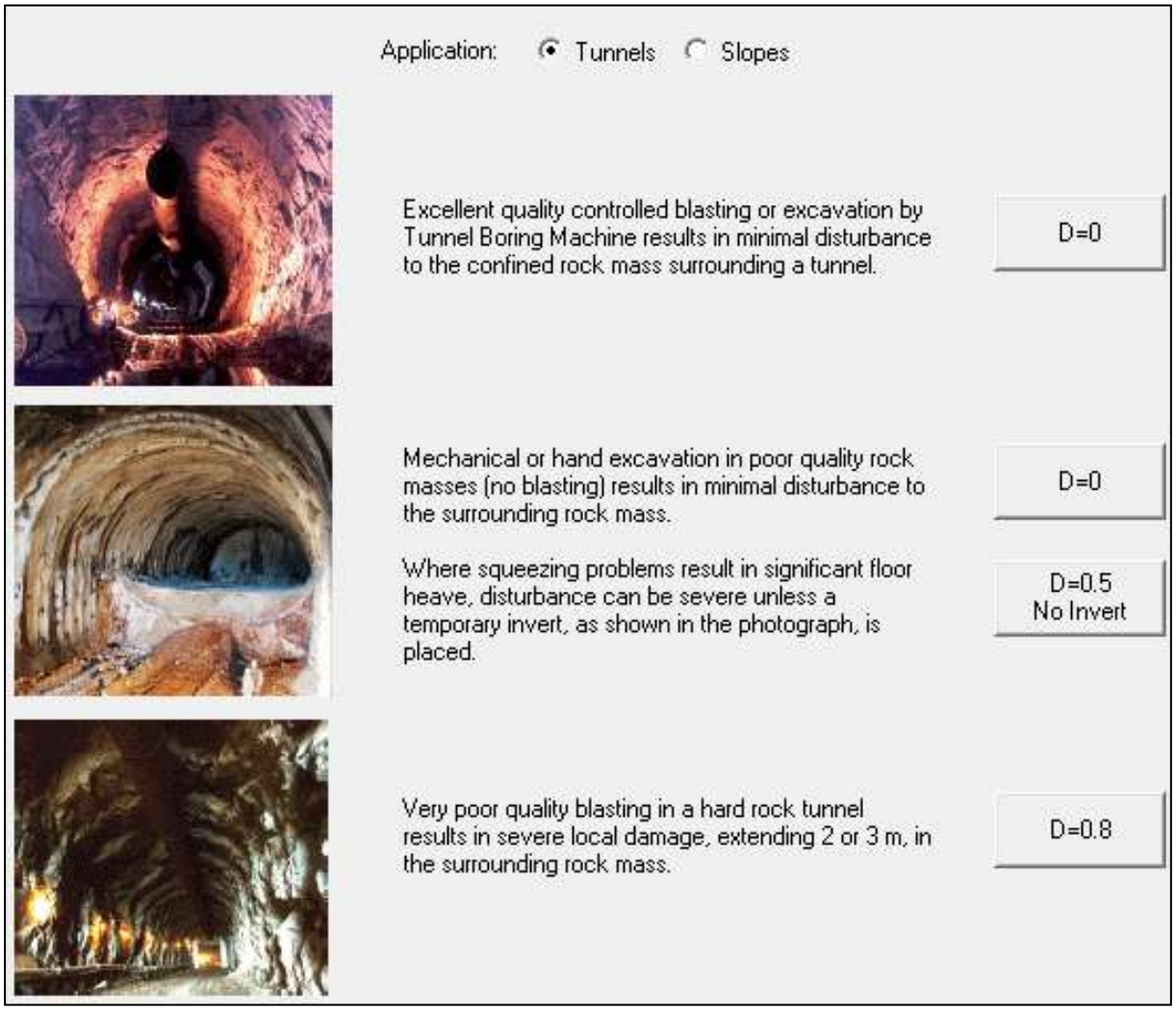


Figure 03 : Abaque : la valeur du facteur de perturbation D.

ANNEXE 3: Abaques et tableaux de sélection des paramètres géomécaniques (GSI, mi, D, MR) des calcaire, socle altéré et socle

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerates 300–400 Breccias 230–350	Sandstones 200–350	Siltstones 350–400 Greywackes 350	Claystones 200–300 Shales 150–250 Marls 150–200
	Non-clastic	Carbonates	Crystalline limestones 400–600	Sparitic limestones 600–800	Micritic Limestones 800–1000	Dolomites 350–500
		Evaporites		Gypsum (350)	Anhydrite (350)	
		Organic				Chalk 1000+
Metamorphic	Non-foliated		Marble 700–1000	Hornfels 400–700 Metasandstone 200–300	Quartzites 300–450	
	Slightly foliated		Migmatite 350–400	Amphibolites 400–500	Gneiss 300–750	
	Foliated			Schists 250–1100	Phyllites/Mica Schist 300–800	Slates 400–600
Igneous	Plutonic	Light	Granite 300–550 Granodiorite 400–450	Diorite 300–350		
		Dark	Gabbro 400–500 Norite 350–400	Dolerite 300–400		
	Hypabyssal		Porphyries (400)		Diabase 300–350	Peridotite 250–300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300–500 Andesite 300–500	Dacite 350–450 Basalt 250–450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400–600	Volcanic breccia (500)	Tuff 200–400	

Figure 04 : la valeur de la constante MR

ANNEXE 4

Résultats du calcul des paramètres géotechniques obtenus à l'aide du logiciel ROCKDATA.

ANNEXE 4: Résultats du calcul des paramètres géotechniques obtenus à l'aide du logiciel ROCKDATA

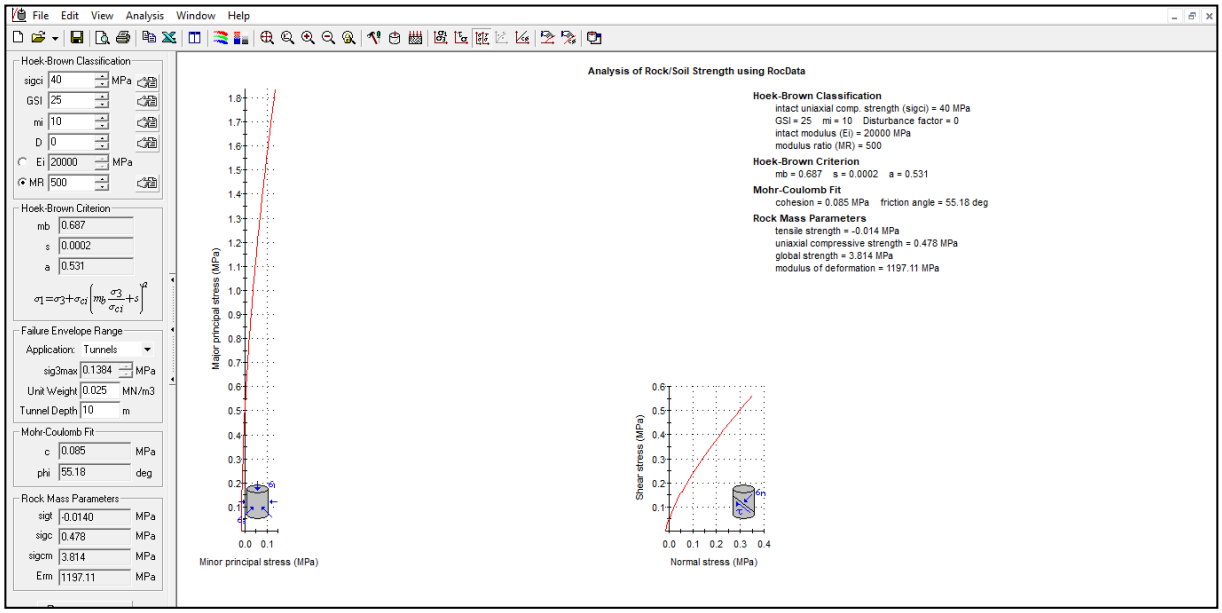


Figure 01 : Résultat du calcul des paramètres géotechniques du calcaire.

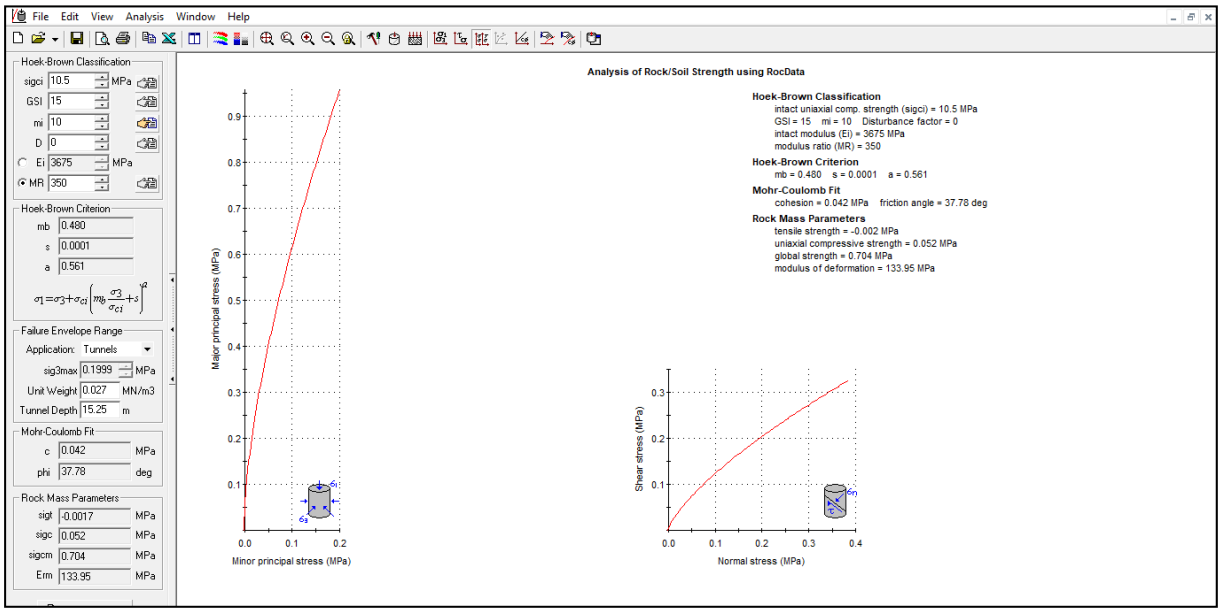


Figure 02 : Résultat du calcul des paramètres géotechniques du socle altéré.

ANNEXE 4: Résultats du calcul des paramètres géotechniques obtenus à l'aide du logiciel ROCKDATA

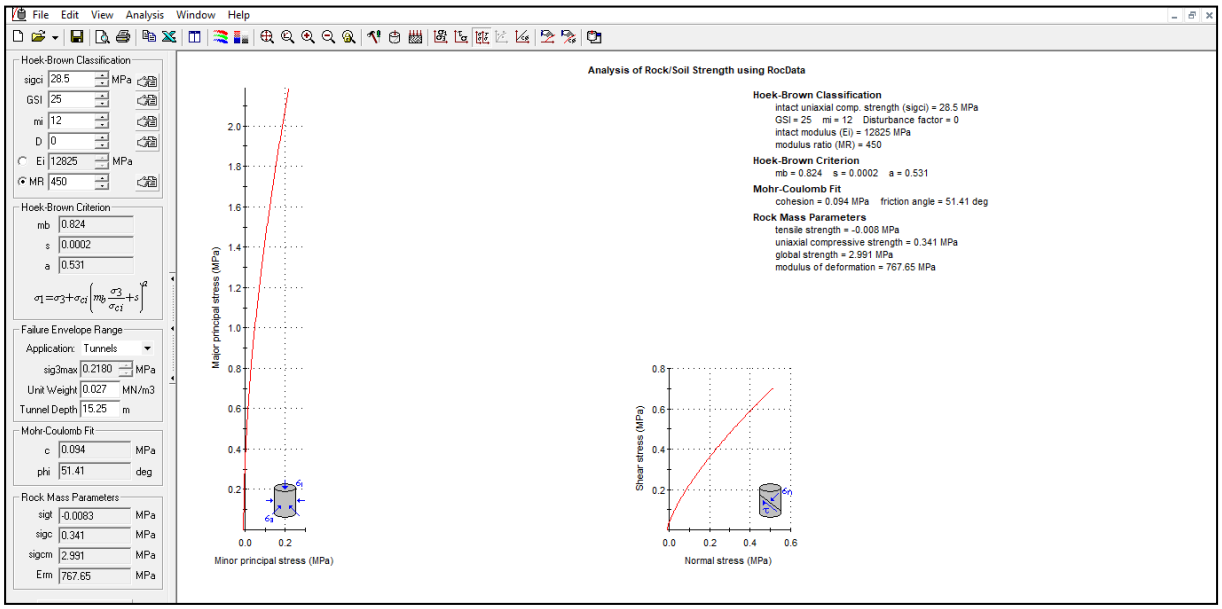


Figure 03 : Résultat du calcul des paramètres géotechniques du socle.

ANNEXE 5

Élaboration de la maquette 3D.

Présentation des logiciels Autodesk utilisés

InfraWorks

InfraWorks d'Autodesk est un logiciel de conception d'infrastructures civiles qui permet de créer, d'évaluer et d'optimiser des concepts de conception (Autodesk, 2024) [13]. InfraWorks offre notamment les fonctionnalités suivantes :

- Modélisation du contexte

Agrégation de données pour générer un modèle contextuel représentant l'environnement bâti et naturel d'un projet.

- Conception conceptuelle

Production de concepts de projets d'infrastructure, évaluation et itération rapide des options de conception.

- Conception de routes

Accélération de la conception grâce à l'utilisation de routes composées et à la planification des routes pour obtenir une vue conceptuelle du projet.

- Analyse de la distance de visibilité

Analyse de la distance de visibilité des routes et des intersections afin d'identifier les angles morts ou les zones de visibilité insuffisante.

- Structures civiles paramétriques

Utilisation de composants et d'assemblages de ponts et de tunnels paramétriques, ainsi que de décorations routières paramétriques.

- Conception de ponts

Prise en charge des ponts à poutres en I préfabriquées et à poutres à âme pleine.

- Analyse de ponts

Création de modèles analytiques pour les ponts mixtes en acier et à poutres en béton précontraint.

- Conception de tunnels

Conception des tunnels paramétriques dans le cadre de projets d'infrastructures globales.

- Conception du drainage

Modélisation des bassins versants, ponceaux et réseaux de drainage avec Drainage Design for InfraWorks.

- Interopérabilité

Agrégation de données à partir de plus de 50 formats de fichiers, dont AutoCAD, Revit, IFC, etc.

- Création de présentations percutantes

Production de storyboards incluant une série d'instantanés ou un parcours vidéo dynamique.

Civil 3D

Autodesk Civil 3D est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) spécialisé dans la modélisation, l'analyse et la documentation des projets d'infrastructure civile. Il est principalement utilisé pour les projets d'infrastructure linéaires, les ouvrages hydrauliques, les modélisations géotechniques, ainsi que pour la génération des documents techniques (Autodesk, 2024) [12].

Parmi ses principales fonctionnalités :

- Modélisation de terrain

Création de modèles numériques de topographie pour les études d'occupation des sols, la planification des systèmes de transport et les simulations d'écoulement de l'eau

- Modélisation de couloirs

Élaboration de couloirs dynamiques riches en données, intégrant les paramètres de profils en long et en travers.

- Analyse et conception de réseaux de drainage

Conception hydraulique et hydrologique des réseaux d'eaux pluviales et usées, incluant le dimensionnement des canalisations, regards et fossés.

- Création de plans et documentation

Production automatisée des documents techniques, tels que les feuilles de profils en long, de profils en travers et les plans de calage.

- Interopérabilité

Prise en charge des formats standards de l'industrie et intégration directe avec des plateformes de SIG ou d'autres outils BIM.

- Automatisation de la conception

Intégration de la programmation visuelle via Dynamo, pour automatiser des tâches répétitives ou complexes.

- Modélisation géotechnique

Visualisation des données du sous-sol et intégration directe dans le modèle Civil 3D à l'aide de modules comme Geotechnical Modeler.

- Quantification des matériaux

Évaluation des volumes de déblais/remblais.

Geotechnical Modeler

Autodesk Geotechnical Modeler est une extension de Civil 3D qui permet d'importer, connecter et visualiser les données géotechniques directement dans l'environnement Civil 3D. Geotechnical Modeler propose des outils permettant de générer facilement des surfaces de strates, de créer des visualisations de sous-surface de données géotechniques dans des vues de profil et de transposer les informations de profil en vue tridimensionnelle. Les flux de travail sont familiers à tous les utilisateurs de Civil 3D, car l'outil utilise une variété d'objets et de styles Civil 3D (Autodesk, 2022) [6].

Subassembly Composer

Autodesk Subassembly Composer pour Civil 3D vous offre une interface permettant de composer et de modifier des profils type complexes, sans connaissances en programmation. Son installation est possible lors de l'installation d'AutoCAD Civil 3D. La personnalisation permet de créer des sous-assemblages adaptés à vos besoins spécifiques. Une fois un sous-assemblage importé dans Civil 3D, vous pouvez l'utiliser à tout moment (Autodesk, 2022) [7].

Part Builder

Le Générateur de composants "Part Builder" d'Autodesk Civil 3D est un outil dédié à la création et à la modification des éléments constitutifs des réseaux de canalisations présents dans les catalogues de composants, il sert à concevoir des formes personnalisées pour représenter graphiquement des éléments réels tels que des canalisations, chaque élément correspond à une famille de composants (canalisation en béton, en fonte ductile, ponceau elliptique, etc.), regroupant plusieurs tailles normalisées. Grâce à cet outil, il est possible de configurer de nouvelles familles de composants ou d'ajuster les dimensions des composants existants (Autodesk, 2024) [11].

Infrastructure Parts Editor

Infrastructure Parts Editor est un outil de modélisation paramétrique destiné à la création et à la gestion de catalogues de pièces compatibles avec Autodesk InfraWorks et Autodesk Civil 3D. Il permet aux utilisateurs de concevoir des composants et des assemblages paramétriques personnalisés pour les réseaux de canalisations et structures de drainage, accessible directement depuis InfraWorks ou Civil 3D, l'outil offre une interface pour modifier, organiser et publier les catalogues de pièces sous forme de familles et de tailles(Autodesk, 2025) [17] .

Inventor Professional

Autodesk Inventor est un logiciel de conception mécanique 3D basé sur la modélisation paramétrique. Il permet de créer, simuler, visualiser et documenter des pièces, des assemblages et des systèmes mécaniques (Autodesk, 2025) [16], il offre des outils avancés pour :

- Modélisation paramétrique

Conception, création et modification des modèles 3D grâce à une interface utilisateur intuitive.

- Modélisation d'assemblages

Visualisez l'ajustement et les performances de votre conception au niveau de l'assemblage.

- Création de dessins

Création rapide des dessins précis, détaillés et clairs pour la fabrication.

- Collaboration grâce aux vues partagées

Collaboration entre les principaux intervenants sur les conceptions à partir de n'importe quel appareil.

- Utilisation de données non natives

Inventor Professional peut ouvrir directement des conceptions créées à partir d'autres systèmes de CAO sans avoir à les convertir.

- Interopérabilité BIM

Autodesk Inventor est conçu pour s'intégrer facilement avec d'autres solutions Autodesk, permettant une collaboration fluide, une continuité des données et une réduction des erreurs de conversion. Les échanges se font via des formats natifs, des liaisons dynamiques ou des extensions dédiées.

- Définition du modèle

Ajoutez des informations sur la fabrication dans le modèle 3D pour les applications en aval.

- États du modèle

Création des états de fabrication, des niveaux de simplification, et plus encore, dans le même fichier pièce ou assemblage.

Revit

Autodesk Revit est un logiciel de modélisation des données du bâtiment (BIM – Building Information Modeling). Il permet aux professionnels de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction de concevoir, documenter, analyser et simuler des bâtiments et infrastructures dans un environnement paramétrique 3D intelligent (Autodesk, 2024) [14].

Les fonctions principales du BIM sont (Autodesk, 2024) [14] :

- Modélisation 3D paramétrique d'éléments architecturaux, structurels et MEP (CVC, plomberie, électricité).
- Documentation automatisée et synchronisée (plans, nomenclatures, annotations).
- Analyse des performances du bâtiment (énergie, structure, simulation).
- Environnement collaboratif grâce à un modèle central partagé en local ou dans le cloud.
- Interopérabilité avec d'autres outils Autodesk et formats IFC.

Dynamo

Dynamo est une application de programmation visuelle conçue pour automatiser des tâches, manipuler des données et générer de la géométrie dans des environnements BIM (Building Information Modeling) comme Autodesk Revit et Autodesk Civil 3D. Au lieu d'écrire du code,

l'utilisateur assemble des nœuds graphiques dans une interface visuelle pour créer des scripts dynamiques et paramétriques, facilitant ainsi l'automatisation des tâches répétitives ou complexes (Dynamo BIM, 2021) [29].

- Dynamo pour Autodesk Civil 3D

Depuis plusieurs versions, Dynamo est intégré à Civil 3D. Il permet d'automatiser des tâches comme la génération de profils en long, la modification de surfaces topographiques, ou l'ajustement de géométries selon des paramètres dynamiques (Autodesk, 2022) [5].

- Dynamo pour Autodesk Revit

Dynamo est largement utilisé avec Revit pour (Dynamo BIM, 2021) [29] :

- Créer des géométries paramétriques.
- Générer automatiquement des familles, des annotations, ou des nomenclatures.
- Interagir avec les données du modèle BIM (quantités, types d'objets, etc.).

Navisworks

Navisworks est un produit de révision de conception 3D.Utilisé principalement dans les secteurs de la construction pour compléter les modules de conception 3D (tels qu'Autodesk Revit, AutoCAD), Navisworks permet aux utilisateurs d'ouvrir et de combiner des modèles 3D, de les parcourir en temps réel et de réviser le modèle à l'aide d'un jeu d'outils, annotations, points de vue et mesures. Une sélection de plug-ins améliore le module en ajoutant la détection des interférences, la simulation 4D, le rendu photoréaliste et la publication au format PDF (Autodesk, 2023) [9].

Navisworks offre ainsi une série de fonctionnalités essentielles pour l'exploration et la révision collaborative des modèles 3D, comme en témoignent les éléments suivants (Autodesk, 2023) [10] :

- Facilite l'ouverture des fichiers NWD et DWF 3D.
- Permet de visualiser la hiérarchie des modèles, les propriétés des objets et les données de révision intégrées, notamment les points de vue, les animations, les annotations et les commentaires.
- Prend en charge l'affichage des matériaux et de l'éclairage en temps réel.

Robot Structural Analysis Professional

Robot Structural Analysis Professional est un logiciel d'analyse de charges structurelles qui vérifie la conformité aux normes. Il aide à créer des conceptions plus résilientes et constructibles, précises, coordonnées et connectées au BIM (Autodesk, 2024) [15].

Fonctionnalités de Robot Structural Analysis Professional (Autodesk, 2024) [15]:

- Workflows de BIM intégrés

Échange de données avec Revit et d'autres outils de conception.

- Capacités d'analyse étendues

Testez le comportement des structures statiques, modales et non linéaires.

- Maillage automatique par éléments finis

Création d'un maillage avancé par éléments finis de haute qualité pour des résultats d'analyse plus précis.

- Amélioration des normes de conception propres à chaque pays

Utilisation de formes de coupe et les codes de construction propres à chaque pays en unités impériales ou métriques pour permettre la vérification de code.

- Interface de programmation d'application (API) ouverte et flexible

Création des structures paramétriques personnalisées, extrayez directement les résultats et étendez les capacités d'analyse et de vérification du code.

Tableau 01 : **En-têtes obligatoires du fichier « Location Details.csv»**

En-tête de colonne	Description	Obligatoire	Exemple
Location ID	Location unique ID	Oui	SP61
Location Type	Type of activity at location	Oui	CP
Easting	Easting or longitude of the location of hole	Oui	504948.7888
Northing	Northing or latitude of the location	Oui	4071756.482
Ground Level	Ground level relative to datum of location or start of traverse	Oui	8.193
Final Depth	Final Depth	Non	28

Tableau 02 : En-têtes obligatoires du fichier « Field Geological Descriptions.csv »

En-tête de colonne	Description	Obligatoire	Exemple
Location ID	Location identifier	Oui	SP61
Depth Top	Depth to the TOP of stratum	Oui	1
Depth Base	Depth to the BASE of description	Oui	3.7
Legend Code	Legend code	Non	102
Geology Code 1	Geology code	Oui	Argile
Geology Code 2	Second geology code	Non	QA

Tableau 03 : Listing de la géométrie de l'axe en plan

Description	Km	X	Y
Initiale	38+930	504926.034	4071738.244
Finale	38+980	504975.917	4071735.807
Centre de la Courbe		504936,388	4071438,423
Rayon [m] : 300,000 Longueur [m] : 50 Courbe : Droit Corde [m] : 49.942			

Tableau 04 : Listing du profil en long

Description	PK	Niveau	Pente(%)
Initiale	38+930	-7.565	-2.524
Finale	38+980	-8.827	-2.524

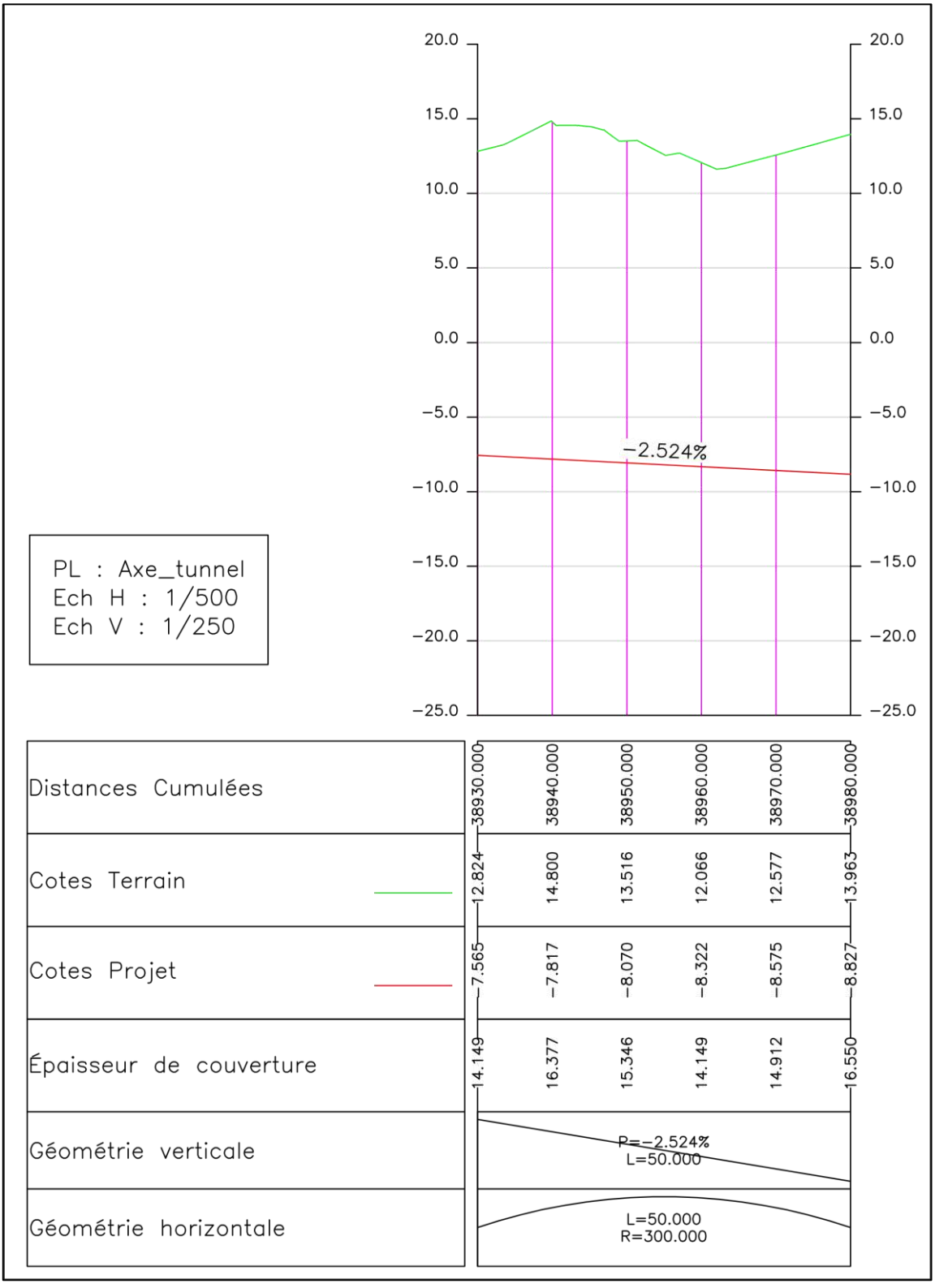
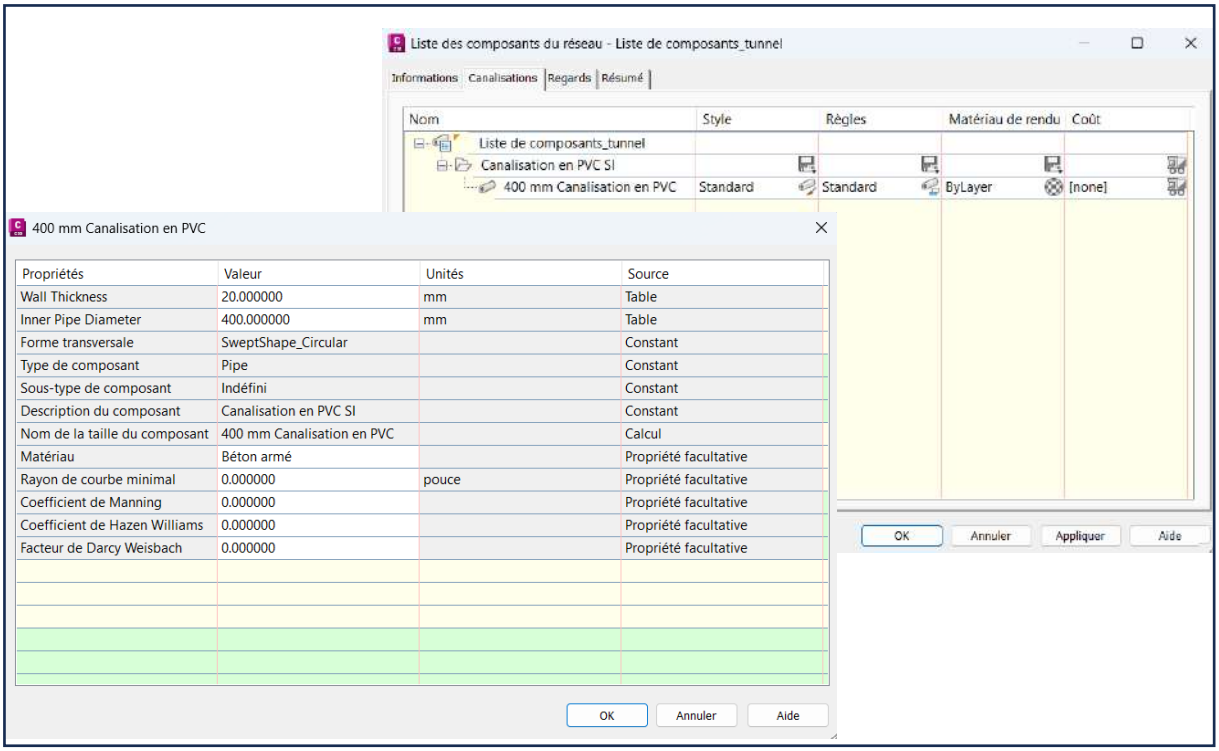


Figure 01 : Profil en long généré dans civil 3D. En rouge : axe du tunnel (pente -2.524%). En vert : relief naturel.

ANNEXE 5 : Élaboration de la maquette 3D



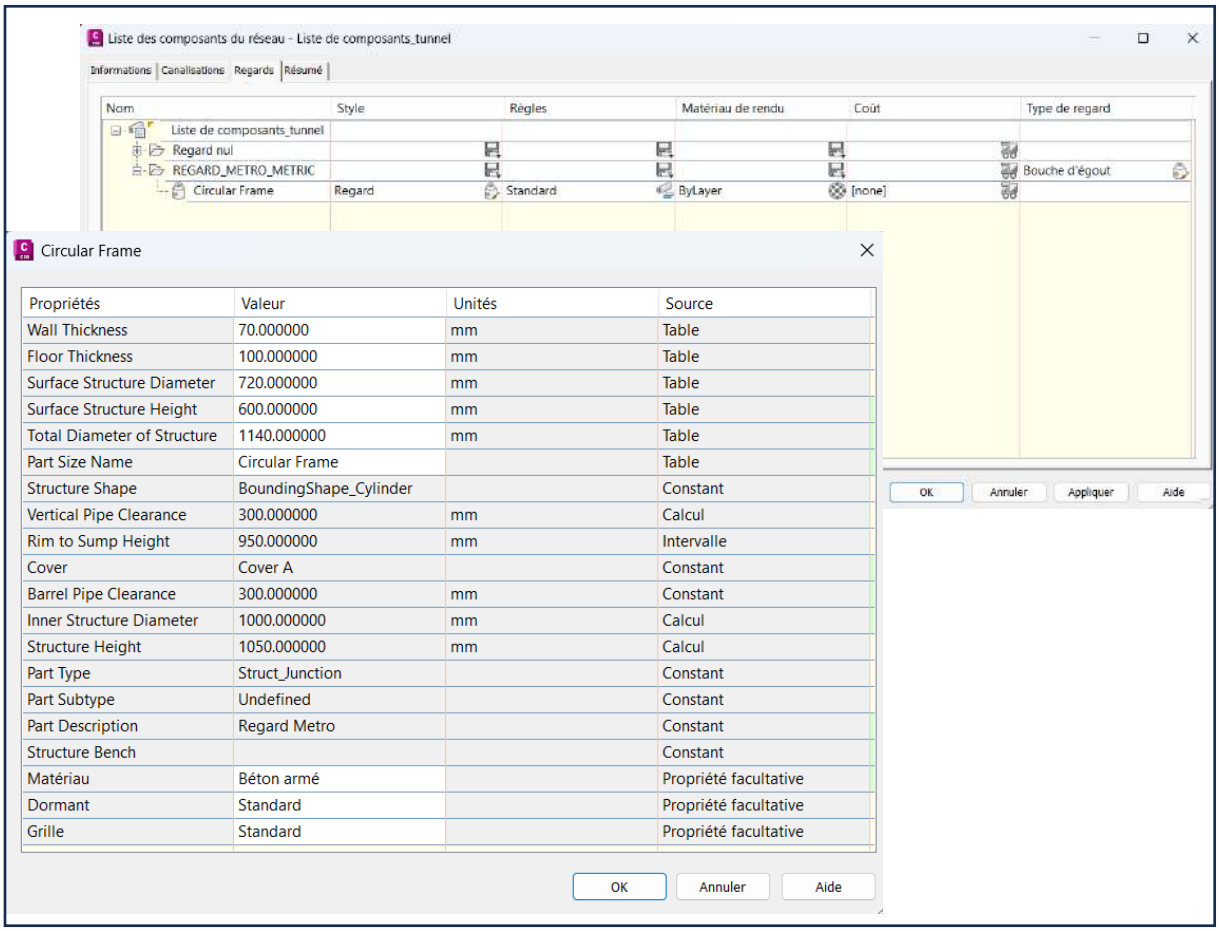


Figure 02 : Paramétrage des composants dans Civil 3D – Propriétés géométriques des tuyaux et regards.

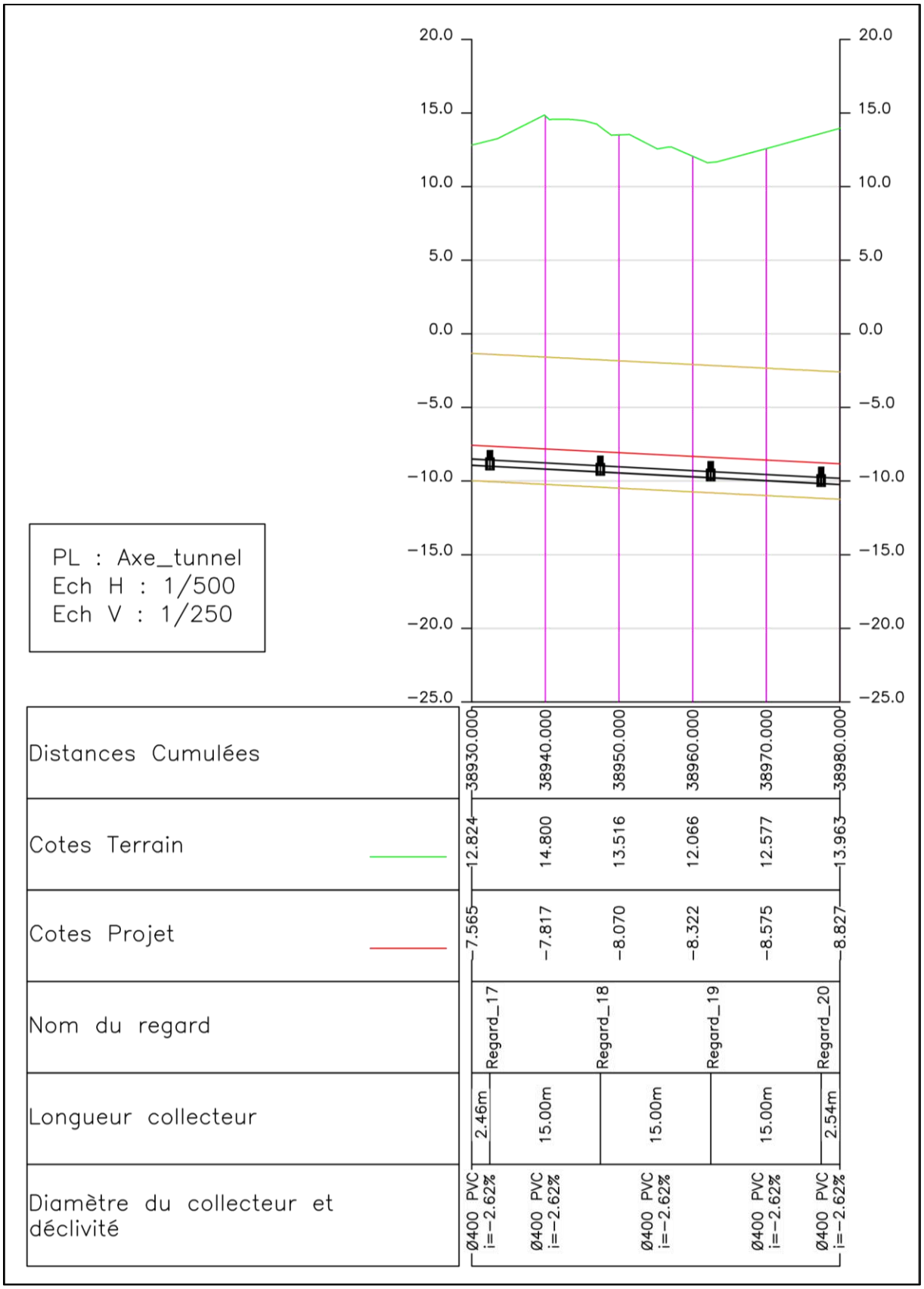
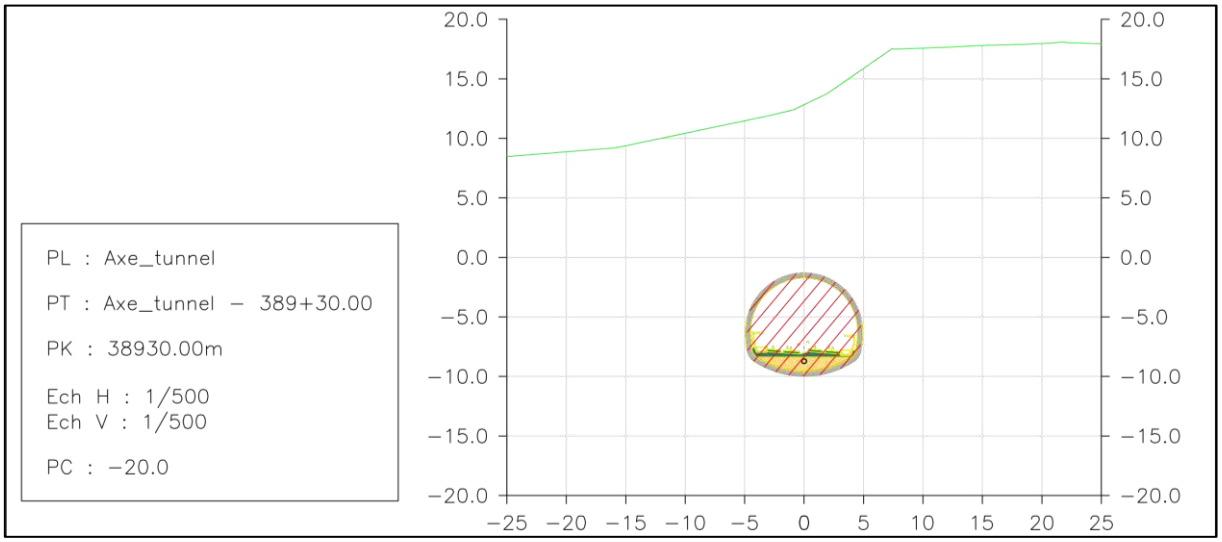
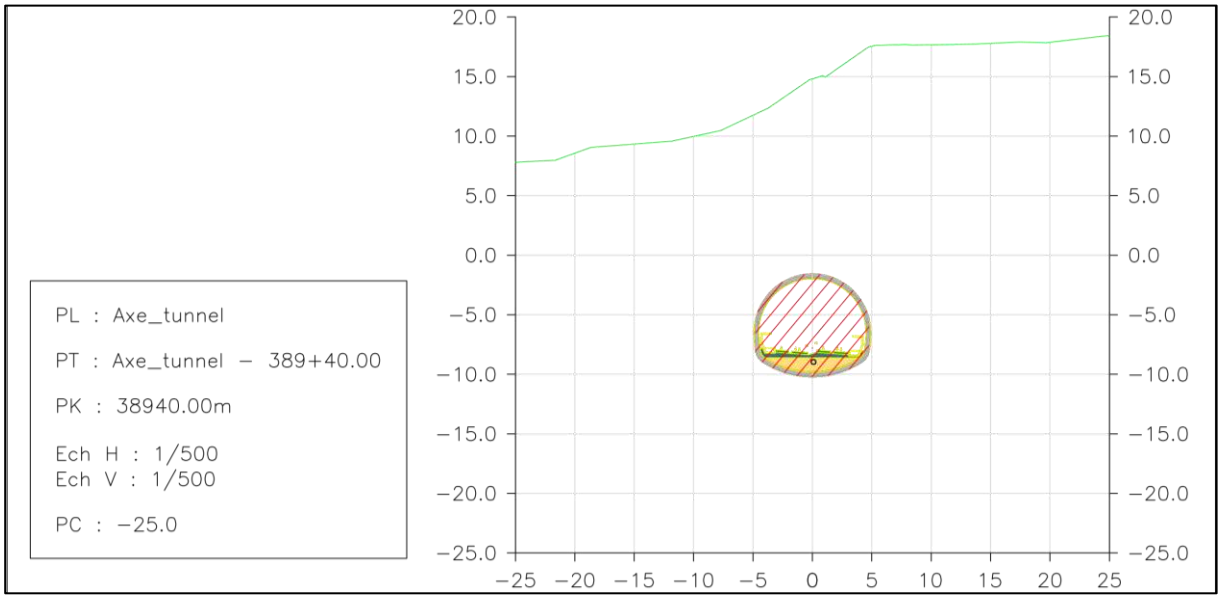
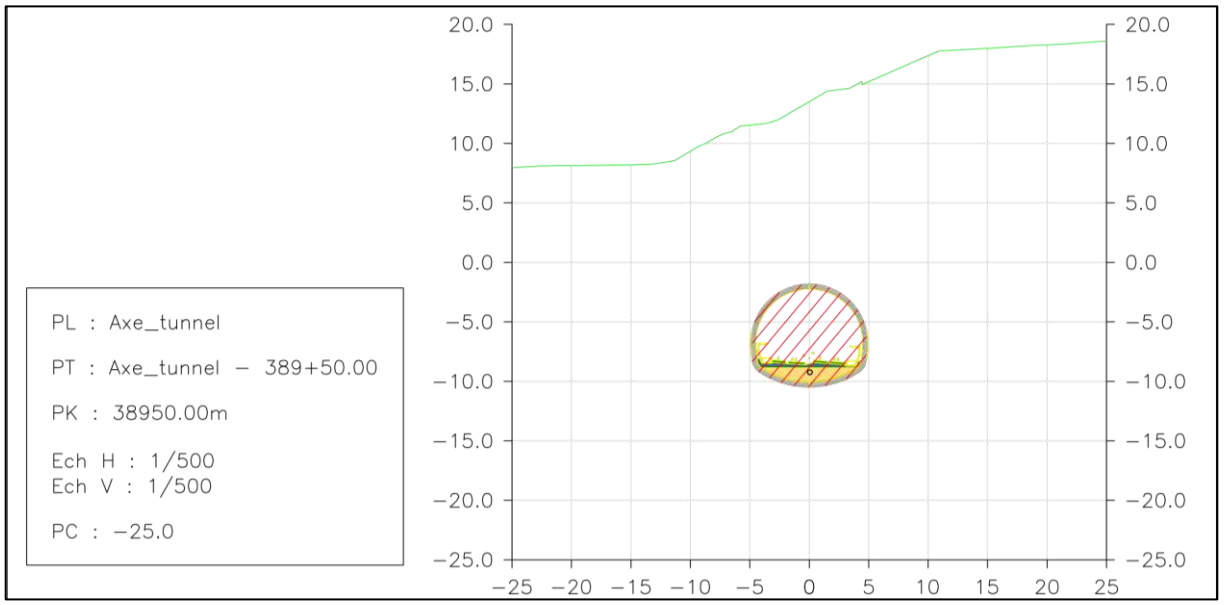


Figure 03 : Profil en long du tunnel – Intégration du réseau d'assainissement.

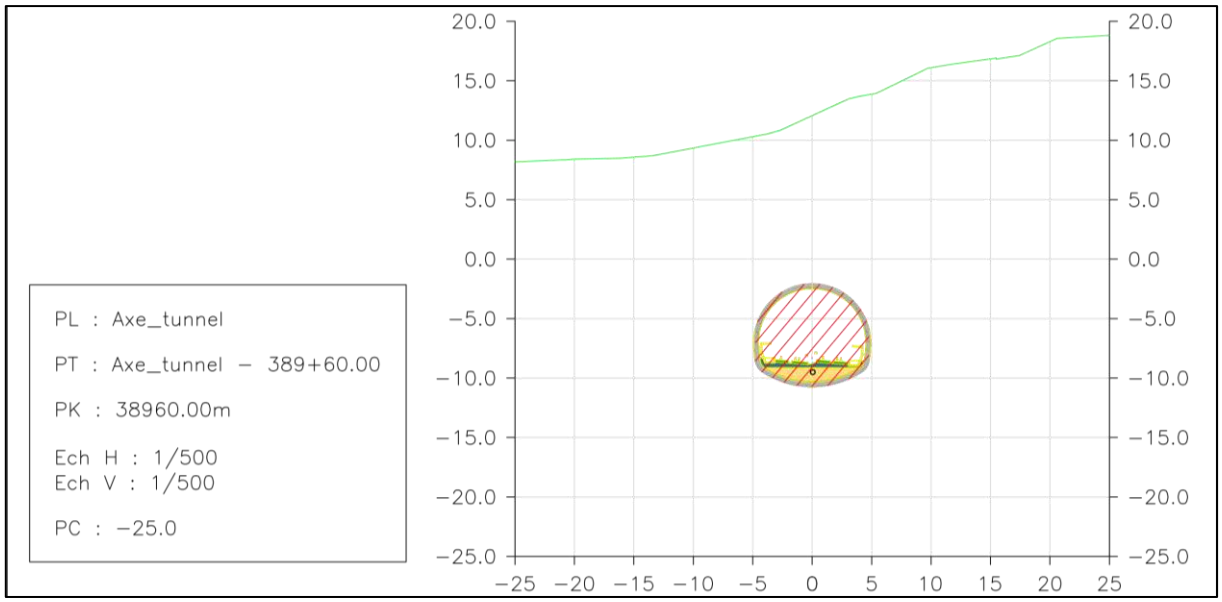
Les profils en travers

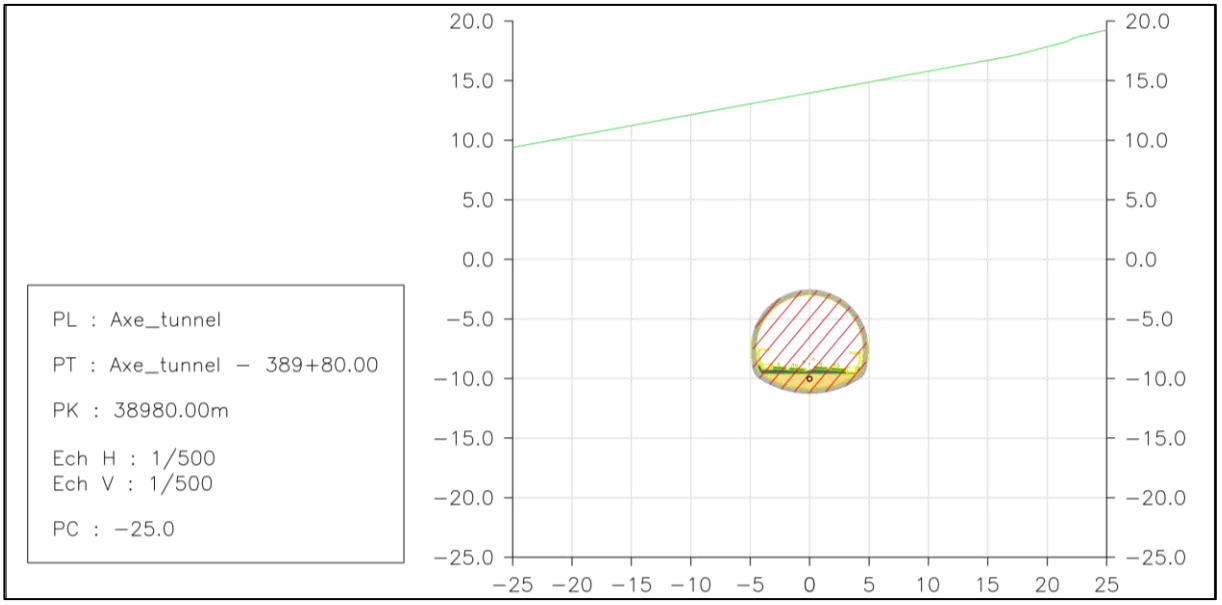


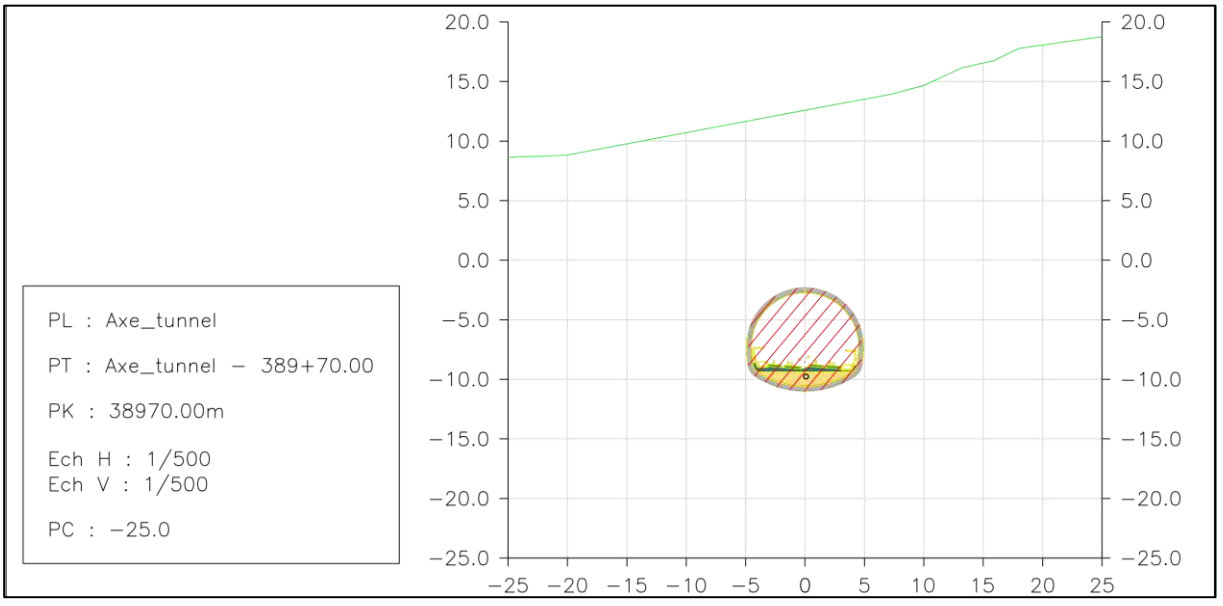




ANNEXE 5 : Élaboration de la maquette 3D







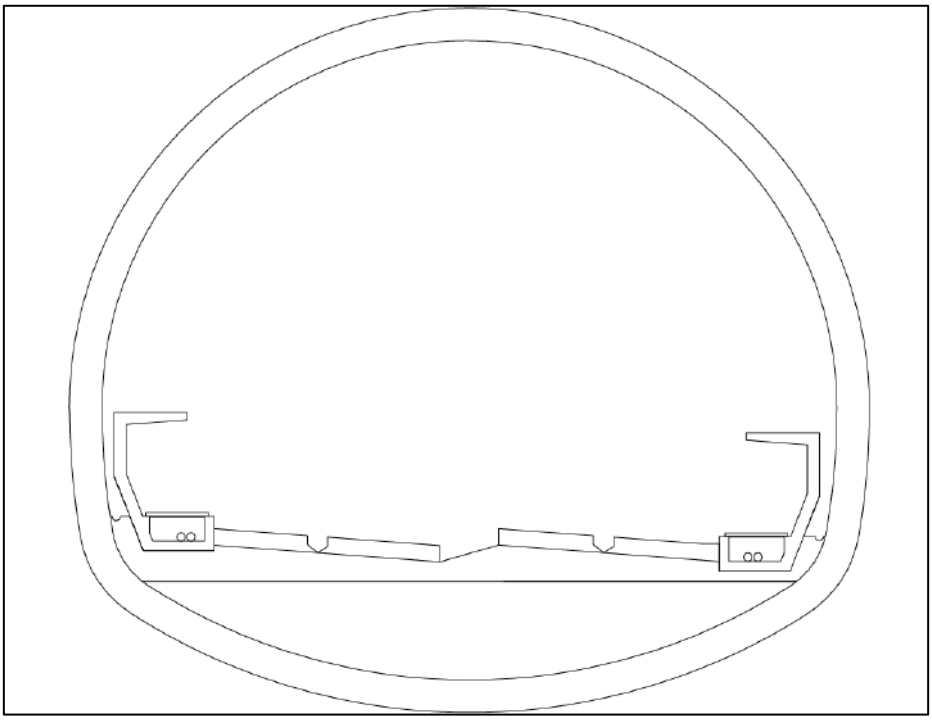


Figure 04 : Section de tunnel (Civil 3D).

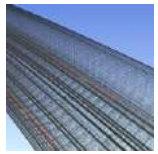
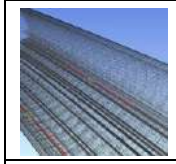
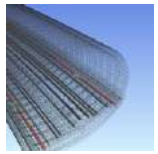
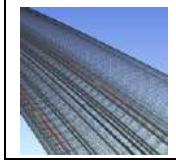
ANNEXE 6

Rapport de conflits

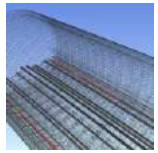
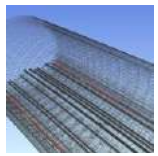
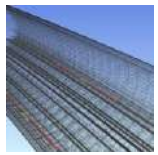
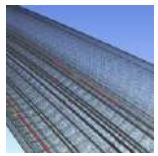
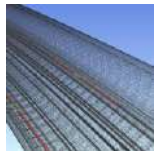
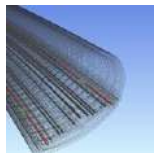
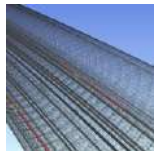
ANNEXE 6 : Rapport de conflits

AUTODESK®
NAVISWORKS®

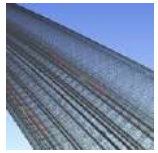
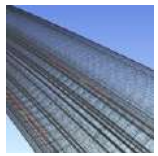
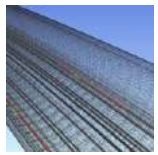
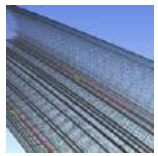
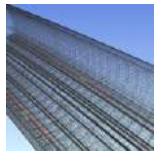
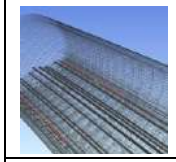
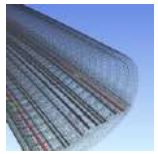
Analyse	Tolérance	Conflits	Nouveau	Actif	Vérifié	Approuvé	Résolu	Type	État
1	0.000m	20	20	0	0	0	0	Dur	OK

							Élément 1			Élément 2		
Image	Nom de conflit	Etat	Distance	Description	Date de recherche	Point de conflit	ID d'élément	Élément Nom	Élément Type	ID d'élément	Élément Nom	Élément Type
	Conflit1	Nouveau	-0.003	Dur	2025/5/23 19:24	x:504951.201, y:4071741.650, z:-8.445	*ID d'élément*: 224062	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223895	câble électrique	Solide
	Conflit2	Nouveau	-0.003	Dur	2025/5/23 19:24	x:504941.087, y:4071741.975, z:-8.196	*ID d'élément*: 224056	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223830	câble électrique	Solide
	Conflit3	Nouveau	-0.003	Dur	2025/5/23 19:24	x:504971.368, y:4071739.989, z:-8.953	*ID d'élément*: 224074	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 224010	câble électrique	Solide
	Conflit4	Nouveau	-0.002	Dur	2025/5/23 19:24	x:504961.299, y:4071740.988, z:-8.697	*ID d'élément*: 224068	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223955	câble électrique	Solide

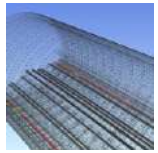
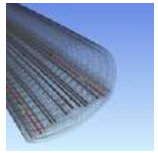
ANNEXE 6 : Rapport de conflits

	Conflit5	Nouveau	-0.002	Dur	2025/5/23 19:24	x:504930.968, y:4071741.963, z:-7.944	*ID d'élément*: 224050	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223770	câble électrique	Solide
	Conflit6	Nouveau	-0.002	Dur	2025/5/23 19:24	x:504930.968, y:4071741.963, z:-7.944	*ID d'élément*: 224050	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223775	câble électrique	Solide
	Conflit7	Nouveau	-0.002	Dur	2025/5/23 19:24	x:504941.087, y:4071741.975, z:-8.194	*ID d'élément*: 224056	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223835	câble électrique	Solide
	Conflit8	Nouveau	-0.002	Dur	2025/5/23 19:24	x:504951.201, y:4071741.650, z:-8.444	*ID d'élément*: 224062	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223890	câble électrique	Solide
	Conflit9	Nouveau	-0.002	Dur	2025/5/23 19:24	x:504961.299, y:4071740.988, z:-8.698	*ID d'élément*: 224068	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223950	câble électrique	Solide
	Conflit10	Nouveau	-0.002	Dur	2025/5/23 19:24	x:504971.369, y:4071739.991, z:-8.943	*ID d'élément*: 224074	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 224015	câble électrique	Solide
	Conflit11	Nouveau	-0.001	Dur	2025/5/23 19:24	x:504960.290, y:4071741.070, z:-8.675	*ID d'élément*: 224068	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223945	câble électrique	Solide

ANNEXE 6 : Rapport de conflits

	Conflit12	Nouveau	-0.001	Dur	2025/5/23 19:24	x:504962.307, y:4071740.904, z:-8.726	*ID d'élément*: 224068	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223960	câble électrique	Solide
	Conflit13	Nouveau	-0.001	Dur	2025/5/23 19:24	x:504952.212, y:4071741.600, z:-8.473	*ID d'élément*: 224062	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223900	câble électrique	Solide
	Conflit14	Nouveau	-0.001	Dur	2025/5/23 19:24	x:504950.190, y:4071741.699, z:-8.423	*ID d'élément*: 224062	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223885	câble électrique	Solide
	Conflit15	Nouveau	-0.001	Dur	2025/5/23 19:24	x:504940.002, y:4071741.992, z:-8.165	*ID d'élément*: 224056	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223825	câble électrique	Solide
	Conflit16	Nouveau	-0.001	Dur	2025/5/23 19:24	x:504942.099, y:4071741.959, z:-8.221	*ID d'élément*: 224056	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223840	câble électrique	Solide
	Conflit17	Nouveau	-0.001	Dur	2025/5/23 19:24	x:504931.980, y:4071741.981, z:-7.965	*ID d'élément*: 224050	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223780	câble électrique	Solide
	Conflit18	Nouveau	-0.001	Dur	2025/5/23 19:24	x:504970.364, y:4071740.106, z:-8.928	*ID d'élément*: 224074	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 224005	câble électrique	Solide

ANNEXE 6 : Rapport de conflits

	Conflit19	Nouveau	-0.001	Dur	2025/5/23 19:24	x:504929.956, y:4071741.945, z:-7.918	*ID d'élément*: 224050	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 223765	câble électrique	Solide
	Conflit20	Nouveau	-0.000968	Dur	2025/5/23 19:24	x:504972.422, y:4071739.867, z:-8.976	*ID d'élément*: 224074	colonne sèche	Solide	*ID d'élément*: 224020	câble électrique	Solide

ANNEXE 7

Modélisation et analyse structurelle.

Calcul des rigidités des cintres

Cintre	Ac (m²)	Ic (Ix) (m4)	Ec (MPa)	EcAc (MN)	EcIc (MN.m²)
HEB120	0.0034	8.6400E-06	210000	714	1.81E+00
HEB140	0.0043	1.5100E-05	210000	903	3.17E+00
HEB160	0.0054	2.4920E-04	210000	1140.3	5.23E+01
HEB180			210000	0	0.00E+00
HEB200	0.0078	5.6960E-04	210000	1640.1	1.20E+02
HEB220	0.0091	8.0900E-05	210000	1911	1.70E+01
HEB240			210000	0	0.00E+00

Calcul des rigidités du béton projeté

Epaisseur, h (m)	Ab (m²) A=hx1	Ib (m4) $I=\frac{1}{12}\,x\,b\,x\,h^3$	Eb(MPa)	EbAb (MN)	EbIb (MN.m²)
0.15	0.15	2.81E-04	10000	1500	2.81E+00
0.20	0.2	6.67E-04	10000	2000	6.67E+00
0.25	0.25	1.30E-03	10000	2500	1.30E+01
0.30	0.3	2.25E-03	10000	3000	2.25E+01
0.35	0.35	3.57E-03	10000	3500	3.57E+01
0.40	0.4	5.33E-03	10000	4000	5.33E+01
0.45	0.45	7.59E-03	10000	4500	7.59E+01

Calcul des paramètres selon Carlos Carranza-Torres

Soutènement		n	EbAb	EcAc	CA	EbIb	EcIc	CI	heq (m)	Eeq (MPa)	Aeq (m²)	Ieq (m4)
Cintre	Epaisseur BP				$C_A = n(A_1E_1 + A_2E_2)$			$C_I = n(I_1E_1 + I_2E_2)$	$h_{eq} = 2\frac{\sqrt{3C_AC_I}}{C_A}$	$E_{eq} = \frac{\sqrt{3}}{6}\frac{C_A^2}{\sqrt{C_AC_I}}$	$A_{eq} = h_{eq} \times 1.0\,m$	$I_{eq} = \frac{h_{eq}^3}{12} \times 1.0\,m$
			2500.00	1911.00		1.30E+01	1.70E+01		0.24	15437.7	0.24	1.92E-03
140.00	0.25	1	2500.00	903.00	3573.15	1.30E+01	3.17E+00	17.00	0.24	14953.53	0.24	1.14E-03

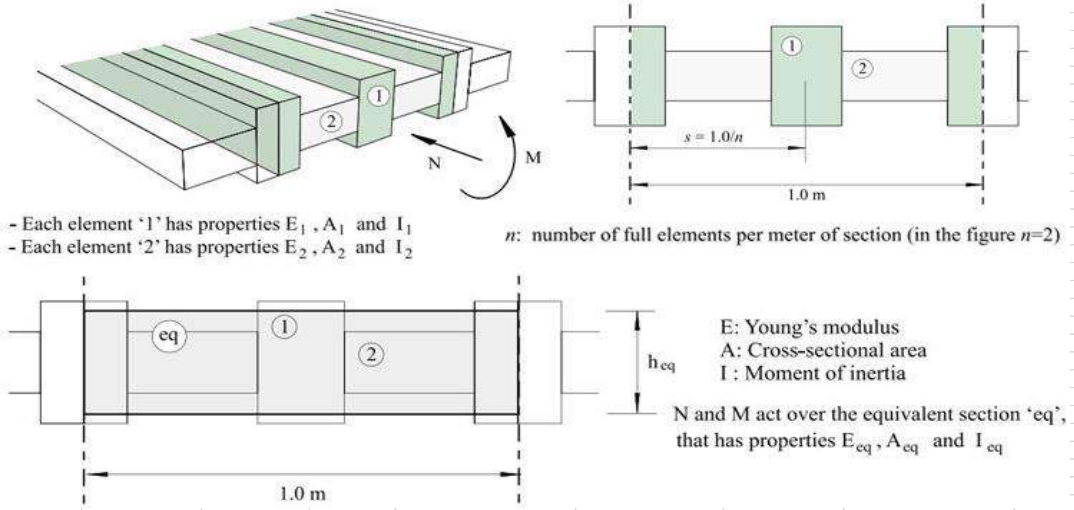
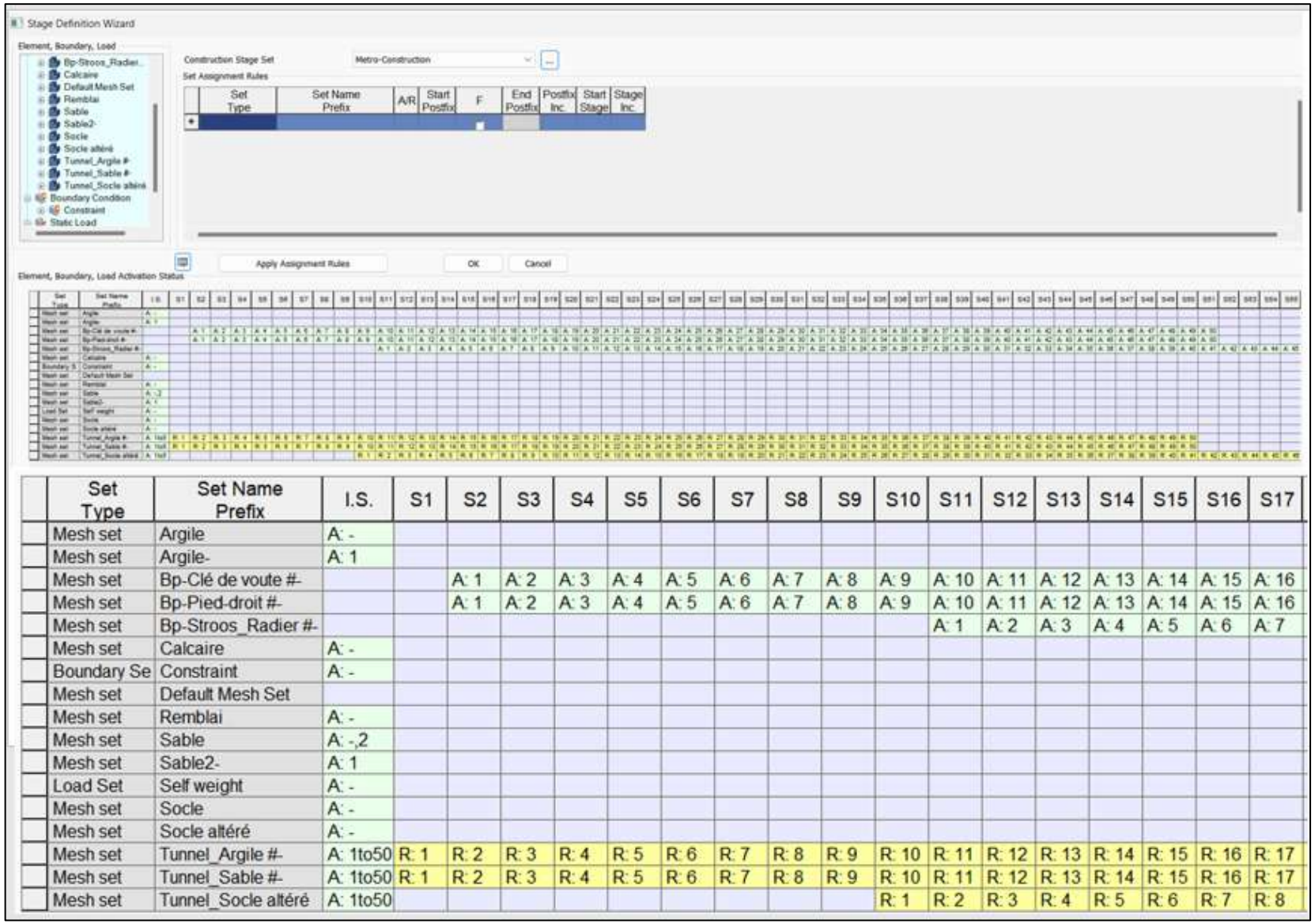


Figure 01 : Calcul des paramètres équivalents du soutènement provisoire.



Set Type	Set Name Prefix	I.S.	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
Mesh set	Argile	A: -																	
Mesh set	Argile-	A: 1																	
Mesh set	Bp-Clé de voute #-			A: 1	A: 2	A: 3	A: 4	A: 5	A: 6	A: 7	A: 8	A: 9	A: 10	A: 11	A: 12	A: 13	A: 14	A: 15	A: 16
Mesh set	Bp-Pied-droit #-			A: 1	A: 2	A: 3	A: 4	A: 5	A: 6	A: 7	A: 8	A: 9	A: 10	A: 11	A: 12	A: 13	A: 14	A: 15	A: 16
Mesh set	Bp-Stroos_Radier #-												A: 1	A: 2	A: 3	A: 4	A: 5	A: 6	A: 7
Mesh set	Calcaire	A: -																	
Boundary Se	Constraint	A: -																	
Mesh set	Default Mesh Set																		
Mesh set	Remblai	A: -																	
Mesh set	Sable	A: -,2																	
Mesh set	Sable2-	A: 1																	
Load Set	Self weight	A: -																	
Mesh set	Socle	A: -																	
Mesh set	Socle altéré	A: -																	
Mesh set	Tunnel_Argile #-	A: 1to50	R: 1	R: 2	R: 3	R: 4	R: 5	R: 6	R: 7	R: 8	R: 9	R: 10	R: 11	R: 12	R: 13	R: 14	R: 15	R: 16	R: 17
Mesh set	Tunnel_Sable #-	A: 1to50	R: 1	R: 2	R: 3	R: 4	R: 5	R: 6	R: 7	R: 8	R: 9	R: 10	R: 11	R: 12	R: 13	R: 14	R: 15	R: 16	R: 17
Mesh set	Tunnel_Socle altéré	A: 1to50										R: 1	R: 2	R: 3	R: 4	R: 5	R: 6	R: 7	R: 8

Figure 02 : Phasage d'exécution de la modélisation.

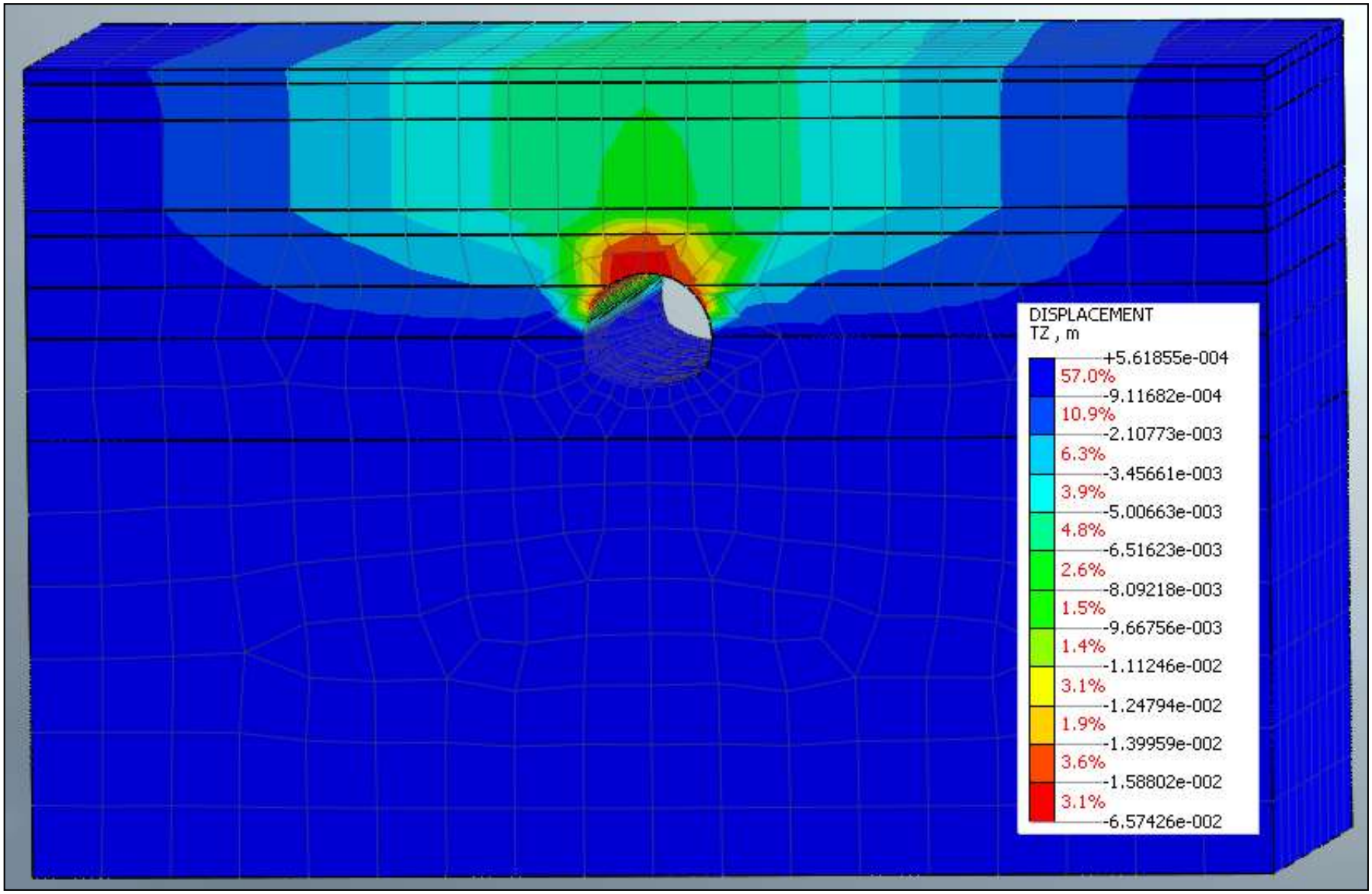


Figure 03 : Déplacement vertical au niveau du tunnel.

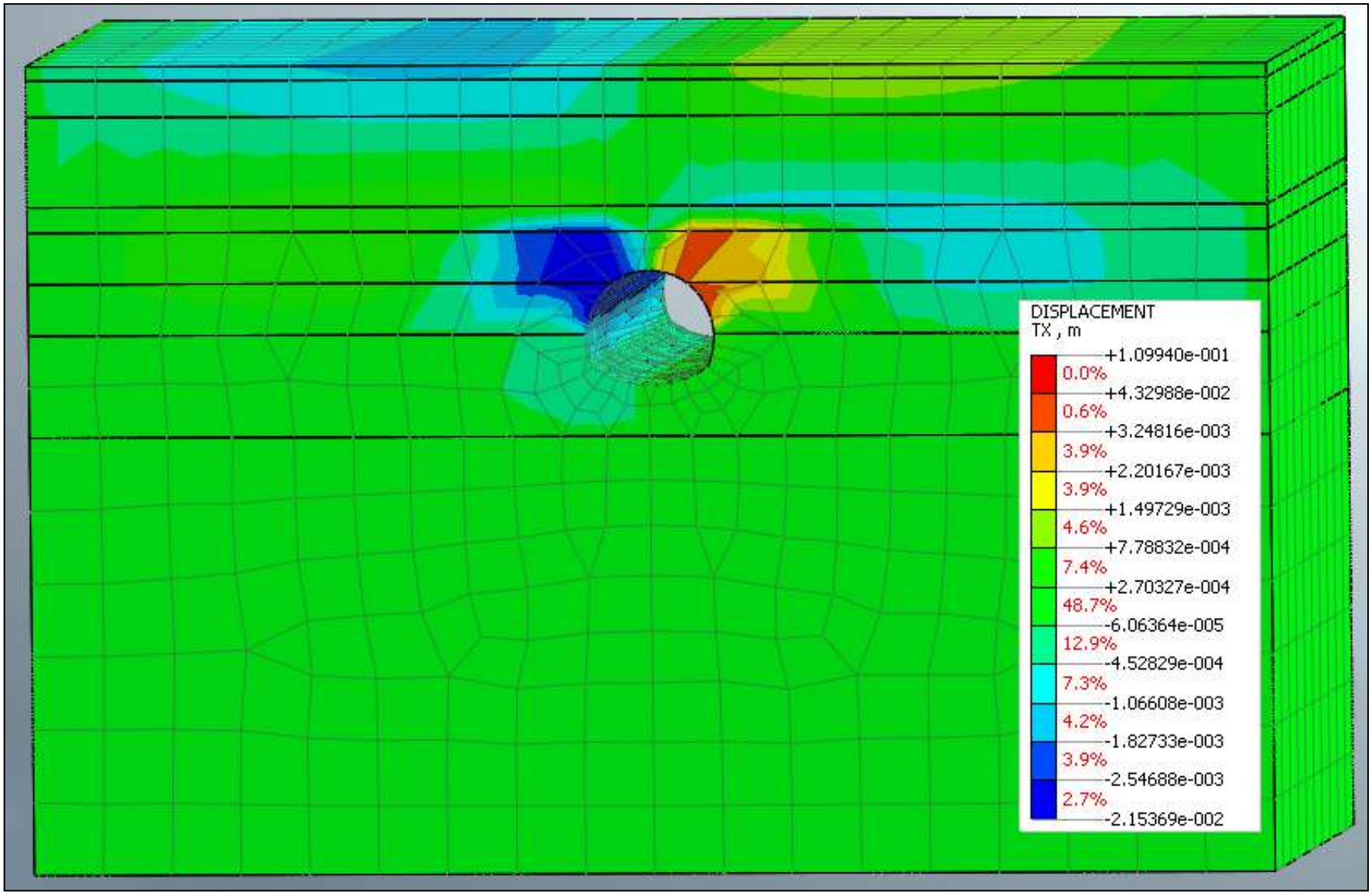


Figure 04 : Déplacement horizental au niveau du tunnel.

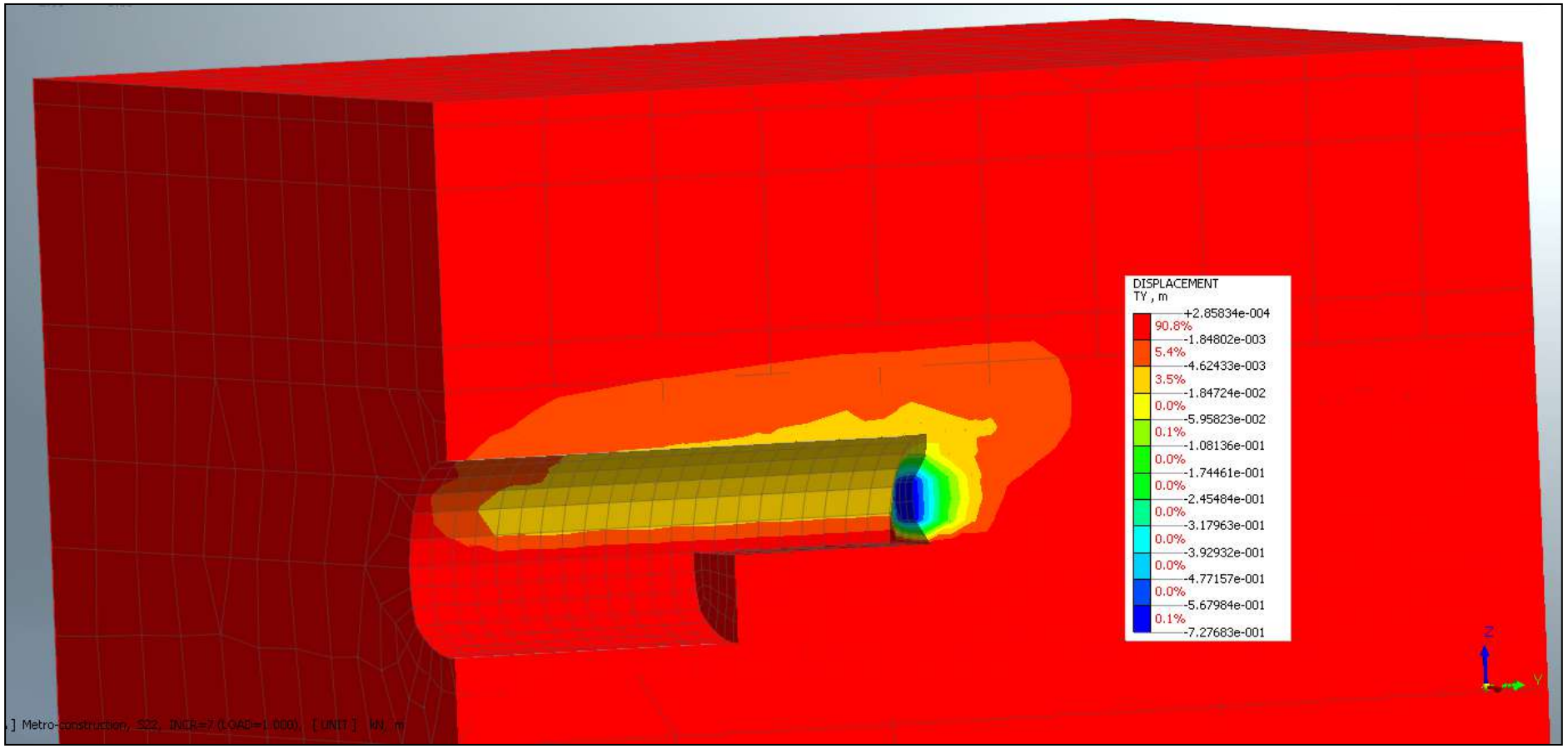


Figure 05 : Déplacement au niveau du front d'attaque.

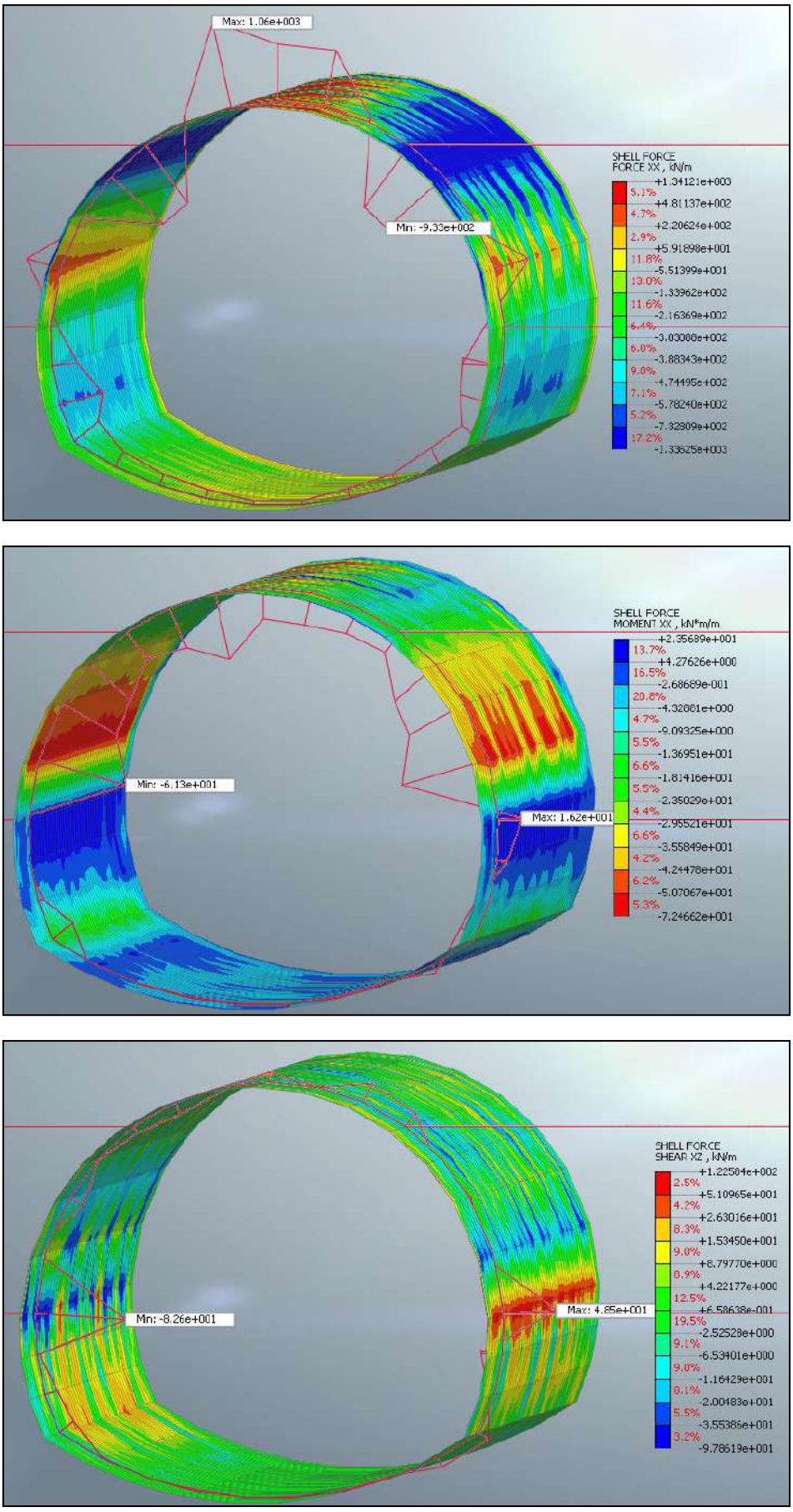


Figure 06 : Résultats des efforts internes au niveau du soutènement provisoire.

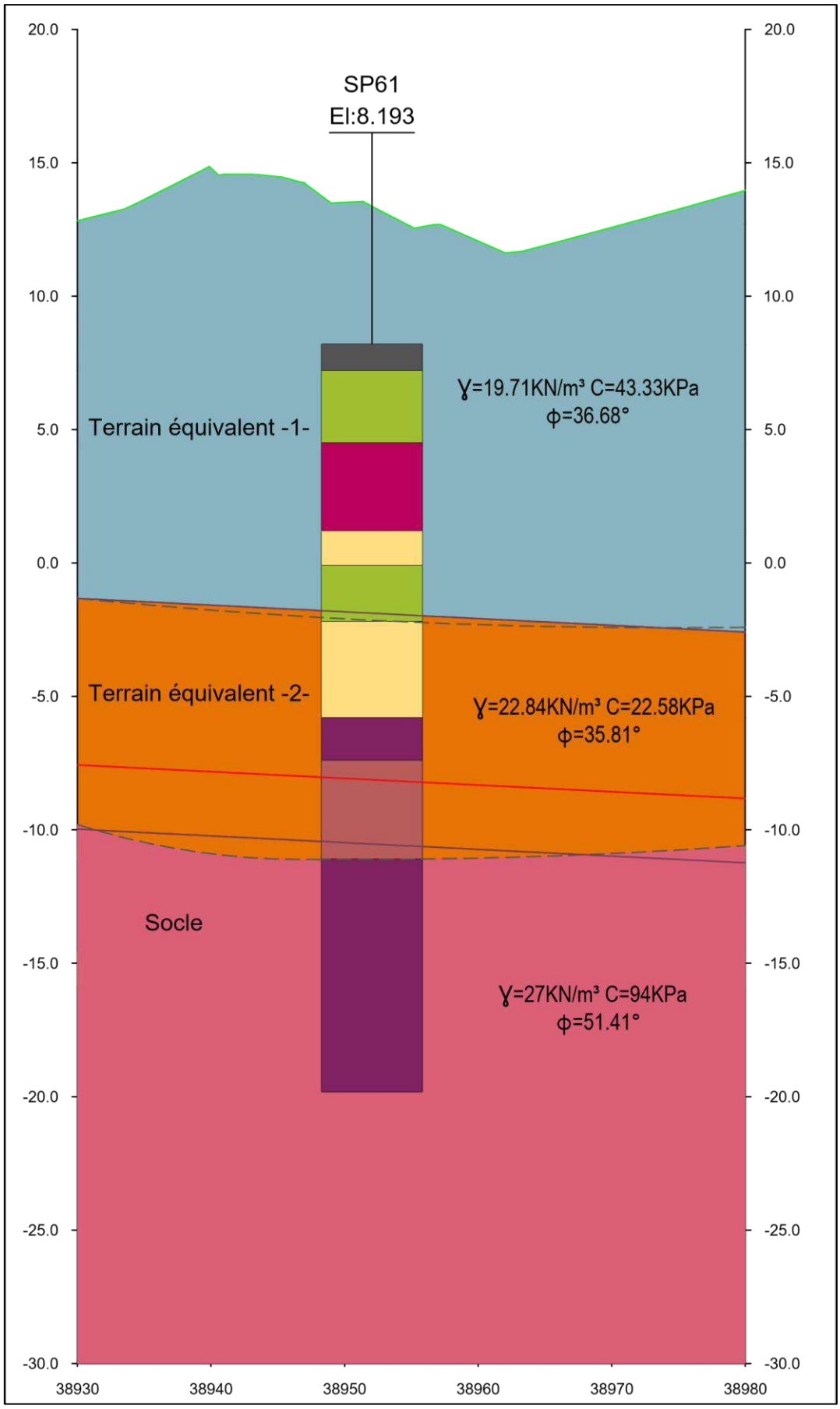


Figure 07 : Profil géotechnique équivalent.

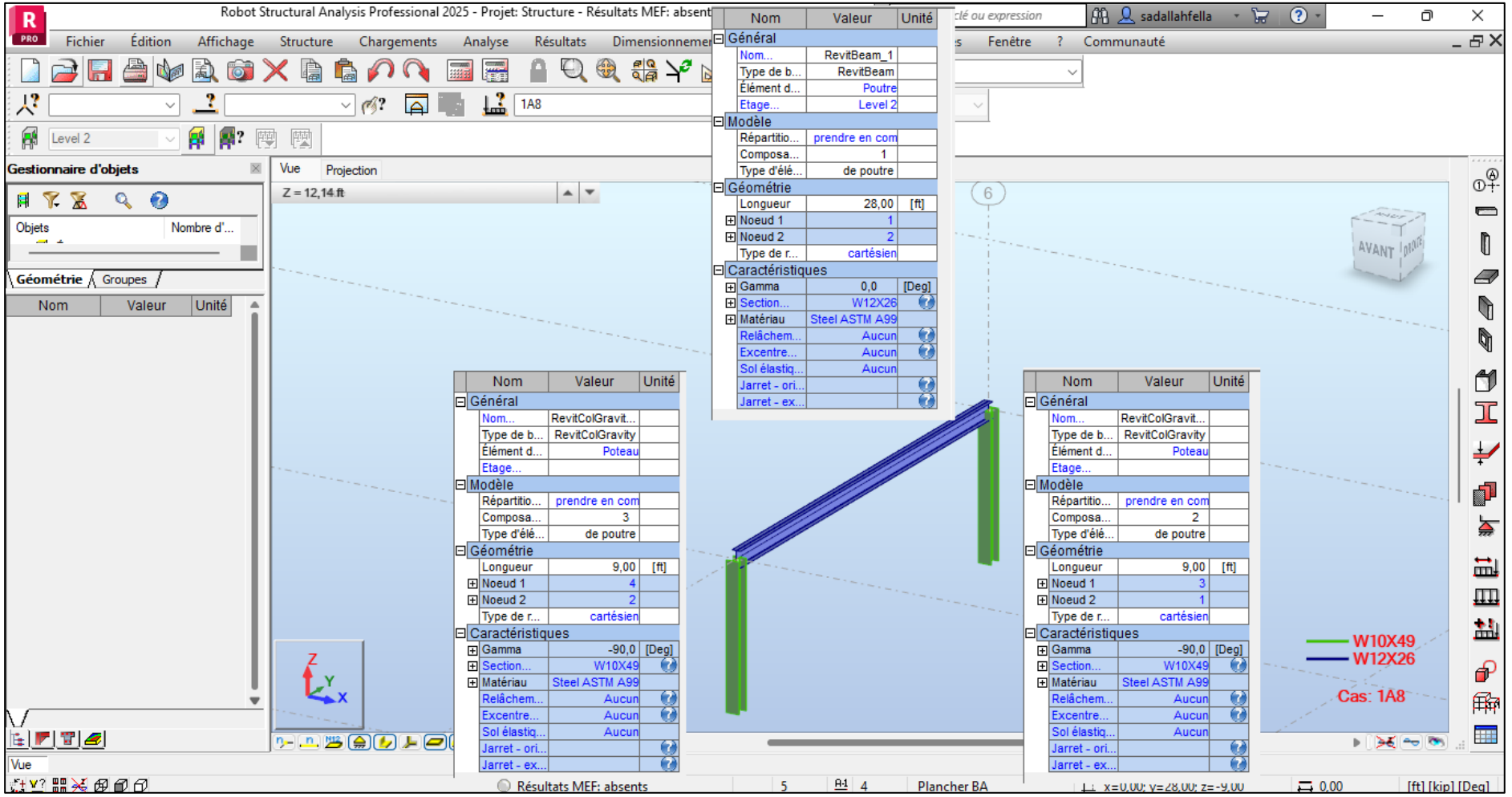


Figure 08 : Modèle du protique importé depuis Revit à Robot Structural Analysis Professional.

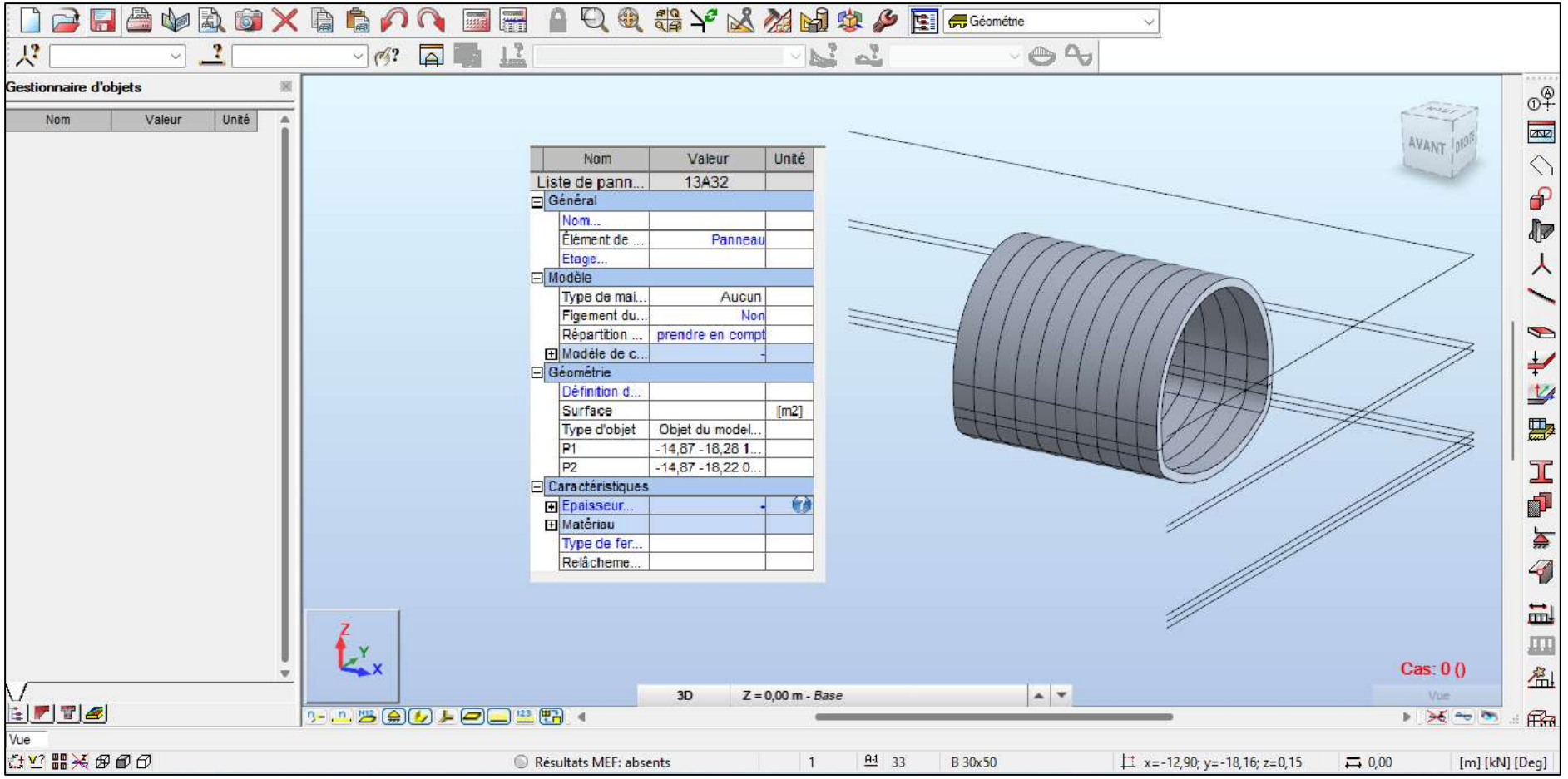


Figure 09 : Modèle du tunnel importé depuis Revit à Robot Structural Analysis Professional format .SAT.

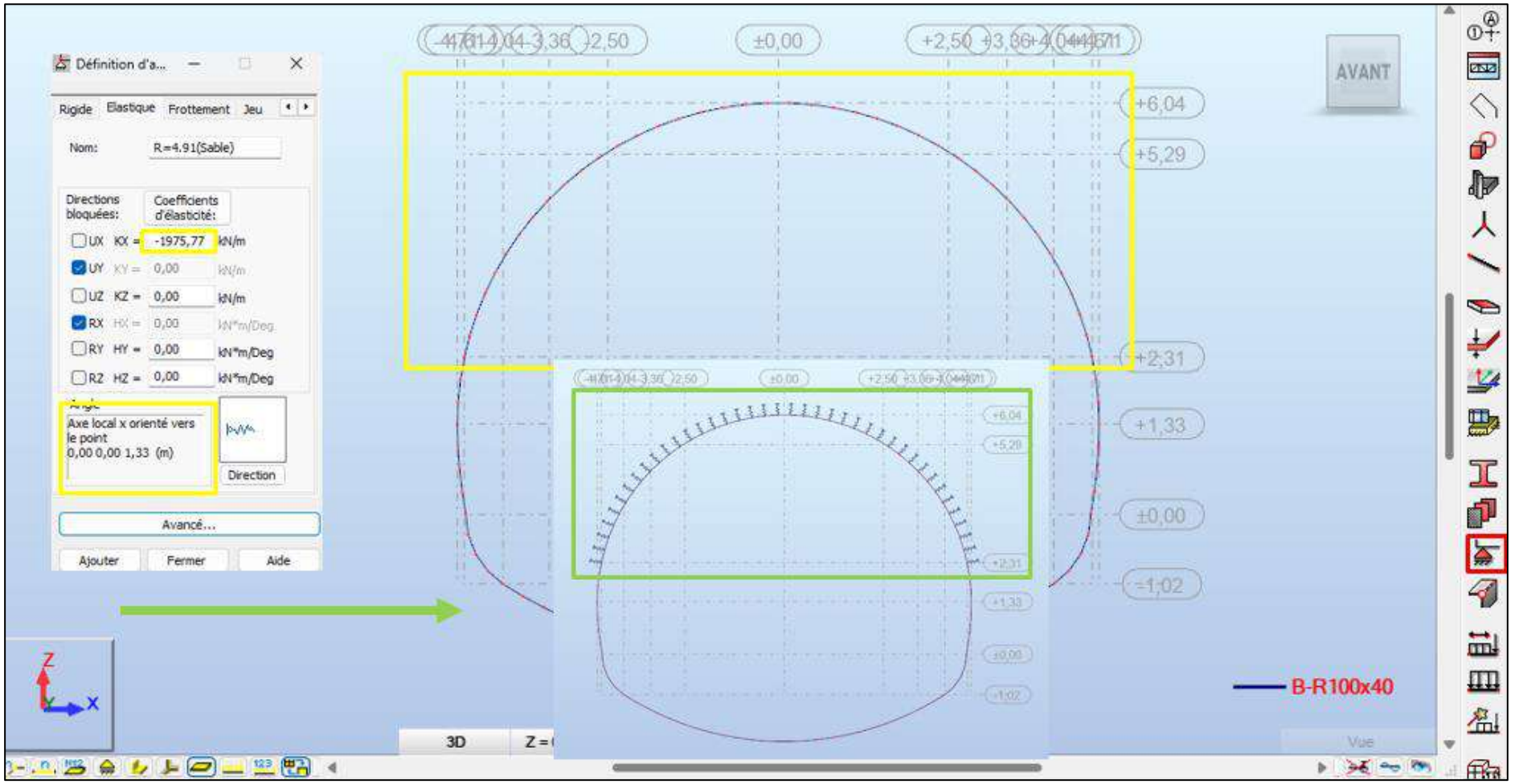


Figure 10 : Application de la raideur radiale de l'élément A - cas du sable.

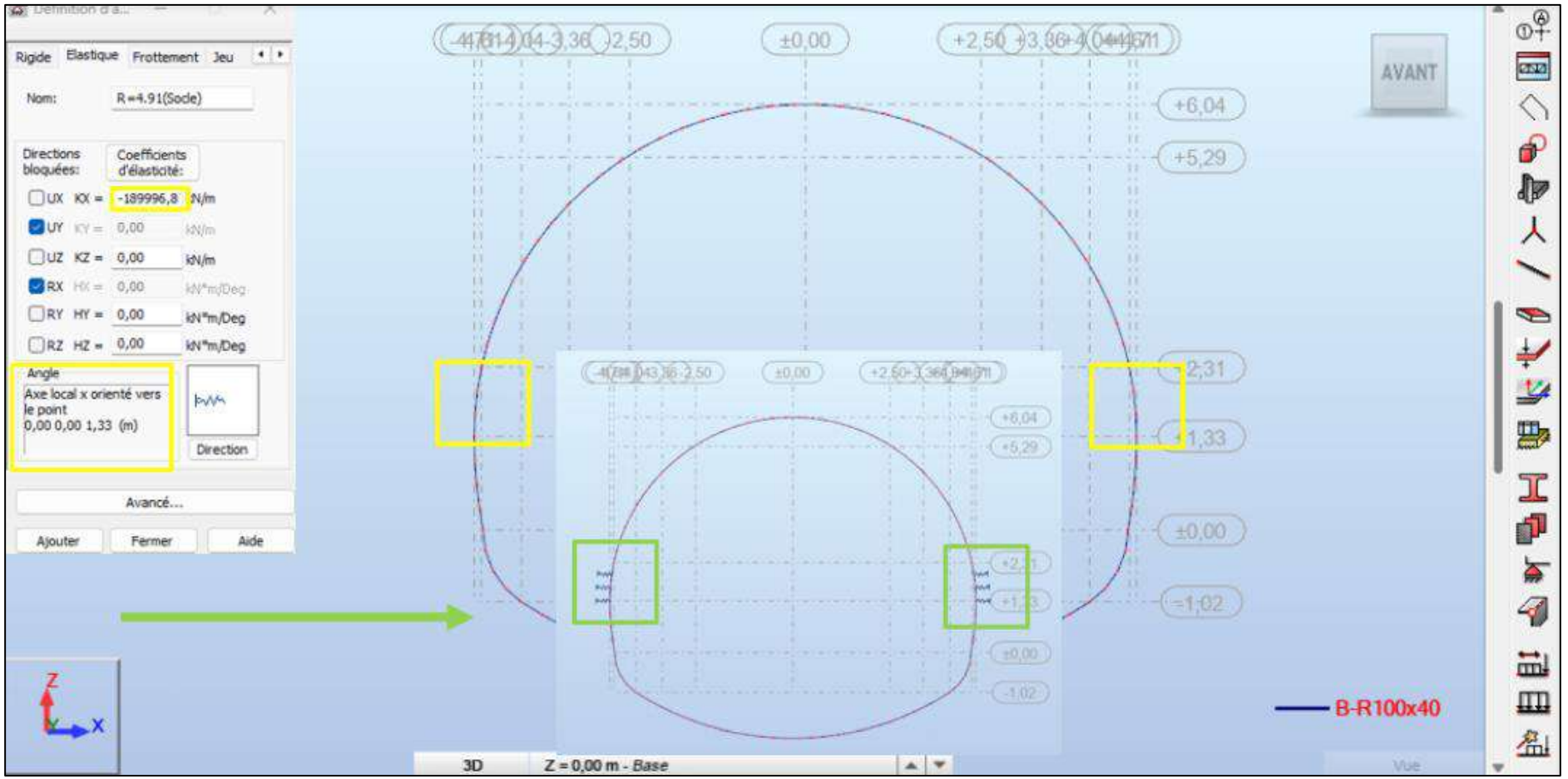


Figure 11 : Application de la raideur radiale de l'élément A - cas du socle altéré.

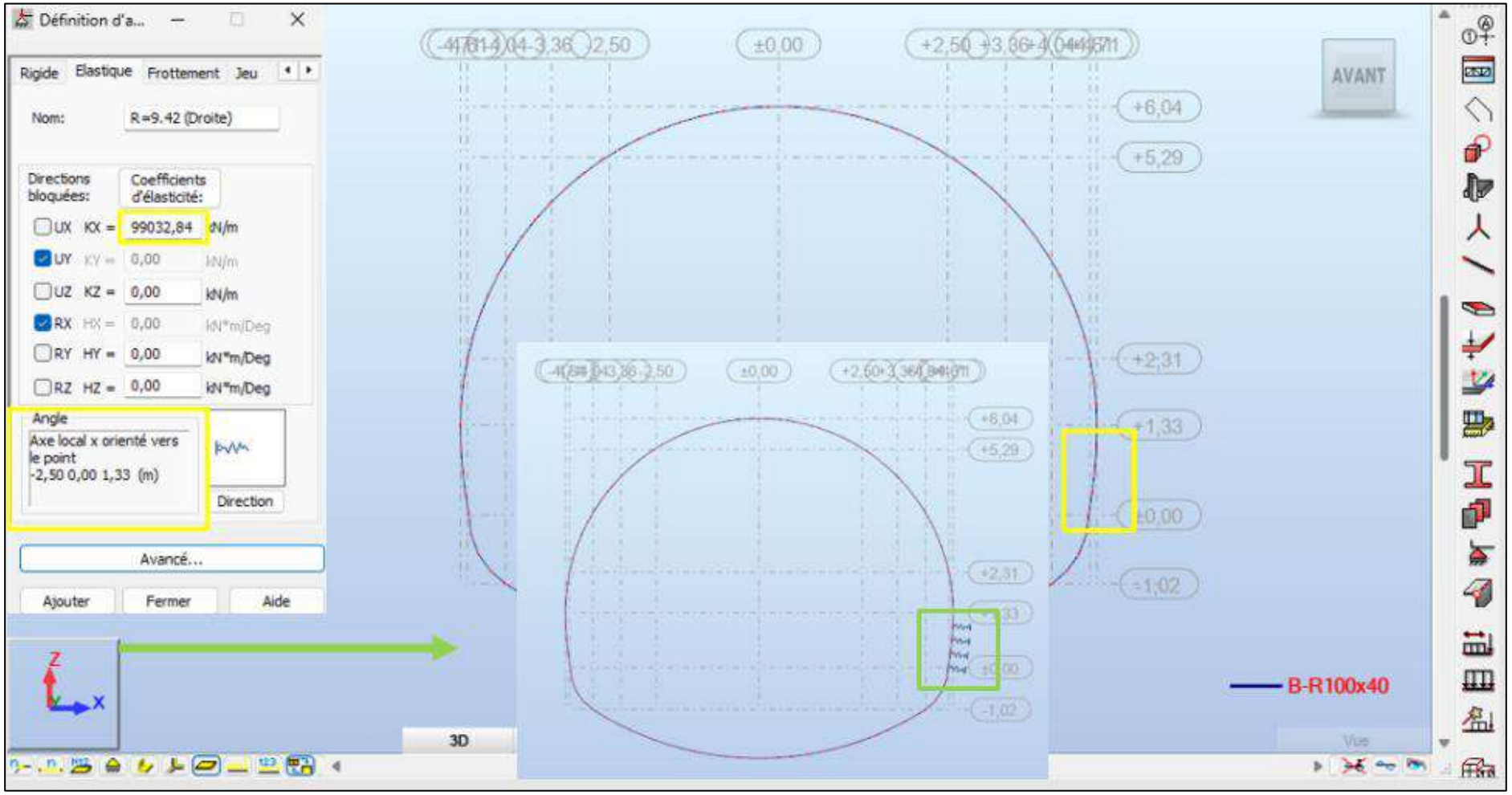


Figure 12 : Application de la raideur radiale de l'élément B -coté droit.

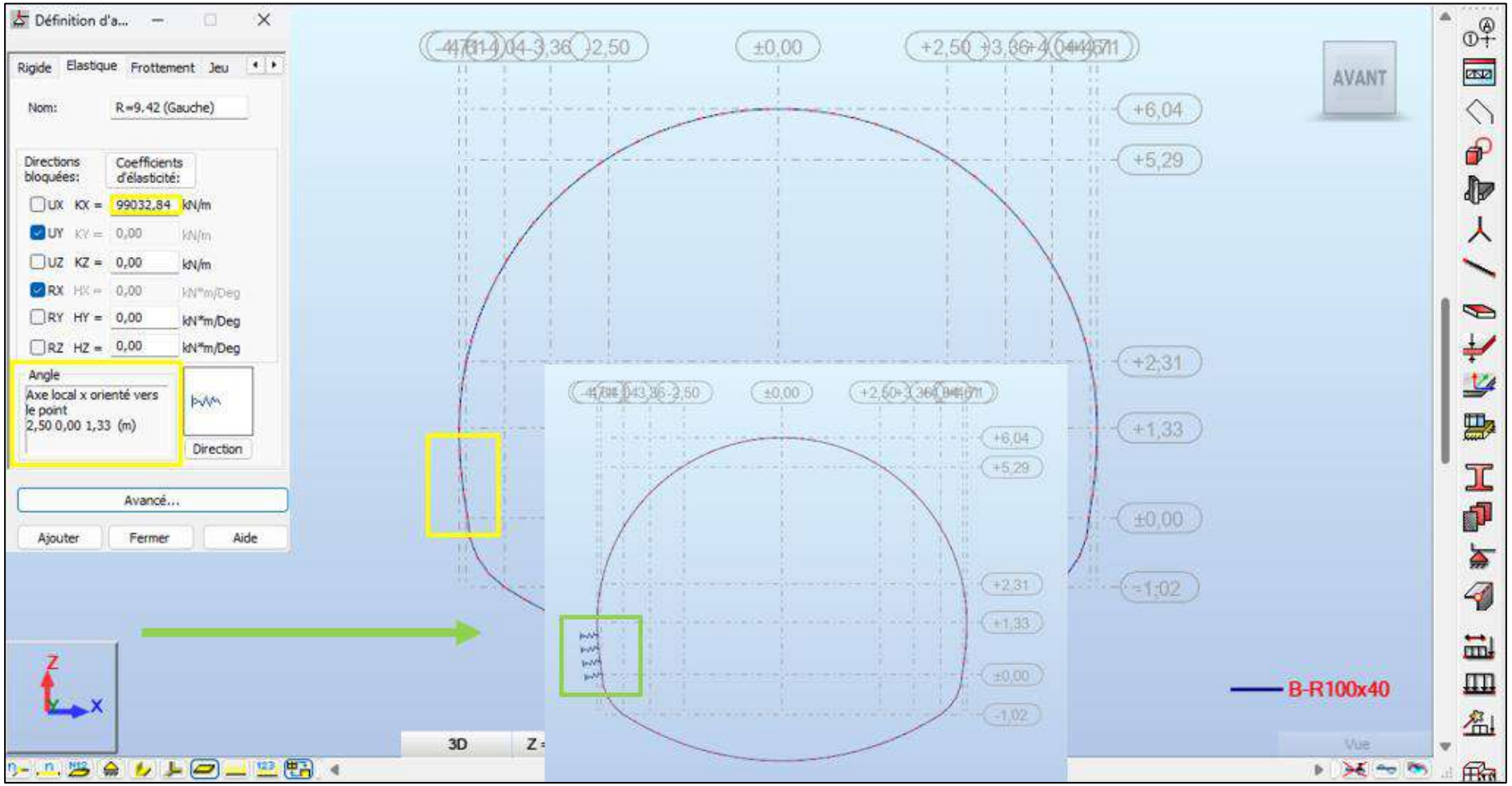


Figure 13 : Application de la raideur radiale de l'élément B -coté gauche.

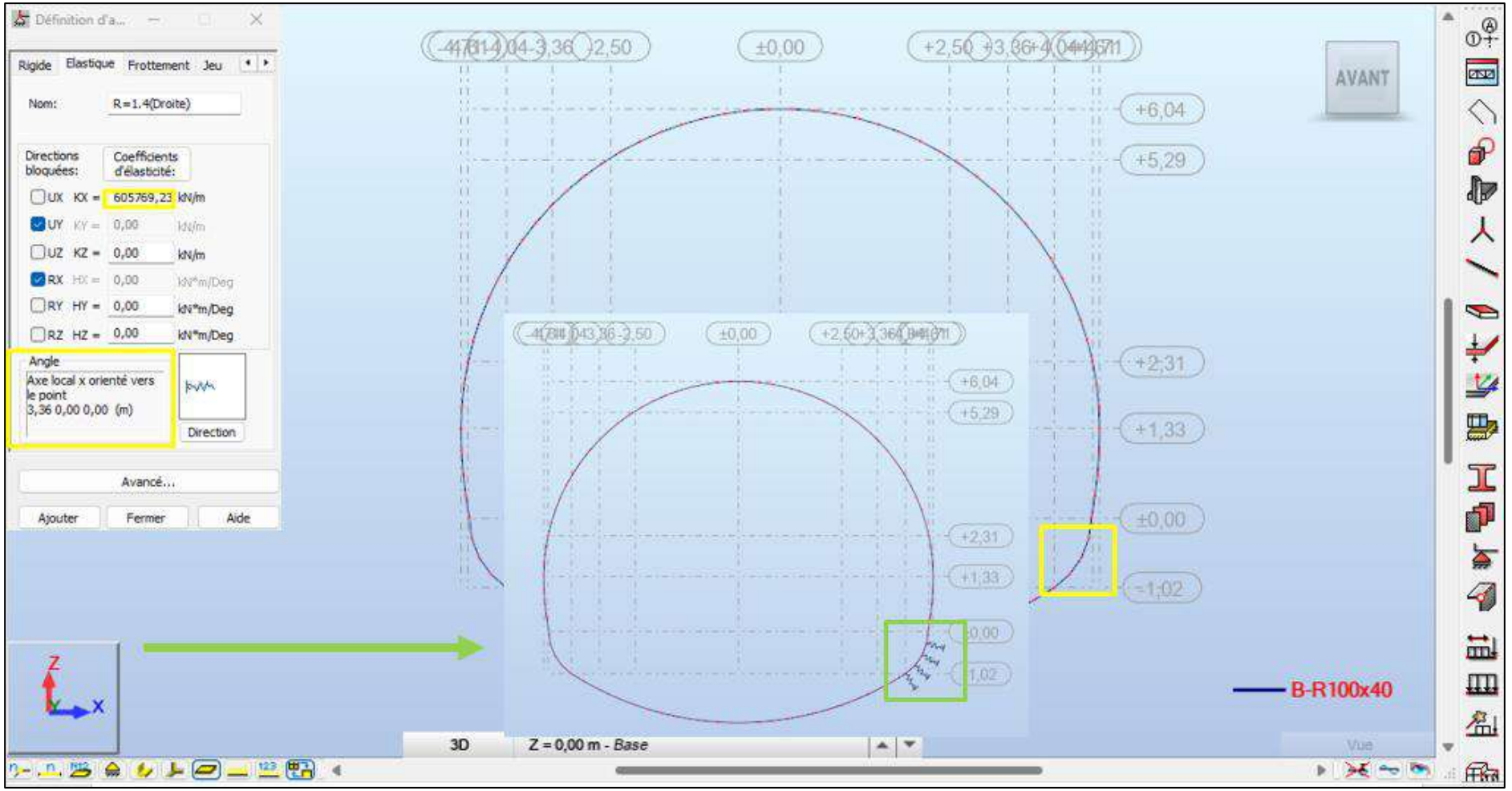


Figure 14 : Application de la raideur radiale de l'élément C -coté droit.

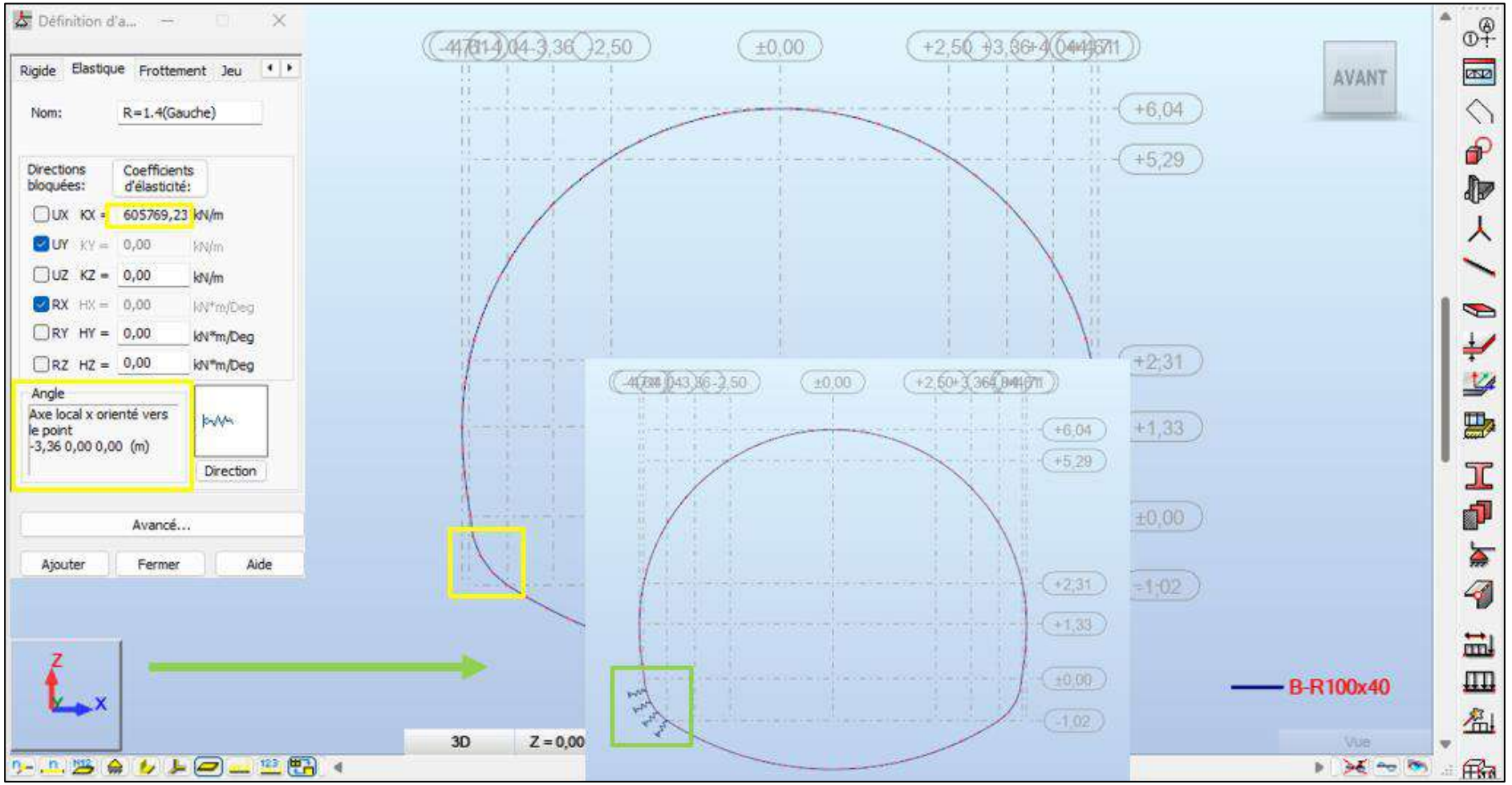


Figure 15 : Application de la raideur radiale de l'élément C -coté gauche.

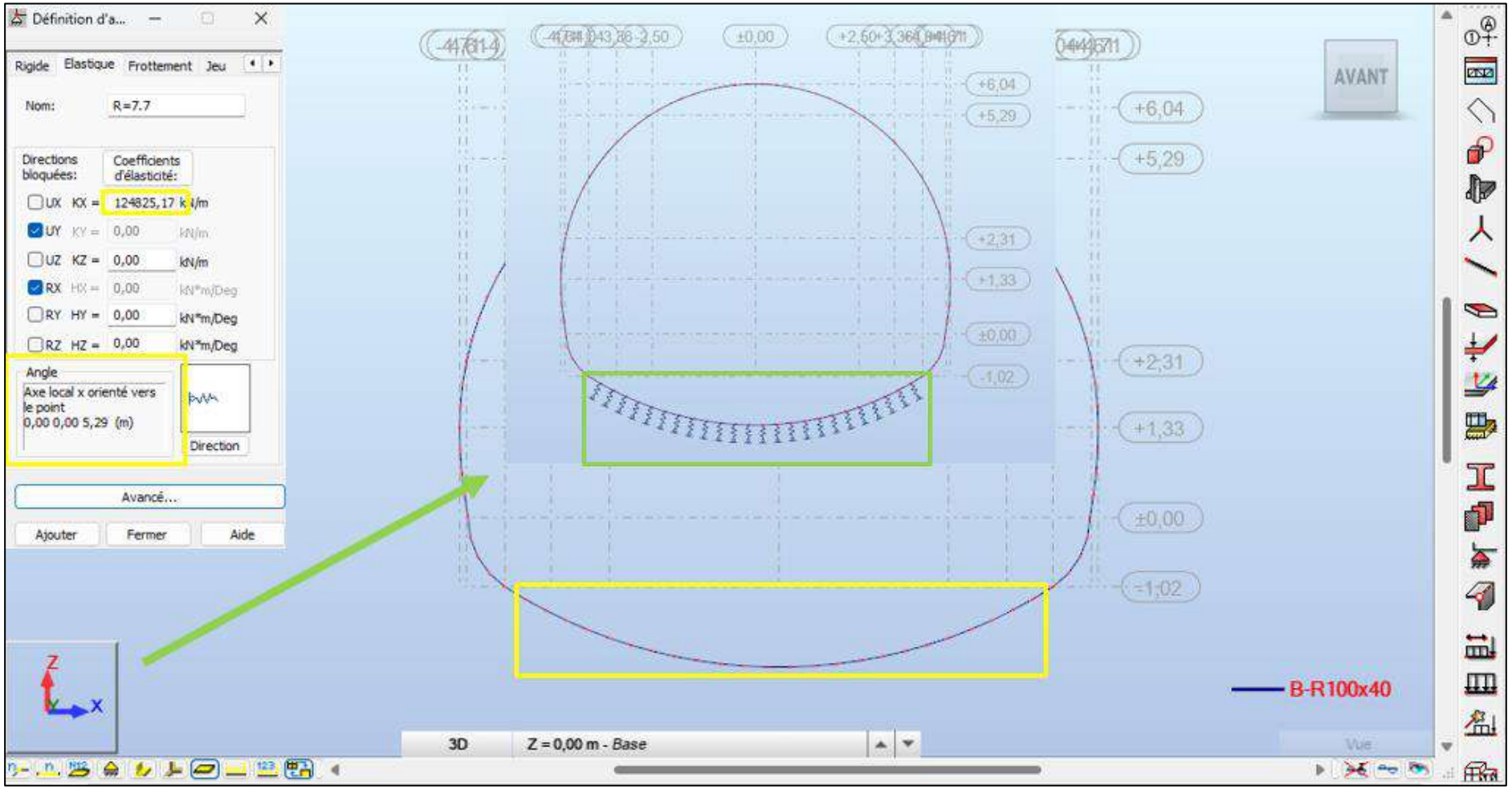
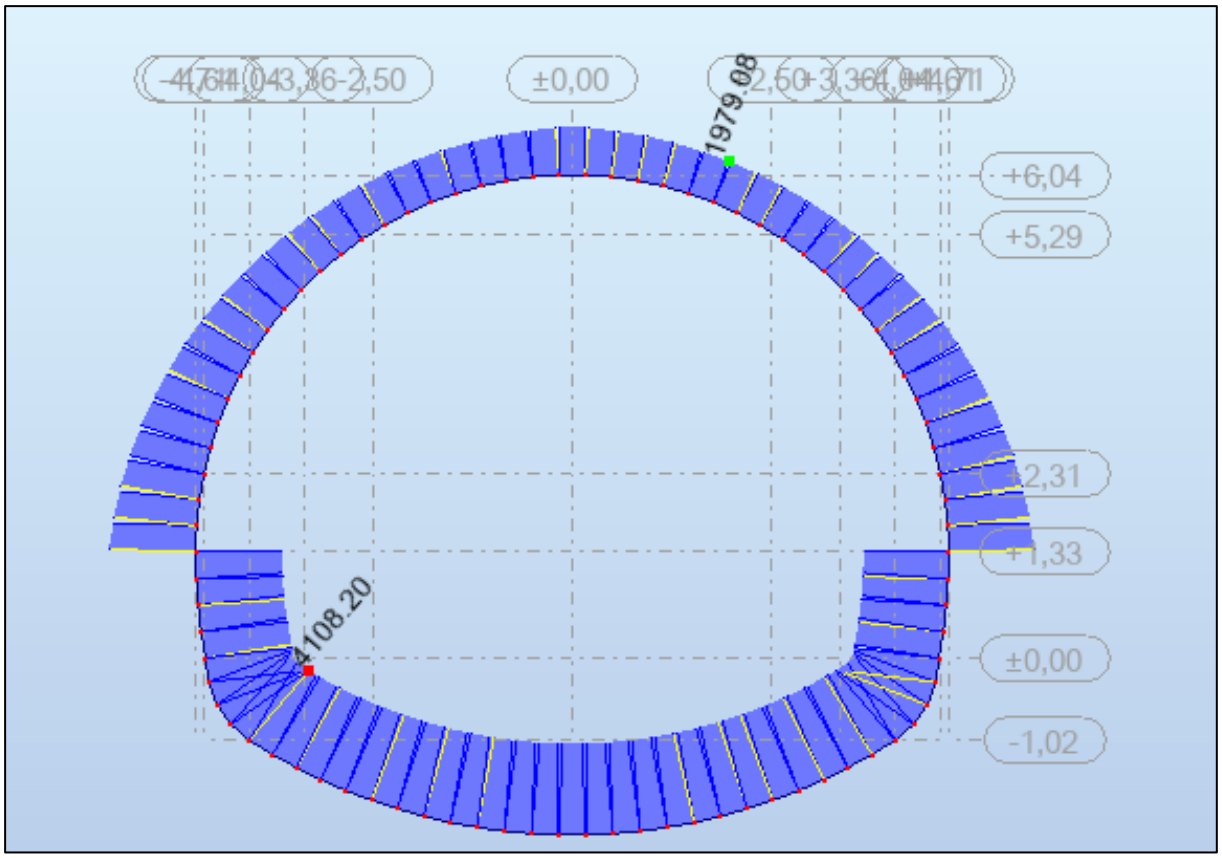
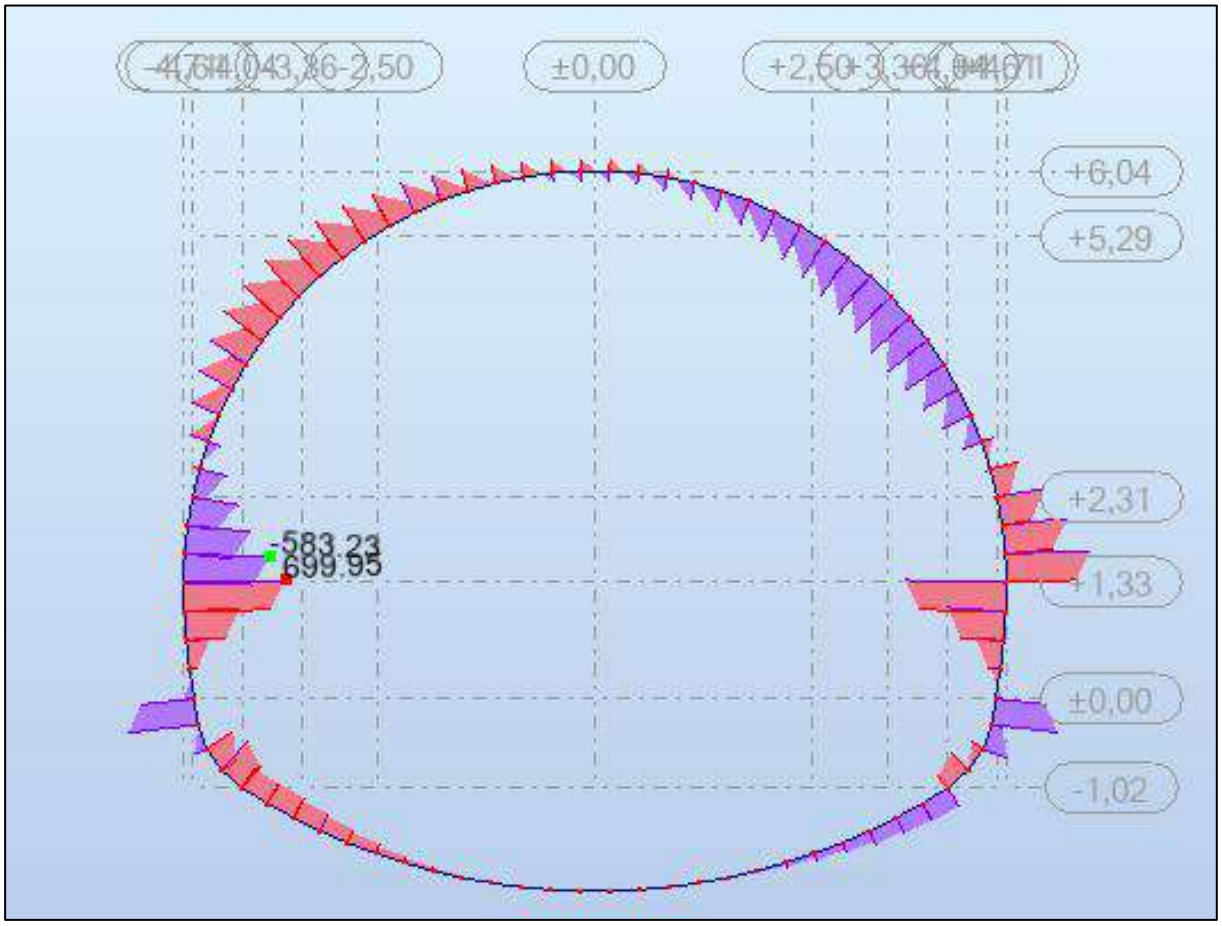


Figure 16 : Application de la raideur radiale de l'élément D


±0,00
+6,04
+5,29
+2,31
+1,33
±0,00
-1,02
1979.08
4108.20


±0,00
+6,04
+5,29
+2,31
+1,33
±0,00
-1,02
-583.23
699.95

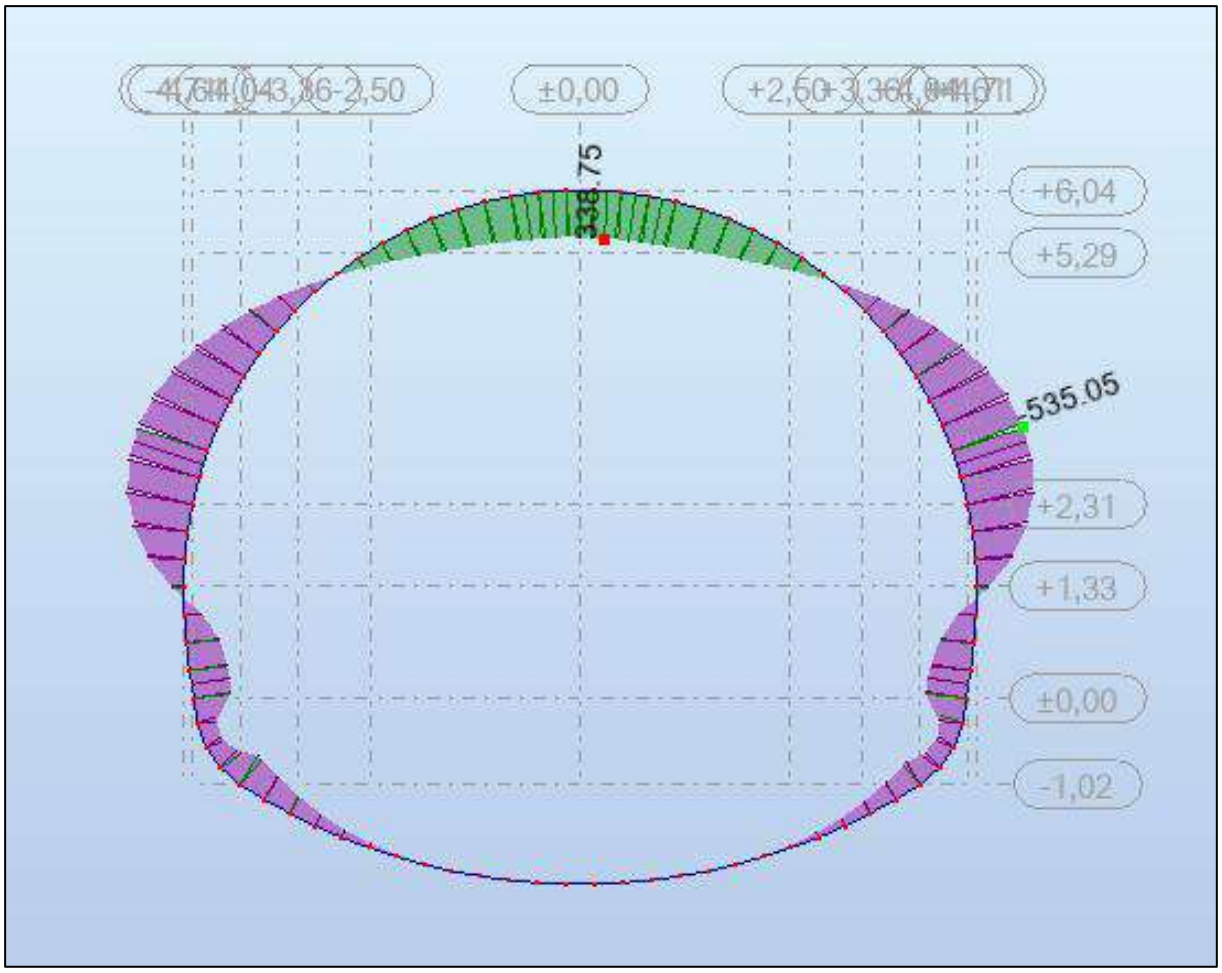


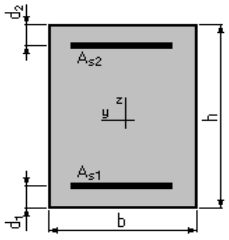
Figure 17 : Résultats des efforts internes au niveau du revêtement définitif.

Ferraillage principale correspondant au moment fléchissant (M+) -Cas de la voûte-

Béton: fc28 = 30,0 (MPa) **Acier: fe = 500,0 (MPa)**

- Fissuration très préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poutre
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99

2. Section:



b = 100,0 (cm)
h = 40,0 (cm)

d_1 = 5,0 (cm)
d_2 = 5,0 (cm)

3. Efforts appliqués:

Cas N^O	Type	**N** (kN)	**M** (kN*m)
1.	ELU	2085,35	332,97

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique A_{s1} = 4,5 (cm2) Section théorique A_{s2} = 0,0 (cm2)
Section minimum $A_{s\ min}$ = 4,1 (cm2)
théorique ρ = 0,13 (%)
minimum ρ_{min} = 0,12 (%)

Analyse par Cas:

Cas N^O 1: Type ELU N = 2085,35 (kN) M = 332,97 (kN*m)

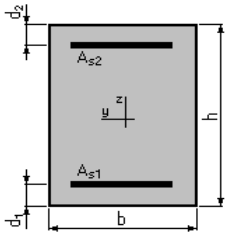
Coefficient de sécurité: 1,00 Pivot: B
Position de l'axe neutre: y = 16,8 (cm)
Bras de levier: Z = 28,3 (cm)
Déformation de l'acier: ε_s = 3,80 (‰)
Déformation du béton: ε_b = 3,50 (‰)
Contrainte de l'acier: tendue: σ_s = 434,8 (MPa)

Ferraillage principale correspondant au moment fléchissant (M-) -Cas de la voûte-

Béton: fc28 = 30,0 (MPa) Acier: fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration très préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poutre
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99

2. Section:



b = 100,0 (cm)
h = 40,0 (cm)
d_1 = 5,0 (cm)
d_2 = 5,0 (cm)

3. Efforts appliqués:

Cas N^{O}	Type	**N** (kN)	**M** (kN*m)
1.	ELU	3080,75	-535,05

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique A_{s1} = 17,1 (cm2) Section théorique A_{s2} = 13,8 (cm2)
Section minimum $A_{s\,min}$ = 4,1 (cm2)
théorique ρ = 0,88 (%)
minimum ρ_{min} = 0,12 (%)

Analyse par Cas:

Cas N^{O} 1: Type ELU N = 3080,75 (kN) M = -535,05 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1,00 Pivot: B
Position de l'axe neutre: y = 21,6 (cm)
Bras de levier: Z = 26,4 (cm)
Déformation de l'acier: ε_s = 2,17 (‰)
Déformation du béton: ε_b = 3,50 (‰)
Contrainte de l'acier:

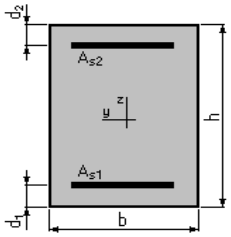
tendue: σ_s = 434,8 (MPa) comprimée: σ_s' = 434,8 (MPa)

Ferraillage principale correspondant au moment fléchissant (M+) -Cas du radier-

Béton: fc28 = 30,0 (MPa) Acier: fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration très préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poutre
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99

2. Section:



b = 100,0 (cm)
h = 40,0 (cm)
d_1 = 5,0 (cm)
d_2 = 5,0 (cm)

3. Efforts appliqués:

Cas N^{O}	Type	**N** (kN)	**M** (kN*m)
1.	ELU	4106,22	1,18

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique	A_{s1} = 0,0 (cm2)	Section théorique	A_{s2} = 0,0 (cm2)
Section minimum	$A_{s\ min}$ = 4,1 (cm2)		
théorique	ρ = 0,00 (%)		
minimum	ρ_{min} = 0,12 (%)		

Analyse par Cas:

Cas N^{O} 1: Type ELU N = 4106,22 (kN) M = 1,18 (kN*m)

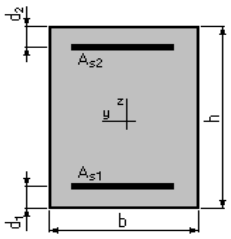
Coefficient de sécurité:	1,65	Pivot: C
Position de l'axe neutre:	y = 49,9	(cm)
Bras de levier:	Z = 15,0	(cm)
Déformation de l'acier:	ε_s = 0,00	(‰)
Déformation du béton:	ε_b = 3,05	(‰)
Contrainte de l'acier:		

Ferraillage principale correspondant au moment fléchissant (M-) -Cas du radier-

Béton: fc28 = 30,0 (MPa) Acier: fe = 500,0 (MPa)

- Fissuration très préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poutre
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99

2. Section:



b = 100,0 (cm)
h = 40,0 (cm)
d_1 = 5,0 (cm)
d_2 = 5,0 (cm)

3. Efforts appliqués:

Cas N^{O}	Type	**N** (kN)	**M** (kN*m)
1.	ELU	3837,16	-289,39

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique	A_{s1} = 0,0 (cm2)	Section théorique	A_{s2} = 0,0 (cm2)
Section minimum	$A_{s\ min}$ = 4,1 (cm2)		
théorique	ρ = 0,00 (%)		
minimum	ρ_{min} = 0,12 (%)		

Analyse par Cas:

Cas N^{O} 1: Type ELU N = 3837,16 (kN) M = -289,39 (kN*m)

Coefficient de sécurité:	1,10	Pivot: B
Position de l'axe neutre:	y = 31,1	(cm)
Bras de levier:	Z = 22,5	(cm)
Déformation de l'acier:	ε_s = 0,00	(‰)
Déformation du béton:	ε_b = 3,50	(‰)
Contrainte de l'acier:		

ANNEXE 8

Rapports des quantités.

Rapport de Matériaux

Axe: Axe_tunnel

Groupe de tabulations: Groupe de tabulations_tunnel

Abscisse curviligne de départ: 38+930.000

Abscisse curviligne de fin: 38+980.000

	Type de surface	**Surface**	**Vol.Inc**	**Vol.Cum**
		m2	**m3**	**m3**
Abscisse: 38+930.000				
	Déblai	68.21	0.00	0.00
	Remblai	0.00	0.00	0.00
	Revêtement	11.38	0.00	0.00
	Béton de remplissage	6.60	0.00	0.00
	Béton de remplissage de voie	2.92	0.00	0.00
Abscisse: 38+940.000				
	Déblai	68.21	682.12	682.12
	Remblai	0.00	0.00	0.00
	Revêtement	11.38	113.78	113.78
	Béton de remplissage	6.60	65.97	65.97
	Béton de remplissage de voie	2.92	29.26	29.26
Abscisse: 38+950.000				
	Déblai	68.21	682.12	1364.23
	Remblai	0.00	0.00	0.00
	Revêtement	11.38	113.78	227.56
	Béton de remplissage	6.60	65.97	131.93
	Béton de remplissage de voie	2.92	29.26	58.51
Abscisse: 38+960.000				
	Déblai	68.21	682.12	2046.35
	Remblai	0.00	0.00	0.00

	Revêtement	11.38	113.78	341.34
	Béton de remplissage	6.60	65.97	197.90
	Béton de remplissage de voie	2.92	29.26	87.77
Abscisse: 38+970.000				
	Déblai	68.21	682.12	2728.46
	Remblai	0.00	0.00	0.00
	Revêtement	11.38	113.78	455.12
	Béton de remplissage	6.60	65.97	263.86
	Béton de remplissage de voie	2.92	29.26	117.03
Abscisse: 38+980.000				
	Déblai	68.21	682.12	3410.58
	Remblai	0.00	0.00	0.00
	Revêtement	11.38	113.78	568.90
	Béton de remplissage	6.60	65.97	329.83
	Béton de remplissage de voie	2.92	29.26	146.28

Cut/Fill Report

Volume Summary

Name	Type	Cut Factor	Fill Factor	2d Area (m^2)	Cut (M^3)	Fill (M^3)	Net (M^3)
Cut	full	1.000	1.000	477.67	3410.57	0.00	3410.57<Déblai>

Totals

	2d Area (m^2)	Cut (M^3)	Fill (M^3)	Net (M^3)
Total	477.67	3410.57	0.00	3410.57<Déblai>

* Value adjusted by cut or fill factor other than 1.0