الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **Master Académique**

En : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'Arts

Par : Abdelmalek Khalil

Sujet

Modélisation et simulation numérique des tassements différentiels et dégradations aux jonctions des pistes aéronautiques

Présenté et soutenu publiquement, le 11/06/2025, devant le jury composé de :

M. Bouchoucha Abdallah	MAA	Président
M. Rouili Ahmed	Professeur	Rapporteur
M. Fernane Ali	MAA	Examinateur

Promotion : 2024/2025

Dédicaces

Je dédie ce travail avec tout mon amour et ma gratitude à mes parents, à ma mère et mon père, piliers de ma vie, pour leurs sacrifices, leur patience et leur soutien inconditionnel.

À mes frères et sœurs, et à toute ma famille Abdelmalek, *merci pour votre amour, vos encouragements et votre présence à chaque étape de mon parcours.*

Je tiens également à dédier ce mémoire à mes chers amis, pour leur amitié précieuse, leurs conseils et leur soutien moral durant ces années d'études.

Enfin, une pensée particulière pour toute la promotion 2025 VOA, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables, des efforts collectifs et des ambitions communes. Merci pour cette belle aventure académique.

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant qui m'a donné la force, la patience et le courage d'accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon Professeur ***ROUILI Ahmed****, pour sa disponibilité, son accompagnement rigoureux, ses conseils précieux et sa confiance tout au long de ce travail. Sa bienveillance et son exigence scientifique ont été pour moi une véritable source d'inspiration.*

Je remercie également l'ensemble de mes enseignants du département de Génie Civil pour la qualité de l'enseignement qu'ils m'ont dispensé durant toutes ces années, ainsi que pour leur dévouement et leur soutien pédagogique.

Un grand merci à mes parents pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant, sans lesquels rien de tout cela n'aurait été possible. Mes pensées affectueuses vont également à mes frères, sœurs et toute ma famille pour leur encouragement.

Je tiens à adresser ma reconnaissance aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail.

Enfin, merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Liste des symboles

γ (gamma) : Poids volumique (en kN/mm³).

E : Module d'élasticité (en kN/mm²).

ν (nu) : Coefficient de Poisson.

φ (phi) : Angle de frottement interne (en degrés).

ψ (psi) : Angle de dilatance (en degrés).

C : Cohésion (en kN/mm²).

K_0 : Coefficient de pression des terres au repos.

U_x : Déplacement horizontal (en mm).

U_y : Déplacement vertical (en mm).

U_{tot} : Déplacement total (en mm).

σ (sigma) : Contrainte (en kN/mm² ou MPa).

Liste des abréviations

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale (ICAO en anglais).

FAA : Federal Aviation Administration (États-Unis).

STAC : Service Technique de l'Aviation Civile (France).

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile (France).

ASTM : American Society for Testing and Materials (États-Unis).

AASHO : American Association of State Highway Officials (Ancien nom de l'AASHTO).

FICAV : Fiche d'Information et de Caractérisation des Aéroports et Voies.

ACN : Aircraft Classification Number (Numéro de classification de l'aéronef).

PCN : Pavement Classification Number (Numéro de classification de la chaussée).

PSI : Present Serviceability Index (Indice d'aptitude au service actuel).

IRI : International Roughness Index (Indice international de rugosité).

PCI : Pavement Condition Index (Indice de l'état de la chaussée).

APMS : Airport Pavement Management System (Système de gestion des chaussées d'aéroport).

FWD : Falling Weight Deflectometer (Déflectomètre à chute de poids).

HWD : Heavy Weight Deflectometer (Déflectomètre lourd).

IMAG : Instrument de Mesure Automatique de Glissance.

EA : Rigidité axiale des géogrilles (en kN/mm).

BB : Béton bitumineux.

GB : Grave bitume.

GNT : Graves non traitées.

Liste des tableaux

CHAPITRE I : LES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES

Tableau 1.1 : Les avantages et les inconvénients des chaussées souples et rigides.....7

Tableau 1.2 : Différences fondamentales entre les chaussées souples et rigides.....8

Tableau 1.3 : Constitutions des chaussées souples 8

Tableau 1.4 : Constitutions des chaussées rigides 9

CHAPITRE II : LES DÉGRADATIONS DES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES

Tableau 2.1 : Dégradations superficielles et structurelles des chaussées aéronautiques 28

CHAPITRE III : MODÈLE DE RÉFÉRENCE

Tableau 3.1 : Caractéristiques mécaniques des matériaux.....31

CHAPITRE IV : MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Tableau 4.1 : Conditions de chargement selon les différents scénarios de circulation (SC) 39

Tableau 4.2 : Graphiques montrant la différence des déplacements verticaux.....53

Tableau 4.3 : Graphiques montrant la différence des déplacements verticaux.....54

Tableau 4.4 : Tableau résumant toutes les différences 55

CHAPITRE V : ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

Tableau 5.1 : Graphiques montrant la différence des déplacements horizontaux 72

Tableau 5.2 : Graphiques montrant la différence des déplacements verticaux.....73

Tableau 5.3 : U_{tot} avant et après renforcement.....75

Tableau 5.4 : U_y avant et après renforcement 77

Tableau 5.5 : U_x avant et après renforcement 79

Liste des figures

CHAPITRE I : LES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES

Figure 1.1 : Corps de chaussée souple 5

Figure 1.2 : Corps de chaussée rigide 6

Figure 1.3 : La remorque de portance 12

Figure 1.4 : Remorque de mesure de déflexion de type HWD 12

Figure 1.5 : Remorque IRV – International Reference Vehicle 13

Figure 1.6 : Analyseur de profil en long 13

CHAPITRE II : LES DÉGRADATIONS DES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES

Figure 2.1 : Fissure de fatigue 17

Figure 2.2 : Faïençage de fatigue 17

Figure 2.3 : Fissuration de joint 18

Figure 2.4 : Fissure parabolique 18

Figure 2.5 : Fissures de retrait 18

Figure 2.6 : Faïençage de retrait 19

Figure 2.7 : Pelade 19

Figure 2.8 : Nid de poule 19

Figure 2.9 : Dés enrobage / brûlures 20

Figure 2.10 : Gonflement / Bourrelet 20

Figure 2.11 : Flache 20

Figure 2.12 : Ornière / frayée 21

Figure 2.13 : Déformation en W 21

Figure 2.14 : Tassement différentiel / Marche 21

Figure 2.15 : Contamination sur une aire de stationnement 22

Figure 2.16 : Dépôt de gomme sur une piste 22

Figure 2.17 : Empreinte / poinçonnement 22

Figure 2.18 : Enrobé poreux 23
Figure 2.19 : Remontée de fines 23
Figure 2.20 : Remontée d'eau par une fissure de joint 23
Figure 2.21 : Répartition ponctuelle dégradée 24
Figure 2.22 : Ressuage 24
Figure 2.23 : Fissure longitudinale 25
Figure 2.24 : Fissure en coin / Cassure d'angle 25
Figure 2.25 : Fracture 25
Figure 2.26 : Pompage 26
Figure 2.27 : Décalage / Marche 26
Figure 2.28 : Épaufrure 26
Figure 2.29 : Faïençage/Écaillage 27
Figure 2.30 : Défaut de joint 27
Figure 2.31 : Réparation ponctuelle dégradée 27

CHAPITRE III : MODÈLE DE RÉFÉRENCE

Figure 3.1 : Le Boeing 747-400 lors du décollage 31
Figure 3.2 : Fiche technique du Boeing 747-400 sur la base FICAV 33
Figure 3.3 : Boggie de train d'atterrissage du Boeing 747-400 33

CHAPITRE IV : MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Figure 4.1 : Paramètres généraux du projet 36
Figure 4.2 : Dimensions et unités du projet 37
Figure 4.3 : Géométrie du modèle 37
Figure 4.4 : Visualisation des Atterrisseurs type B747 38
Figure 4.5 : Charge de File 1(A) et File 2(B) 38
Figure 4.6 : Informations générales du maillage 40
Figure 4.7 : Maillage du modèle 40
Figure 4.8 : Les conditions initiales 40

Figure 4.9 : Champ des contraintes effectives avant chargement.....41
Figure 4.10 : Les phases de calcul.....41
Figure 4.11 : Phase 1.....42
Figure 4.12 : Phase 2.....42
Figure 4.13 : Phase 3.....42
Figure 4.14 : Informations de calcul en phase.....43
Figure 4.15 : Déformations totales du maillage de la phase 1.....43
Figure 4.16 : Déplacements totaux de la phase 1.....44
Figure 4.17 : Déplacements horizontaux de la phase 1.....44
Figure 4.18 : Déplacements verticaux de la phase 1.....45
Figure 4.19 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple.....45
Figure 4.20 : Déformations totales du maillage de la phase 2.....46
Figure 4.21 : Déplacements totaux de la phase 2.....47
Figure 4.22 : Déplacements horizontaux de la phase 2.....47
Figure 4.23 : Déplacements verticaux de la phase 2.....48
Figure 4.24 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple.....48
Figure 4.25 : Déformations totales du maillage de la phase 3.....49
Figure 4.26 : Déplacements totaux de la phase 3.....50
Figure 4.27 : Déplacements horizontaux de la phase 3.....50
Figure 4.28 : Déplacements verticaux de la phase 3.....51
Figure 4.29 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple.....51

CHAPITRE V : ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

Figure 5.1 : Géogrille de renforcement.....58
Figure 5.2 : Paramètres du géogrille.....59
Figure 5.3 : Les phases de calcul.....60
Figure 5.4 : Phase 1.....60
Figure 5.5 : Phase 2.....60

Figure 5.6 : Phase 3.....61
Figure 5.7 : Informations de calcul en phase.....61
Figure 5.8 : Déformations totales du maillage de la phase 1.....62
Figure 5.9 : Déplacements totaux de la phase 1.....62
Figure 5.10 : Déplacements totaux de la phase 1(en flèches).....63
Figure 5.11 : Déplacements horizontaux de la phase 1.....63
Figure 5.12 : Déplacements horizontaux de la phase 1(en flèches).....64
Figure 5.13 : Déplacements verticaux de la phase 1.....64
Figure 5.14 : Déplacements verticaux de la phase 1 (en flèches).....65
Figure 5.15 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple – Phase 1.....65
Figure 5.16 : Déformations totales du maillage de la phase 2.....66
Figure 5.17 : Déplacements totaux de la phase 2.....66
Figure 5.18 : Déplacements totaux de la phase 2 (en flèches).....67
Figure 4.19 : Déplacements horizontaux de la phase 2.....67
Figure 5.20 : Déplacements horizontaux de la phase 2 (en flèches).....68
Figure 5.21 : Déplacements verticaux de la phase 2.....68
Figure 5.22 : Déplacements verticaux de la phase 2 (en flèches).....69
Figure 5.23 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple – Phase 2.....69
Figure 5.24 : Déformations totales du maillage de la phase 3.....70
Figure 5.25 : Déplacements totaux de la phase 3.....70
Figure 5.26 : Déplacements totaux de la phase 3 (en flèches).....70
Figure 5.27 : Déplacements horizontaux de la phase 3 (en flèches).....71
Figure 5.28 : Déplacements verticaux de la phase 3 (en flèches).....71
Figure 5.29 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple – Phase 3.....71

Résumé :

Ce mémoire s'intéresse à la problématique du comportement mécanique de la jonction entre la chaussée rigide et la chaussée souple dans les infrastructures aéroportuaires, une zone sujette à des désordres récurrents tels que le tassement différentiel et la fissuration prématurée. Cette interface, soumise à des sollicitations mécaniques cycliques induites par le trafic aérien lourd (notamment les avions de type Boeing 747), constitue un point critique pour la durabilité et la sécurité des pistes.

L'étude repose sur une modélisation numérique bidimensionnelle réalisée à l'aide du logiciel PLAXIS 2D, selon l'approche par éléments finis. Trois cas de chargement sont analysés selon la position des trains d'atterrissage par rapport à la jonction. Une étude paramétrique est ensuite menée pour évaluer l'apport d'un renforcement par géogrille unidirectionnelle, en variant sa position et ses caractéristiques mécaniques.

Les résultats mettent en évidence une concentration accrue des contraintes et des déplacements à l'interface rigide-souple. L'intégration de la géogrille permet d'atténuer ces effets, en améliorant la répartition des efforts et en réduisant significativement les déformations verticales. L'approche proposée contribue ainsi à une meilleure maîtrise des pathologies localisées dans les zones de transition et à une optimisation de la conception des chaussées aéroportuaires.

Mots-clés : chaussée rigide, chaussée souple, interface rigide-souple, tassement différentiel, PLAXIS 2D, modélisation numérique, géogrille, infrastructures aéroportuaires.

ملخص :

يتناول هذا البحث إشكالية السلوك الميكانيكي لمنطقة الالتقاء بين الرصف الصلب والرصف المرن ضمن البنى التحتية للمطارات، وهي منطقة تُظهر غالبًا مظاهر خلل إنشائي مثل الهبوط التفاضلي والتشقق المبكر. وتزداد أهمية هذه المنطقة نظرًا لتعرضها لأحمال متكررة ناتجة عن مرور طائرات ذات أوزان عالية، طائرة بوينغ 747 كمثال.

تم اعتماد النمذجة العددية ثنائية الأبعاد باستخدام برنامج PLAXIS 2D، وفقًا لمنهج العناصر المحددة. وقد جرى تحليل ثلاث حالات تحميل تختلف حسب تموضع عجلات الهبوط بالنسبة إلى منطقة الالتقاء. ثم تم تنفيذ دراسة تحليلية لتقييم فعالية التسليح بالجيوغريل أحادي الاتجاه، مع اختبار تأثير موقعه وخصائصه الميكانيكية.

أظهرت النتائج أن المنطقة الانتقالية بين الرصفين تُعدّ الأكثر عرضة لتركيز الإجهادات والتشوهات .وأثبت إدخال الجيوغريل فاعلية ملحوظة في تقليص هذه الظواهر وتحسين توزيع الإجهادات، مما يساهم في تحسين الأداء الهيكلي وإطالة عمر الخدمة.

تعزز هذه الدراسة أهمية استخدام النمذجة العددية كأداة فعالة لتحليل وتحسين تصميم الرصفات الجوية في المناطق الحساسة.

الكلمات المفتاحية : رصف صلب، رصف مرن، الالتقاء بين الرصفين، الهبوط التفاضلي، PLAXIS 2D، النمذجة العددية، الجيوغريل، بنى تحتية جوية.

Abstract :

This dissertation investigates the mechanical behavior of the transition zone between rigid and flexible pavements in airport infrastructures—a recurrently problematic area often affected by differential settlement and early-stage cracking. Subjected to intense cyclic loads induced by heavy aircraft traffic, particularly Boeing 747-type planes, this interface represents a structural weakness that compromises the runway durability and operational safety.

The adopted methodology is based on finite element numerical modeling using PLAXIS 2D in plane strain conditions. Three loading scenarios were defined according to the wheel positioning relative to the rigid–flexible interface. A parametric study was conducted to assess the effectiveness of uniaxial geogrid reinforcement, considering variations in its depth and stiffness.

The results clearly indicate that the interface zone exhibits elevated stress concentrations and vertical deformations. The incorporation of geogrids significantly mitigates these effects by enhancing load distribution and minimizing differential settlements. The findings support the implementation of reinforcement strategies at transition zones and underline the value of advanced modeling tools in optimizing pavement designs under high-load conditions.

Keywords : rigid pavement, flexible pavement, rigid–flexible interface, differential settlement, numerical modeling, PLAXIS 2D, geogrid, airport pavement engineering.

Table des matières

Liste des symboles ……...I

Liste des abréviations ……II

Liste des tableaux ……..III

Liste des figures ……IV

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction 2

Plan du mémoire 2

CHAPITRE I : LES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES

1. Définition et rôle 4

2. Cadre réglementaire, rôle de l'OACI 4

3. Structure des chaussées aéronautiques 4

4. Types des chaussées aéronautiques 5

4.1. Chaussée souple 5

4.2. Chaussée rigide 6

5. Choix d'un type de chaussée 6

6. Différences fondamentales entre les chaussées souples et rigides 8

7. Choix d'une constitution de chaussée 8

8. Durée de vie d'une chaussée aéronautique 9

9. L'indice de service des chaussées aéronautiques 9

9.1. Définition 9

9.2. Origine et développement 9

9.3. Méthodes d'évaluation 10

9.4. Seuils d'acceptabilité 10

9.5. Utilisation dans la gestion des chaussées aéronautiques 10

10. Jonctions Rigide–Souple 11

11. Auscultation des chaussées aéronautiques 11
11.1. La portance 11
11.1.1. Remorque de portance 11
11.1.2. Déflectomètre à charge tombante (HWD) 12
11.2. L'adhérence des chaussées 12
11.3. L'uni longitudinal des chaussées 13

CHAPITRE II : LES DÉGRADATIONS DES CHAUSSÉESAÉRONAUTIQUES

1. Contexte général 16
2. Origine des tassements différentiels sur la jonction rigide-souple 16
3. Type des dégradations 16
3.1. Pour les chaussées souples 17
3.1.1. Les fissurations 17
3.1.2. Les arrachements 19
3.1.3. Les déformations 20
3.1.4. Autres dégradations 22
3.2. Pour les chaussées rigides 24
3.2.1. Dégradations structurelles 25
3.2.2. Dégradations superficielles 26
3.2.3. Autres dégradations 27

CHAPITRE III : MODÈLE DE RÉFÉRENCE

1. Introduction 30
2. Description géométrique du modèle 30
3. Caractéristiques mécaniques des Matériaux 31
4. Conditions aux limites 31
5. Conditions de Chargement 32
5.1. Charge de Calcul 32
5.1.1. Répartition de la charge 33

CHAPITRE IV : MODÉLISATION NUMÉRIQUE

1. Introduction 35
2. Présentation de PLAXIS 35
2.1. Définition 35
3. Géométrie et scénarios de chargement 36
3.1. Géométrie du modèle 37
3.2. Scénarios de chargement 38
4. Génération du maillage 39
5. Conditions initiales 40
6. Examen des résultats 41
6.1. Résultats de la phase 1 43
6.1.1. Commentaires sur la Phase 1 46
6.2. Résultats de la phase 2 46
6.2.1. Commentaires sur la Phase 2 49
6.3. Résultats de la phase 3 49
6.3.1. Commentaires sur la Phase 3 52
6.4. Comparaisons 52

CHAPITRE V : ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

1. Introduction 57
2. Renforcement par géogrille 57
2.1. Avantages dans le cas d'une jonction rigide-souple 58
2.2. Paramètres influents 58
3. Scénarios de renforcement 59
4. Examen des résultats 60
4.1. Résultats de la phase 1 62
4.1.1. Commentaires sur la Phase 1 65
4.2. Résultas de la phase 2 66

4.2.1. Commentaires sur la Phase 2 69

4.3.1. Commentaires sur la Phase 3 72

5. Les points plastiques dans Plaxis 74

5.1. Définition 74

5.2. Types de points plastiques dans Plaxis 74

5.3. Utilité dans l'analyse 75

6. Comparaison des résultas avant et après le renforcement 75

6.1. Déplacements totaux 75

6.2. Déplacements verticaux 77

6.3. Déplacements horizontaux 79

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion 82

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction :

Les infrastructures aéroportuaires constituent des éléments essentiels pour le transport aérien moderne, dont la fiabilité et la durabilité conditionnent directement la sécurité et la performance des opérations aériennes. Parmi elles, les pistes de roulement et de décollage/atterrissage font l'objet d'une attention particulière en matière de conception, d'entretien et de renforcement. Or, certaines configurations spécifiques, notamment la jonction entre une piste souple (souvent en enrobé bitumineux) et une piste rigide (en béton), représentent des zones critiques sujettes à des désordres fréquents.

Cette interface, soumise à des sollicitations mécaniques intenses dues au passage répété des aéronefs lourds, peut présenter des dégradations telles que le retrait longitudinal, les fissurations prématurées, ou encore des tassements différentiels. Ces anomalies impactent non seulement le confort et la sécurité des usagers, mais aussi les coûts d'entretien et la durabilité de l'ouvrage.

Dans cette optique, la modélisation numérique s'impose comme un outil puissant pour analyser en profondeur le comportement mécanique de cette jonction. En recourant à des méthodes de calcul par éléments finis, il devient possible de simuler l'interaction sol-structure, d'évaluer les distributions de contraintes et de déformations, et de tester l'efficacité de différentes solutions de renforcement ou d'aménagement par l'usage des géogrilles.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette démarche. Il a pour objectif d'étudier, à l'aide d'un modèle numérique (réalisé sous le logiciel PLAXIS 2D), le comportement de la jonction entre une piste souple et une piste rigide soumise à des charges représentatives du trafic aérien. L'étude mettra en évidence les zones de concentration des efforts, les phénomènes de tassement différentiel, et proposera des améliorations visant à limiter les désordres à l'interface.

Plan du mémoire :

Ce mémoire est constitué de cinq chapitres distincts :

- Chapitre 1 : Les chaussées aéronautiques.
- Chapitre 2 : Les dégradations des chaussées aéronautiques.
- Chapitre 3 : Modèle de référence.
- Chapitre 4 : Modélisation numérique.
- Chapitre 5 : Étude paramétrique.

CHAPITRE I : LES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES

1. Définition et rôle :

Les chaussées aéronautiques sont des infrastructures essentielles destinées à supporter les charges et sollicitations exercées par les aéronefs, que ce soit pendant leur circulation, leurs manœuvres ou leur stationnement.

Contrairement aux chaussées routières, qui sont conçues principalement pour les véhicules terrestres, les chaussées aéronautiques doivent répondre à des exigences techniques beaucoup plus strictes, en raison :

- Des charges extrêmement élevées engendrées par les avions, en particulier les gros porteurs tels que le Boeing 747 ou l'Airbus A380.
- Des conditions d'utilisation spécifiques, notamment des sollicitations ponctuelles et répétées sur des zones localisées (zones de contact des trains d'atterrissage).
- De la sécurité et de la fiabilité attendues dans un environnement aéroportuaire.

Ces contraintes nécessitent des conceptions structurales adaptées**,** des matériaux performants ainsi qu'un **e**ntretien rigoureux pour garantir la durabilité et la sécurité des opérations aériennes.

2. Cadre réglementaire, rôle de l'OACI :

L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) joue un rôle central dans la normalisation et la réglementation des chaussées aéronautiques. À travers ses Annexes, en particulier l'Annexe 14, l'OACI établit les exigences relatives :

- Aux dimensions des pistes et voies de circulation.
- Aux caractéristiques des revêtements.
- Au système de classification de résistance des chaussées (ACN-PCN), permettant de vérifier la compatibilité entre un aéronef (ACN) et la chaussée (PCN).
- À l'entretien, l'inspection et la sécurité. **[1]**

3. Structure des chaussées aéronautiques :

La structure des chaussées aéronautiques est constituée principalement de trois couches distinctes, de qualités croissantes de bas en haut **[2]** :

- **La couche de surface ou couche de roulement :** assure un rôle fonctionnel (étanchéité, bon uni, rugosité) et un rôle structurel.

- **La couche de base :** assure essentiellement un rôle structurel en diffusant et diminuant les contraintes sur la couche de fondation et le sol support, constitue une bonne assise pour la couche de surface.
- **La couche de fondation :** assure un support à la couche de base et en particulier permet le bon compactage de cette dernière, Participe à la répartition des contraintes sur le sol support.

On note aussi la présence d'autres couches supplémentaires dans certains cas de chaussées :

- **Une sous couche :** conçue pour éviter la remontée des eaux de la nappe phréatique (rôle anticapillaire), et empêcher la contamination des couches supérieures par les sols supports argileux (rôle anti contaminant).
- **Une couche de forme :** La couche de forme constitue une liaison entre les terrassements proprement dits et la chaussée. L'intérêt de disposer d'une couche de forme n'est pas seulement de conduire à une réduction de l'épaisseur de la chaussée, mais elle répond à des buts divers : comme le réglage de la circulation de chantier, la protection du sous-sol contre les intempéries, l'anticontamination, l'amélioration et homogénéisation de la portance du support de chaussée et la protection contre le gel.

4. Types des chaussées aéronautiques :

On distingue généralement deux types principaux de chaussées aéronautiques :

4.1. Chaussée souple :

Composée de plusieurs couches granulaires surmontées d'une couche de roulement en enrobé bitumineux. Elle offre une certaine flexibilité et une répartition progressive des charges.

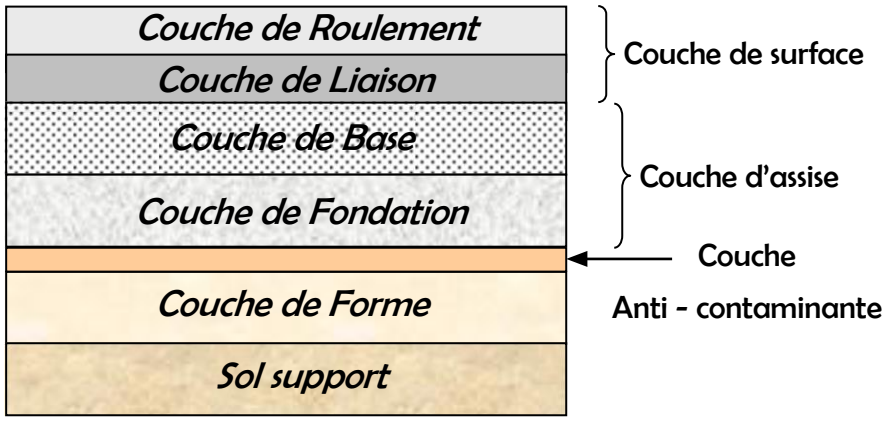


Figure 1.1 : Corps de chaussée souple

4.2. Chaussée rigide :

Constituée principalement de dalles en béton de ciment. Elle est plus rigide, transmet les charges sur une plus grande surface, et convient bien aux zones à forte sollicitation (aires de stationnement, têtes de piste).

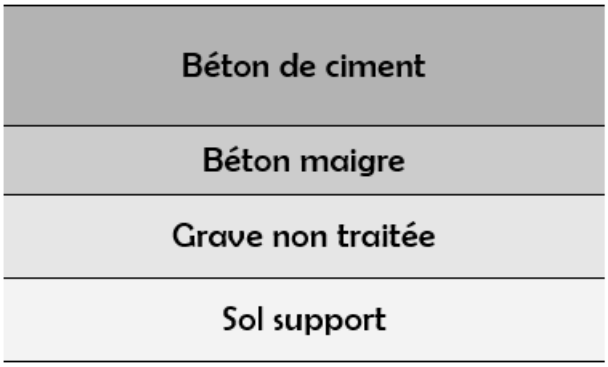


Figure 1.2 : Corps de chaussée rigide

Il existe également des chaussées semi-rigides ou renforcées, combinant les avantages des deux systèmes.

5. Choix d'un type de chaussée :

Le choix d'un type de chaussée dépend d'un grand nombre de considérations relatives, en particulier :

- Aux coûts de construction.
- Aux conditions locales d'approvisionnement en matériaux.
- Au climat Au sol support.
- Aux possibilités d'assurer l'entretient convenable et peu onéreux.
- Au trafic Aux délais d'exécution.
- Aux possibilités de programmation des travaux.
- Aux divers problèmes techniques A la technicité disponible des entreprises de réalisation.

Il n'est pas possible de préciser dans quel cas il faut prévoir une chaussée rigide plutôt qu'une chaussée souple, cependant le choix ne pourra être fait qu'après une étude complète des deux procédés, impliquant les considérations susmentionnées et tenant compte des avantages et inconvénients que chaque type présente.

Tableau 1.1 : Les avantages et les inconvénients des chaussées souples et rigides

	Chaussée souple	Chaussée rigide
Avantages	➢ Renforcement et réparations très faciles. ➢ Absence de joints.	➢ Grande dureté. ➢ Bonne répartition des charges sur le sous-sol. ➢ Imperméable, séchage rapide, nettoyage facile. ➢ Exige moins de matériaux. ➢ Peu d'entretien. ➢ Bonne résistance aux carburants et souffles des réacteurs. ➢ Meilleure visibilité (teint clair).
Inconvénients	➢ Entretien plus onéreux. ➢ Mauvaise résistance aux carburants et souffle des réacteurs. ➢ Fondation très importante. ➢ Moins bonne visibilité (teint sombre).	➢ Faible élasticité. ➢ Risque de fissuration. ➢ Présence de joints donc de points faibles structurels. ➢ Entretien courant des joints relativement onéreux. ➢ Réparation et renforcement difficiles.

Il faut aussi noter que les chaussées rigides vieillissent moins rapidement que les chaussées souples sous réserve d'un entretien constant des joints, elles sont assez souvent conseillées pour les zones d'aérodrome à très fort trafic. A titre indicatif, pour la construction du revêtement léger destiné aux accotements de piste, aux prolongements d'arrêt, une structure de chaussée du type souple est préférable. Pour les aires de stationnement et les extrémités des pistes de préférence en chaussée de type rigide.

6. Différences fondamentales entre les chaussées souples et rigides :

Tableau 1.2 : Différences fondamentales entre les chaussées souples et rigides

Chaussée souple	Chaussée rigide
➢ Constituée de couches granulaires et d'un revêtement bitumineux. ➢ Plus flexible, elle s'adapte mieux aux déformations sous les charges. ➢ Moins coûteuse à construire mais plus sensible à l'usure et à la fatigue.	➢ Constituée de dalles en béton hydraulique (armé ou non). ➢ Plus durable, elle répartit mieux les charges, mais est plus coûteuse et rigide. ➢ Moins tolérante aux mouvements du sol et aux variations thermiques.

7. Choix d'une constitution de chaussée :

Le choix d'une constitution de chaussée est basé sur des règles structurelles, des règles de construction et des règles de protection. La conformité avec ses trois règles se traduit par l'adoption des dispositions suivantes en matière de choix d'une constitution de chaussée.

- **Pour les chaussées souples :**

Tableau 1.3 : Constitutions des chaussées souples

Couche	Composition	Constitution	Abréviation	Épaisseurs minimales (En cm)
Couche de surface	Matériaux traités aux liants hydrocarbonés	Béton Bitumineux	BB	5
Couche de base	Matériaux traités aux liants hydrocarbonés	Grave-Bitume	GB	10
Couche de fondation	Matériaux non traités	Grave Non Traité	GNT	20

Pour assurer un bon comportement des couches supérieures de la chaussée il est nécessaire de prévoir une épaisseur suffisante de matériaux traités aux liants hydrocarbonés. La détermination de cette minimale serait exposée au chapitre dimensionnement de chaussées souples.

- **Pour les chaussées rigides :**

Tableau 1.4 : Constitutions des chaussées rigides

Couche	Composition	Épaisseurs minimales (En cm)
Couche de surface + Couche de base	Dalle en béton de	15
Couche de fondation	Matériaux non traités	20

8. Durée de vie d'une chaussée aéronautique :

La longévité structurelle d'une chaussée est déterminée comme étant la durée après laquelle la résistance de la chaussée ne suffit plus pour accueillir et supporter en toute sécurité le trafic pour lequel elle a été initialement prévue. Il s'impose alors de diminuer le trafic ou de consolider la structure de la chaussée. Tenant compte de l'augmentation du trafic, de la rentabilité de l'investissement et de la pérennité des matériaux utilisés, les pistes aéronautiques sont traditionnellement conçues pour une longévité standard de dix ans. On pourrait envisager une longévité accrue, particulièrement pour les chaussées de type rigide. Durant la durée de vie normale d'une chaussée, seules des opérations d'entretien courant sont effectuées pour la conservation des qualités fonctionnelles de la surface de roulement.

9. L'indice de service des chaussées aéronautiques :

9.1. Définition :

L'indice de service IS (ou Serviceability Index) est une mesure de l'état fonctionnel d'une chaussée, qui traduit sa capacité à assurer un niveau de confort, de sécurité et de performance acceptable pour les usagers. Dans le domaine aéronautique, cela concerne notamment la planéité, la portance, la régularité de surface et la capacité à supporter les charges des aéronefs sans dégradation majeure.

Cet indice est utilisé pour surveiller l'évolution des chaussées dans le temps et pour déterminer le moment optimal d'une intervention (entretien ou réhabilitation) **[3][4]**.

9.2. Origine et développement :

L'indice a été développé à l'origine pour les chaussées routières à travers le Present Serviceability Index (PSI) dans les études de l'AASHO Road Test (1960). Il a été adapté par la suite aux chaussées aéronautiques avec des critères spécifiques :

- Absence de déformations dangereuses.
- Adhérence suffisante.
- Portance conforme au trafic d'aéronefs prévu.
- Bon état de surface **[3][5]**.

9.3. Méthodes d'évaluation :

L'indice de service peut être mesuré directement ou estimé à partir d'indicateurs techniques comme :

- IRI (International Roughness Index) : pour la planéité.
- PCI (Pavement Condition Index) : indice basé sur l'identification et la quantification des dégradations visibles (fissures, orniérages, ruptures…).
- Résultats de mesures de portance : via essais de plaque ou FWD (Falling Weight Deflectometer).
- Niveau de confort de roulement (perceptible par les pilotes ou mesurable par accéléromètre) **[4][6]**.

9.4. Seuils d'acceptabilité :

Les guides internationaux comme ceux de la FAA et de l'OACI proposent des seuils pour déterminer l'état de service :

- PSI > 4 : Très bon état.
- 3 < PSI ≤ 4 : Bon état – entretien léger possible.
- 2 < PSI ≤ 3 : État moyen – entretien ou renforcement conseillé.
- PSI ≤ 2 : Mauvais état – intervention urgente requise **[1][3]**.

Pour les aéroports internationaux, les niveaux d'exigence sont plus élevés, notamment pour les pistes principales.

9.5. Utilisation dans la gestion des chaussées aéronautiques :

L'indice de service est un outil central dans les systèmes de gestion de chaussées aéronautiques (APMS) :

- Il permet la priorisation des travaux d'entretien.
- Il alimente les modèles de dégradation pour prévoir la durée de vie résiduelle.
- Il sert à justifier les investissements dans les programmes de réhabilitation.

10. Jonctions Rigide–Souple :

Les jonctions entre chaussées rigides et souples dans les aérodromes sont des zones critiques qui doivent être conçues pour résister aux charges lourdes et aux effets environnementaux (température, humidité).

Différents types de jonctions sont utilisés selon les contraintes mécaniques et les conditions d'exploitation :

- **Jonction avec dalle de transition :** Insertion d'une dalle en béton renforcée entre les deux structures pour limiter les déformations différentielles.
- **Jonction à couches de transition en granulats :** Mise en place des couches granulaires compactées entre les structures pour répartir les contraintes de manière progressive.
- **Jonction avec joint de dilatation souple :** Intégration d'un joint flexible pour absorber les mouvements thermiques et éviter les fissurations.
- **Jonction emboîtée avec transfert de charge :** Utilisation d'éléments de liaison (goujons, ancrages) pour assurer un transfert progressif des charges entre les structures.
- **Jonction avec surcouche d'enrobé :** Application d'un enrobé bitumineux sur la dalle rigide pour créer une transition souple et homogène.

Ces solutions visent à améliorer la durabilité, la performance structurelle et le confort de roulement dans les zones de transition soumises à des charges aéronautiques élevées.

11. Auscultation des chaussées aéronautiques :

11.1. La portance :

La portance des chaussées aéronautiques peut être évaluée grâce à deux dispositifs principaux : la remorque de portance du STAC et le déflectomètre à charge tombante (HWD).

11.1.1. Remorque de portance :

Cet appareil effectue une auscultation dite « lourde » en appliquant une charge comparable à celle d'une roue d'avion à l'aide d'un vérin.

- La réaction de la chaussée à cette charge répétée permet d'estimer sa capacité portante.
- Le dispositif comprend un tracteur et une remorque lestée à 60 tonnes grâce à deux caissons de 20 m³.
- La remorque joue le rôle de massif de réaction.



Figure 1.3 : La remorque de portance

Pour les chaussées souples : On analyse leur comportement à la fatigue en les soumettant à des cycles de chargement/déchargement avec enregistrement des déformations à chaque cycle.

Pour les chaussées rigides : L'objectif est de déterminer la charge qui induit une déflexion égale à la déformation admissible du béton. L'essai est réalisé au point faible, souvent le coin de dalle.

11.1.2. Déflectomètre à charge tombante (HWD) :

Plus léger, cet appareil simule le passage d'une charge roulante par l'application d'un impact sur une plaque circulaire. Il mesure le bassin de déflexion généré par cette sollicitation dynamique. La force est ajustée selon la nature de la chaussée.



Figure 1.4 : Remorque de mesure de déflexion de type HWD

11.2. L'adhérence des chaussées :

L'adhérence entre les pneus d'un avion et la piste est cruciale pour la sécurité lors de l'atterrissage, du roulage et du freinage. Elle dépend de nombreux facteurs : vitesse de l'avion, état et pression des pneumatiques, rugosité du revêtement, épaisseur du film d'eau, etc.

Pour mesurer cette adhérence, le STAC et Aéroports de Paris ont mis au point l'IMAG (Instrument de Mesure Automatique de Glissance). Il s'agit d'une remorque équipée d'une troisième roue lestée, freinée à 15 % de glissement. Des capteurs mesurent les efforts générés. Les essais se font sur surface propre, sèche ou mouillée grâce à un système embarqué.

D'autres dispositifs auto mouillants de mesure continue du frottement sont également utilisés.



Figure 1.5 : Remorque IRV – International Reference Vehicle

11.3. L'uni longitudinal des chaussées :

L'uni longitudinal désigne l'ensemble des irrégularités de surface ressenties par les aéronefs pendant le roulage, le décollage ou l'atterrissage. Contrairement aux chaussées routières, les avions sont sensibles à des longueurs d'onde plus longues (jusqu'à 100 m), ce qui peut provoquer des vibrations ou des déséquilibres dangereux.

En France, on utilise l'Analyseur de Profil en Long (APL) pour évaluer cet uni. D'autres méthodes, comme la méthode des bosses développée par Boeing, sont également utilisées.



Figure 1.6 : Analyseur de profil en long

Conséquences d'un mauvais uni :

- Inconfort des passagers (vibrations, secousses).
- Difficultés de pilotage (cockpit instable, mauvaise lecture des instruments).
- Risque de surcharges dynamiques sur la chaussée ou sur la structure des avions, aggravant les défauts existants.

CHAPITRE II : LES DÉGRADATIONS DES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES

1. Contexte général :

La cause principale des dégradations des chaussées aéronautiques est la fatigue sous l'action répétée des charges produites par le mouvement intensif des aéronefs et les contraintes d'origine thermique. Cette usure apparaît souvent sous forme de dégradations qu'on observe sur la surface des chaussées, et peut par conséquent se manifester comme des déformations avec ou sans fissurations des enrobés. La fissuration dans le revêtement entraîne la pénétration des eaux jusqu'aux couches inférieures qui se saturent, et par conséquent engendrent une diminution de la portance du sol support par perte des caractéristiques mécaniques. Ces dégradations sont causées principalement par le mauvais dimensionnement, les conditions de la mise en œuvre et les conditions d'exploitation, comme le trafic et le climat **[7]**.

2. Origine des tassements différentiels sur la jonction rigide-souple :

La jonction entre une chaussée rigide (souvent en béton de ciment) et une chaussée souple (en enrobé bitumineux sur fondation granulaire) constitue une zone sensible dans les infrastructures aéronautiques. Elle est souvent située au niveau des transitions entre les pistes, les voies de circulation et les aires de stationnement, ou entre différentes phases de réhabilitation d'un aéroport **[1][3]**.

Les tassements différentiels se produisent lorsque les deux sortes de revêtements réagissent de manière différente aux charges imposées. Ceci est dû à :

- **La différence de rigidité des matériaux :** le béton utilisé pour la chaussée rigide présente un module bien supérieur à celui des couches bitumineuses.
- **La réponse mécanique différenciée sous sollicitation dynamique :** le revêtement souple a tendance à se déformer dans un mode élasto-plastique, tandis que le revêtement rigide demeure pratiquement inaltérable jusqu'à fracture.
- **Des bases hétérogènes :** Malgré l'usage d'une même plateforme, les demandes variées entraînent des consolidations distinctes dans le sol de fondation.
- **Conditions hydrauliques sur site :** Infiltration d'eau sous la chaussée flexible qui accélère le fluage ou l'affaissement local.

3. Type des dégradations :

Selon les normes définies par l'OACI dans l'Annexe 14, ainsi que les recommandations du catalogue de dégradations du STBA, on distingue : **[7]**

3.1. Pour les chaussées souples :

- Le type de dégradation : 22 types sont recensés pour les chaussées souples.
- Le niveau de dégradation : trois niveaux sont identifiés — léger, moyen et élevé.
- La densité de dégradation dans la maille considérée : elle est mesurée par la surface caractéristique de chaque type de dégradation.

Les principaux groupes de désordres observés dans une chaussée souple sont :

- Les fissurations.
- Les arrachements.
- Les déformations.
- Autres types de dégradations.

3.1.1. Les fissurations :

a) **Fissures de fatigue :** Fissures longitudinales apparaissant dans les traces des trains d'atterrissage, souvent accompagnées de fissures transversales irrégulières et d'une légère dépression (voir Figure 2.1).



Figure 2.1 : Fissure de fatigue

b) **Faïençage de fatigue :** Fissuration en mailles polygonales dont la plus grande diagonale ne dépasse pas 60 cm (voir Figure 2.2).



Figure 2.2 : Faïençage de fatigue

c) **Fissuration des joints :** Fissures localisées au niveau des joints des dalles (voir Figure 2.3).



Figure 2.3 : Fissuration de joint

d) **Fissures paraboliques :** Fissures en forme de croissant affectant la couche de roulement, souvent accompagnées de bourrelets (voir Figure 2.4).

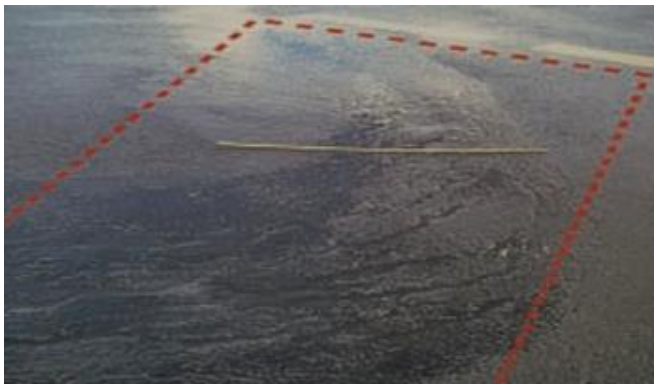


Figure 2.4 : Fissure parabolique

e) **Fissure de retrait :** Fissure due au retrait des matériaux, apparaissant régulièrement en travers de la chaussée (voir Figure 2.5).



Figure 2.5 : Fissures de retrait

f) Faïençage de retrait : Maillage de fissures rectangulaires (60 cm à 3 m), touchant toute la chaussée, même hors des zones circulées (voir Figure 2.6).



Figure 2.6 : Faïençage de retrait

3.1.2. Les arrachements :

a) Pelade : Décollement de plaques de la couche de roulement (voir Figure 2.7).



Figure 2.7 : Pelade

b) Nid de poule : Cavités formées par le départ de matériaux à la surface (voir Figure 2.8).



Figure 2.8 : Nid de poule

c) **Dés enrobage / brûlures :** Séparation du liant et des granulats, avec éventuel départ de ces derniers (voir Figure 2.9).



Figure 2.9 : Dés enrobage / brûlures

3.1.3. Les déformations :

a) **Gonflement / Bourrelet :** Gonflement localisé ou en profil longitudinal ou transversal de la chaussée (voir Figure 2.10).



Figure 2.10 : Gonflement / Bourrelet

b) **Flache :** Dépression localisée de forme elliptique ou arrondie (voir Figure 2.11).



Figure 2.11 : Flache

c) **Ornière / frayée :** Dépression longitudinale dans les traces d'atterrissage, parfois avec des bourrelets latéraux (voir Figure 2.12).



Figure 2.12 : Ornière / frayée

d) **Déformation en W :** Dépressions longitudinales de grand rayon situées de part et d'autre de l'axe de roulement (voir Figure 2.13).

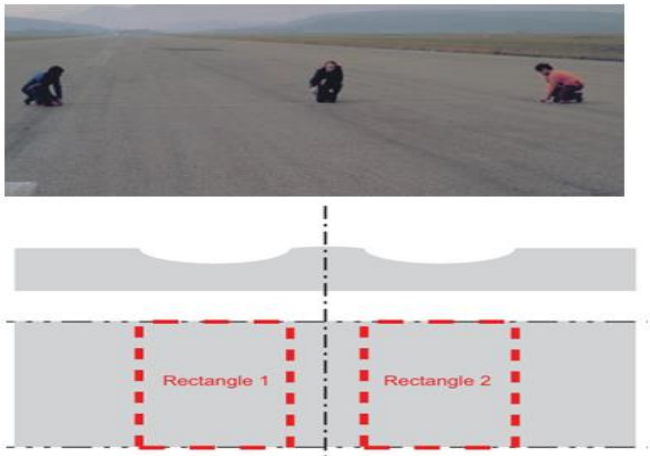


Figure 2.13 : Déformation en W

e) **Tassement différentiel / Marche :** Dénivellation transversale causée par une différence de structure ou de mise en œuvre (voir Figure 2.14).



Figure 2.14 : Tassement différentiel / Marche

3.1.4. Autres dégradations :

a) **Contamination / souillure :** Infiltration de produits chimiques (huiles, carburants…) dans le revêtement (voir Figure 2.15).

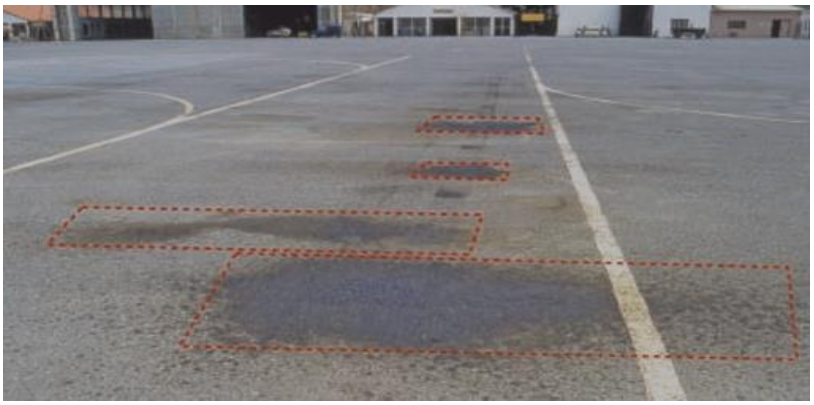


Figure 2.15 : Contamination sur une aire de stationnement

b) **Dépôt de gomme :** Accumulation de caoutchouc dans les zones de toucher des roues (voir Figure 2.16).



Figure 2.16 : Dépôt de gomme sur une piste

c) **Empreinte / poinçonnement :** Enfoncement localisé du revêtement, fréquent dans les aires de stationnement roues (voir Figure 2.17).



Figure 2.17 : Empreinte / poinçonnement

d) **Enrobé poreux :** Enrobé à texture ouverte, visible au centre ou aux joints entre bandes (voir Figure 2.18).



Figure 2.18 : Enrobé poreux

e) **Remontée de fines :** Humidité chargée en fines ou boues remontant à travers les défauts de la couche de roulement (voir Figure 2.19).



Figure 2.19 : Remontée de fines

f) **Remontée d'eau :** Zone humide visible à la surface du revêtement (voir Figure 2.20).

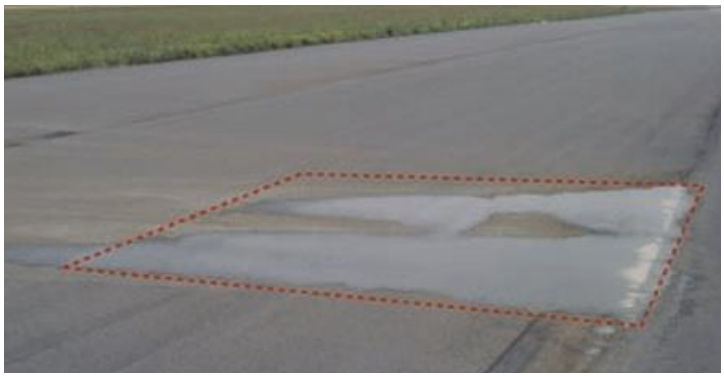


Figure 2.20 : Remontée d'eau par une fissure de joint

g) **Réparation ponctuelle dégradée :** Zone réparée présentant à nouveau des dégradations en surface ou en bordure, hors scellements de fissures (voir Figure 2.21).



Figure 2.21 : Répartition ponctuelle dégradée

h) **Ressuage :** Remontée à la surface du revêtement de mastic composé de liant et fines (voir Figure 2.22).



Figure 2.22 : Ressuage

3.2. Pour les chaussées rigides :

- Le type de dégradation : 10 types sont recensés pour les chaussées rigides.
- Le niveau de dégradation : trois niveaux sont identifiés — léger, moyen et élevé.
- La densité de dégradation dans la maille considérée : elle est mesurée par la surface caractéristique de chaque type de dégradation.

Les principaux groupes de désordres observés dans une chaussée rigide sont :

- Dégradations structurelles.
- Dégradations superficielles.
- Dégradations de joints.
- Autres dégradations.

3.2.1. Dégradations structurelles :

a) **Fissure (longitudinale, transversale, oblique) :** Rupture de la dalle en deux parties (hors coin de dalle) (voir Figure 2.23).



Figure 2.23 : Fissure longitudinale

b) **Fissure en coin / Cassure d'angle :** Fissure partant d'un coin, coupant la dalle dans son quart adjacent (voir Figure 2.24).



Figure 2.24 : Fissure en coin / Cassure d'angle

c) **Fracture :** Rupture en plus de deux morceaux, excluant les cassures d'angle (voir Figure 2.25).



Figure 2.25 : Fracture

d) Pompage : Remontée d'eau (avec ou sans fines) par les joints ou fissures (voir Figure 2.26).



Figure 2.26 : Pompage

e) Décalage / Marche : Différence de niveau entre deux dalles ou les bords d'une fissure (voir Figure 2.27).



Figure 2.27 : Décalage / Marche

3.2.2. Dégradations superficielles :

a) Épaufrure : Bris localisé du bord de dalle (coin ou joint), à moins de 30 cm, touchant partiellement l'épaisseur (voir Figure 2.28).



Figure 2.28 : Épaufrure

b) Faïençage / Écaillage : Dégradation superficielle de la dalle débutant par un maillage de fines fissures (faïençage), pouvant évoluer en détachement de petites plaques en surface (écaillage) (voir Figure 2.29).



Figure 2.29 : Faïençage/Écaillage

3.2.3. Autres dégradations :

a) Défaut de joint : Joint ne jouant plus son rôle d'étanchéité (voir Figure 2.30).



Figure 2.30 : Défaut de joint

b) Réparation ponctuelle dégradée : Réparation locale ≥ 0,5 m² présentant des défauts visibles (surface ou contour) (voir Figure 2.31).



Figure 2.31 : Réparation ponctuelle dégradée

Le tableau ci-dessous présente les principales formes de dégradations rencontrées sur les chaussées aéronautiques :

Tableau 2.1 : Dégradations superficielles et structurelles des chaussées aéronautiques

Type	Dégradations révélant un défaut de structure	Dégradations révélant un défaut de surface
Chaussée Souple	- Flache - Ornière - Fissure de fatigue - Faïençage de fatigue - Déformation en W - Gonflement - Tassement différentiel - Remontée d'eau - Remontée de fines	- Dés enrobage/brûlure - Enrobés poreux - Fissure de joint - Fissure de retrait - Faïençage de retrait - Réparation dégradée - Contamination - Dépôt de gomme - Poinçonnement - Ressuage - Fissure parabolique - Nid de poule - Pelade
Chaussée Rigide	- Fissure - Fracture - Fissure en coin - Pompage - Décalage/marche	- Épaufrure - Faïençage/écaillage - Réparation ponctuelle dégradée - Défaut de joint - Dépôt de gomme

CHAPITRE III : MODÈLE DE RÉFÉRENCE

1. Introduction :

L'étude et l'analyse des structures de chaussées aéronautiques, notamment au niveau de la jonction entre chaussées rigides et souples, ont longtemps reposé sur des approches empiriques, en raison de la complexité des sollicitations appliquées par les aéronefs et de la diversité des matériaux mis en œuvre. Toutefois, des avancées significatives ont été accomplies ces dernières années, aussi bien en matière de compréhension des mécanismes de dégradation que dans le développement d'outils numériques adaptés.

Ces évolutions ont été rendues possibles grâce à l'amélioration des méthodes de calcul, à l'intégration de la méthode des éléments finis et à une meilleure caractérisation du comportement mécanique des matériaux sous charges dynamiques répétées.

Cela a permis la mise en place de modèles numériques représentatifs du comportement différentiel au niveau de la transition entre chaussée rigide et chaussée souple. La suite de ce travail s'attache à décrire ces modèles.

2. Description géométrique du modèle :

Le modèle comprend :

- **La modélisation de la structure de chaussée aéronautique :** La géométrie du modèle a été conçue pour représenter fidèlement le comportement de la chaussée au passage des roues arrière du train principal d'un Boeing 747 au moment du décollage. Ce moment est critique en raison de l'intensité des charges transitoires appliquées sur la chaussée lors de l'accélération maximale de l'appareil. Le modèle représente à la fois la chaussée rigide (dalle en béton de 15 cm sur 20 cm de GNT) et la chaussée souple adjacente (BB 5 cm, GB 10 cm, GNT 20 cm), avec une interface directe entre les deux types de structure.
- **La représentation des roues arrière :** Le train principal arrière du Boeing 747 est constitué de deux ensembles de bogies, chacun doté de quatre roues réparties en deux axes (deux roues par essieu). Pour tenir compte de la répartition réelle de la charge et du contact pneumatique, chaque roue est modélisée par une charge répartie sur une surface rectangulaire, simulant l'empreinte au sol du pneu (voir Figure 3.1).
- **Trois cas de positionnement des charges :**
  - Cas A : Roues placées entièrement sur la zone rigide.
  - Cas B : Roues centrées sur la jonction rigide-souple.
  - Cas C : Roues placées entièrement sur la zone souple.



Figure 3.1 : Le Boeing 747-400 lors du décollage

3. Caractéristiques mécaniques des Matériaux :

La fidélité de la modélisation dépend de la précision des caractéristiques mécaniques attribuées à chaque matériau, les valeurs sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Caractéristiques mécaniques des matériaux

Matériaux	Modèle	Poids volumique (γ) [kN/mm³]	Module d'élasticité E [kN/mm²]	Coefficient de Poisson ν	Cohésion C [kN/mm²]	Angle de frottement φ °	Angle de dilatation ψ
BB	Élastique linéaire	2.3×10^{-8}	3	0.35	-	-	-
Dalle en béton	Élastique linéaire	2.4×10^{-8}	25	0.2	-	-	-
GB	Élastique linéaire	2.2×10^{-8}	0.08	0.3	-	-	-
GNT	Mohr-Colomb	2×10^{-8}	0.001	0.3	5×10^{-6}	40	10

4. Conditions aux limites :

Les conditions aux limites représentent les contraintes et restrictions imposées aux déplacements et déformations du modèle numérique afin de simuler correctement l'environnement réel de la chaussée aéronautique. Elles permettent de reproduire l'effet du sol environnant et d'éviter les influences artificielles dues à la taille finie du modèle.

Dans mon étude, les conditions aux limites sont définies comme suit :

- **Fond du modèle :** Entièrement encastré, interdisant tout déplacement vertical et horizontal, afin de simuler un sous-sol rigide et profond ($U_x = 0$, $U_y = 0$).

- **Bords latéraux :** déplacement horizontal bloqué pour empêcher la fuite latérale des matériaux, tandis que les déplacements verticaux sont libres pour permettre le tassement naturel sous charges ($U_x = 0$, U_y libre).
- **Surface supérieure :** libre, pour permettre l'application des charges d'avion sous forme de pressions réparties.

5. Conditions de Chargement :

L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) définit les règles et recommandations relatives aux charges appliquées sur les chaussées aéronautiques **[8]** :

- **Nature des charges :** Les charges proviennent principalement du poids des avions, transmis à la chaussée par les trains d'atterrissage (roues). Chaque roue exerce une pression de contact spécifique, fonction du poids supporté et de la surface de contact pneu-sol.
- **Distribution des charges :** L'OACI recommande de modéliser les charges sous forme de pressions uniformes ou réparties sur des empreintes rectangulaires ou circulaires, représentant les zones de contact des pneus. La géométrie des trains (nombre de roues, disposition, espacements) doit être prise en compte pour simuler précisément la répartition des efforts.
- **Intensité des charges :** Les pressions appliquées varient en fonction du type d'avion (par exemple, Boeing 747, Airbus A380). Les valeurs typiques de pression au sol varient généralement entre 500 kPa à 1200 kPa selon les charges et types de pneus.
- **Durée et répétition :** Le chargement est considéré comme statique ou quasi-statique dans la plupart des analyses, représentant les conditions maximales de charge au moment du contact. Pour les analyses dynamiques ou cycliques, il convient de prendre en compte la répétition des passages et l'effet de fatigue.

5.1. Charge de Calcul :

Le Boeing 747-400 est un avion gros-porteur très utilisé dans le transport aérien commercial longue distance. Il constitue un cas d'étude classique pour la conception et le dimensionnement des chaussées aéronautiques, en raison de ses charges importantes et de la complexité de son train d'atterrissage, dont la charge maximale au décollage est d'environ 396 tonnes (voir Figure 3.2) **[9]** .

Fiche aéronef

Constructeur : **BOEING**
B 747-400
Indicatif OACI : **B744**

Commentaire
Alpha factor 0.8

Caractéristiques générales

Masse maxi au roulage (kg)	Masse maxi au décollage (kg)	Masse maxi à l'atterrissage (kg)	Masse à vide opérationnelle (kg)
397 801	396 894	285 764	178 756

Pression des pneumatiques
Pression de gonflage standard (MPa)

Att. principal	Att. de nez
1.406	1.406

Répartition des charges

Att. de nez Centrage avant (% max)		Att. principal Centrage arrière (% max)	
V statique	V freinage constant	V statique	V freinage constant
7.29	29000	23.33	92800

Figure 3.2 : Fiche technique du Boeing 747-400 sur la base FICAV

5.1.1. Répartition de la charge :

- Poids maximal au décollage est 396894 kg = 3892200 N.
- Pourcentage de poids supporté par les roues arrière lors du décollage est 90% donc 3502980 N.
- Boeing 747-400 est de 16 roues, si nous divisons la charge de manière égale en trouve que la charge sur chaque roue est 218936 N.
- Pour 4 roues (Boggie) est 875744 N.
- Si nous considérons la forme comme un rectangle (aire approximative), la surface de contact pour une roue est 0.175m², pour 4 roues est 0.7m² (voir Figure 3.3).
- Finalement en trouve une contrainte de **1.25 Mpa = 0.00125 kN/mm²**



Figure 3.3 : Boggie de train d'atterrissage du Boeing 747-400

CHAPITRE IV : MODÉLISATION NUMÉRIQUE

1. Introduction :

La modélisation est cet art de simplification qui permet à l'ingénieur de représenter et de prévoir le comportement de structures complexes, soumises à des sollicitations multiples et souvent imprévisibles. Dans le domaine des infrastructures aéroportuaires, cette complexité est particulièrement marquée au niveau des zones critiques comme la jonction entre chaussées rigides et chaussées souples, un point de transition aux propriétés mécaniques contrastées.

Si les ingénieurs maîtrisent les principes fondamentaux liés aux contraintes, aux efforts et à la déformation des matériaux, c'est bien le comportement global de la structure (ses mouvements, ses tassements différentiels et ses zones de concentration de contrainte) qui conditionne les risques de dégradation et les enjeux de sécurité.

Avec l'évolution rapide du trafic aérien, l'augmentation des charges roulantes, notamment celles générées par le Boeing 747-400, pousse les infrastructures à leurs limites. Les projets deviennent alors de plus en plus ambitieux, coûteux, et soumis à des exigences de sécurité toujours plus strictes.

Face à ces défis, et en raison de la complexité croissante des méthodes analytiques, l'ingénieur s'appuie sur des outils numériques avancés. La modélisation par éléments finis s'impose comme une méthode puissante pour simuler le comportement mécanique de la jonction rigide-souple. Elle permet d'anticiper les zones de faiblesse, les concentrations de contraintes, ainsi que les mécanismes de dégradation potentiels induits par les charges verticales cycliques.

Dans cette étude, le logiciel PLAXIS 2D a été utilisé pour modéliser l'interaction entre les couches structurelles d'une chaussée aéronautique. Il a permis d'observer l'évolution des contraintes, des déformations, et des tassements différentiels sous différentes configurations de charge, en particulier à l'interface critique entre le béton rigide et les enrobés souples. Ce travail vise à mieux comprendre le comportement différentiel des matériaux et à proposer des pistes d'optimisation pour améliorer la durabilité de cette zone souvent négligée, mais essentielle à la sécurité des opérations aériennes.

2. Présentation de PLAXIS :

2.1. Définition :

PLAXIS est un logiciel des éléments finis en deux et en trois dimensions de géotechnique, développé par la société néerlandaise éponyme PLAXIS. Ce logiciel fut développé en premier lieu dans les années 1970 afin de pouvoir analyser le cas du barrage d'Oosterschelde en Allemagne. Actuellement, PLAXIS 2D et 3D version 10.0 est la dernière version. Il permet de résoudre deux types de problèmes :

Ceux qui sont axisymétriques (d'où provient le nom PLAXIS pour Plasticity et Axisymmetric) et ceux qui sont répondants aux hypothèses de déformations planes. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc).

PLAXIS offre une large gamme de modèles décrivant le comportement des matériaux (11 en tout) et permet également à l'utilisateur de créer et de définir son propre modèle. Parmi ceux-ci, des modèles linéaires et non-linéaires ainsi que dépendants du temps sont proposés. Il est donc possible de procéder à l'analyse statique et dynamique. Les modèles prennent également en compte l'écoulement de l'eau à travers les sols modélisés ainsi que la génération de pressions inertielles offrant la possibilité d'effectuer des calculs en contraintes totales ou effectives, mais aussi de donner au sol des caractéristiques telles que drainé, non-drainé et non poreux **[10]** .

3. Géométrie et scénarios de chargement :

Le choix s'est porté sur :

- Eléments à 15 nœuds pour le sol.
- Modèle 2D plane strain.
- Unités : mm, kN, jour.

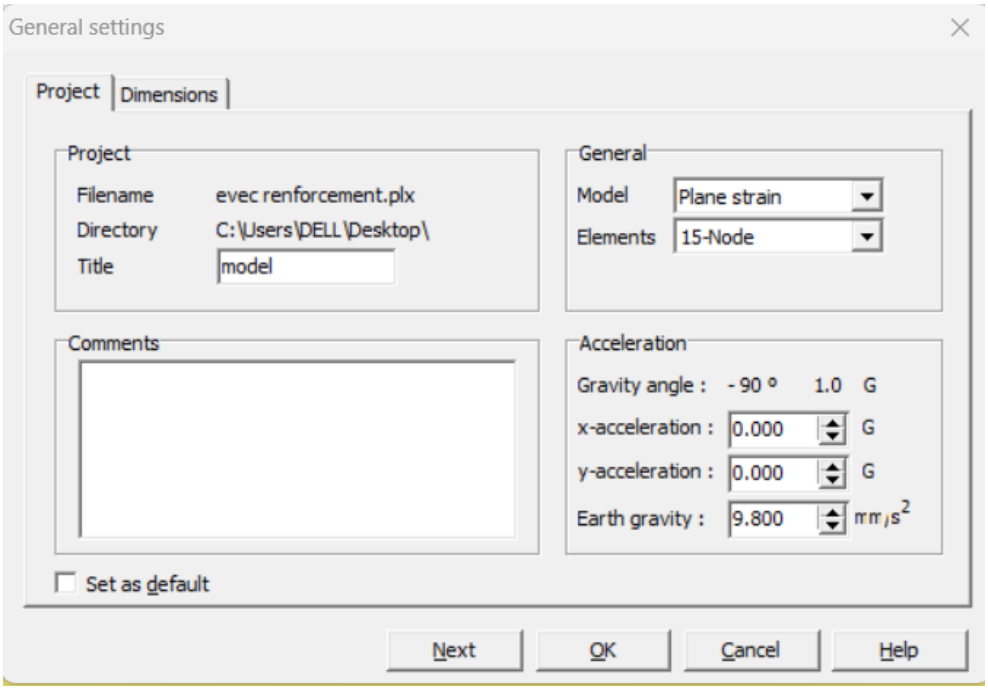


Figure 4.1 : Paramètres généraux du projet

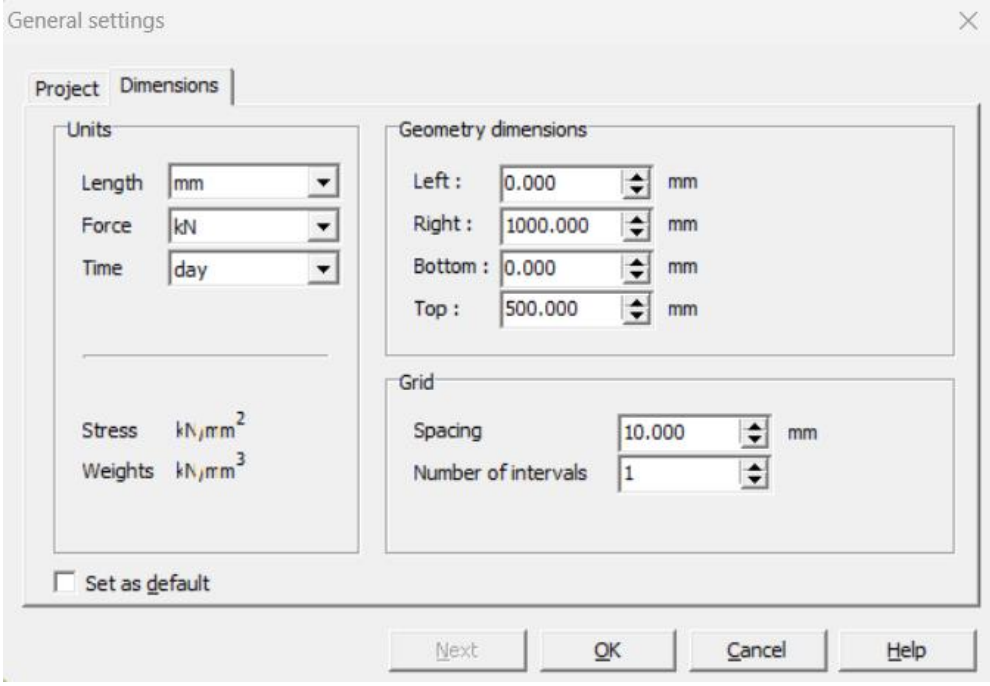


Figure 4.2 : Dimensions et unités du projet

3.1. Géométrie du modèle :

La géométrie du modèle étudié est représentée sur la (Figure 4.3).

- BB : 5cm
- GB : 10 cm
- GNT : 20 cm
- La dalle : 15 cm
- Chargement : 0.00125 kN/mm² (voir Figure 4.4 et 4.5)

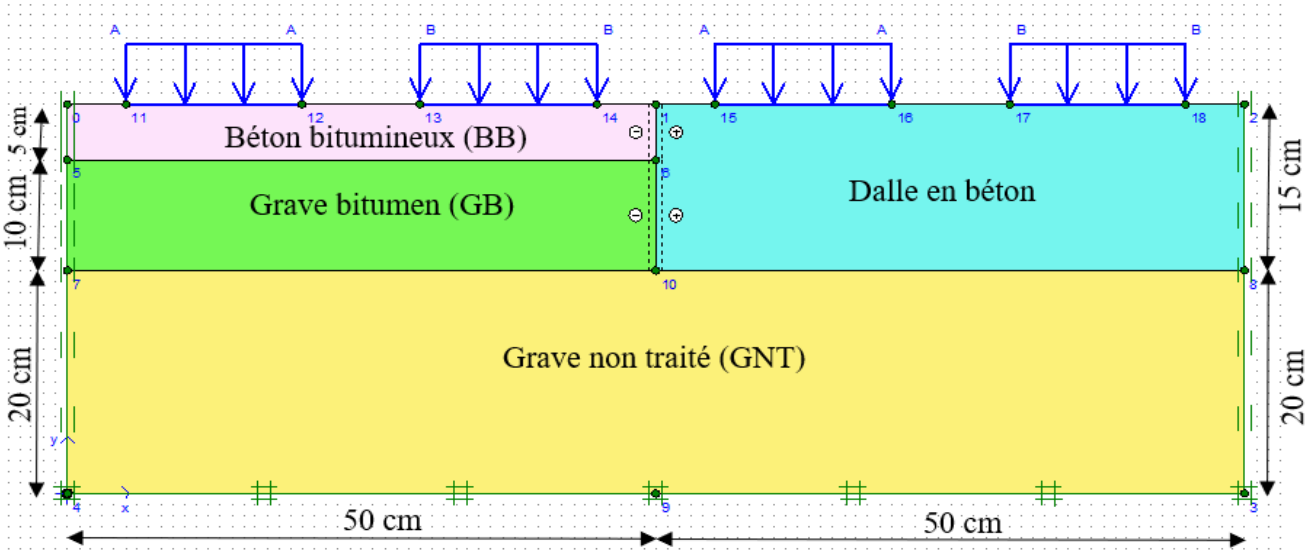


Figure 4.3 : Géométrie du modèle

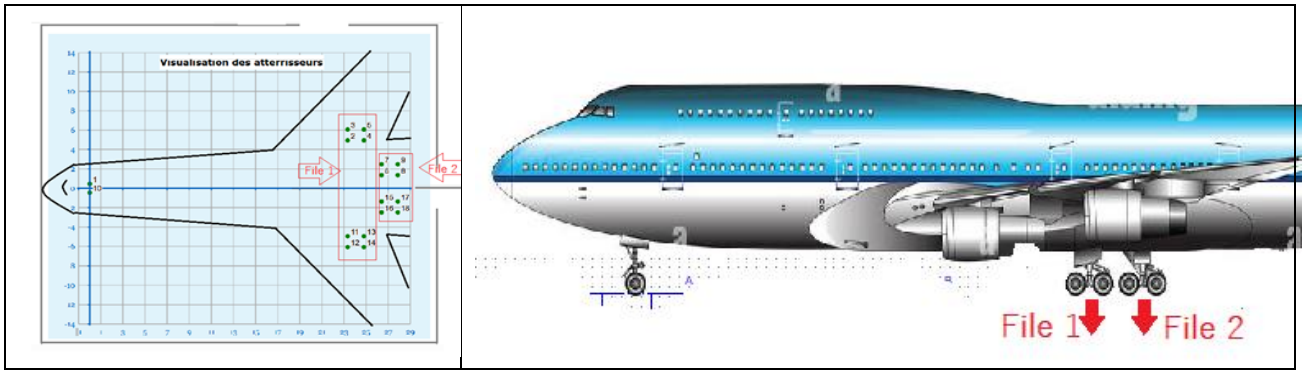


Figure 4.4 : Visualisation des Atterrisseurs type B747

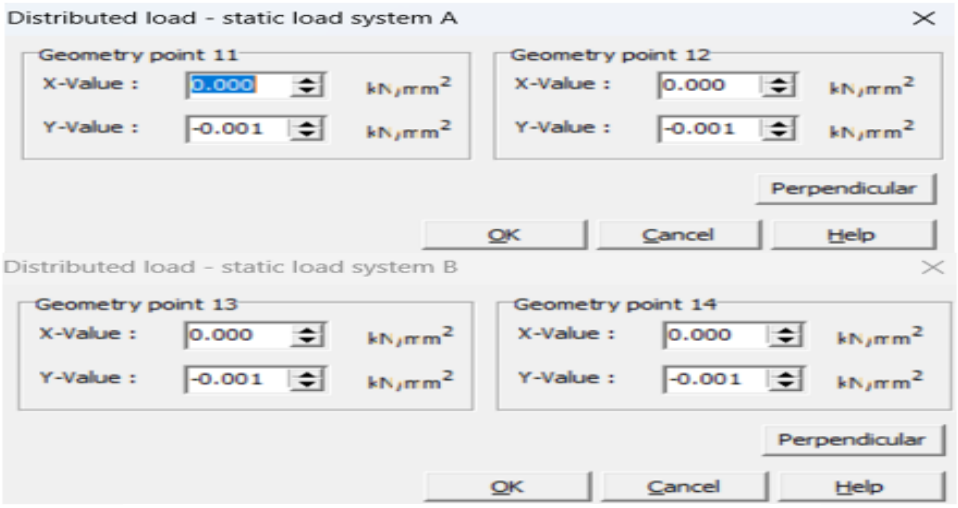


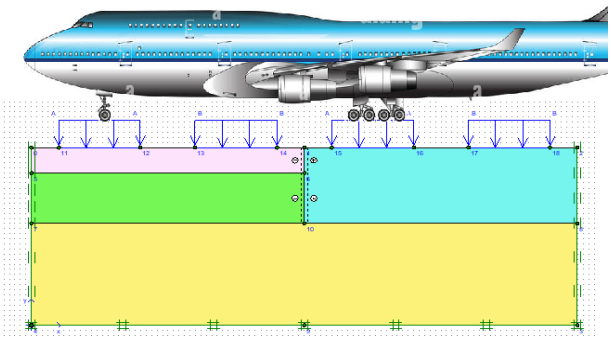
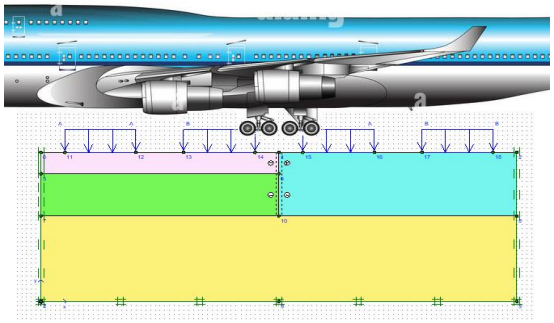
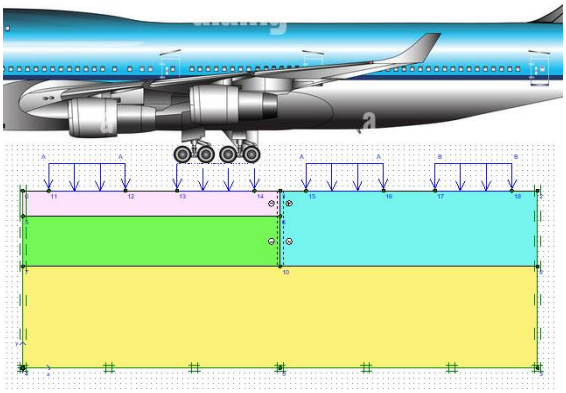
Figure 4.5 : Charge de File 1(A) et File 2(B)

3.2. Scénarios de chargement :

Dans le cadre de cette étude, plusieurs scénarios de chargement ont été définis afin de représenter les conditions réelles d'exploitation des chaussées aéronautiques :

1. **Chargement en pleine zone rigide :** Cette configuration permet d'étudier le comportement de la dalle en béton seule sous un appui quasi-concentré, et d'évaluer la manière dont la rigidité du matériau absorbe les charges sans générer de déformation excessive.
2. **Chargement centré sur la jonction rigide–souple :** Ce scénario vise à simuler la situation la plus critique, où l'une des roues principales du train d'atterrissage repose directement sur la zone de transition entre la chaussée rigide et la chaussée souple. Ce cas met en évidence les effets de tassement différentiel et de concentration des contraintes à l'interface.
3. **Chargement en pleine zone souple :** Dans ce scénario, les efforts sont appliqués uniquement sur la structure bitumineuse. Il permet de comparer le niveau de déformation et l'enfoncement relatif par rapport à la zone rigide, mettant en évidence la sensibilité accrue des couches souples aux efforts répétés (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Conditions de chargement selon les différents scénarios de circulation (SC)

Scenario de Circulation	Mode de Chargement par rapport à la Jonction
SC-1	
SC-2	
SC-3	

4. Génération du maillage :

- Ce modèle se fait par des éléments à 15 nœuds.
- Le nombre d'éléments est de 134 éléments et
- Le nombre de nœuds est de 1165 nœuds qui résulte 1608 points sollicites comme il est représenté sur la (Figure 4.6).

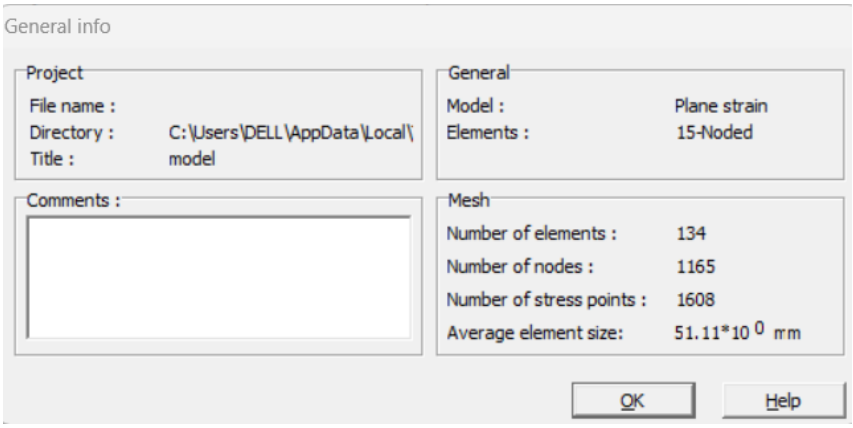


Figure 4.6 : Informations générales du maillage

Le maillage du modèle étudié est présenté dans la figure suivante :

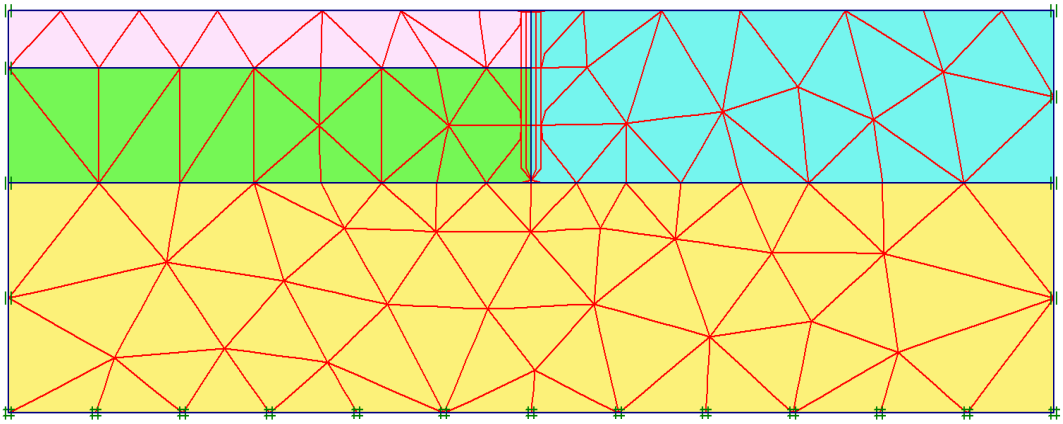


Figure 4.7 : Maillage du modèle

5. Conditions initiales :

Dans cette modélisation, aucune nappe phréatique n'est présente. Le niveau d'eau est donc considéré en dessous du domaine étudié, ce qui implique l'absence de pressions interstitielles dans l'état initial. La fonction "Initial Conditions" du logiciel PLAXIS est utilisée uniquement pour générer l'état de contraintes géostatiques liées au poids propre des matériaux.

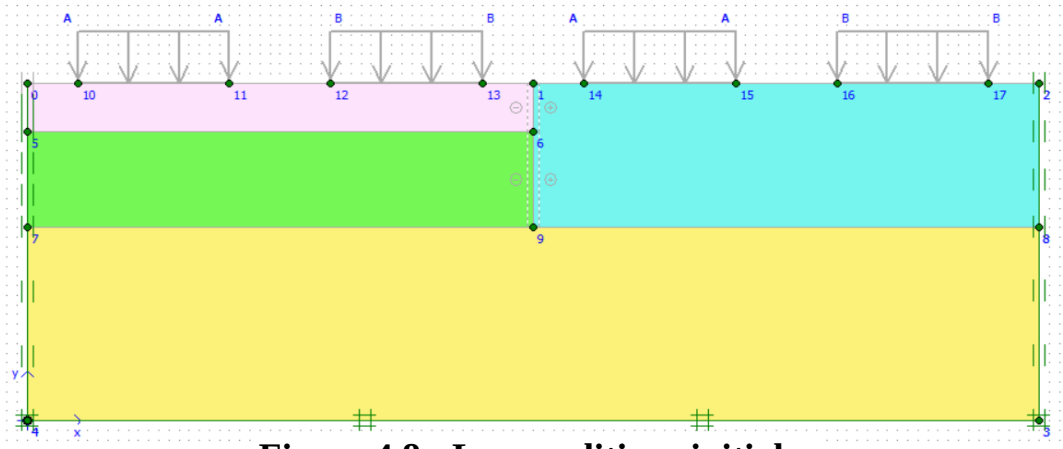


Figure 4.8 : Les conditions initiales

La figure suivante va représenter le champ des contraintes effectives avant le chargement comme ci-dessous :

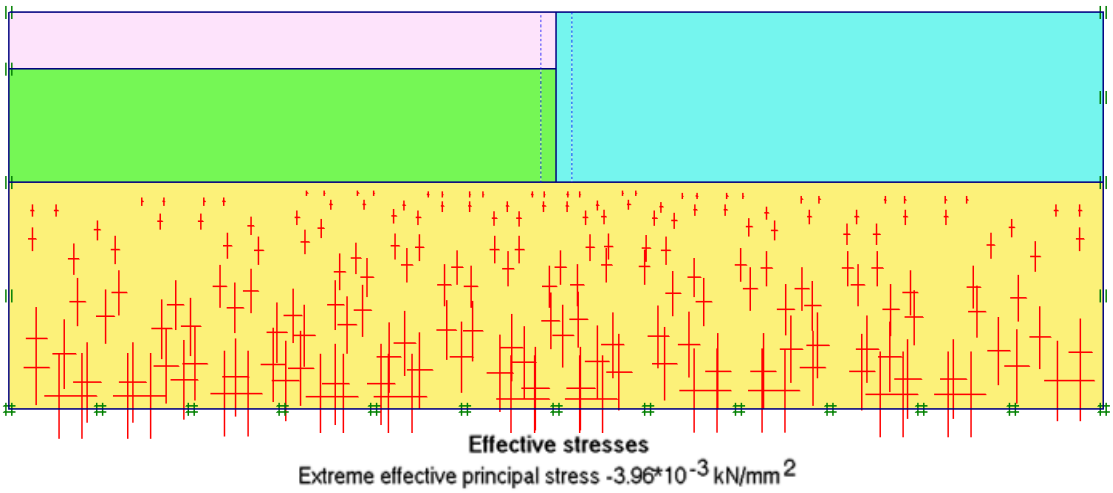


Figure 4.9 : Champ des contraintes effectives avant chargement

6. Examen des résultats :

- **Phase initiale :** Initiation des contraintes (procédure K_0)
- **Phase 1 :** Activation des charges sur la chaussée rigide.
- **Phase 2 :** Activation des charges sur la zone de jonction entre la chaussée souple/rigide.
- **Phase 3 :** Activation des charges sur la chaussée souple.

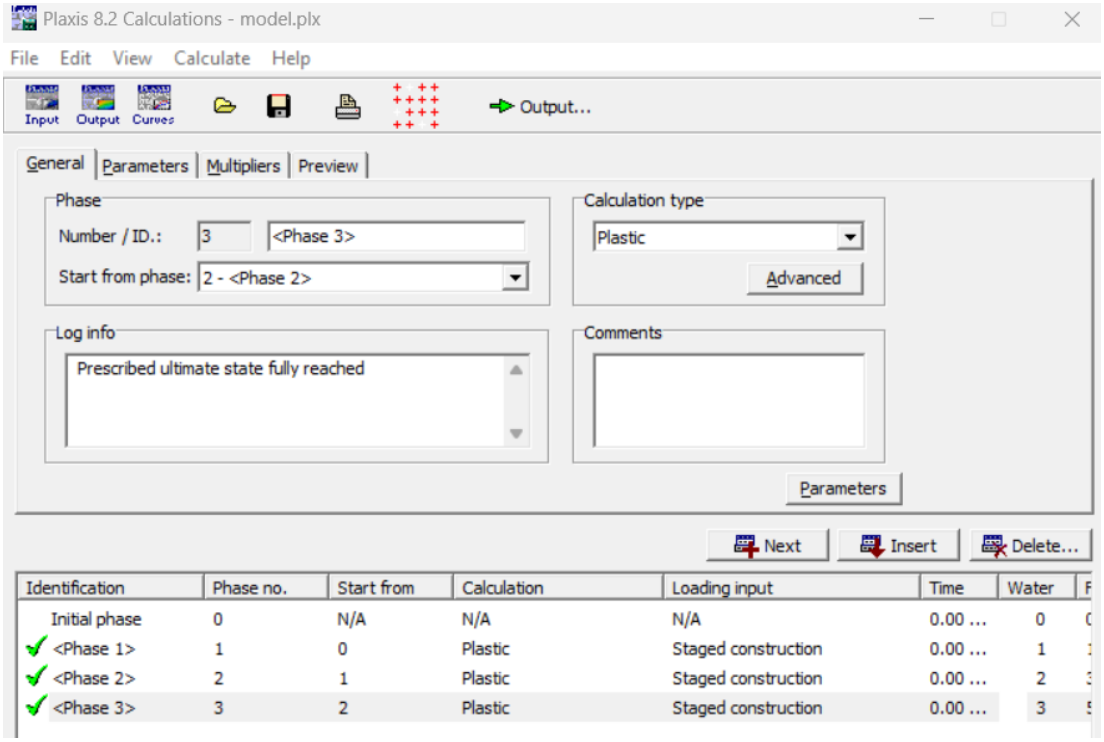


Figure 4.10 : Les phases de calcul

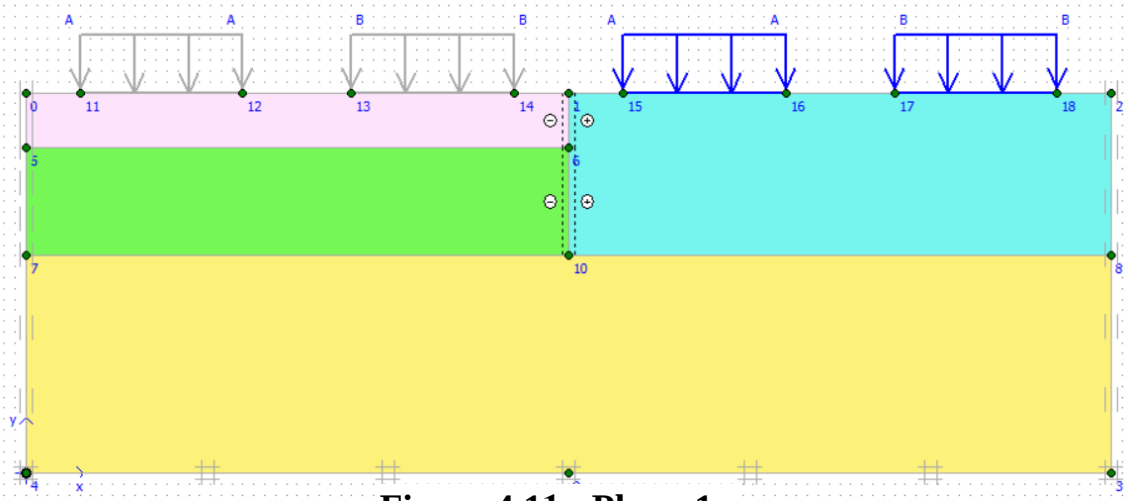


Figure 4.11 : Phase 1

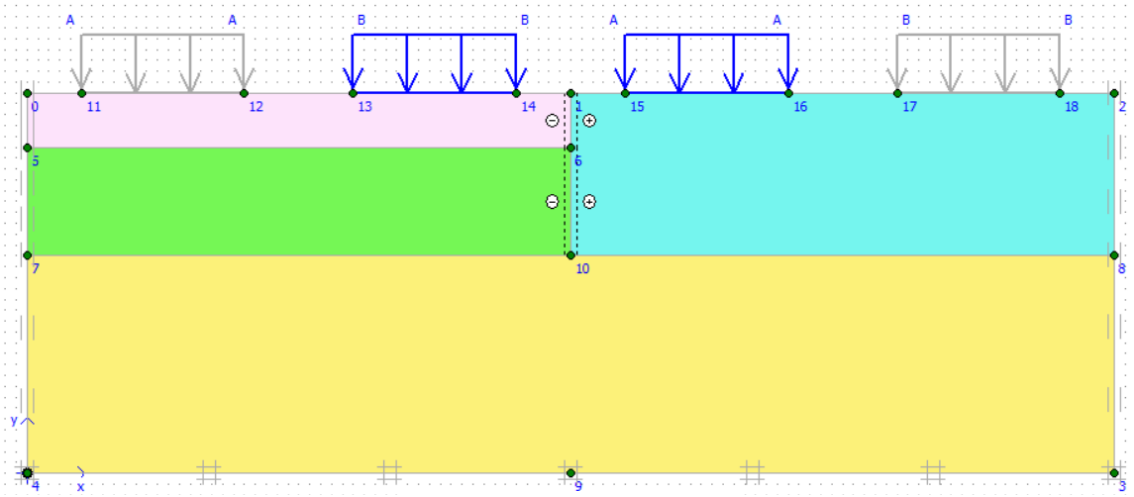


Figure 4.12 : Phase 2

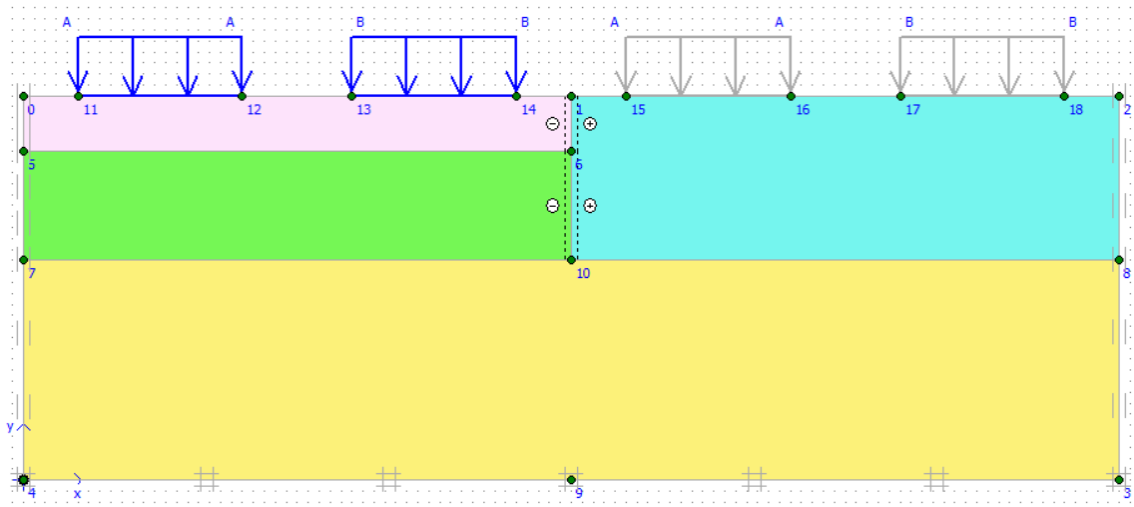


Figure 4.13 : Phase 3

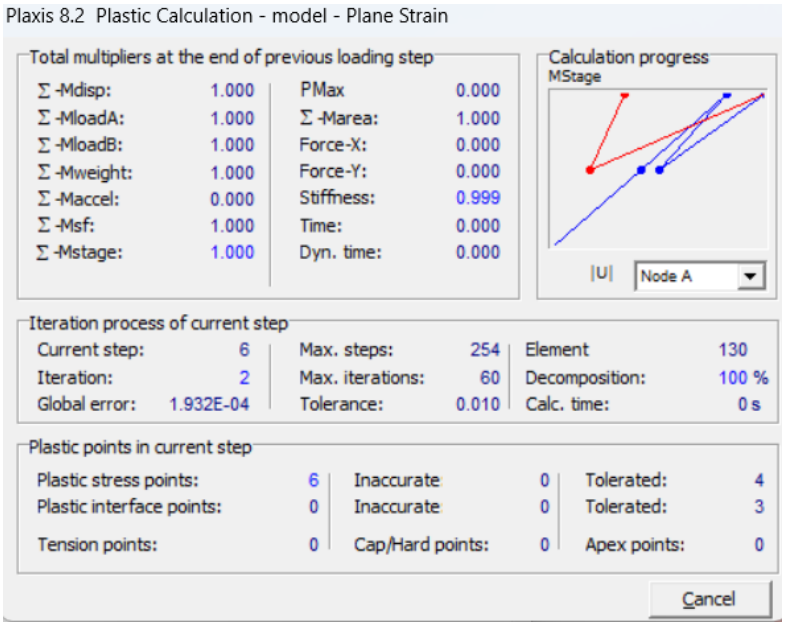


Figure 4.14 : Informations de calcul en phase

Après avoir lancé les calculs, les résultats peuvent être examinés pour chacune des phases avec le programme Output.

6.1. Résultats de la phase 1 :

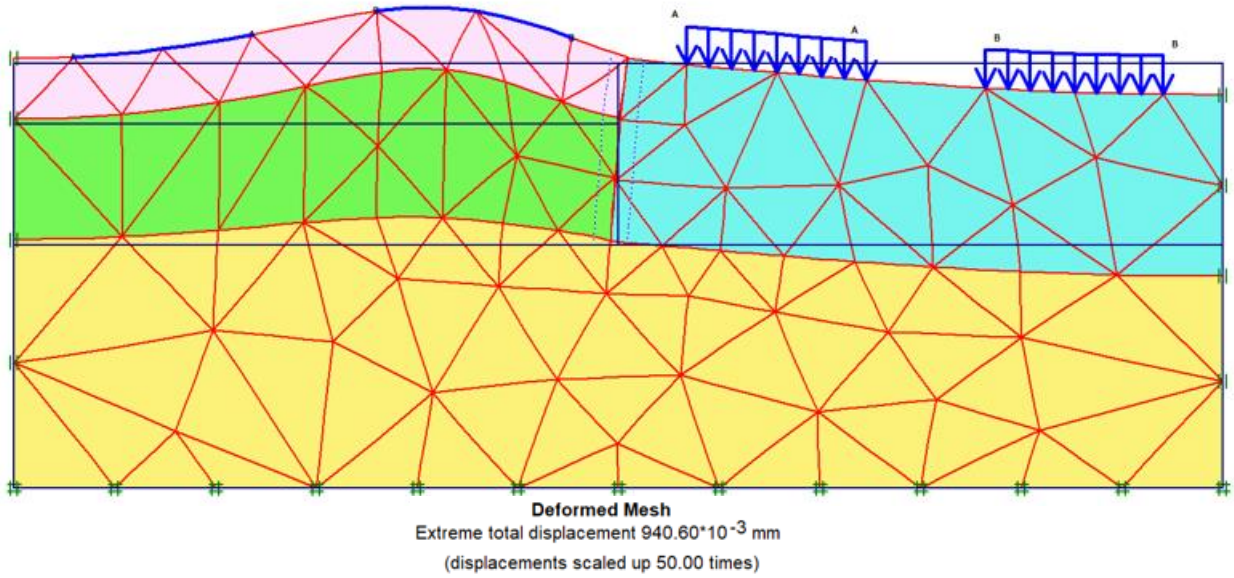


Figure 4.15 : Déformations totales du maillage de la phase 1

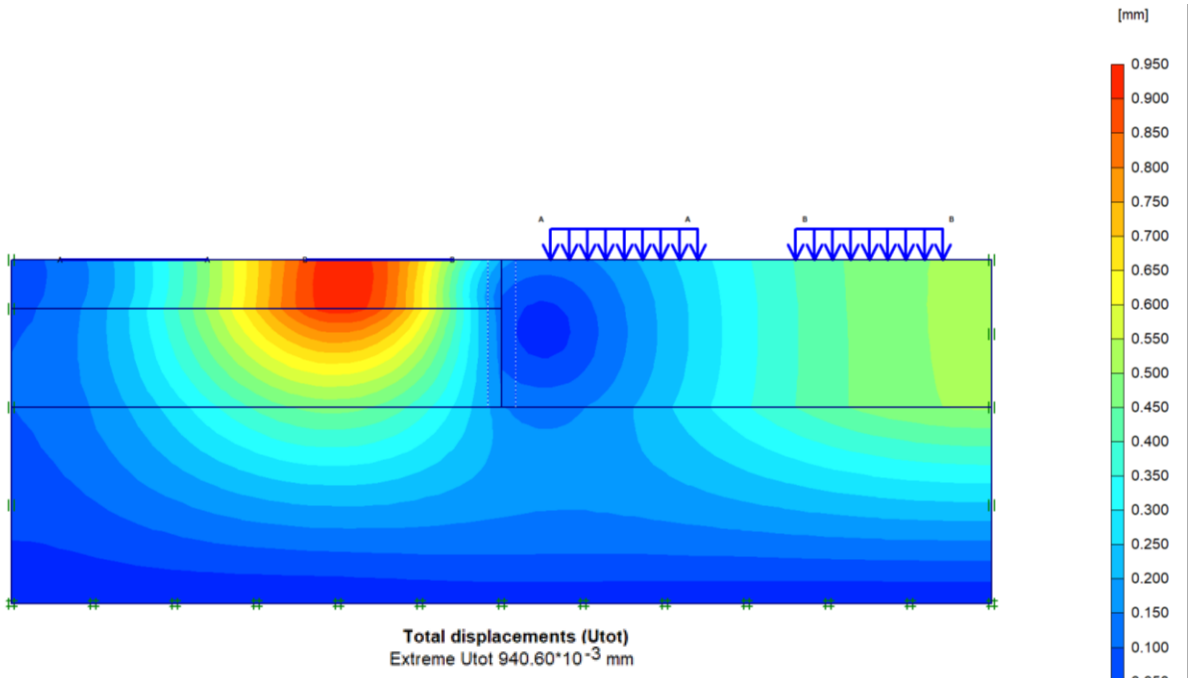


Figure 4.16 : Déplacements totaux de la phase 1

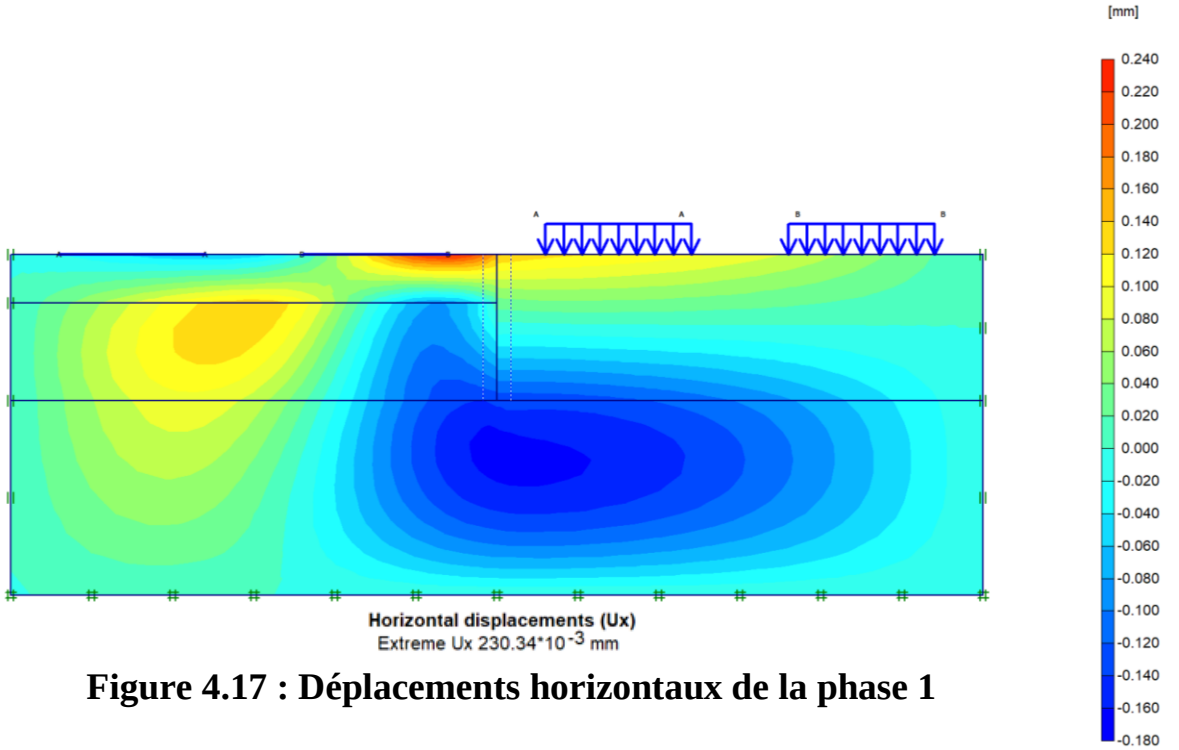


Figure 4.17 : Déplacements horizontaux de la phase 1

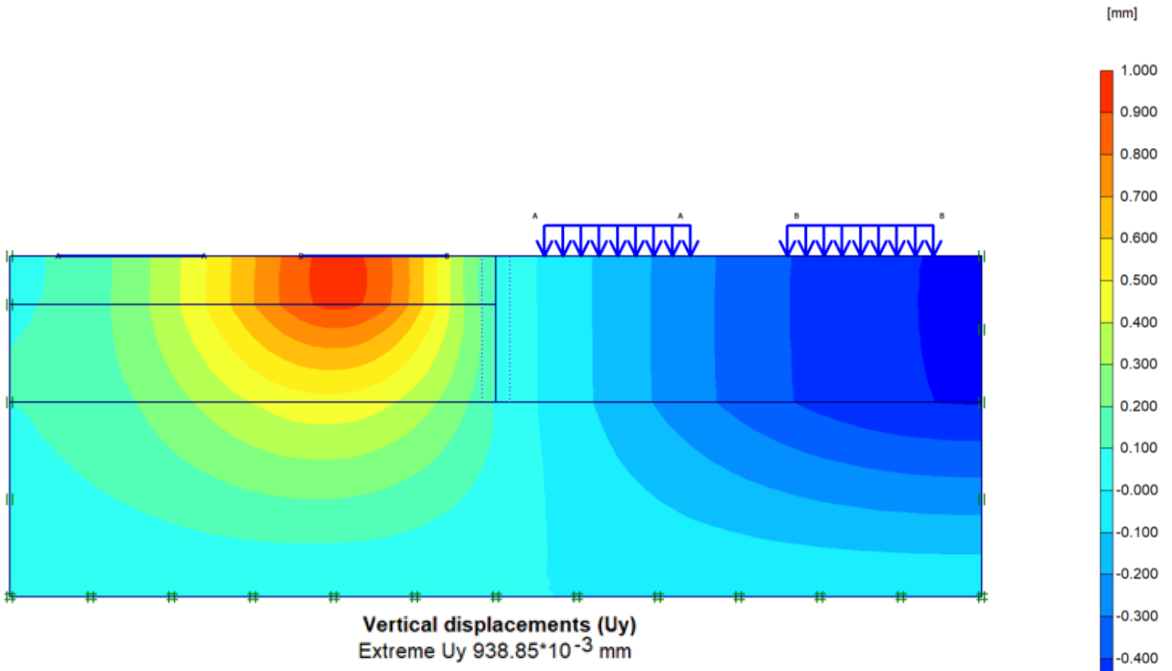


Figure 4.18 : Déplacements verticaux de la phase 1

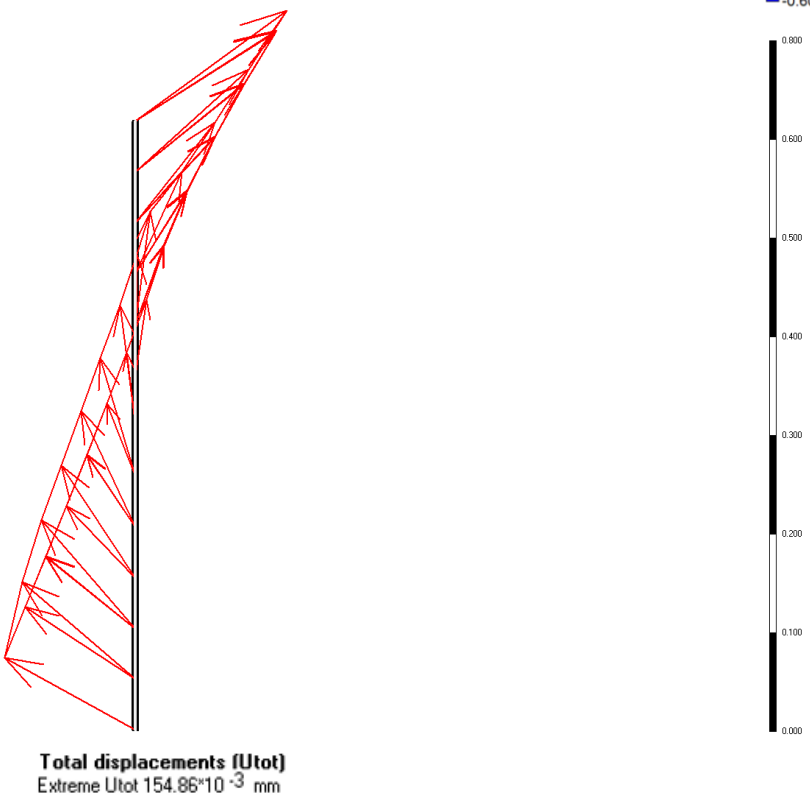


Figure 4.19 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple

6.1.1. Commentaires sur la Phase 1 :

- **Stabilité du modèle :** Lors de la phase 1, le modèle a convergé sans difficulté, indiquant une bonne stabilité globale de la structure sous la charge appliquée. Aucun message d'erreur ni d'instabilité n'a été signalé par PLAXIS, ce qui confirme la validité des conditions aux limites et des propriétés des matériaux utilisés.
- **Répartition des contraintes :** Les contraintes verticales continuent de s'accumuler sous les zones de charge, avec une pénétration plus profonde dans le sol. On observe une concentration significative des contraintes du côté de la chaussée souple.
- **Déformation du système :** Les déplacements totaux et verticaux augmentent considérablement en Phase 1, indiquant une déformation accrue de la structure. Le déplacement vertical maximal (U_y) est 938.85 × 10^{-3} mm, et le déplacement horizontal maximal (U_x) est 230.34 × 10^{-3} mm.
  La chaussée souple subit des déformations nettement plus importantes par rapport à la chaussée rigide.
- **Comportement à l'interface rigide/souple :** La discontinuité à l'interface rigide/souple devient de plus en plus prononcée, soulignant la différence de comportement entre les deux sections de la chaussée sous charge croissante. Il est essentiel de surveiller cette zone pour les signes de rupture ou de défaillance.
- **Effet du maillage :** Le maillage reste globalement adéquat, mais les grandes déformations en Phase 1 pourraient nécessiter un raffinement supplémentaire du maillage dans les zones critiques pour maintenir la précision des résultats.

6.2. Résultats de la phase 2 :

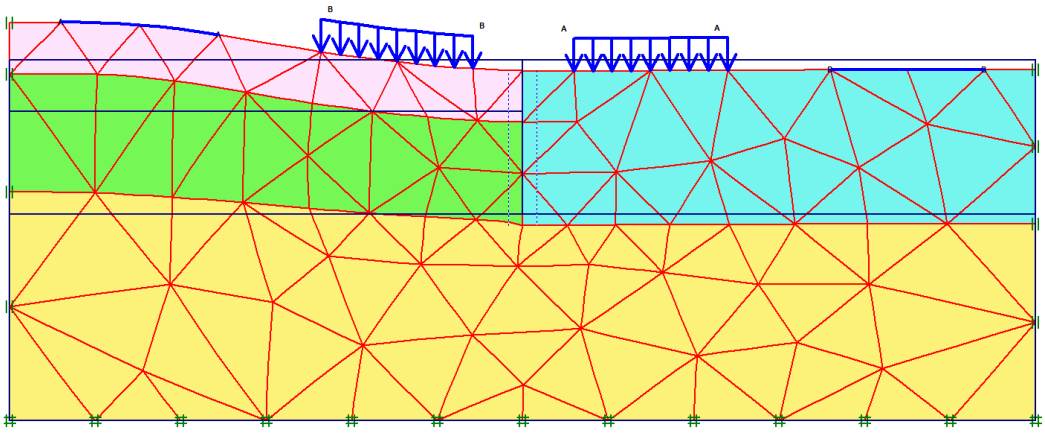


Figure 4.20 : Déformations totales du maillage de la phase 2

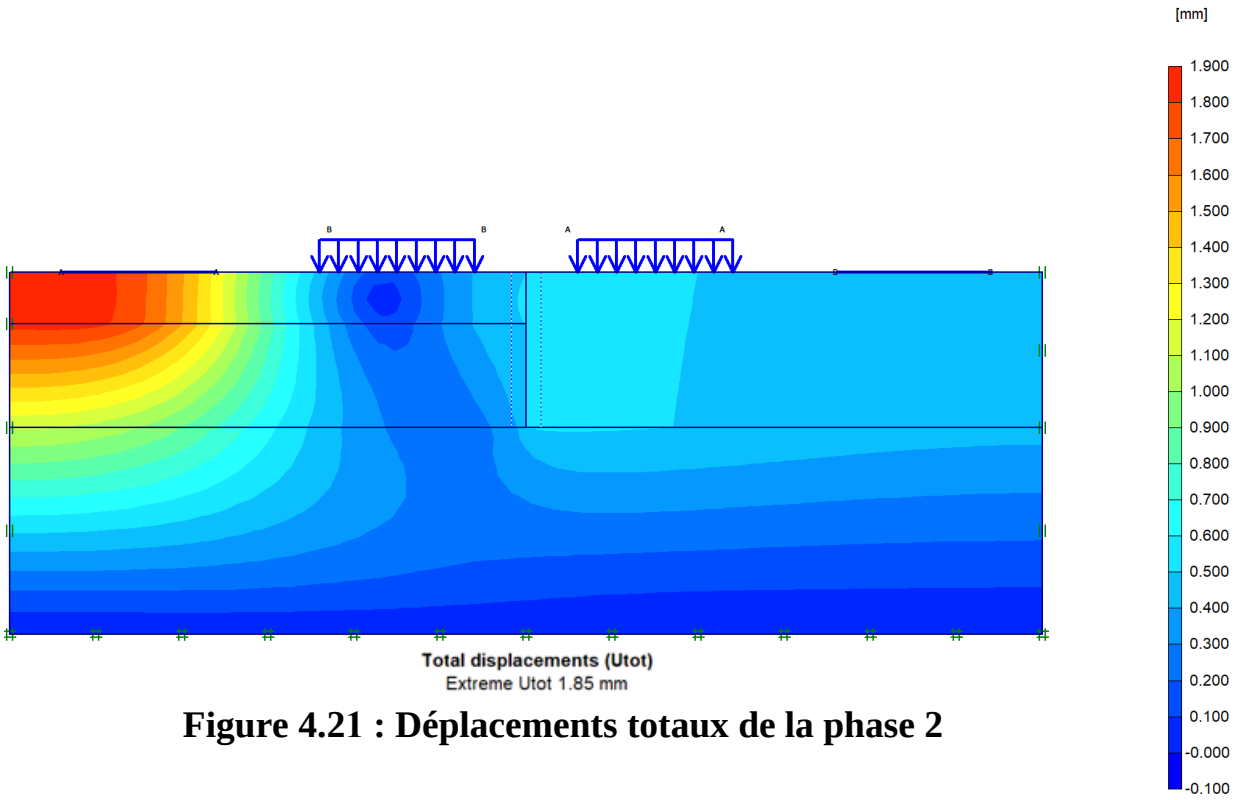


Figure 4.21 : Déplacements totaux de la phase 2

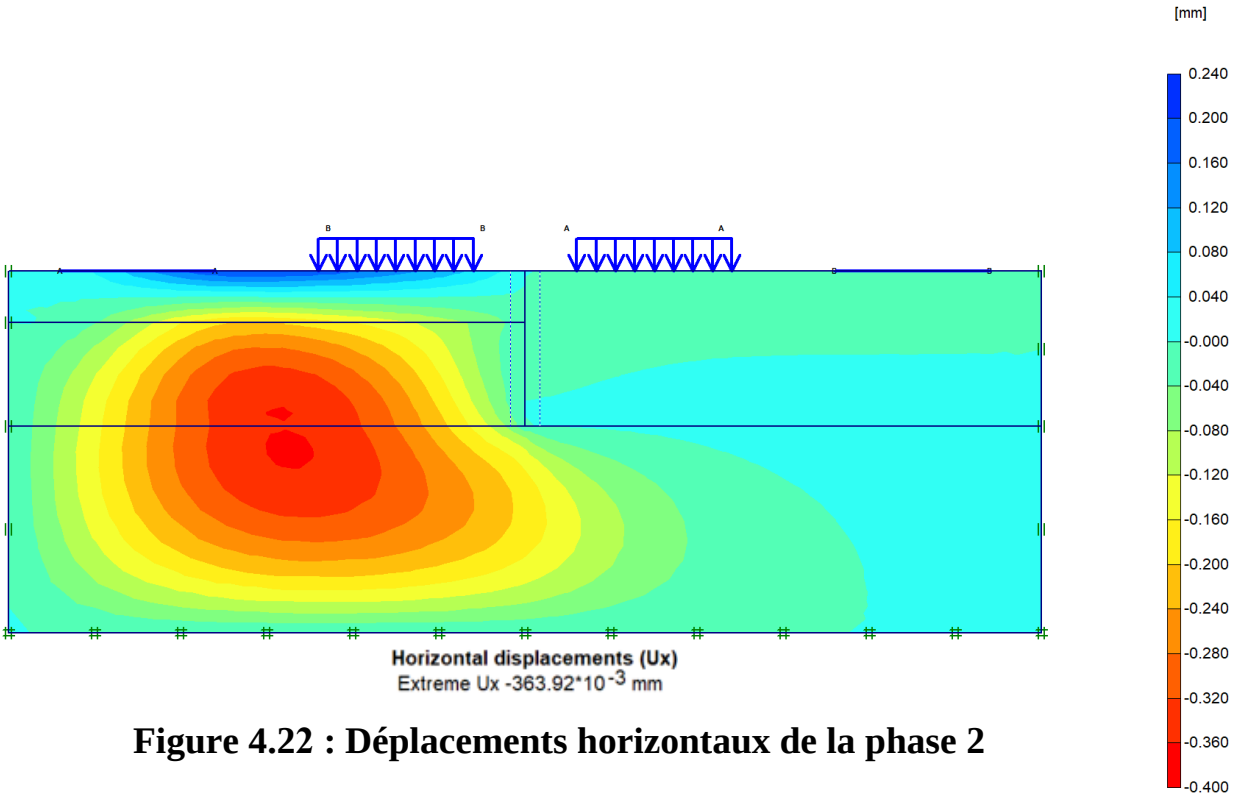


Figure 4.22 : Déplacements horizontaux de la phase 2

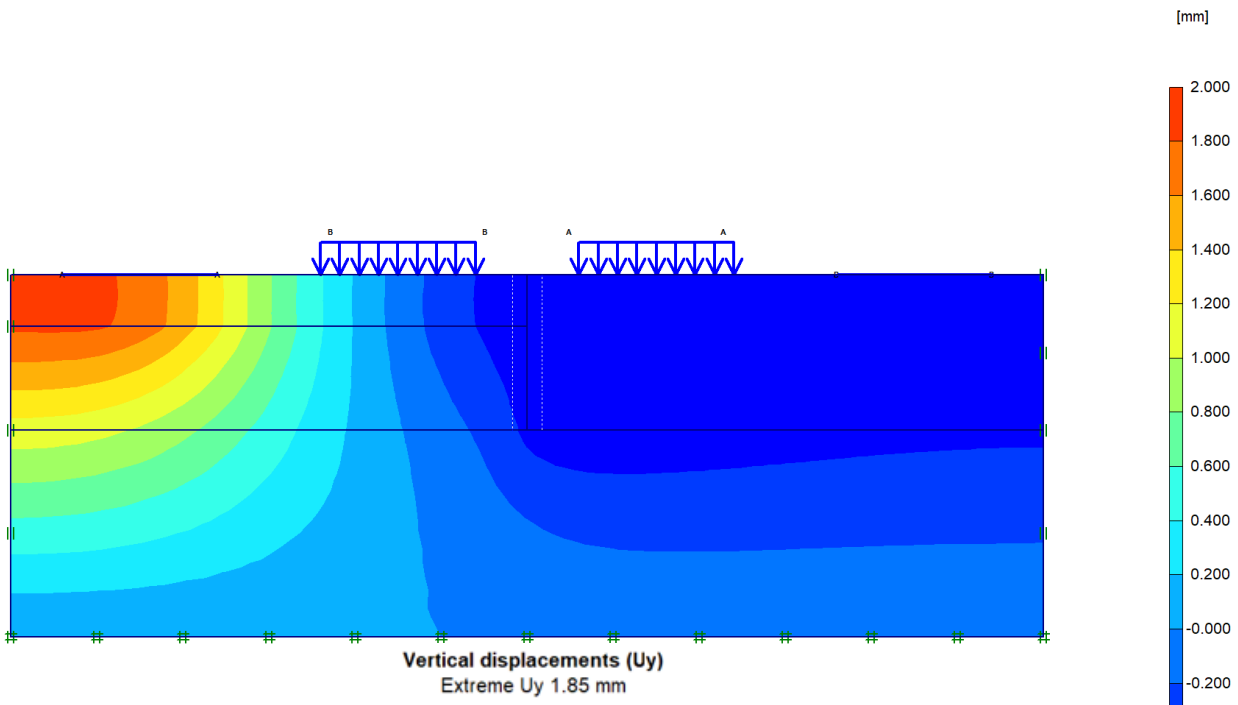


Figure 4.23 : Déplacements verticaux de la phase 2

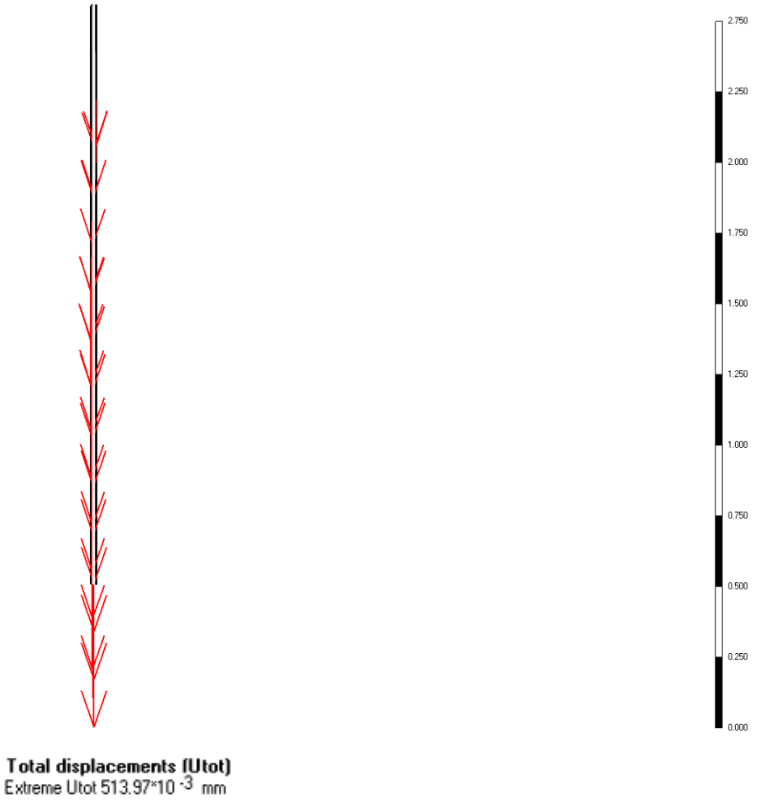


Figure 4.24 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple

6.2.1. Commentaires sur la Phase 2 :

- **Stabilité du modèle :** Le modèle continue de montrer une bonne stabilité avec l'ajout de la charge dans la Phase 2. La solution a convergé sans erreur notable, indiquant que la structure peut supporter la charge accrue sans instabilité numérique.
- **Répartition des contraintes :** L'application du second ensemble de charges a entraîné une distribution plus large des contraintes verticales sur la surface de la chaussée. On observe des concentrations de contraintes qui se chevauchent, en particulier dans les couches de fondation, ce qui suggère un effet cumulatif des charges. Les schémas de distribution des contraintes indiquent que les deux groupes de charges contribuent à l'état de contrainte global, avec une augmentation notable de l'intensité de la contrainte sous les charges nouvellement appliquées.
- **Déformation du système :** Les déplacements totaux ont augmenté en Phase 2, comme prévu avec la charge ajoutée. Le déplacement vertical maximal est de 1.85mm. Les déplacements horizontaux montrent également une zone d'influence plus large, avec une valeur maximale de 363.92×10^{-3}mm. La déformation est plus prononcée sur le côté de la chaussée souple.
- **Comportement à l'interface rigide/souple :** La discontinuité dans les déplacements et les contraintes à l'interface chaussée rigide/souple persiste et peut être légèrement amplifiée en raison de la charge supplémentaire. Cela souligne les réponses de rigidité différentes des deux types de chaussée. Il est crucial de surveiller cette zone pour détecter tout tassement différentiel ou concentration de contraintes potentiels qui pourraient entraîner une détérioration prématurée.
- **Effet du maillage :** Le maillage reste adéquat pour capturer les schémas de déformation et de contrainte. Le maillage raffiné dans les zones chargées est essentiel pour résoudre avec précision les concentrations de contraintes et les gradients de déplacement.

6.3. Résultats de la phase 3 :

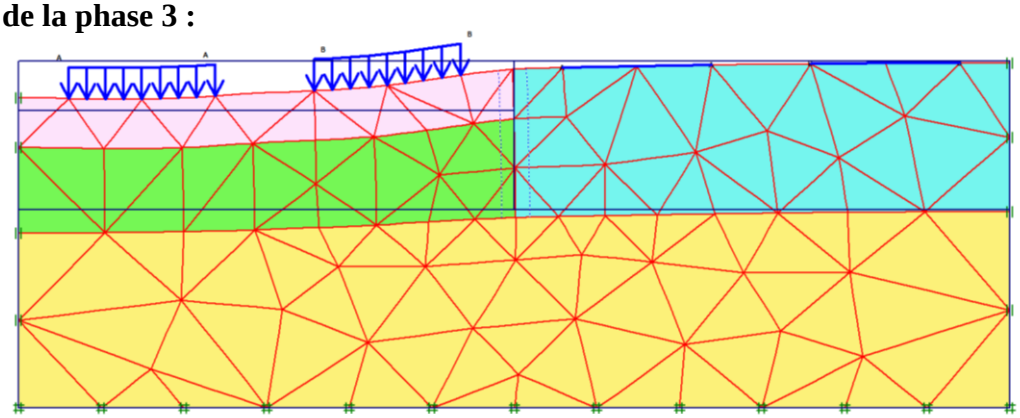


Figure 4.25 : Déformations totales du maillage de la phase 3

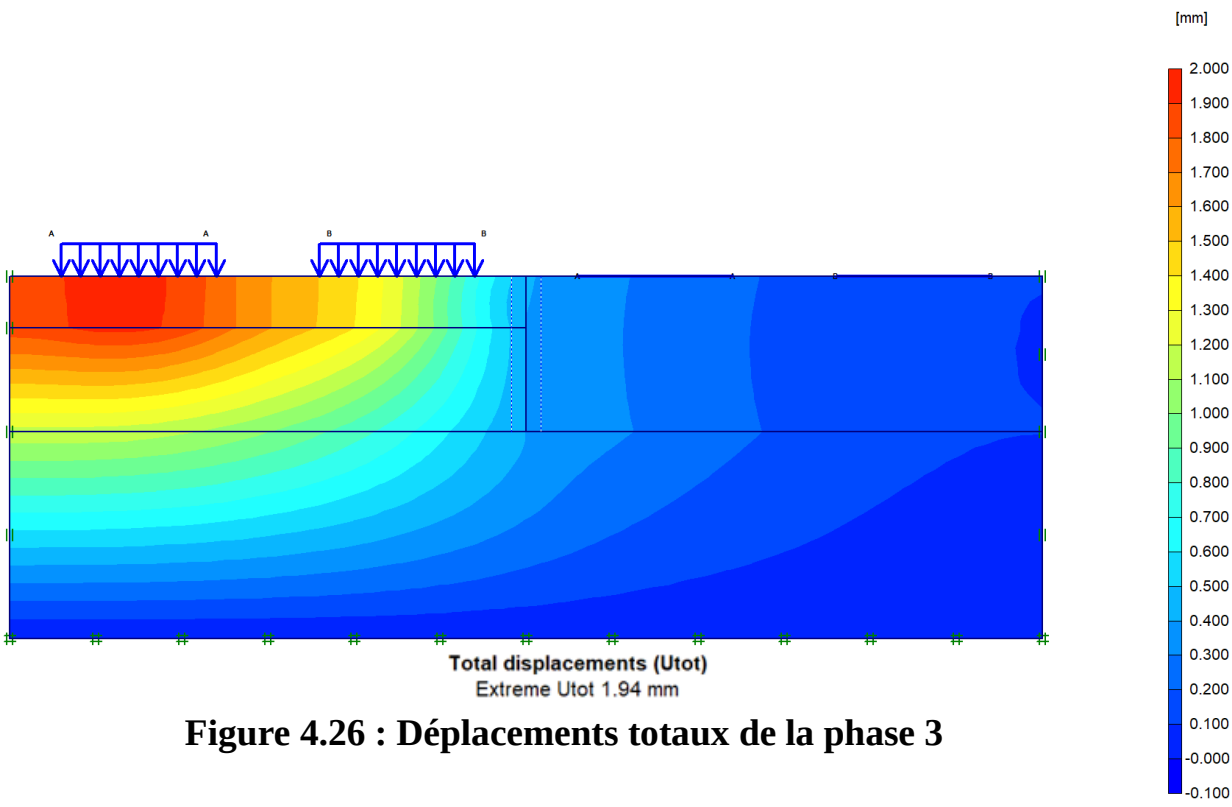


Figure 4.26 : Déplacements totaux de la phase 3

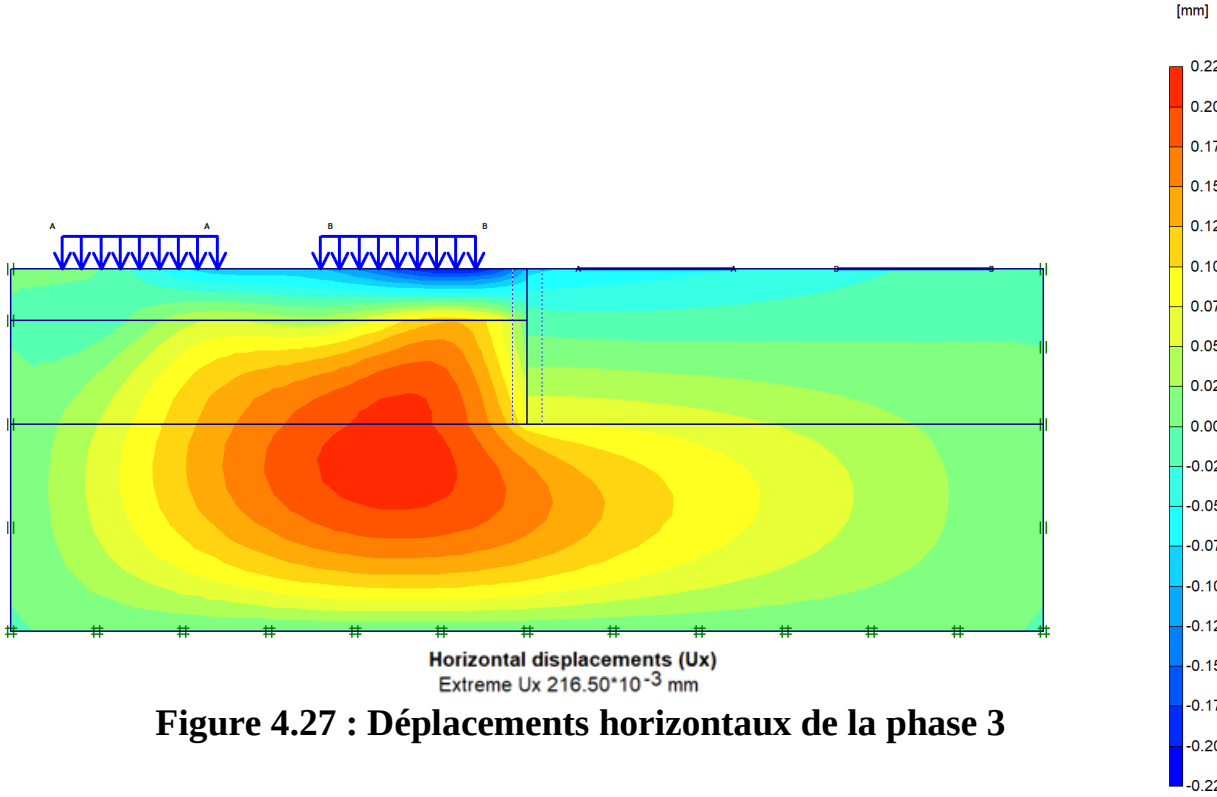


Figure 4.27 : Déplacements horizontaux de la phase 3

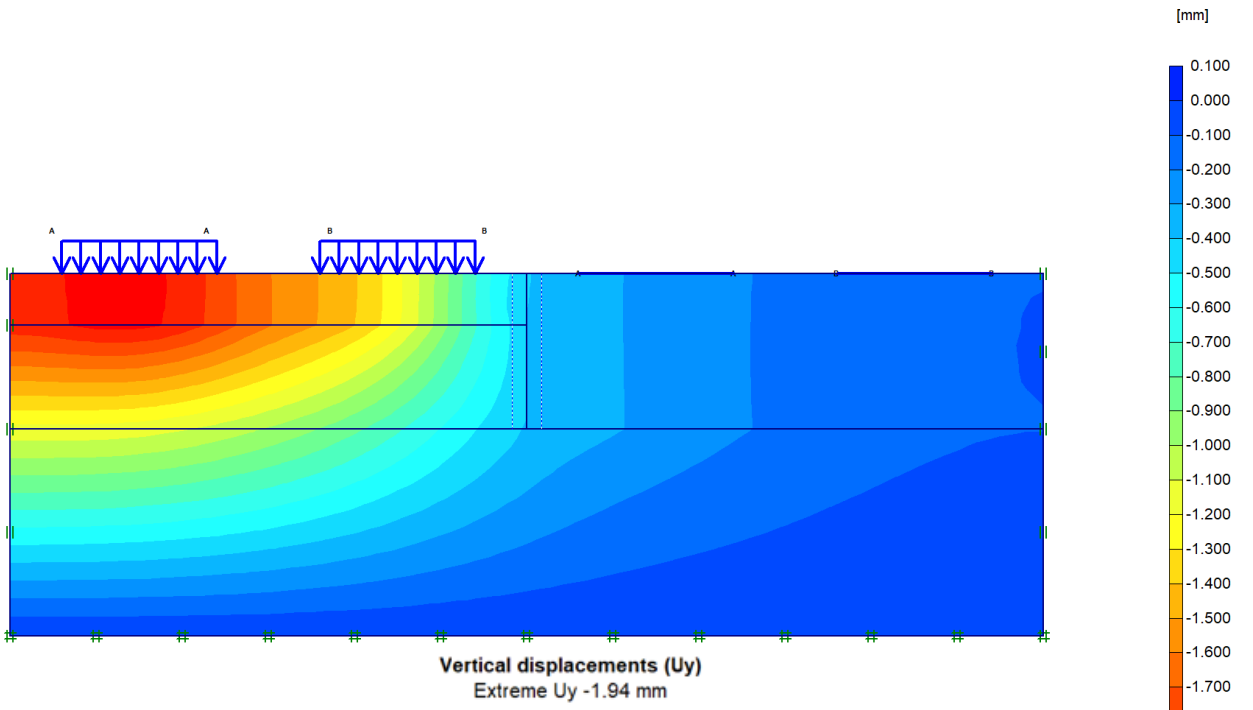


Figure 4.28 : Déplacements verticaux de la phase 3

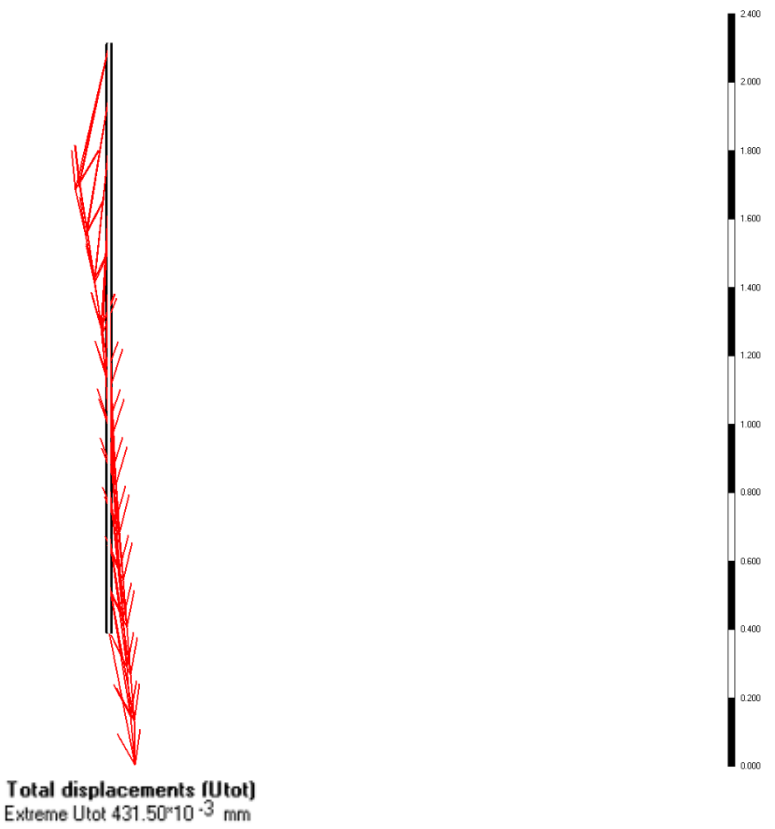


Figure 4.29 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple

6.3.1. Commentaires sur la Phase 3 :

- **Stabilité du modèle :** Lors de la phase 3, le modèle a convergé sans difficulté, malgré les conditions de chargement plus sévères. Cela montre une bonne stabilité globale de la structure, même sous des sollicitations importantes. Aucun message d'erreur ou d'instabilité n'a été signalé par PLAXIS, ce qui confirme la robustesse du modèle.
- **Répartition des contraintes :** Les contraintes verticales sont fortement concentrées sous les zones de contact des roues, avec une diffusion encore plus profonde dans les couches inférieures. La couche granulaire (GNT) continue d'assurer une transmission efficace des efforts, mais une accumulation plus importante est visible dans la zone souple.
- **Déformation du système :** Les déplacements verticaux (U_y) sont désormais plus étendus et plus importants, notamment dans la chaussée souple. La dalle en béton de la chaussée rigide maintient toujours une déformation limitée, ce qui confirme son rôle de structure de répartition des charges. La différence de comportement entre les deux types de chaussée est encore plus marquée.
- **Comportement à l'interface rigide/souple :** Une discontinuité plus nette dans les contraintes et les déplacements est observée à l'interface entre les deux types de chaussée. Cela met en évidence une différence de rigidité croissante sous l'effet des charges. Aucun signe immédiat de rupture n'est détecté, mais cette zone représente un point critique à surveiller.
- **Effet du maillage :** Le raffinement du maillage autour de la zone de contact permet toujours une bonne précision des résultats. Toutefois, vu l'intensité des déformations en Phase 3, un raffinement supplémentaire localisé dans les zones les plus sollicitées pourrait améliorer la précision numérique.

6.4. Comparaisons :

Les tableaux suivants montrent les déplacements verticaux et horizontaux dans les différentes phases :

Tableau 4.2 : Graphiques montrant la différence des déplacements verticaux

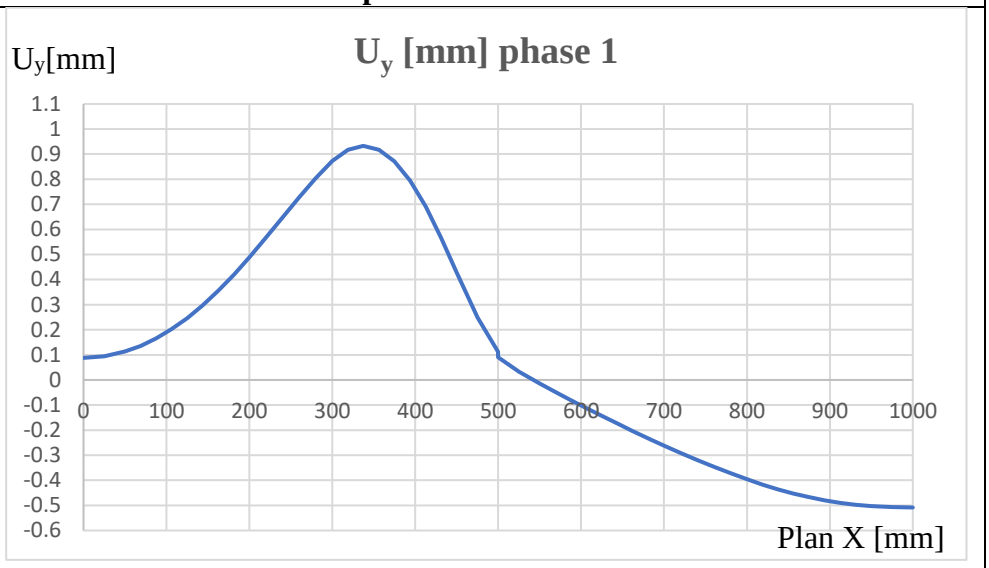
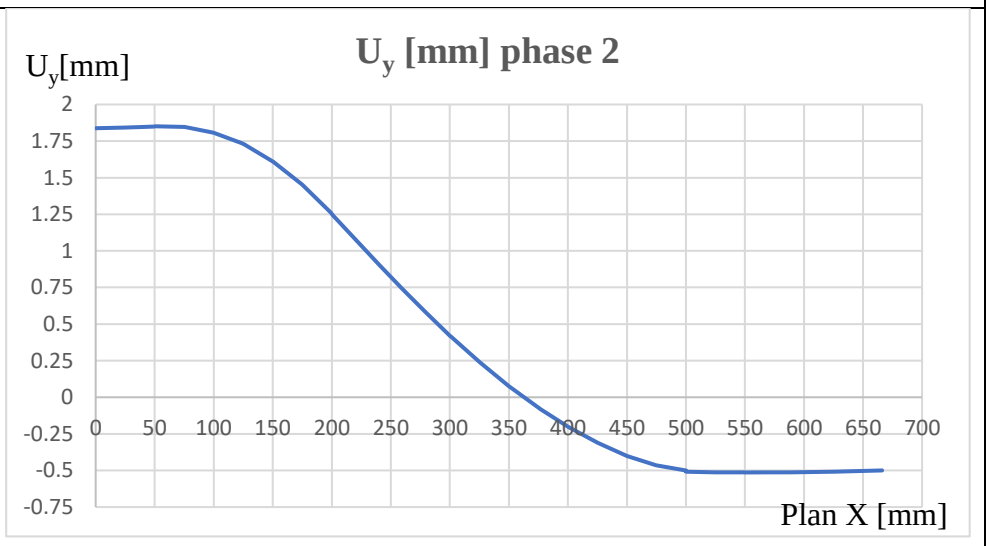
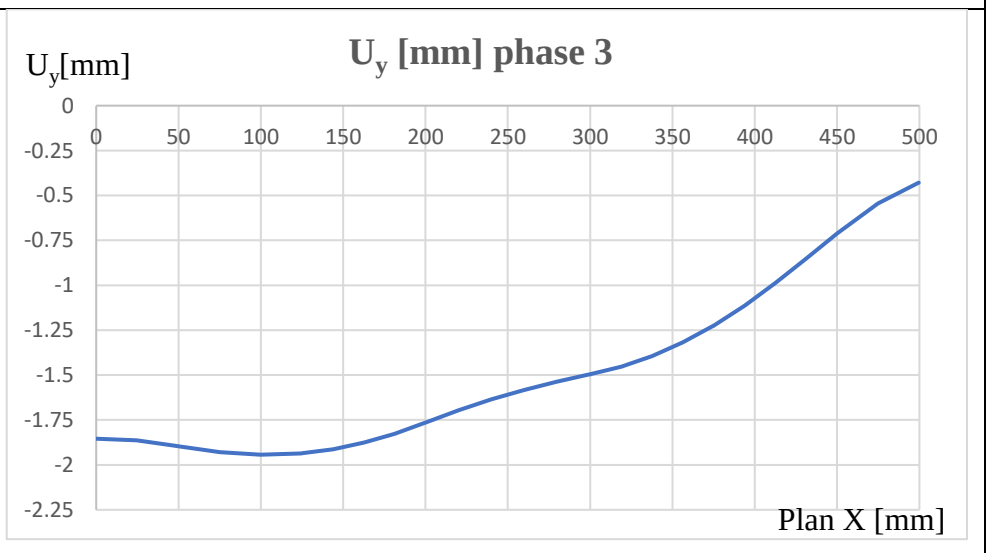
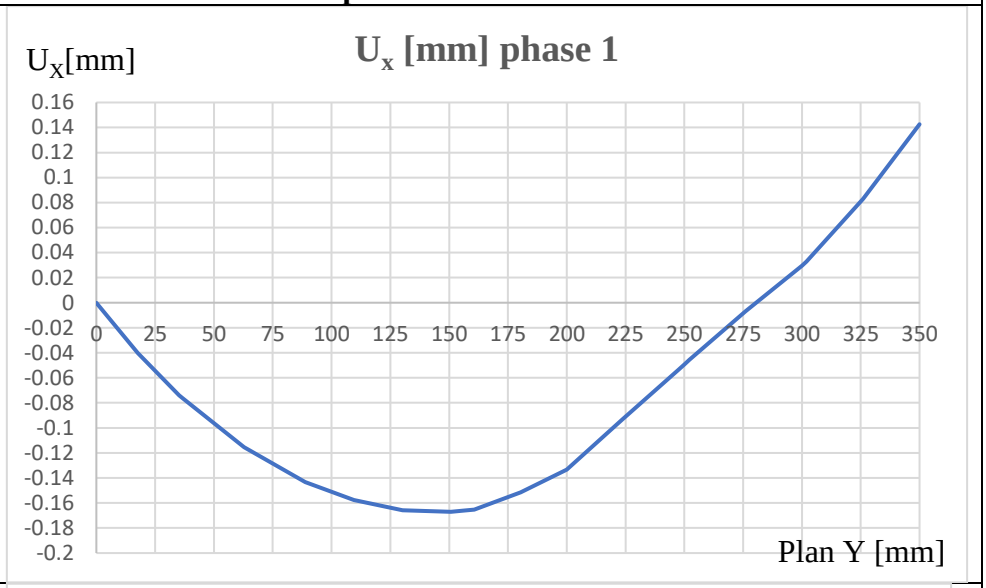
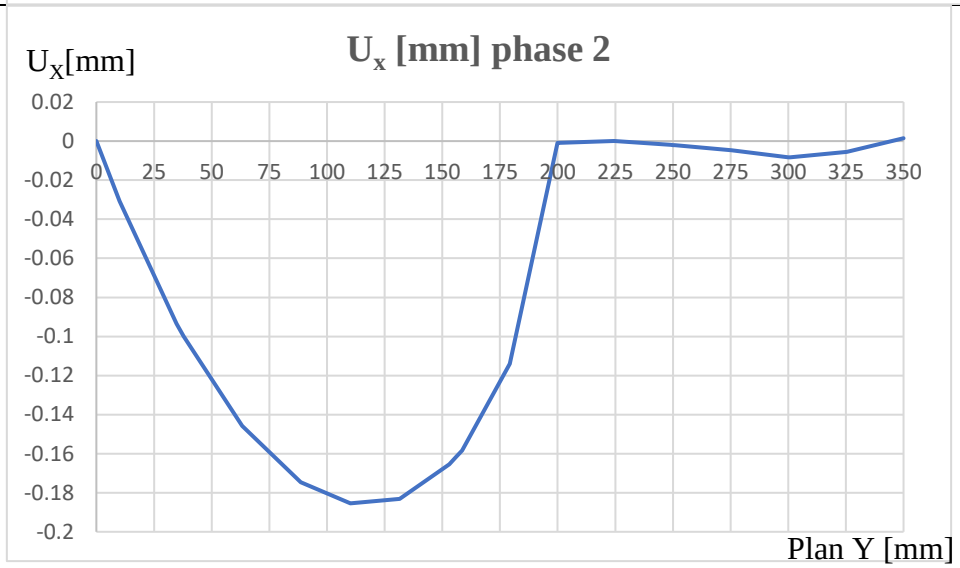
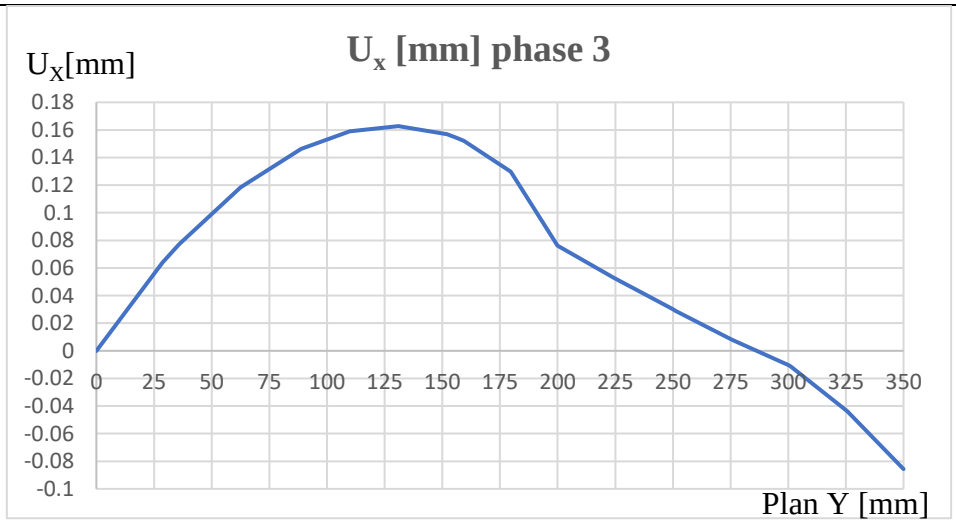
Phase	Déplacements verticaux
1ère Phase	
2ème Phase	
3ème Phase	

Tableau 4.3 : Graphiques montrant la différence des déplacements verticaux

Phase	Déplacements horizontaux
1ère Phase	
2ème Phase	
3ème Phase	

Les résultats des trois phases montrent une progression nette des déformations et des contraintes :

Tableau 4.4 : Tableau résumant toutes les différences

1ère Phase	2ème Phase	3ème Phase
La chaussée rigide seule absorbe bien les charges, avec une bonne stabilité et de faibles déformations.	La jonction rigide/souple commence à montrer des discontinuités et des déformations localisées.	Les déformations augmentent fortement, surtout dans la chaussée souple, et l'interface devient critique.

La comparaison entre les trois phases montre que :

- La chaussée rigide offre une très bonne performance en termes de stabilité et de limitation des déformations.
- La chaussée souple, plus sensible aux charges, génère des déplacements importants sous sollicitation.
- L'interface rigide/souple constitue le point critique du système, où des tassements différentiels et des concentrations de contraintes peuvent apparaître.

Ces résultats confirment l'importance de renforcer la zone de transition entre les deux types de chaussée et de suivre attentivement son comportement dans les structures aéroportuaires soumises à des charges lourdes comme celles des trains d'atterrissage d'un Boeing 747.

CHAPITRE V : ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

1. Introduction :

La conception et la maintenance des chaussées aéronautiques constituent un enjeu majeur pour la sécurité et la durabilité des infrastructures aéroportuaires. Parmi les zones les plus sensibles à la dégradation, la jonction entre une chaussée rigide et une chaussée souple se distingue par sa vulnérabilité accrue aux sollicitations mécaniques, en raison des différences de rigidité, de comportement en service et de réponse aux charges dynamiques. Cette discontinuité structurelle est notamment sujette à des tassements différentiels importants et à des concentrations de contraintes qui favorisent l'apparition de fissurations, de désintégration locale des matériaux, voire de défaillances prématurées.

Face à cette problématique, le recours à des techniques de renforcement par géogrille s'est largement développé ces dernières décennies. En particulier, les géogrilles unidirectionnelles, conçues pour résister efficacement à la traction dans une direction principale, offrent un potentiel significatif pour améliorer la performance mécanique des structures de chaussées. Leur intégration dans les couches de fondation ou de base permet notamment de redistribuer les contraintes, de limiter les déformations plastiques, et de réduire les tassements différentiels.

Dans ce contexte, la présente étude propose une analyse paramétrique visant à évaluer l'efficacité d'un renforcement par géogrille unidirectionnelle au niveau de la jonction rigide-souple d'une chaussée soumise à des charges aéronautiques lourdes, telles que celles générées par un Boeing 747. L'objectif principal est de déterminer l'influence de différents paramètres liés à la géogrille (position, rigidité, orientation), ainsi que des conditions de chargement, sur la réponse mécanique de la structure.

L'étude s'appuie sur une modélisation numérique bidimensionnelle réalisée à l'aide du logiciel Plaxis 2D, permettant de simuler le comportement du sol et des matériaux de chaussée de manière réaliste. Les résultats obtenus visent à identifier les configurations optimales de renforcement susceptibles de minimiser les dégradations à la jonction et d'accroître la durabilité de la structure.

2. Renforcement par géogrille :

Les géogrilles unidirectionnelles sont constituées de polymères résistants (polyester, polyéthylène haute densité, polypropylène), extrudés ou tissés selon une structure ouverte permettant une interaction mécanique directe avec les granulats du sol. Leur rôle principal dans une structure de chaussée est de :

- Contenir les déplacements horizontaux des matériaux granulaires.
- Distribuer les charges verticales sur une plus grande surface.
- Réduire les concentrations de contraintes, notamment à l'interface rigide-souple.

Lorsque la géogrille est bien ancrée dans la couche granulaire, elle mobilise une résistance à la traction face aux forces induites par les charges verticales, créant un effet de membrane qui limite l'orniérage et les déformations excessives.

2.1. Avantages dans le cas d'une jonction rigide-souple :

Dans le cas spécifique de la jonction entre une chaussée rigide (dalle en béton) et une chaussée souple (structure bitumineuse sur support granulaire), l'introduction d'une géogrille unidirectionnelle permet :

- De réduire les tassements différentiels à l'interface des deux types de chaussées.
- D'améliorer la transition des rigidités, en créant une zone de dissipation progressive des contraintes.
- De retarder l'apparition des fissures de fatigue dans la couche bitumineuse adjacente à la dalle béton.
- D'augmenter la durée de vie de la structure dans cette zone sensible.

2.2. Paramètres influents :

L'efficacité du renforcement dépend de plusieurs paramètres, notamment :

- La profondeur d'installation de la géogrille (souvent placée dans la couche de fondation).
- Le module de traction (exprimé en kN/mm).
- L'orientation par rapport à l'axe de la chaussée (doit être alignée avec la direction principale des contraintes).
- La qualité du compactage des matériaux granulaires autour de la grille.



Figure 5.1 : Géogrille de renforcement

3. Scénarios de renforcement :

Ces scénarios d'analyse visent à étudier l'effet du renforcement de la structure de chaussée soumise à des charges élevées à travers différentes configurations, après l'introduction d'une géogrille. L'objectif est de mieux comprendre la répartition des contraintes et des déformations dans chaque situation.

Une géogrille unidirectionnelle du EA=1100 KN/mm du est introduite selon trois configurations distinctes :

1ère phase : Géogrille placée dans l'interface

Elle améliore l'adhérence entre les couches et limite les mouvements relatifs, ce qui renforce l'intégrité structurelle de la chaussée.

2ème phase : Géogrille placée entre la couche de GNT et la dalle ainsi qu'entre le GB

Cette position permet de renforcer la zone la plus sollicitée en profondeur, en limitant les tassements permanents et en améliorant la distribution des efforts.

3ème phase : Combinaison des deux cas précédents

C'est le scénario le plus performant, maximisant les avantages du renforcement en agissant à la fois sur l'interface et sur les couches de fondation.

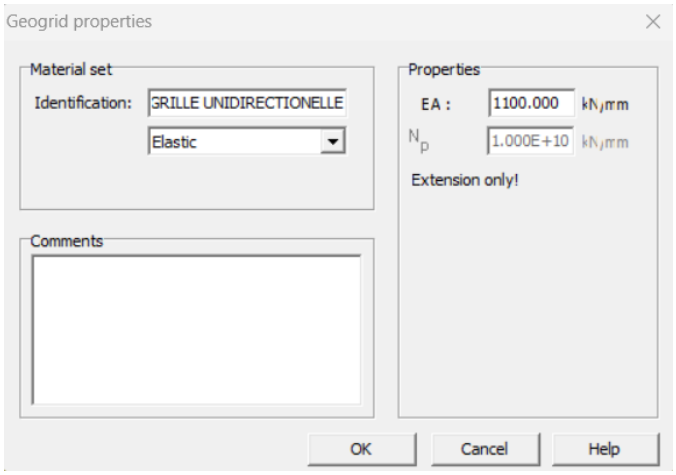


Figure 5.2 : Paramètres du géogrille

4. Examen des résultats :

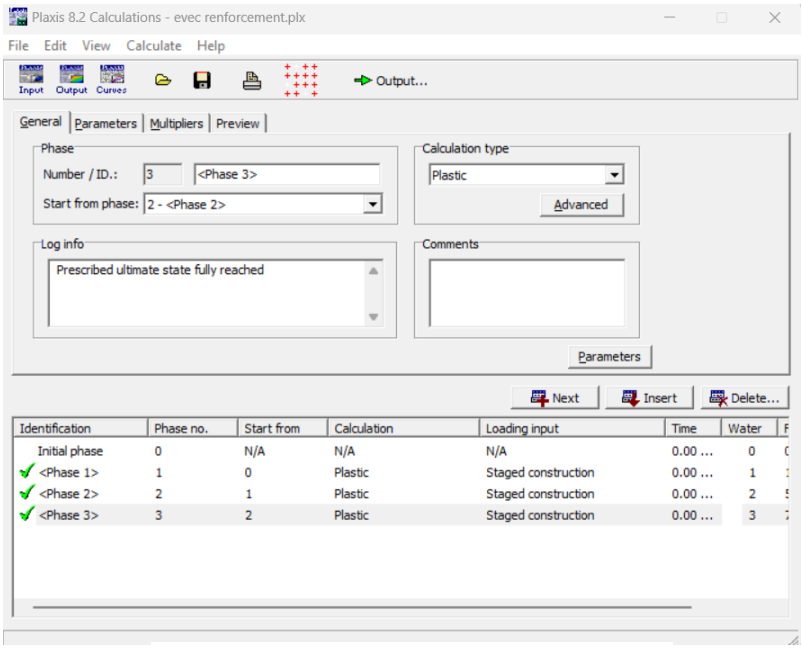


Figure 5.3 : Les phases de calcul

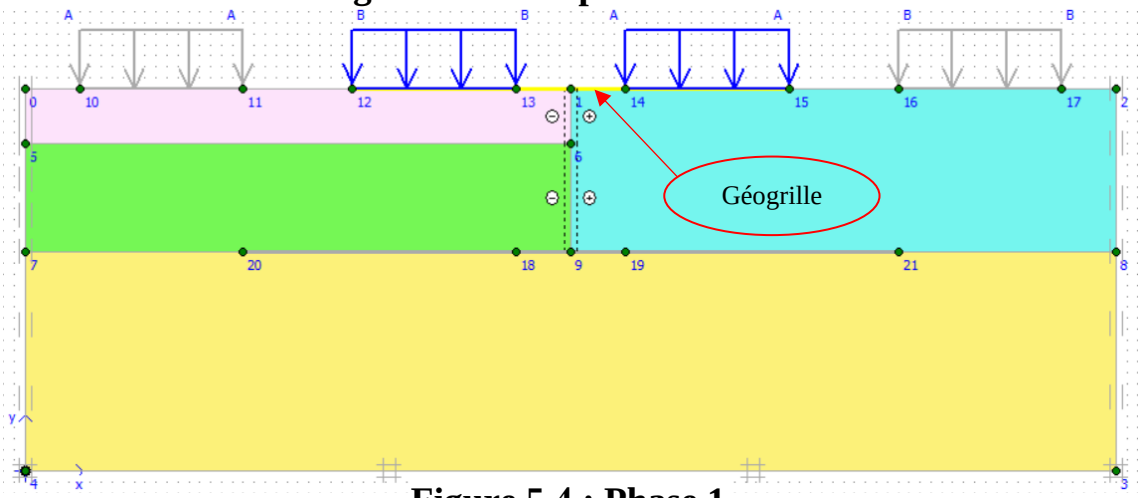


Figure 5.4 : Phase 1

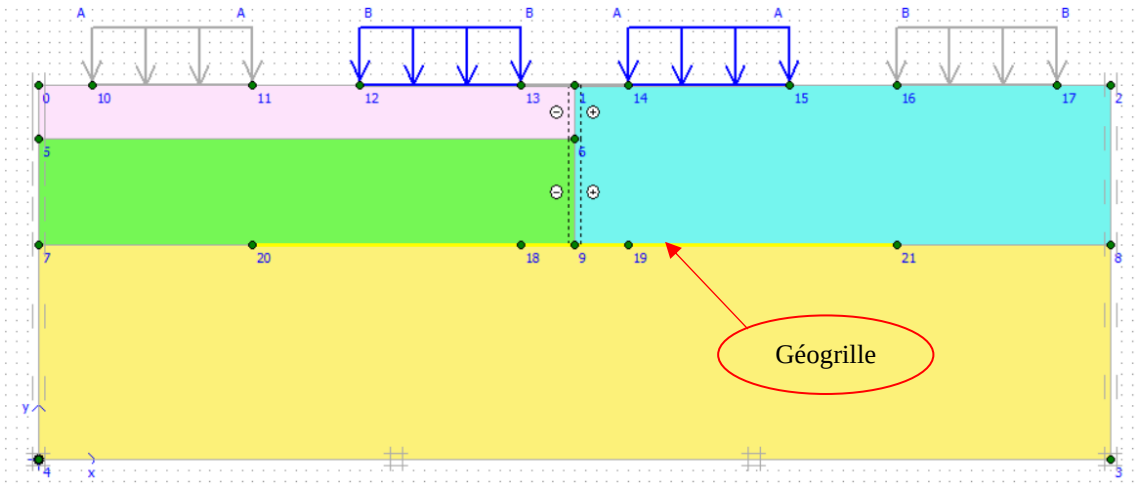


Figure 5.5 : Phase 2

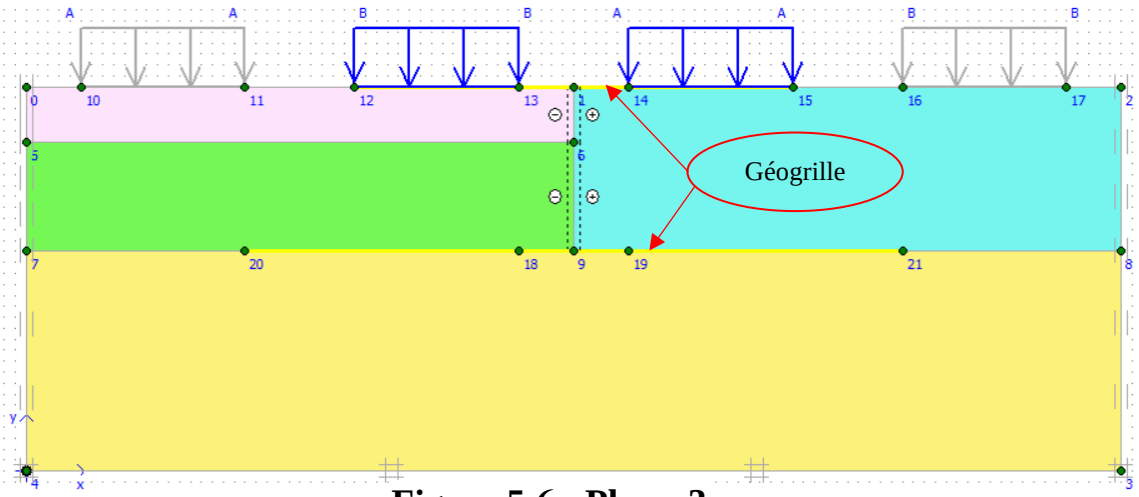


Figure 5.6 : Phase 3

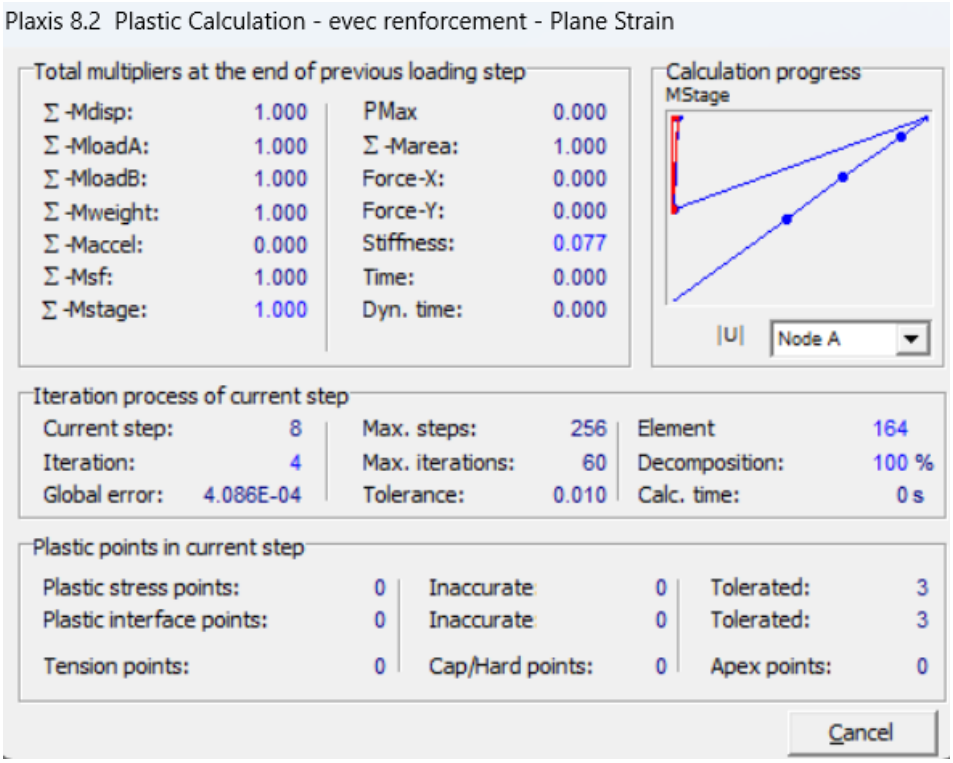


Figure 5.7 : Informations de calcul en phase

Après avoir lancé les calculs, les résultats peuvent être examinés pour chacune des phases avec le programme Output.

4.1. Résultats de la phase 1 :

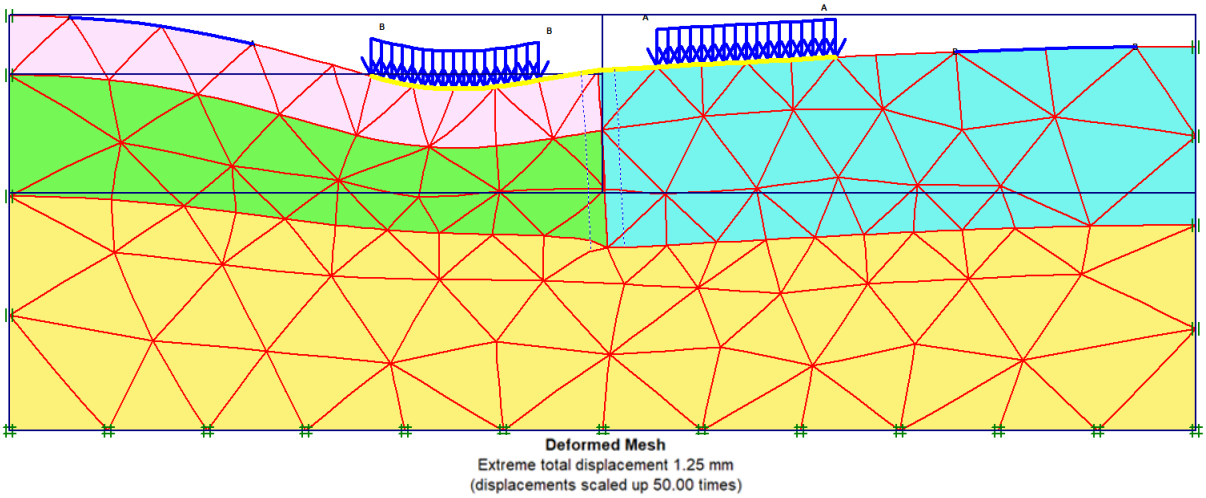


Figure 5.8 : Déformations totales du maillage de la phase 1

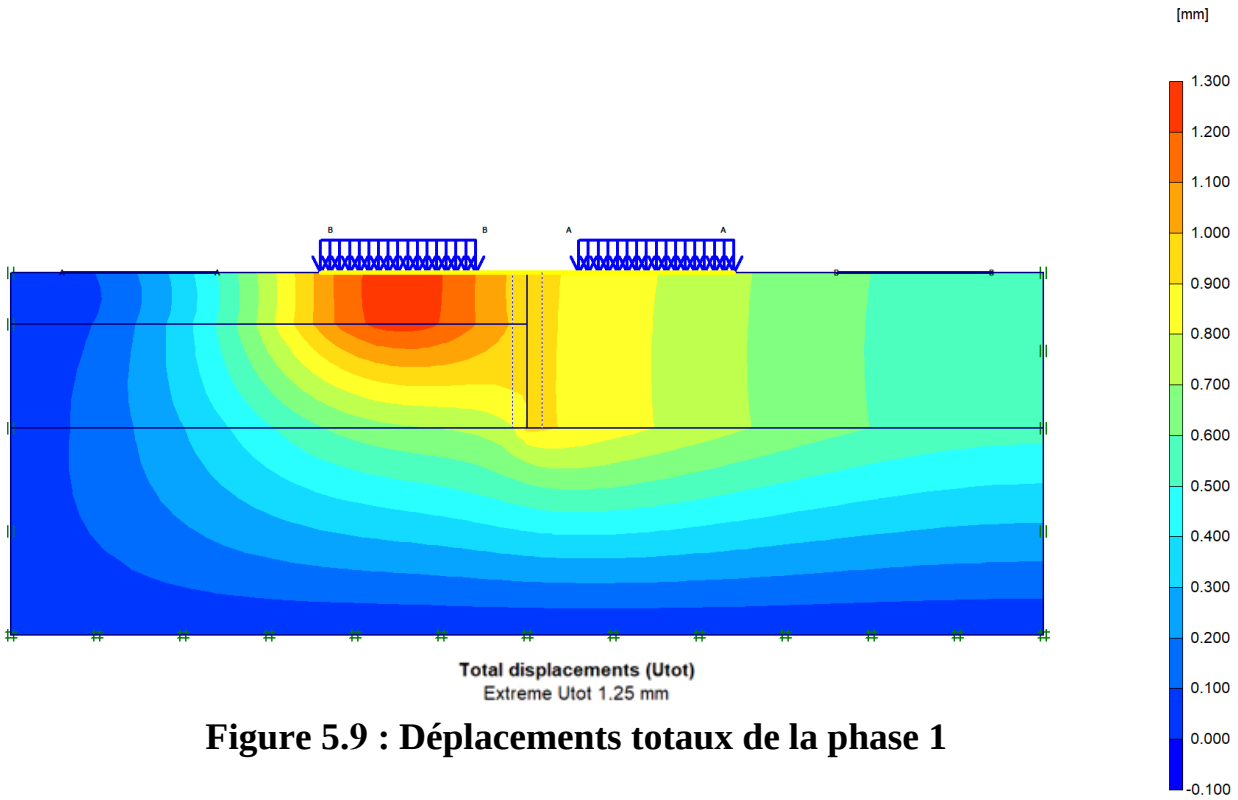


Figure 5.9 : Déplacements totaux de la phase 1

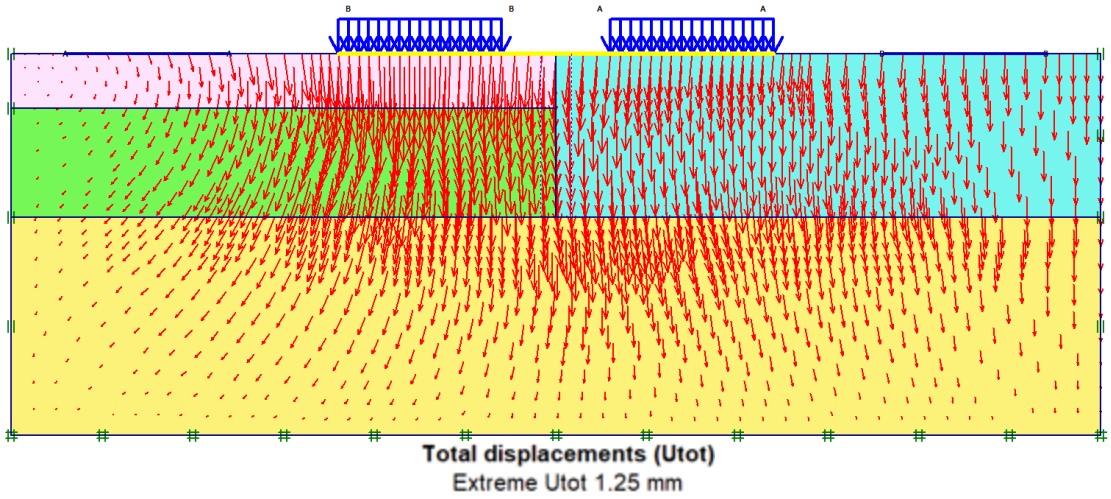


Figure 5.10 : Déplacements totaux de la phase 1(en flèches)

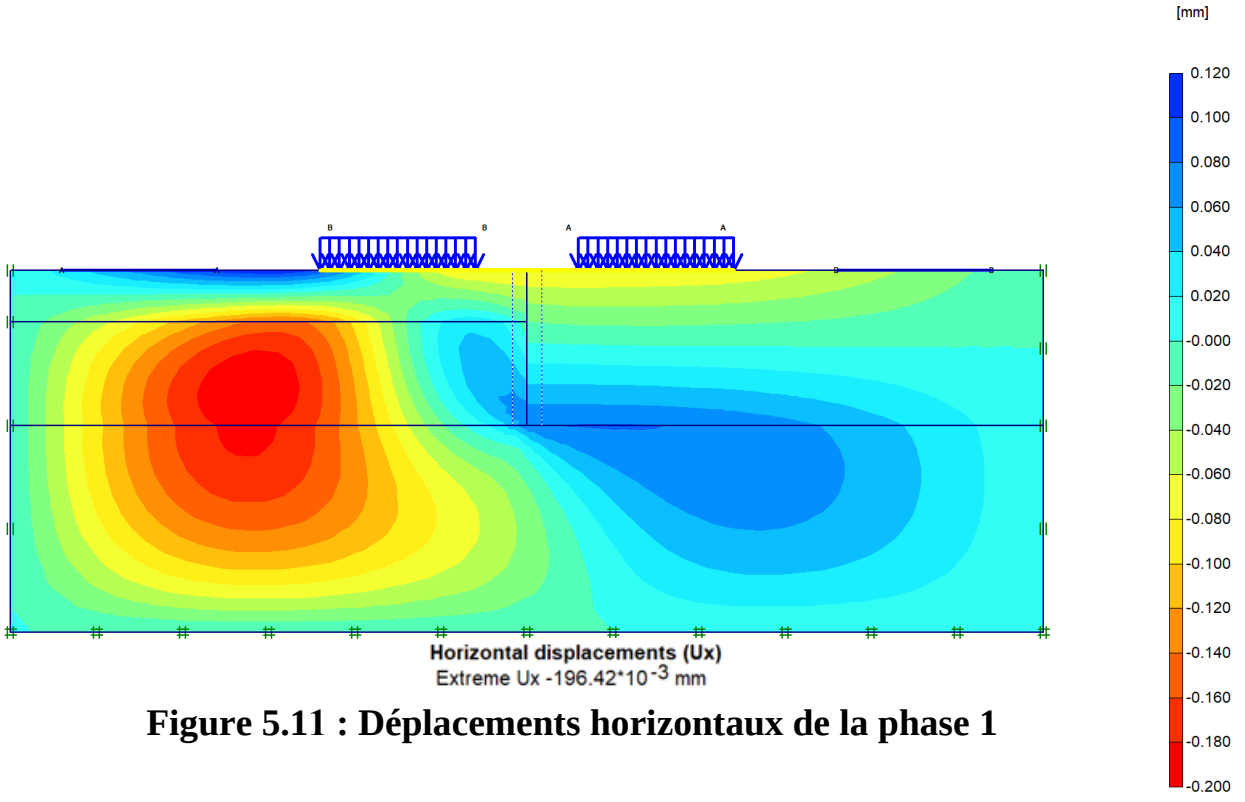


Figure 5.11 : Déplacements horizontaux de la phase 1

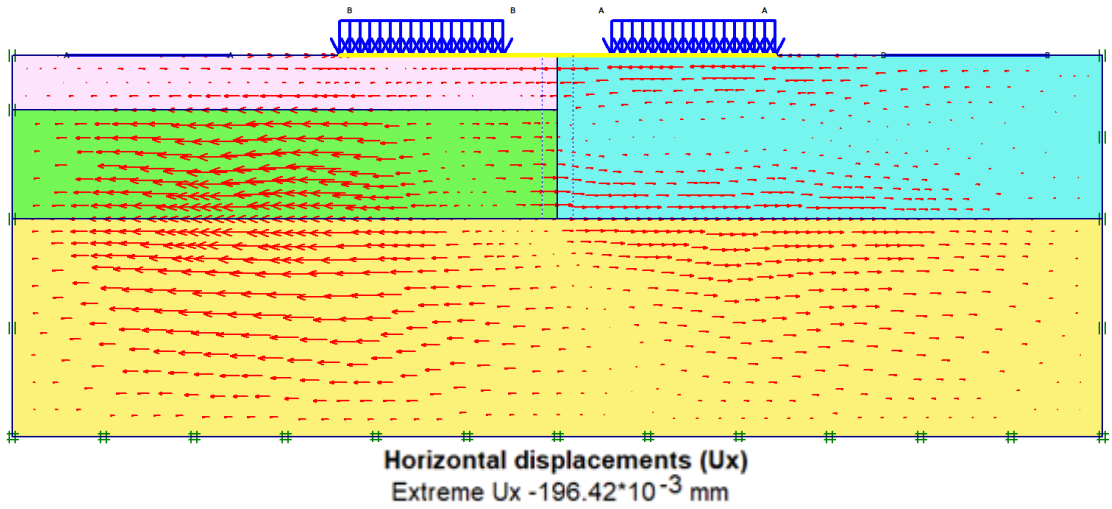


Figure 5.12 : Déplacements horizontaux de la phase 1(en flèches)

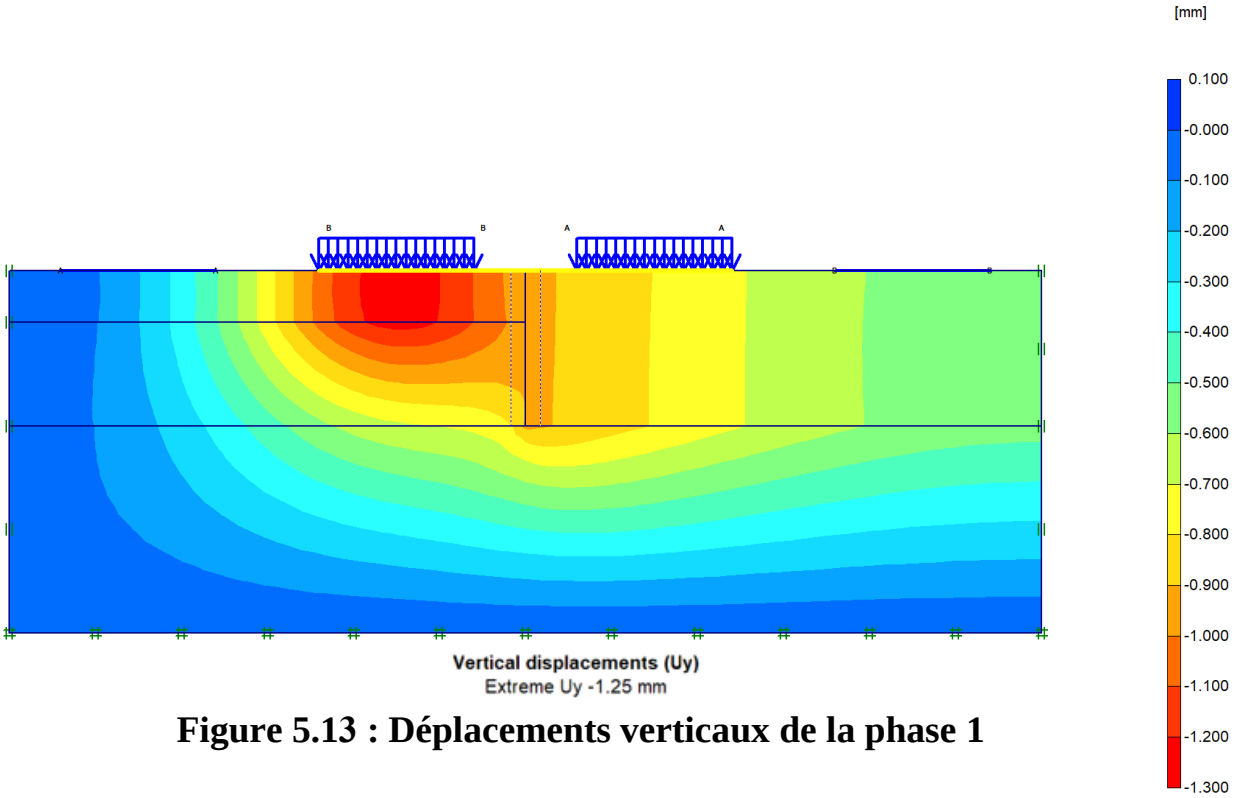


Figure 5.13 : Déplacements verticaux de la phase 1

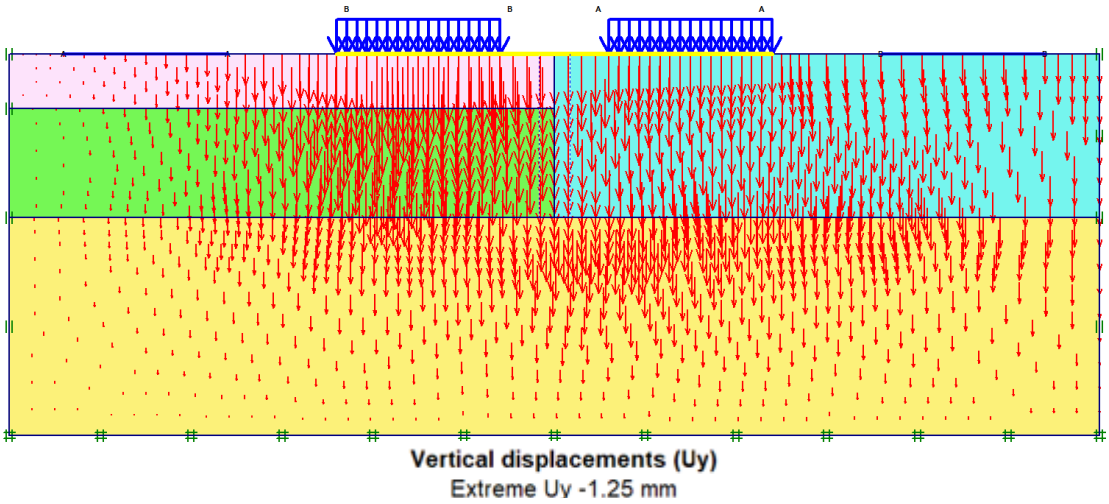


Figure 5.14 : Déplacements verticaux de la phase 1 (en flèches)

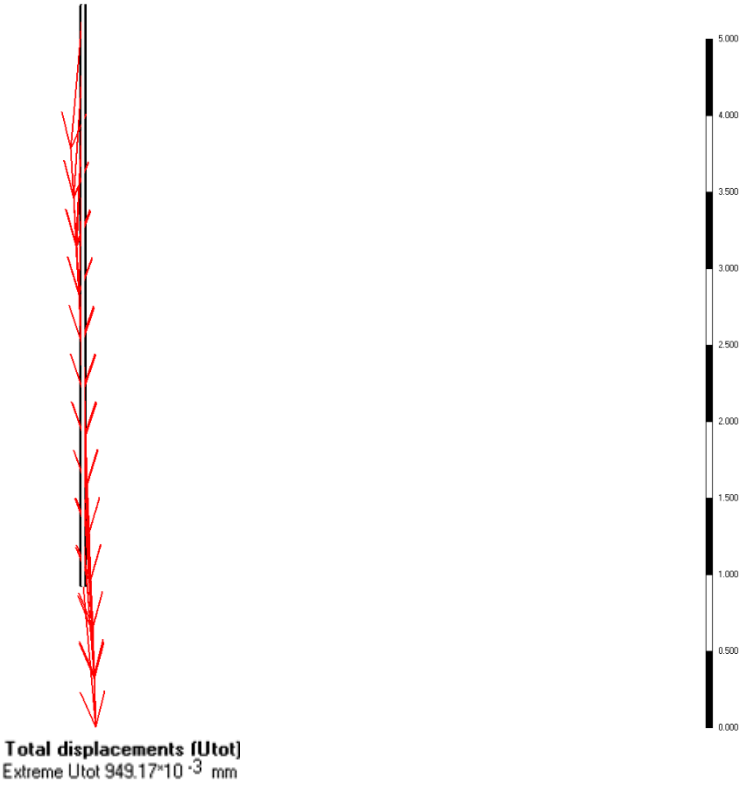


Figure 5.15 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple – Phase 1

4.1.1. Commentaires sur la Phase 1 :

- **Déplacements :** Les déplacements totaux et verticaux sont relativement limités, avec un déplacement max de 1.25 mm et un déplacement vertical maximal (U_y) max de -1.25 mm.
  Les déplacements horizontaux (U_x) montrent une certaine concentration, avec un (U_x) max de -196.42×10^{-3}mm.

- **Interprétation :** Même en Phase 1, le renforcement semble réduire les déplacements par rapport aux résultats initiaux (avant renforcement).

4.2. Résultas de la phase 2 :

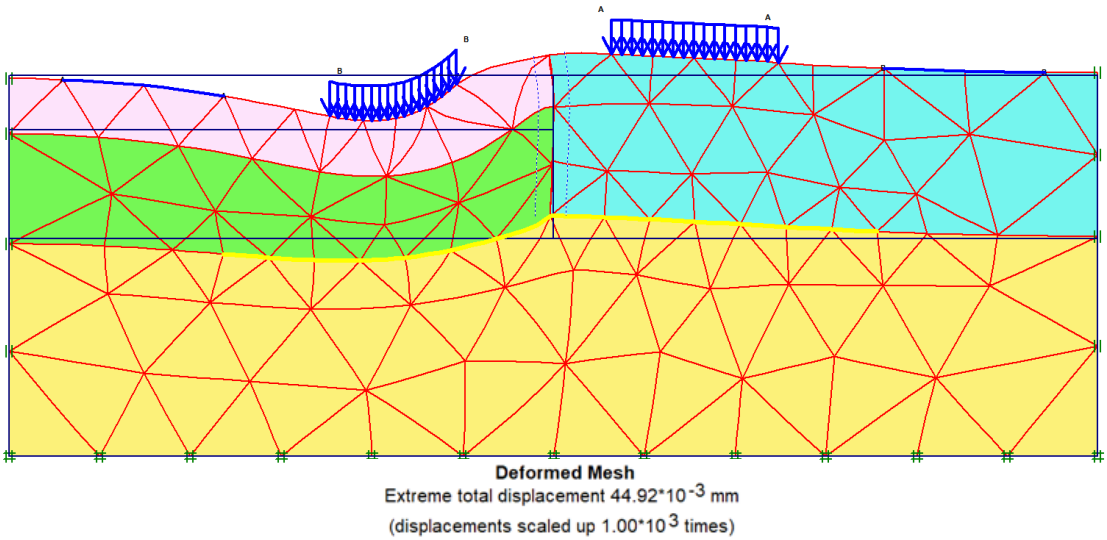


Figure 5.16 : Déformations totales du maillage de la phase 2

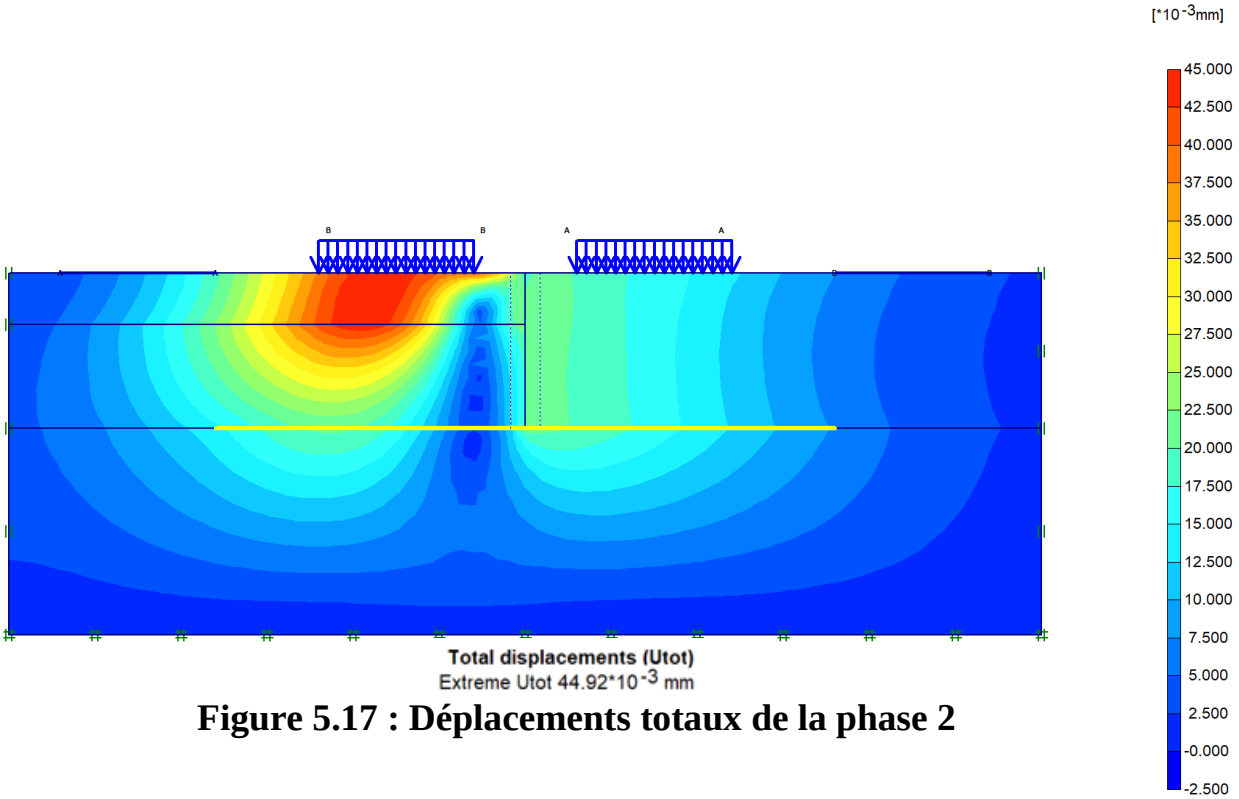


Figure 5.17 : Déplacements totaux de la phase 2

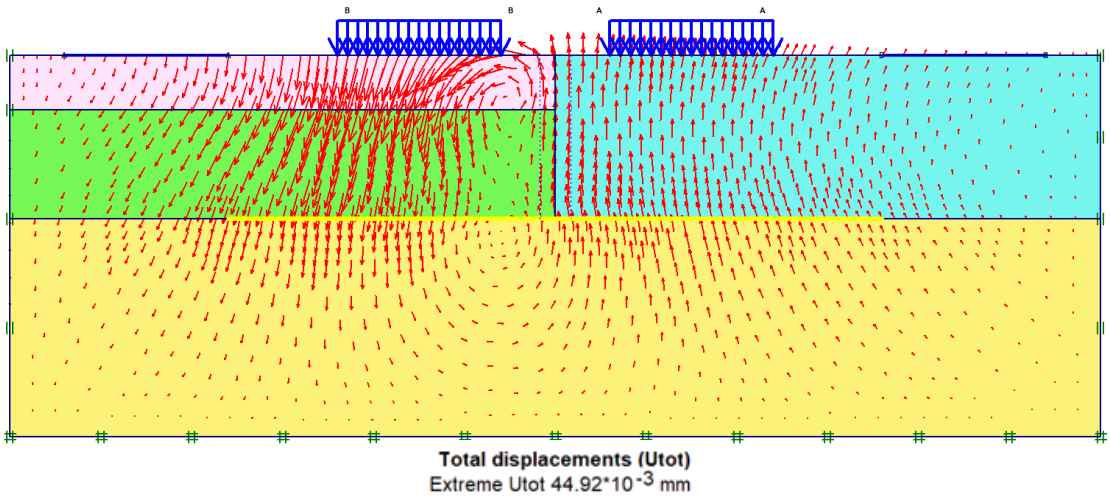


Figure 4.18 : Déplacements totaux de la phase 2 (en flèches)

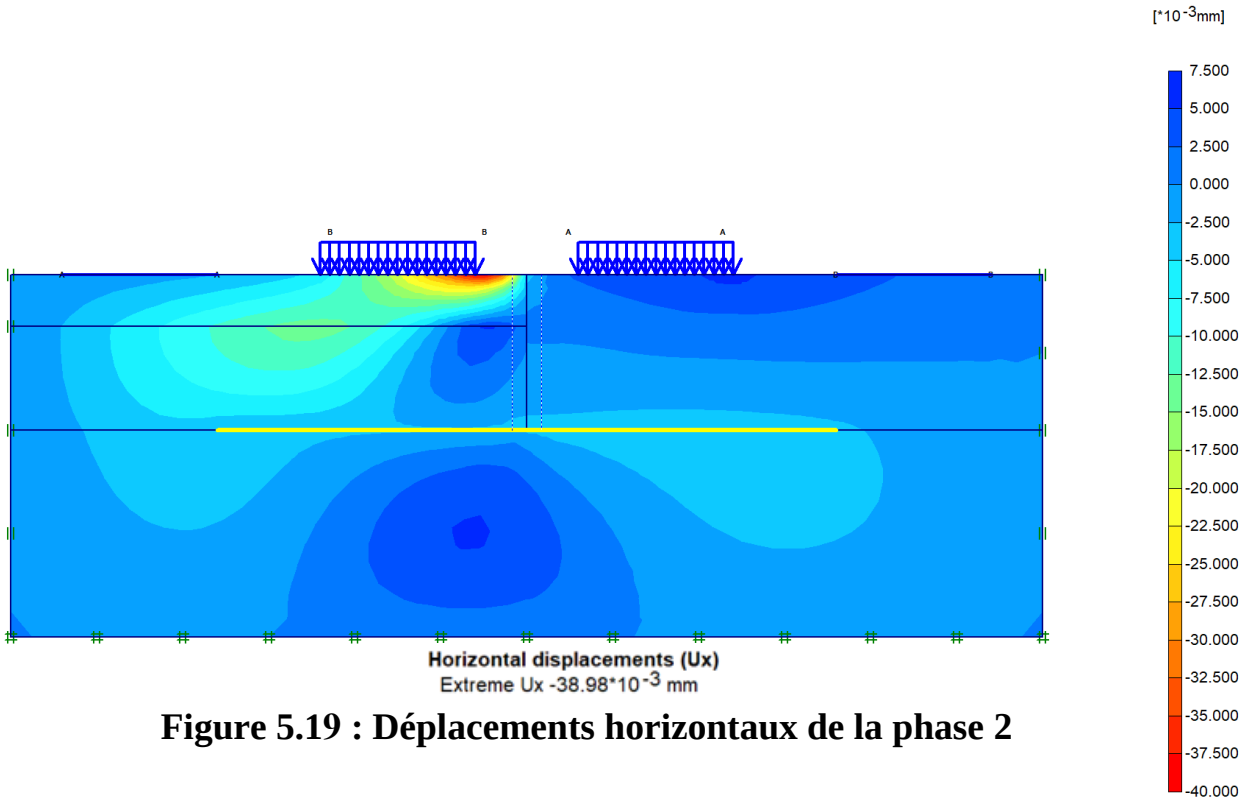


Figure 5.19 : Déplacements horizontaux de la phase 2

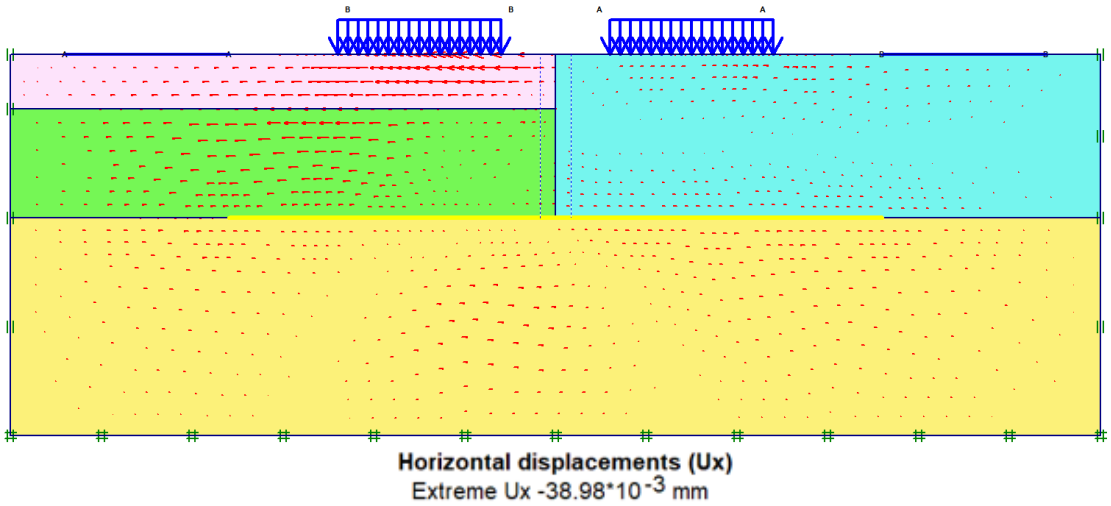


Figure 5.20 : Déplacements horizontaux de la phase 2 (en flèches)

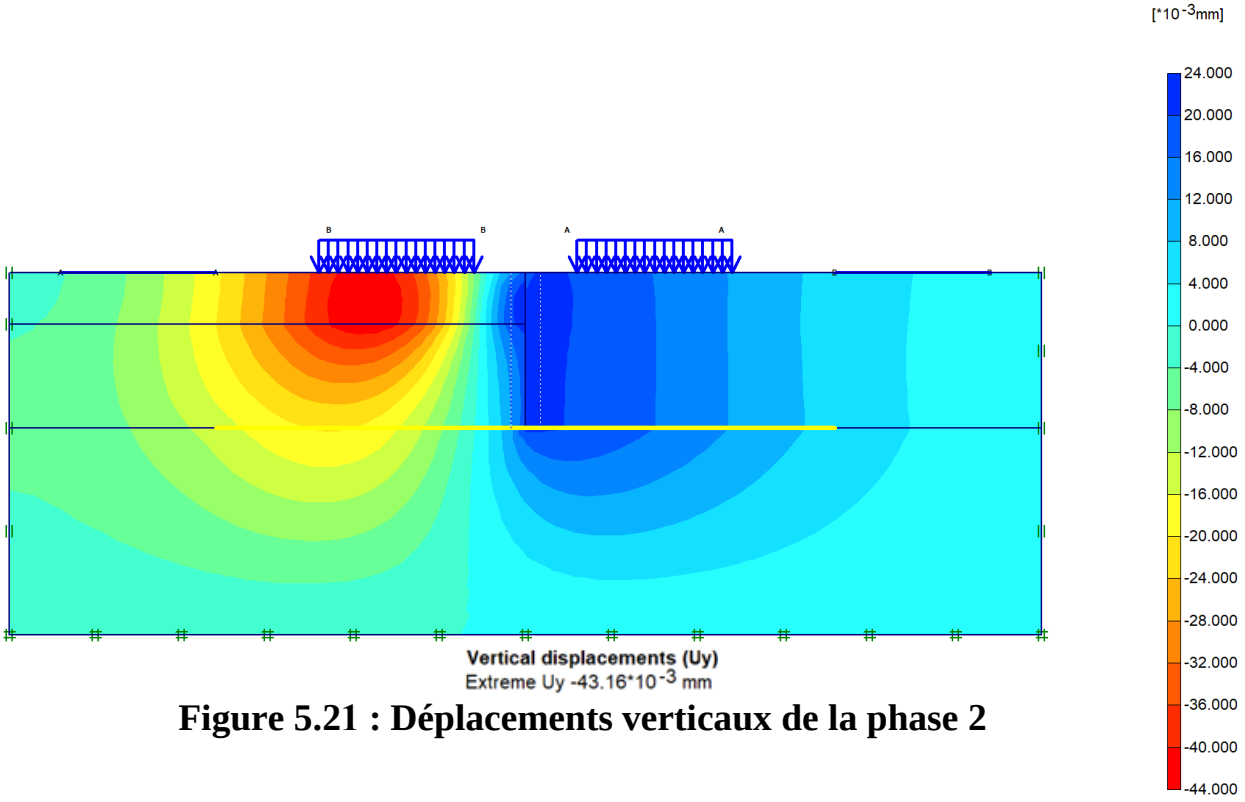


Figure 5.21 : Déplacements verticaux de la phase 2

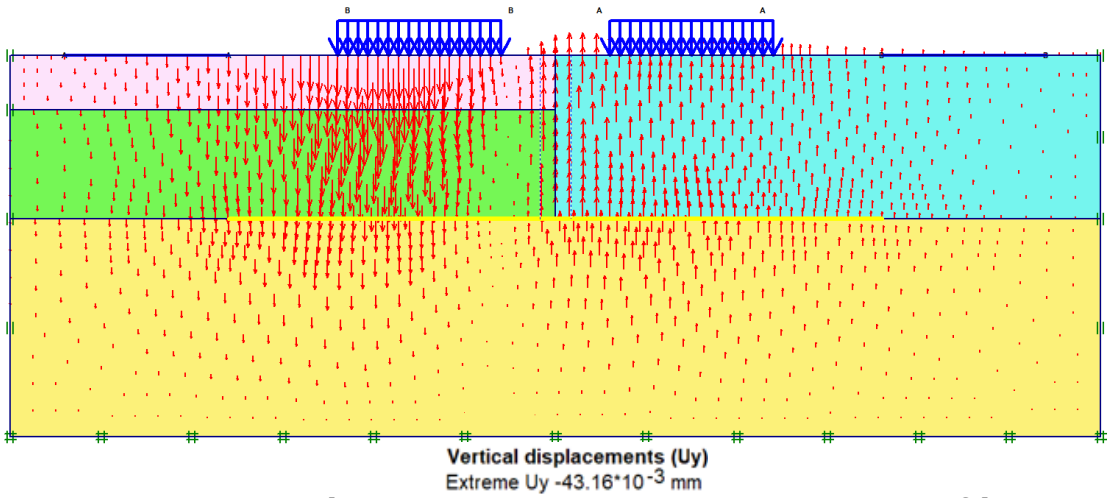


Figure 5.22 : Déplacements verticaux de la phase 2 (en flèches)

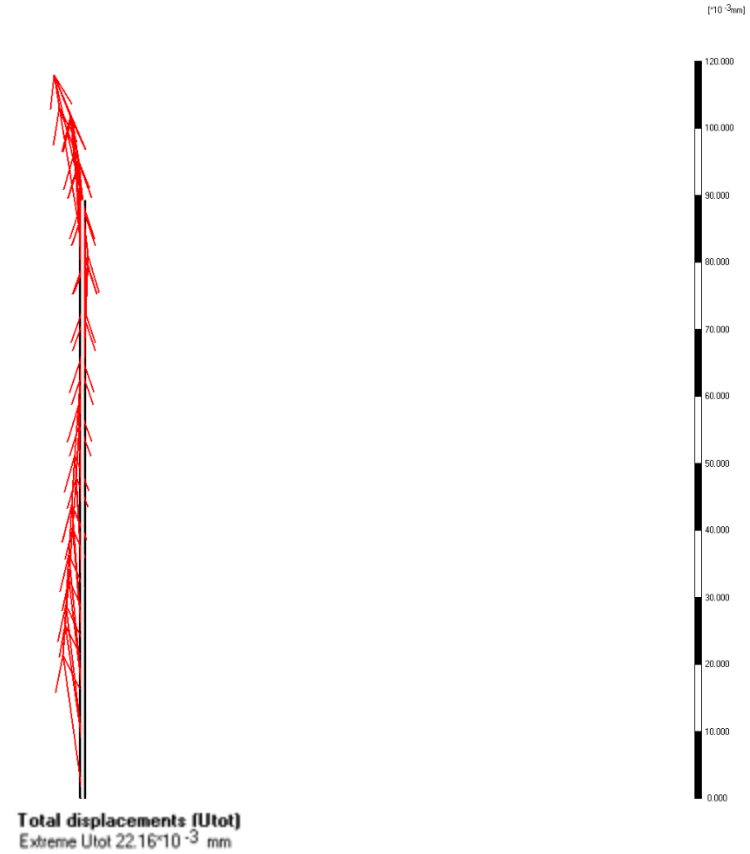


Figure 5.23 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple – Phase 2

4.2.1. Commentaires sur la Phase 2 :

- **Déplacements :** U_{tot} max = 44.92 × 10^{-3} mm et U_y max = -43.16 × 10^{-3} mm. Les déplacements horizontaux (U_x) sont de -88.98 × 10^{-3} mm.
- **Interprétation :** C'est ici, en Phase 2, que l'effet de la géogrille est crucial. La géogrille est spécifiquement placée dans cette phase, et les résultats montrent qu'elle contrôle efficacement

l'augmentation des déplacements. Ceci indique que la géogrille fonctionne comme prévu pour stabiliser la structure sous la charge.

4.3. Résultats de la phase 3 :

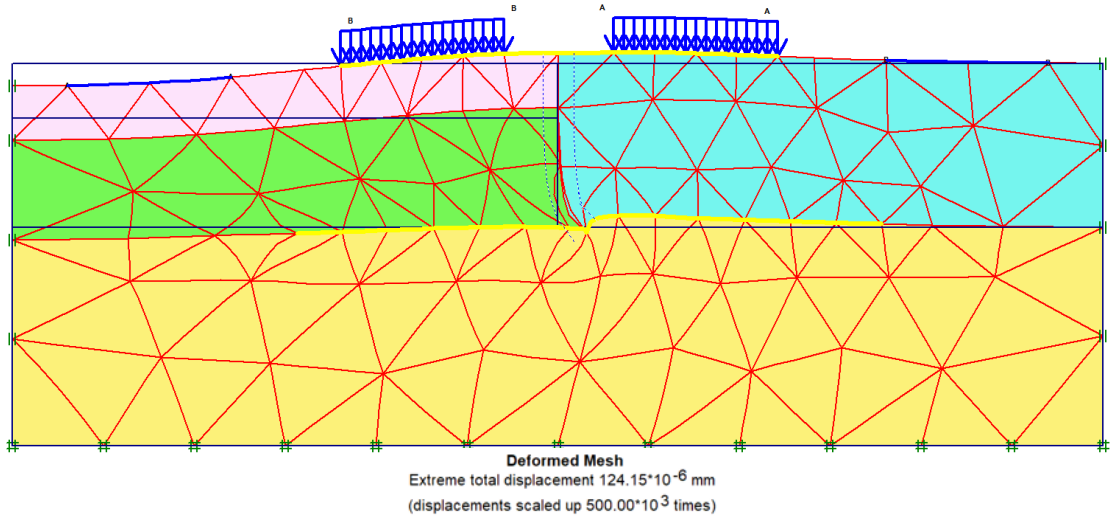


Figure 5.24 : Déformations totales du maillage de la phase 3

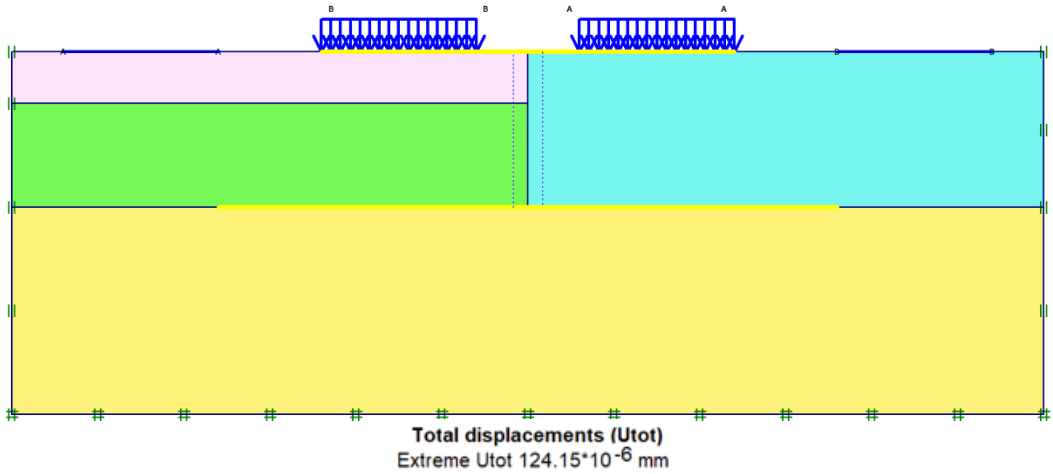


Figure 5.25 : Déplacements totaux de la phase 3

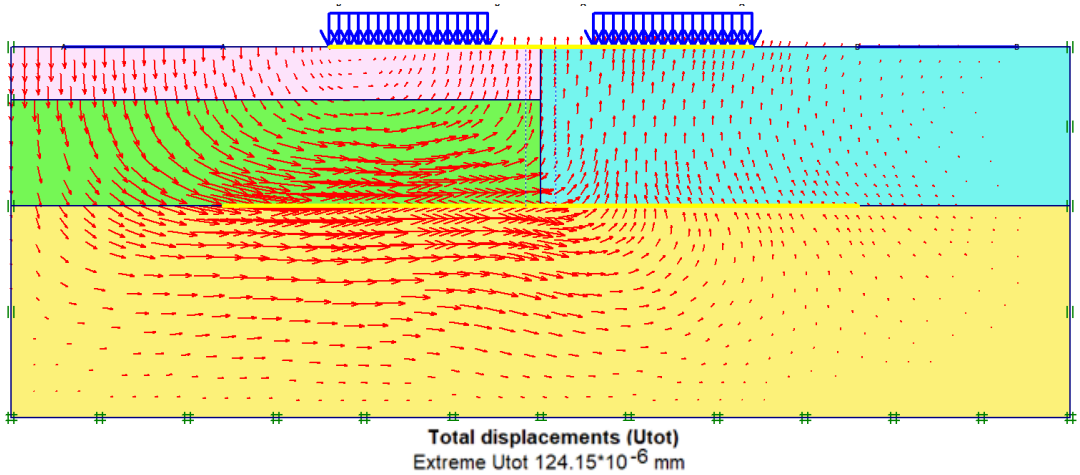


Figure 5.26 : Déplacements totaux de la phase 3 (en flèches)

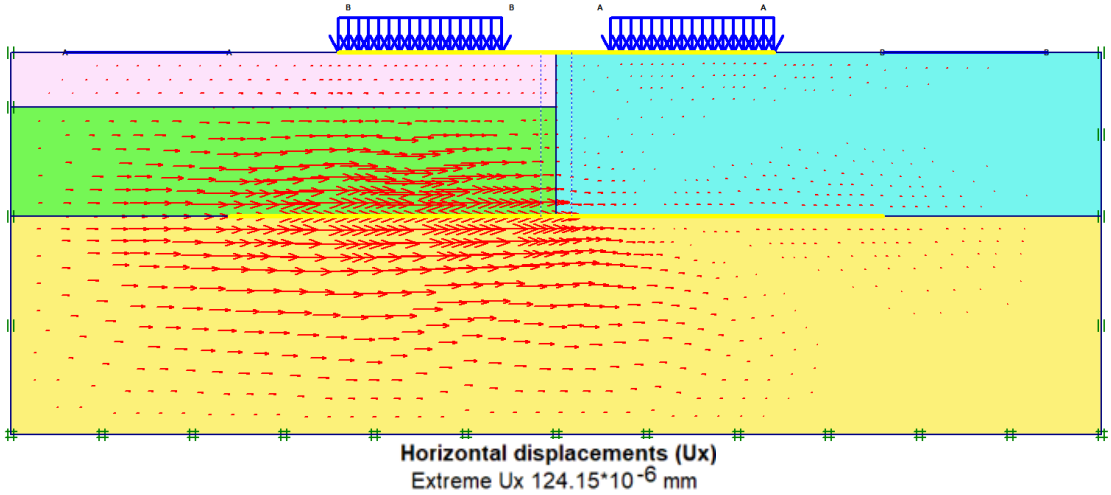


Figure 5.27 : Déplacements horizontaux de la phase 3 (en flèches)

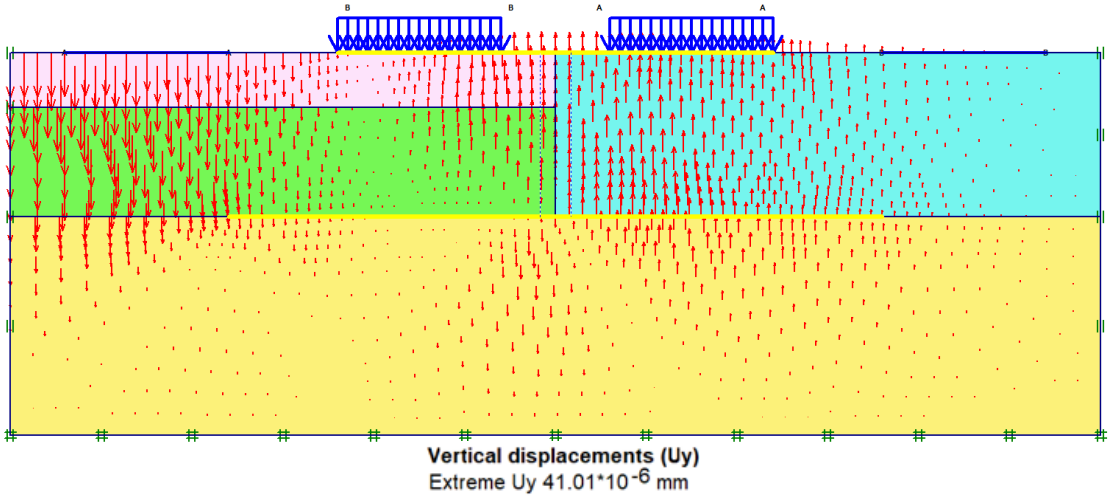


Figure 5.28 : Déplacements verticaux de la phase 3 (en flèches)

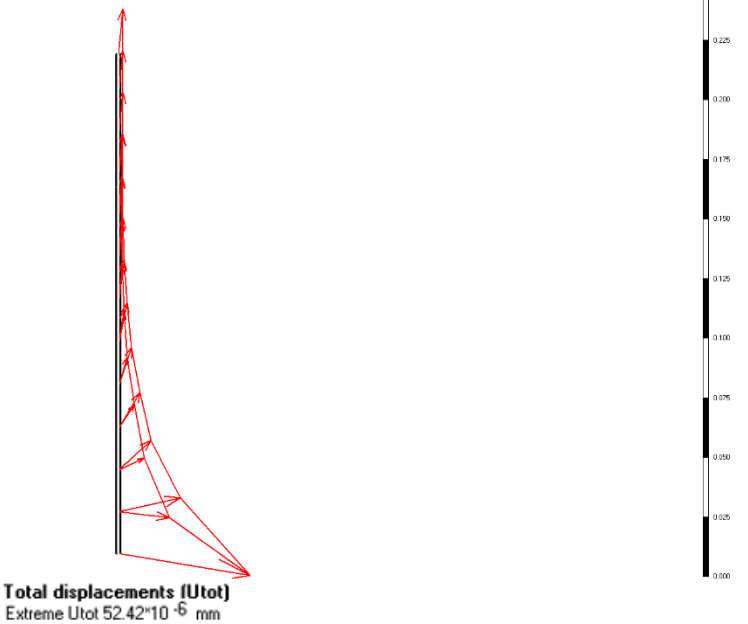


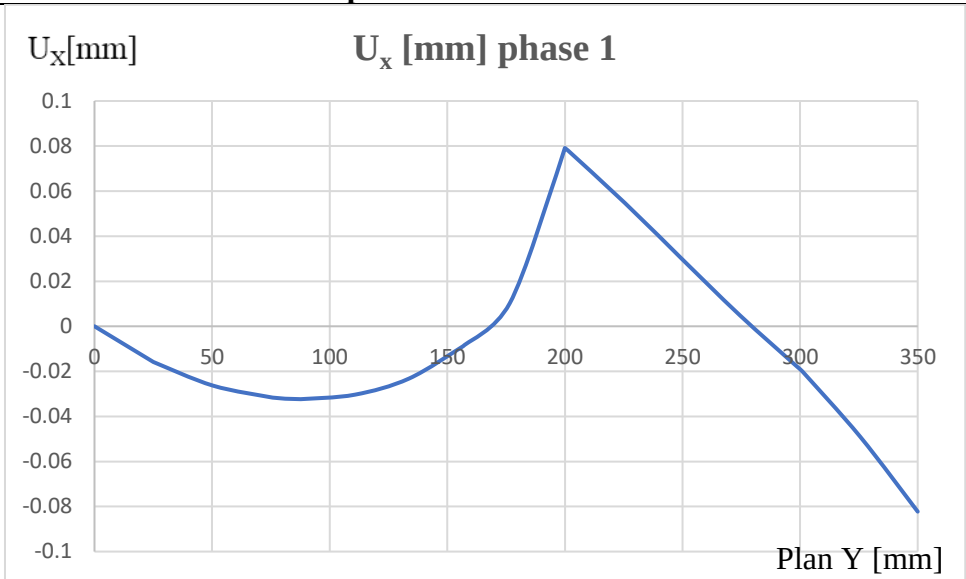
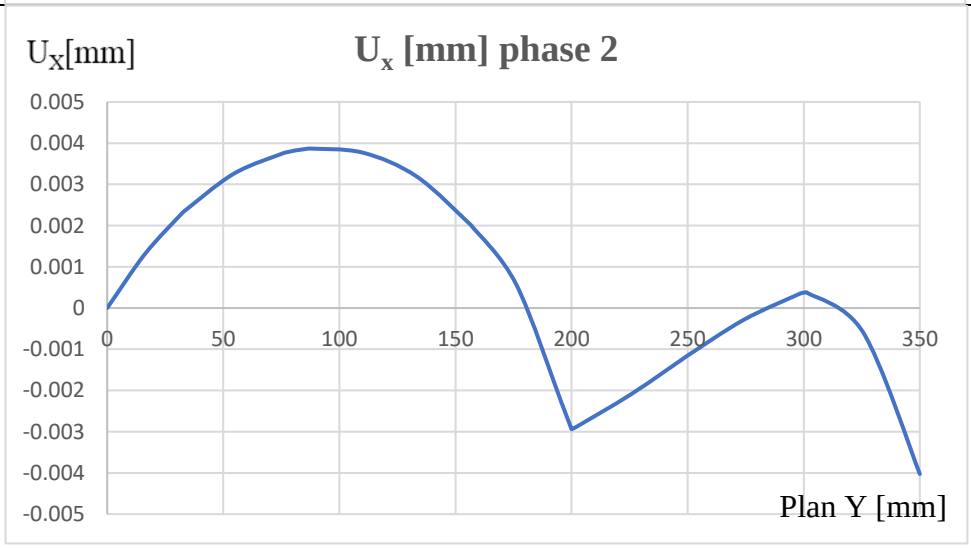
Figure 5.29 : Déplacements totaux à l'interface rigide/souple – Phase 3

4.3.1. Commentaires sur la Phase 3 :

- **Déplacements :** Les déplacements sont extrêmement faibles dans cette phase. Les valeurs de déplacement sont U_{tot} max = 124.15×10^{-6} mm, $U_x = 124.15 \times 10^{-6}$ mm et $U_y = -41.01 \times 10^{-6}$ mm.
- **Interprétation :** La Phase 3 montre des déplacements étonnamment bas, ce qui pourrait indiquer une stabilisation significative de la structure globale.

Les tableaux suivants montrent les déplacements verticaux et horizontaux dans les différentes phases :

Tableau 5.1 : Graphiques montrant la différence des déplacements horizontaux

Phase	Déplacements horizontaux
1ère Phase	
2ème Phase	

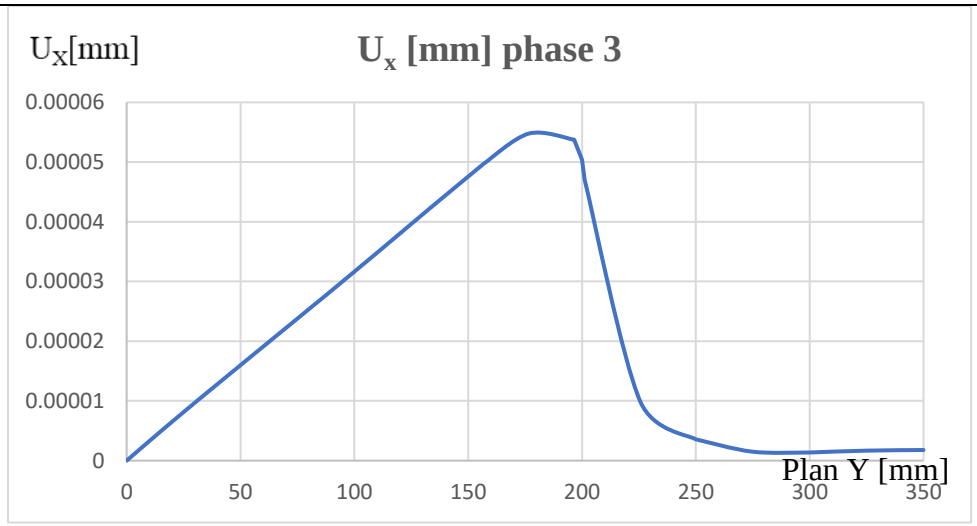
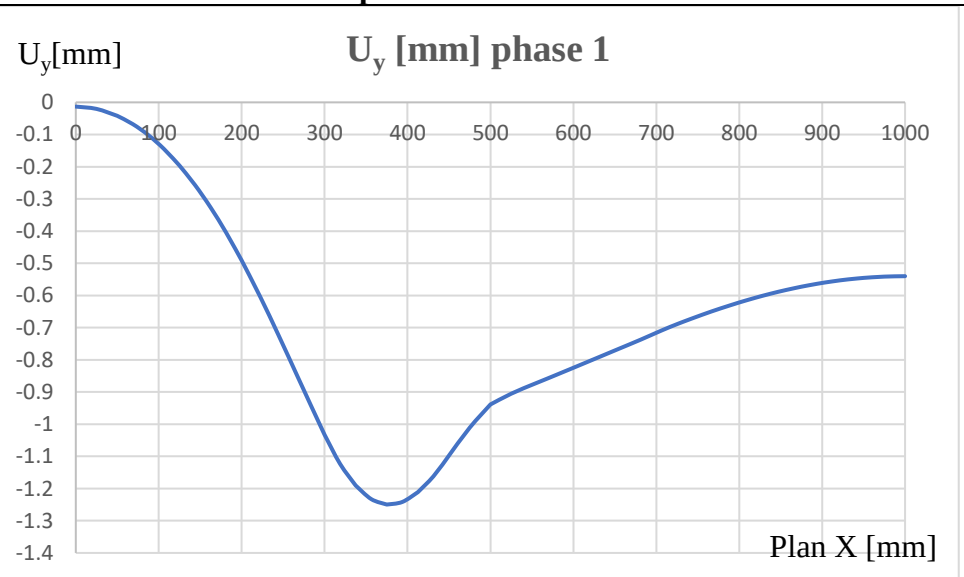
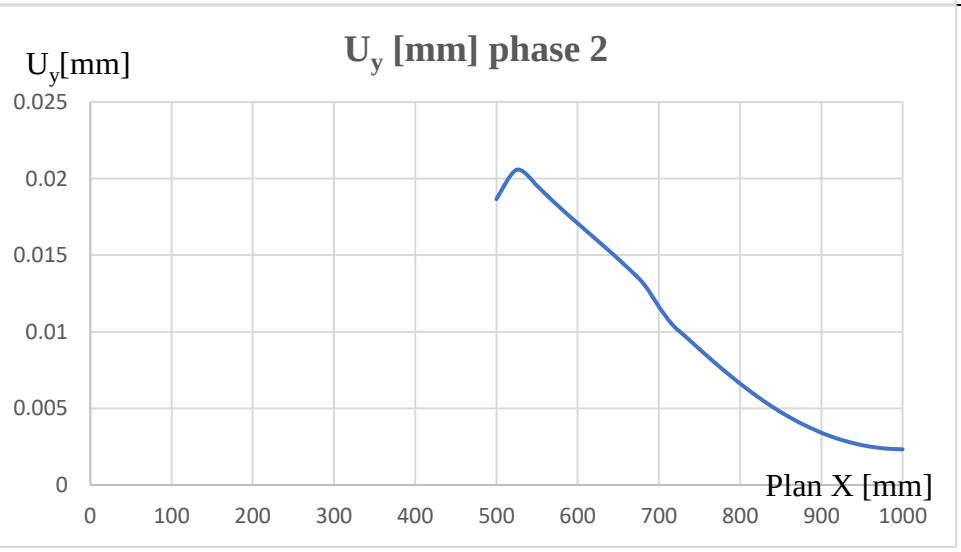
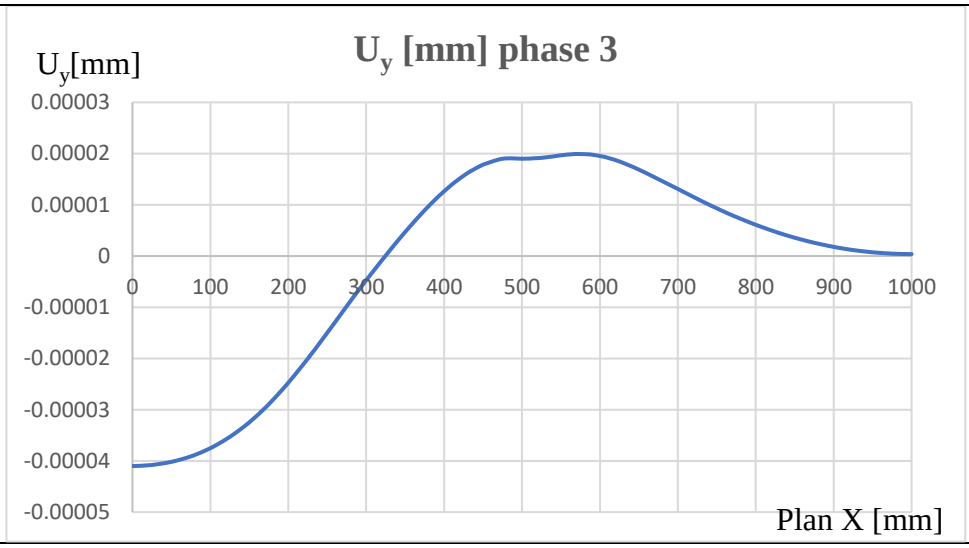
3ème Phase	

Tableau 5.2 : Graphiques montrant la différence des déplacements verticaux

Phase	Déplacements verticaux
1ère Phase	
2ème Phase	

3ème Phase	

5. Les points plastiques dans Plaxis :

Dans la modélisation géotechnique par éléments finis avec Plaxis 2D, les points plastiques (ou plastic points) jouent un rôle fondamental dans l'interprétation du comportement non linéaire des matériaux de sol. Ces points représentent les zones dans le maillage où la contrainte a dépassé le seuil d'élasticité du sol, provoquant une déformation plastique irréversible **[10]** .

5.1. Définition :

Un point plastique est un point de Gauss (point d'intégration dans un élément fini) où la condition de plasticité est atteinte. Cela signifie que l'état de contrainte dans ce point dépasse le critère de rupture ou de plastification défini par le modèle de comportement du sol (Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Soft Soil, etc.).

5.2. Types de points plastiques dans Plaxis :

Plaxis distingue plusieurs types de points plastiques, représentés graphiquement à l'aide de symboles de couleurs différentes. On peut les consulter via Output → Deformations → Plastic Points. Voici quelques exemples courants :

- Rouge : Déformation plastique sous cisaillement.
- Jaune : Déformation plastique sous compression.
- Bleu : Déformation plastique sous extension.
- Violet : Point de rupture (failure point).
- × : Point plastifié sans convergence (plastic non-convergence).

5.3. Utilité dans l'analyse :

L'analyse des points plastiques permet :

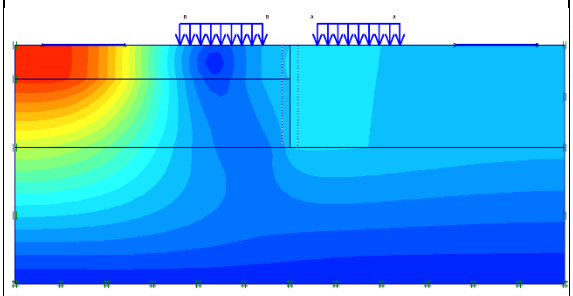
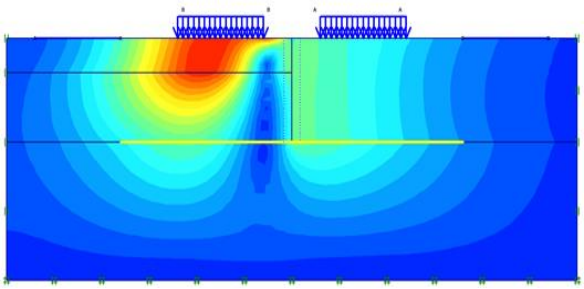
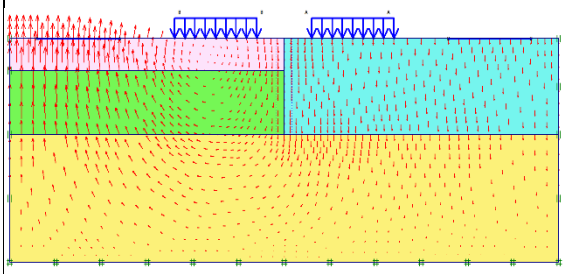
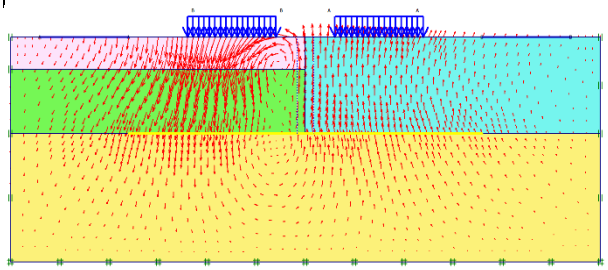
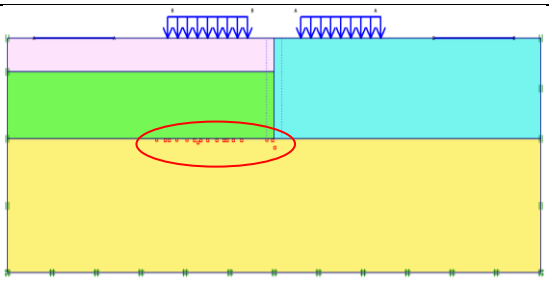
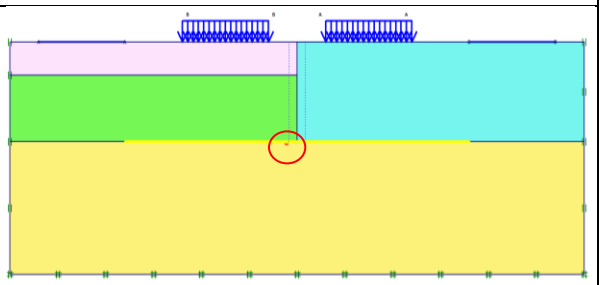
- D'identifier les zones critiques de la structure ou du sol,
- de déterminer le mécanisme de rupture potentiel,
- de valider l'efficacité d'un renforcement (par exemple, une géogrille),
- et de comparer le comportement élastique/plastique selon différentes configurations.

Dans le cadre d'une étude paramétrique, la comparaison des distributions de points plastiques entre différents cas (avec ou sans géogrille) permet de visualiser l'effet du renforcement sur la propagation des zones plastiques.

6. Comparaison des résultas avant et après le renforcement :

6.1. Déplacements totaux :

Tableau 5.3 : U_{tot} avant et après renforcement

État	Avant renforcement	Après renforcement
Shading		
Arrow		
Plastic points		
Valeur	U_{tot} = 1.85 mm	$U_{tot} = 44.92 \times 10^{-3}$mm

Observations :

L'analyse des déplacements totaux (U_{tot}) avant et après l'installation du renforcement par géogrille met en évidence une amélioration significative du comportement mécanique de la jonction rigide-souple sous charge verticale.

Avant le renforcement, les contours de déformation (shading) révèlent une concentration importante des déplacements dans la zone de transition entre la dalle en béton et la structure souple.

Les vecteurs de déplacement (arrow plot) indiquent des mouvements verticaux prononcés, dirigés vers le bas, avec une déformation maximale atteignant U_{tot} = 1.85 mm.

La carte des points plastiques montre également une zone plastifiée relativement large dans la couche de fondation au niveau de la jonction, signe d'une sollicitation excessive du matériau granulaire.

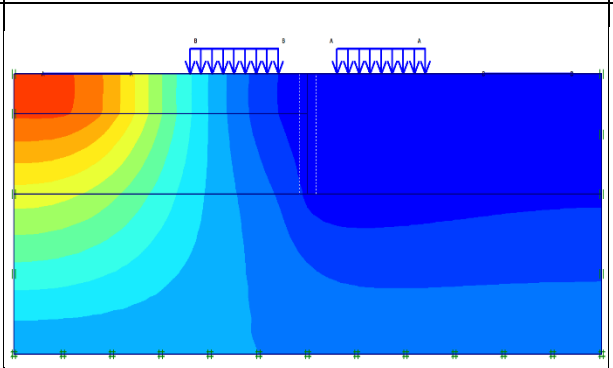
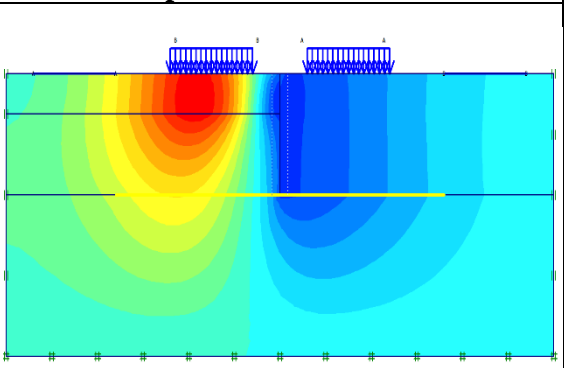
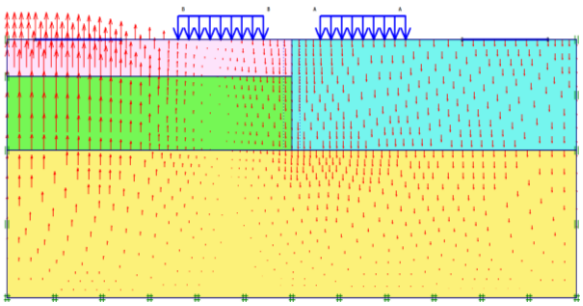
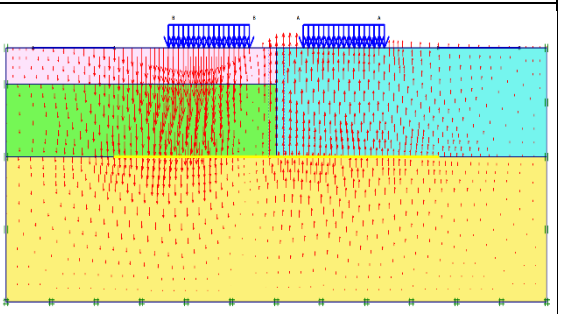
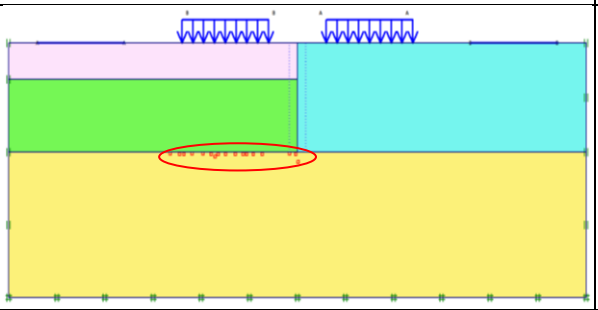
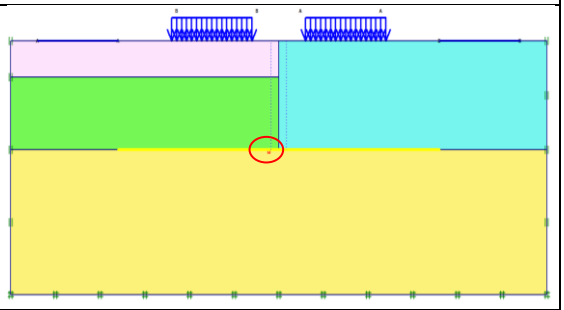
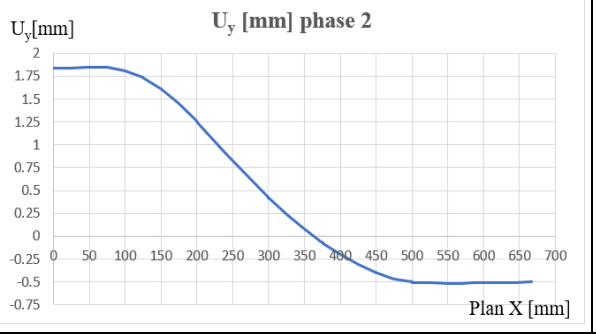
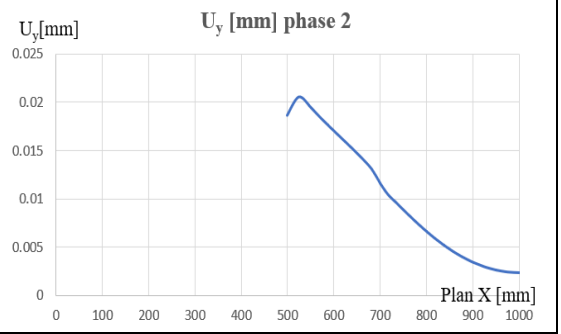
En revanche, après la mise en place de la géogrille unidirectionnelle, on observe une réduction très marquée des déplacements totaux, avec une valeur maximale de seulement 44.92×10^{-3} mm, soit une réduction de près de 97.6 %. Cette diminution notable s'accompagne d'une redistribution plus homogène des vecteurs de déplacement, qui restent confinés dans la zone supérieure sans générer de mouvement différentiel brutal.

De plus, les points plastiques sont fortement réduits, localisés uniquement dans une petite zone très restreinte, ce qui confirme un comportement majoritairement élastique du sol renforcé.

Ces résultats démontrent clairement que l'introduction d’un géogrille à la jonction permet de maîtriser les déplacements différentiels, de limiter la déformation permanente, et donc d'améliorer la durabilité de la structure dans des conditions de chargement sévères, comme celles des chaussées aéronautiques.

6.2. Déplacements verticaux :

Tableau 5.4 : U_y avant et après renforcement

État	Avant renforcement	Après renforcement
Shading		
Arrow		
Plastic points		
Graphe		
Valeur	Uy = 1.85mm	Uy = -43.16×10^{-3}mm

Observations :

Les déplacements verticaux (U_y) constituent un indicateur essentiel pour évaluer les tassements différentiels dans les structures de chaussée, notamment à la jonction rigide-souple soumise à des charges ponctuelles élevées.

Avant le renforcement, les résultats de la simulation montrent un déplacement vertical maximal de 1.85 mm, concentré à l'interface entre la dalle rigide et la structure souple. Cette concentration est confirmée par le graphique de déplacement (U_y) en fonction de la position horizontale (Plan X), qui présente un pic marqué à l'endroit de transition. L'analyse vectorielle (flèches) révèle également une orientation des déplacements orientées vers le bas, traduisant un tassement localisé significatif. Cette situation engendre une discontinuité mécanique susceptible d'affecter la performance de la chaussée à long terme.

Après l'introduction de la géogrille unidirectionnelle, une nette amélioration est observée. La valeur maximale du déplacement vertical est réduite à 43.16×10^{-3} mm, ce qui représente une réduction de plus de 97 % par rapport à l'état initial.

Le profil graphique montre une courbe beaucoup plus lissée, signe d'une meilleure répartition des charges verticales et d'un tassement plus uniforme.

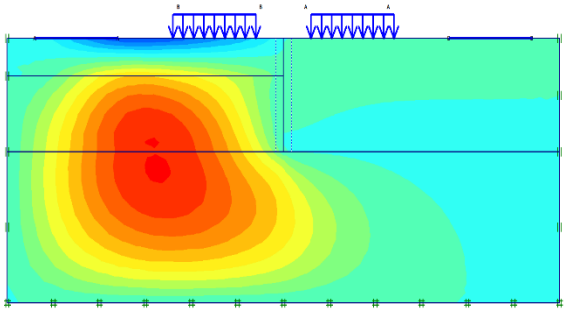
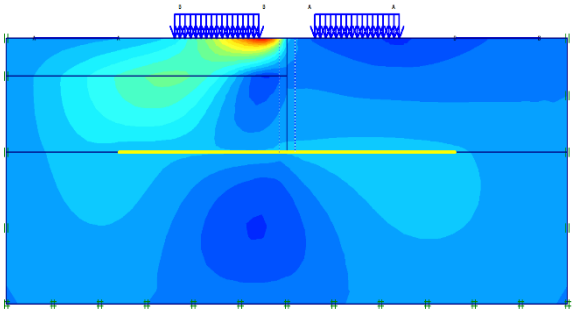
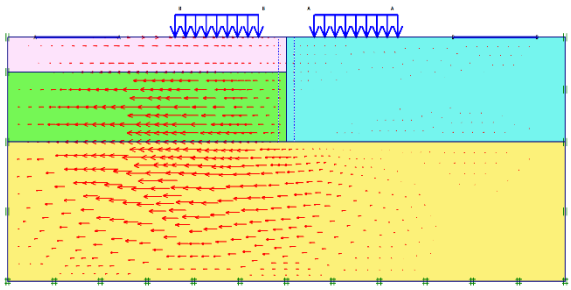
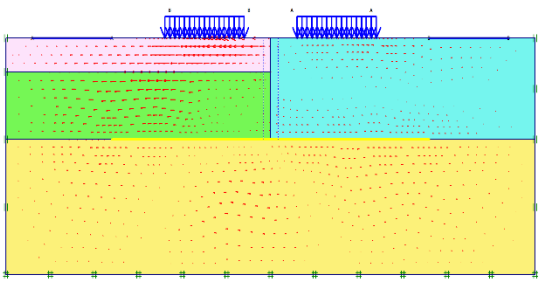
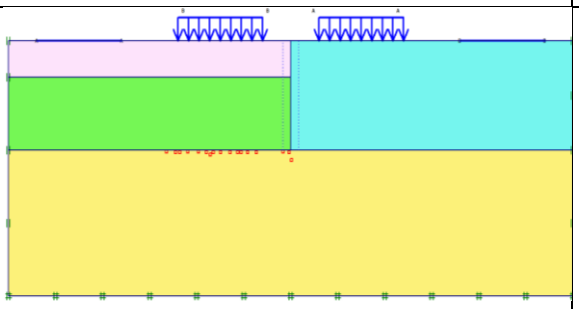
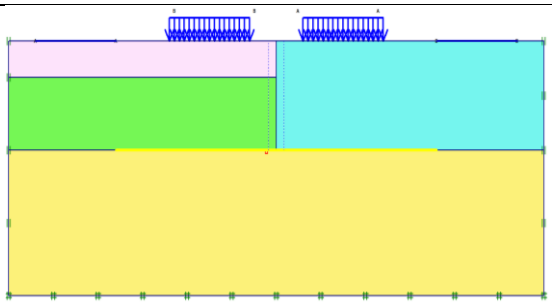
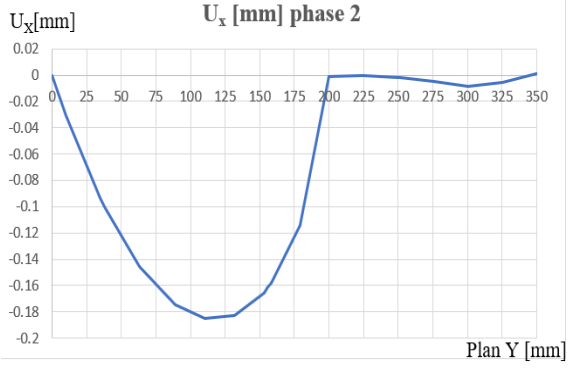
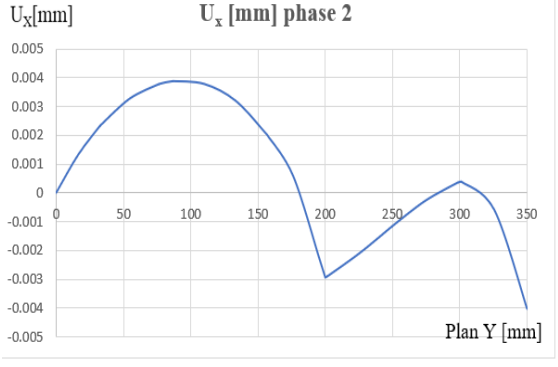
Les flèches de déplacement sont plus petites et mieux distribuées, témoignant d'une réponse plus stable du système renforcé.

En outre, l'absence de points plastiques notables après renforcement (comparé à leur apparition localisée avant renforcement) confirme une réduction significative des sollicitations mécaniques excessives au sein des matériaux granulaires.

Ainsi, l'ajout de la géogrille améliore considérablement le comportement vertical de la structure, contribuant à la stabilité géotechnique et à la réduction des tassements différentiels, qui sont souvent la source de fissurations et de dégradations prématurées des chaussées aéronautiques.

6.3. Déplacements horizontaux :

Tableau 5.5 : U_x avant et après renforcement

État	Avant renforcement	Après renforcement
Shading		
Arrow		
Plastic points		
Graphe		
Valeur	$U_x = -363.92 \times 10^{-3}$mm	$U_x = -38.98 \times 10^{-3}$mm

Observations :

Les déplacements horizontaux U_x jouent un rôle crucial dans l'analyse des phénomènes de cisaillement et de glissement différentiel dans les structures géotechniques, en particulier au niveau des interfaces matériaux rigides/souples. Ces déplacements sont souvent responsables de la formation de fissures obliques et de désalignements dans les structures de chaussée.

Avant l'installation du géogrille, les résultats montrent un déplacement horizontal maximal de -363.92 × 10^{-3} mm, concentré dans la partie souple à proximité immédiate de la jonction. Cette valeur importante traduit un glissement horizontal latéral du matériau sous l'effet de la contrainte induite par la charge verticale localisée. Le graphique de U_x selon la direction Y présente une variation prononcée, confirmant un comportement non uniforme et potentiellement instable dans la zone de transition.

Après renforcement par la géogrille unidirectionnelle, une réduction significative du déplacement horizontal est observée, avec une valeur maximale de -38.98 × 10^{-3} mm, soit environ un facteur 9 de diminution. Le contour de déplacement (shading) illustre une distribution plus homogène des efforts, tandis que les flèches (arrow plot) montrent une réorientation localisée et contenue des mouvements horizontaux. Le comportement devient plus symétrique et moins dispersé, attestant d'une meilleure cohésion interne des matériaux renforcés.

Les points plastiques, également réduits après renforcement, confirment la diminution des zones de rupture potentielle et la limitation des effets de glissement au sein des couches structurales.

En résumé, le renforcement par géogrille permet non seulement de limiter les tassements verticaux, mais également de réduire les déplacements horizontaux critiques, ce qui améliore la stabilité globale de la structure à la jonction rigide-souple sous charge d'avion.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion :

Pour l'étude des pathologies signalées (retrait longitudinal, fissurations prématurées, ou tassements différentiels) résultants de la jonction entre une piste souple et une piste rigide, soumise à des charges représentatives d'un avion de calcul (Boeing 747) et du trafic aérien normalisé, un modèle numérique est proposé, prenant en considération la géométrie, les conditions aux limites et les matériaux constituants chaque type de chaussées (souple ou rigide). Le modèle est ensuite utilisé pour le diagnostic des désordres à la jonction, analyse des corrections proposées par usage des géogrilles comme matériaux de renforcement et de réhabilitation de la jonction.

Le mode de chargement de la jonction, en fonction de l'ordre du passage du train d'atterrissage principale de l'avion de calcul, est pris en considération lors de l'analyse numérique, les résultats en termes de déplacements et concentration des contraintes montrent une bonne qualité de modélisation numérique et valide l'approche suivie dans cette investigation. Les résultats de l'analyse numérique du renforcement montrent clairement l'efficacité de l'utilisation des géogrilles en nappe horizontale, comme solution économique qui vise à limiter les désordres localisés souvent au niveau de l'interface de la jonction.

Une étude paramétrique est ensuite réalisée pour déterminer la géométrie optimale (position d'insertion verticale) de la nappe de renforcement de géogrille. Les résultats obtenus montrent que l'installation de la nappe de géogrille sous la couche de base des chaussées, juste à l'interface entre la couche de base et la couche de fondation (interface sol – chaussée) permet une meilleure répartition des charges et la limitation des déformations différentielles entre les deux types de structure (souple vs rigide). Ce type de renforcement permet aussi une amélioration sensible de la portance et la réduction des tassements, donc une meilleure transition rigide-souple.

Références Bibliographiques :

[1] OACI. Annexe 14 – Aérodromes, Volume I : Conception et exploitation technique des aérodromes. Organisation de l'Aviation Civile Internationale, Montréal.

[2] Rouili Ahmed. (2025). Cours Aérodromes. Université Larbi Tébessi, Département de Génie Civil, Filière VOA, Tébessa.

[3] FAA. (2014). AC 150/5380-6C – Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation.

[4] FAA. (2023). AC 150/5320-17C – Airport Pavement Management System (APMS). Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation.

[5] ASTM International. (2018). ASTM D6433 – Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. West Conshohocken, PA.

[6] Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). Principles of Pavement Design. 2e éd., John Wiley & Sons, New York.

[7] STAC. (2007). Catalogue des dégradations sur chaussées aéronautiques – État de surface. Service Technique de l'Aviation Civile, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, France.

[8] OACI. (2019). Manuel de conception des aérodromes – Partie 6 : Chaussées. Doc 9157, 4e éd., Organisation de l'Aviation Civile Internationale, Montréal.

[9] DGAC. (2020). FICAV – Fiche d'Information et de Caractérisation des Aéroports et Voies de circulation. Direction Générale de l'Aviation Civile, Paris.

[10] Plaxis 8.2. (2007). Manuel de référence, version 1.2. Delft, Pays-Bas.