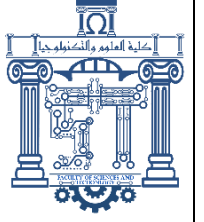




الجمهورية الجزائرية  
الديمقراطية  
الشعبية



Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث  
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي  
التبسي-تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

## MEMOIRE

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

**Filière : Travaux publics**

**Spécialité : Voies et Ouvrages d'Art**

**Par :**

**Souane Bilel et Aissoug Fahd**

**Sujet :**

**Analyse numérique du rôle et épaisseur optimale de la  
couche de forme pour le cas des chaussées  
aéronautiques soumises à un trafic dense**

Présenté et soutenu publiquement, le 07 / 06 / 2023 , devant le jury composé de :

Ninouh Tarek  
Rouili Ahmed  
Bouchoucha Abdallah

Professeur  
Professeur  
MAA

Président  
Rapporteur  
Examinateur

Promotion : 2022/2023



# DÉDICACES

*« Je dédie ce modeste travail :  
À toute la famille, mon père, ma mère, mes frères et sœurs,  
À tous les amis et proches et à toute personne ayant contribué  
à ce travail de près ou de loin. »*

# Remerciement

*Louange à ALLAH (que son Nom soit glorifié) qui nous a guidé, et sans lui nous n'aurions jamais été sur la bonne voie.*

*Nous remercions nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs  
patiences.*

*Nous exprimons toute notre gratitude au Professeur **Rouili Ahmed**  
pour son encadrement exceptionnel, sa confiance, son soutien incessant  
et son encouragement permanent.*

*Nous tenons également à remercier l'ensemble des enseignants du  
Département de Génie Civil pour toutes les informations qu'ils nous  
ont prodigué durant les cinq années de notre formation.*

*Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de  
Présider et d'examiner ce modeste travail.*

*A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation  
de ce Mémoire.*

**MERCI.**

# Liste des symboles

$K_0$ : Coefficient de poussée

$E$  : Module d'Young [ $\text{KN}/\text{m}^2$ ]

$\nu$  : Coefficient de poisson

$c$  : cohésion (kPa)

$\varphi$ : Angle de frottement

$\gamma_{\text{sat}}$  : Poids volumique saturé.

$K$  : Module de réaction du sol

$P$  : La charge réelle sur atterrisseur

$P'$  : La charges réelles pondérées

$P''$  : La charge normale de calcul

# Liste des abréviations

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

ACN : Numéro de classification de l'avion

PCN : Numéro de classification de chaussée

BB : béton bitumineux

GB : grave bitume

GNT : grave non traité

CS : Calcul statique

CD : Calcul dynamique

CP : Charge partielle

CT : Charge totale

# Liste des Figures

## Chapitre 1 : Aéronefs et charges de calcul

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figure 1.1 | : L'atterrisseur d'avion.....                                      | 08 |
| Figure 1.2 | : Schémas d'avion.....   | 08 |
| Figure 1.3 | : Dimensions type d'un Boeing 747.....                             | 09 |
| Figure 1.4 | : Pondération des charges réelles selon la fonction des aires..... | 17 |
| Figure 1.5 | : Caractéristique géométrique Boeing 727.....                      | 20 |
| Figure 1.6 | : Caractéristiques générales Iliouchine 0000 62M.....              | 22 |
| Figure 1.7 | : Caractéristique géométrique Boeing 727.....                      | 23 |

## Chapitre 2 : Les chaussées aéronautiques

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figure 2.1 | : Corps de chaussée souple.....                           | 27 |
| Figure 2.2 | : Corps de chaussée rigide.....                           | 28 |
| Figure 2.3 | : Différentes structures des chaussées aéronautiques..... | 29 |

## Chapitre 3 : Règles de conceptions et d'exploitation ( ACN /PCN)

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figure 3.1 | : Principe du dimensionnement forfaitaire.....   | 36 |
| Figure 3.2 | : Détermination de l'épaisseur équivalente ..... | 37 |
| Figure 3.3 | : Abaques de calcul forfaitaire du P.C.N.....    | 40 |

## Chapitre 4 : Modélisation de la structure d'une chaussée souple type.

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figure 4.1  | : Modèle de référence.....                               | 42 |
| Figure 4.2  | : Paramètre généraux du modèle.....                      | 43 |
| Figure 4.3  | : Modèle géométrique.....                                | 44 |
| Figure 4.4  | : Modèle géométrique présentée la charge concentrée..... | 44 |
| Figure 4.5  | : Modèle géométrique présentée la charge répartie.....   | 45 |
| Figure 4.6  | : Modèle en éléments finis.....                          | 46 |
| Figure 4.7  | : Génération des contraintes initiales.....              | 46 |
| Figure 4.8  | : Evaluation de la valeur de $K_0$ .....                 | 47 |
| Figure 4.9  | : Contraintes effectives du modèle.....                  | 47 |
| Figure 4.10 | : Modèle de calcul plastic avec charge concentrée .....  | 48 |
| Figure 4.11 | : Modèle de calcul plastic avec charge répartie.....     | 48 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figure 4.12</b> | : Modèle de calcul dynamique avec charge concentrée..... | 48 |
| <b>Figure 4.13</b> | : Modèle de calcul dynamique avec charge répartie.....   | 49 |

## **Chapitre 5 :Calculs numériques et résultats**

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Figure 5.1</b>  | :Déplacement total - charge concentrée effet statique.....                    | 51 |
| <b>Figure 5.2</b>  | :Déplacement total - charge concentrée effet dynamique.....                   | 51 |
| <b>Figure 5.3</b>  | :Déplacement total - charge répartie effet statique.....                      | 51 |
| <b>Figure 5.4</b>  | :Déplacement total -charge répartie effet dynamique.....                      | 52 |
| <b>Figure 5.5</b>  | :Effet statique - charge concentrée.....                                      | 56 |
| <b>Figure 5.6</b>  | :Effet statique - charge répartie.....  | 57 |
| <b>Figure 5.7</b>  | :Effet dynamique - charge concentré.....                                      | 57 |
| <b>Figure 5.8</b>  | :Effet dynamique - charge répartie.....                                       | 58 |
| <b>Figure 5.9</b>  | :Plastification - charge concentré effet statique.....                        | 58 |
| <b>Figure 5.10</b> | :Plastification -charge répartie effet statique.....                          | 59 |
| <b>Figure 5.11</b> | :Plastification -charge concentrée effet dynamique.....                       | 59 |
| <b>Figure 5.12</b> | :Plastification -charge répartie effet dynamique.....                         | 60 |
| <b>Figure 5.13</b> | :Courbe de déformations pour la charge 111kN.....                             | 64 |
| <b>Figure 5.14</b> | : Courbe de déformations pour la charge 300kN.....                            | 64 |
| <b>Figure 5.15</b> | : Courbe de déformations pour la charge 500kN.....                            | 65 |
| <b>Figure 5.16</b> | : Courbes totales pour toutes les charges.....                                | 65 |
| <b>Figure 5.17</b> | : Zones de plastifications en fonction des épaisseurs et des chargements..... | 69 |



# Liste des tableaux

## Chapitre 1 : Aéronefs et charges de calcul

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tableau 1.1 | : Types d'atterrisseurs.....  | 10 |
| Tableau 1.2 | : Dimensions et types d'atterrisseurs.....  | 11 |
| Tableau 1.3 | : Classification des avions d'après le chiffre et la lettre de code (Source : OACI).. | 15 |

## Chapitre 2 : Les chaussées aéronautiques

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tableau 2.1 | : Comparaison de chaussée souple et rigide..... | 30 |
| Tableau 2.2 | : Constitution de chaussée souple.....          | 31 |
| Tableau 2.3 | : Constitution de chaussée rigide.....          | 32 |
| Tableau 2.4 | : Coefficient d'équivalent de matériaux.....    | 34 |

## Chapitre 3 : Règles de conceptions et d'exploitation ( ACN / PCN)

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tableau 3.1 | : Classification par catégories des sols supports de chaussée..... | 39 |
|-------------|--|----|

## Chapitre 4 : Modélisation de la structure d'une chaussée souple type

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tableau 4.1 | : Matériaux de structure.....                                   | 42 |
| Tableau 4.2 | : Les différents types de dimensions de la couche de forme..... | 44 |
| Tableau 4.3 | : Les types des charges.....                                    | 45 |
| Tableau 4.4 | : Spécifications des matériaux.....                             | 45 |

## Chapitre 5 : Calculs numériques et résultats

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tableau 5.1 | : Deformed mesh charge appliquée C1=111 kN/m.....       | 53 |
| Tableau 5.2 | : Deformed mesh - charge appliquée C2=300 kN/m.....     | 54 |
| Tableau 5.3 | : Deformed mesh - charge appliquée C3=500 kN/m.....     | 55 |
| Tableau 5.4 | : Déplacement total - charge appliquée C1=111 kN/m..... | 60 |
| Tableau 5.5 | : Déplacement total - charge appliquée C2=300 kN/m..... | 62 |
| Tableau 5.6 | : Déplacement total - charge appliquée C3=500 kN/m..... | 63 |
| Tableau 5.7 | : Points Plastiques - charge appliquée C1=111 kN/m..... | 66 |
| Tableau 5.8 | : Points Plastiques - charge appliquée C2=300 kN/m..... | 67 |
| Tableau 5.9 | : Points Plastiques - charge appliquée C3=500 kN/m..... | 68 |

## Résumé

De par sa nature, la couche de forme d'une chaussée aéronautique agit par son épaisseur et résistance comme un support structurel pour la piste d'aérodrome, répartissant les charges des aéronefs sur une plus grande surface et réduisant ainsi les contraintes sur le sol sous-jacent. Elle contribue à prévenir l'affaissement et le tassement du sol, ce qui pourrait compromettre la stabilité de la piste.

Dans ce travail de recherche une approche numérique du comportement d'une couche de forme est proposée, un modèle numérique prenant en considération les aspects géométriques et rhéologiques ainsi que les charges appliquées, est proposé. Dans le calcul numérique, différentes conditions géométriques (variation de l'épaisseur de la couche de forme) et conditions de chargements sont considérées. L'analyse numérique a permis de mieux connaître le comportement sous l'influence d'un trafic dense et de charges élevées. Les conditions de plastification (fatigue) sont étudiées afin de déterminer l'épaisseur optimale de conception de la couche de forme, pour différentes conditions de chargement (concentrées, répartie statique et dynamique).

**Mots clés :** Couche de forme , modélisation numérique, épaisseur , trafic.

## ملخص

بحكم طبيعتها ، تؤدي طبقة تغطية أرضية المطار من خلال سمكها وقوتها دعم هيكلية لمدراج المطار ، وتوزع أحمال الطائرات على مساحة أكبر وبالتالي تقلل من الضغوط على أسفل الأرض و يساعد على منع الهبوط واستقرارها، مما قد يضر باستقرار المسار.

في هذا العمل البحثي ، تم اقتراح نموذج عددي لدراسة حمولة طبقة التغطية. النموذج عددي يأخذ في الاعتبار الجوانب الهندسية والريولوجية وكذلك الأحمال المطبقة. في الحساب العددي ، يتم النظر في الظروف الهندسية المختلفة (التباين في سمك طبقة التغطية. ) وظروف التحميل. قدم التحليل العددي نظرة ثاقبة للسلوك تحت تأثير حركة المرور الكثيفة والأحمال العالية. تمت دراسة ظروف الدائن (التعب) من أجل تحديد السماكة التصميمية المثلى لطبقة السد ، لظروف التحميل المختلفة (المركزة ، الموزعة الساكنة والديناميكية).

**الكلمات المفتاحية:** طبقة تغطية أرضية المطار, النموذج العددي ,سمك طبقة التغطية, حركة المطار.

## **Abstract**

By its nature, the capping layer of an airfield pavement acts through its thickness and strength as a structural support for the airfield runway, distributing the aircraft loads over a larger area and thus reducing the stresses on the ground beneath. -lying. It helps to prevent subsidence and settling of the ground, which could compromise the stability of the track.

In this research work, a numerical approach to the behavior of a capping layer is proposed, a numerical model taking into account the geometric and rheological aspects as well as the applied loads, is proposed. In the numerical calculation, different geometric conditions (variation in the thickness of the capping layer) and loading conditions are considered. Numerical analysis has provided insight into the behavior under the influence of heavy traffic and high loads. The plastification (fatigue) conditions are studied in order to determine the optimal design thickness of the capping layer, for different loading conditions (concentrated, distributed static and dynamic).

**Keywords** :Capping layer, Numerical modeling, layer's dimensions, traffic

# TABLE DES MATIERES

|   |           |
|---|-----------|
| Liste des symboles.....   | I         |
| Liste des abréviations.....   | II        |
| Liste des figures.....  | III       |
| Liste des tableaux.....   | IV        |
| <br>  |           |
| <b>Introduction .....</b>   | <b>02</b> |
| <br>  |           |
| <b>Chapitre 1 :Aéronefs et charges de calcul.....</b>               | <b>05</b> |
| <br>  |           |
| 1.1 Définition et classification.....                               | 05        |
| 1.2 Caractéristiques générales des avions et numéro d'ACN.....      | 05        |
| 1.3 Répartition des charges.....                                    | 06        |
| 1.4 Les atterrisseurs.....  | 09        |
| 1.4.1 Types d'atterrisseur.....                                     | 10        |
| 1.4.2 Atterrisseurs types.....                                      | 11        |
| 1.4.3 La pression des pneumatiques.....                             | 11        |
| 1.5 Le numéro D'ACN.....  | 12        |
| 1.5.1 Détermination de l'ACN.....                                   | 12        |
| 1.6 Note sur la classification des avions.....                      | 13        |
| 1.7 Avions gros porteurs et a forte charge de sollicitation.....    | 14        |
| 1.8 Le choix de la charge de calcul.....                            | 16        |
| 1.8.1 Données relatives aux avions.....                             | 16        |
| 1.9 Pondération des charges.....                                    | 17        |
| 1.10 Considérations relatives au trafic.....                        | 18        |
| 1.11. Caractéristique générales des trois types d'avion.....        | 19        |
| 1.11.2Caractéristiques générales Iliouchine 62M (catégorie 4D)..... | 19        |
| 1.11.1 Caractéristiques générales Boeing 727(catégorie 4C) .....    | 21        |
| 1.11.3 Caractéristiques générales Boeing 747 (catégorie 4E) .....   | 22        |

**Chapitre 2 : Les chaussées aéronautiques..... 25**

2.1 Généralité..... 25

2.2 Spécificités des chaussées aéronautiques..... 25

2.3 Structure des chaussées aéronautiques..... 26

    La couche de surface ou couche de roulement ..... 26

    La couche de base..... 26

    La couche de fondation..... 26

    Une sous couche..... 26

    Une couche de forme..... 26

2.4 Types de chaussées aéronautique de type ‘souple’..... 27

    Chaussée souple..... 27

    Chaussée rigide ..... 27

    Chaussée composite ..... 28

    Chaussée semi-rigide ..... 28

2.5 Choix d’un type de chaussée..... 30

2.6 Choix d’une constitution de chaussée..... 31

    Pour les chaussées souples ..... 31

    Pour les chaussées rigides ..... 31

2.7 Choix de la couche de forme..... 32

2.8 Notion d’épaisseur équivalente..... 33

2.9 Durée de vie d’une chaussée aéronautique..... 34

**Chapitre 3 : Règles de conceptions et d’exploitation (méthode ACN /PCN)..... 36**

3.1 Principe de la méthode..... 36

3.2 Dimensionnement forfaitaire des chaussées souples..... 37

3.3 Présentation de la méthode A.C.N. -P.C.N..... 38

    3.3.1 Détermination de L’A.C.N..... 38

    3.3.2 Détermination des P.C.N..... 40

**Chapitre 4 : Modélisation de la structure d’une chaussée souple type... 42**

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Structure de chaussée type.....                                    | 42 |
| 4.2 Géométrie du model.....  | 43 |
| 4.3 Géométrie et propriétés des matériaux.....                         | 43 |
| 4.4 Arrangement généraux (général settings) du modele.....             | 43 |
| 4.5 Conditions de chargement.....                                      | 44 |
| 4.6 Caractéristique des matériaux .....                                | 45 |
| 4.7 Modélisation en Eléments finis.....                                | 46 |
| 4.8 Conditions initiales.....  | 46 |
| 4.8.1 Contraintes initiales.....                                       | 46 |
| 4.9 Type de calcul.....  | 48 |
| 4.10 Simulation numérique.....   | 49 |
| 4.10.1 Simulation de différentes épaisseurs de la couche de forme..... | 49 |

## **Chapitre 5 : Calculs numériques et résultats..... 51**

|   |    |
|---|----|
| 5.1 Etapes de calculs.....  | 51 |
| 5.1.1. Calcul sous chargement concentré.....  | 51 |
| 5.1.2 Calcul sous chargement repartie.....  | 52 |
| 5.2 Déformations calculés du model.....   | 53 |
| 5.3. Comportement de la couche de forme (rôle structurel) .....                     | 56 |
| 5.4. Déformation de la couche de forme (sous) chargement statice et dynamique.....  | 56 |
| 5.5. Plastification de la couche de forme sous chargement statice et dynamique..... | 58 |
| 5.6. Détermination de l'épaisseurs optimal.....                                     | 60 |
| 5.6.1. Déplacement de phase total de model.....                                     | 60 |
| 5.6.2. La relation entre la déformation et l'épaisseur de la couche de forme.....   | 64 |
| 5.6.3 Estimation de l'épaisseur optimale de la couche de forme.....                 | 65 |
| 5.6.4 Conclusion.....   | 69 |

## **Conclusion..... 71**

# **INTRODUCTION**



## **1. Introduction**

Les pistes souples sont des types de pistes d'aérodrome qui sont constituées de matériaux flexibles tels que l'asphalte, le béton bitumineux ou le gravier compacté. Ces pistes sont utilisées dans la majorité des aérodromes à travers le monde, offrant une alternative importante aux pistes rigides traditionnelles en béton. De point de vue structurel, les pistes souples offrent des avantages assez considérables par leur flexibilité, ce qui les rend moins sensibles aux fissures causées par les mouvements du sol. Elles peuvent mieux absorber les forces générées par les atterrissages et les décollages, réduisant ainsi les contraintes sur le sol support. Les pistes souples peuvent être construites sur des terrains variés, y compris des sols instables ou des terrains difficiles à condition de prévoir une couche de forme.

La couche de forme d'une piste d'aérodrome, également appelée plateforme de la piste, est la couche de sol ou de matériau compacté qui est préparée et nivelée pour servir de base à la construction de la piste. C'est une composante essentielle de l'infrastructure d'un aéroport, car elle fournit une surface solide et stable pour les opérations des aéronefs.

La couche de forme est un élément de transition permettant d'adapter les caractéristiques des matériaux de remblai ou de sols en place aux fonctions essentielles d'une plate-forme support de chaussée ou de voie. Elle doit donc répondre à la fois des objectifs de court terme pour la réalisation de la chaussée ou de la voie (nivellement, portance, protection du sol support et traficabilité) et de long terme vis à vis de l'utilisation de l'ouvrage (homogénéisation, garantie d'une portance minimale, contribution au drainage de la plate-forme). L'épaisseur et la nature de la couche de forme reste un élément de conception d'importance capitale pour le comportement de la structure de la chaussée aéronautique, soumise à de très fortes sollicitations.

De par sa nature la couche de forme agit par son épaisseur et résistance comme un support structurel pour la piste d'aérodrome, répartissant les charges des aéronefs sur une plus grande surface et réduisant ainsi les contraintes sur le sol sous-jacent. Elle contribue à prévenir l'affaissement et le tassement du sol, ce qui pourrait compromettre la stabilité de la piste.

Dans ce travail de recherche une approche numérique du comportement d'une couche de

Forme est proposée, un modèle numérique est développé, prenant en considération les aspects géométriques et rhéologiques ainsi que les charges appliquées. Dans le calculs numérique différentes conditions géométriques (variation de l'épaisseur de la couche de forme) et conditions de chargements sont considérées. L'analyse numérique permettra de mieux connaître le comportement sous l'influence d'un trafic dense et de charges élevées. Les conditions de plastification (fatigue) sont étudiées afin de déterminer l'épaisseur optimale de conception de la couche de forme, pour différentes conditions de chargement (concentrées, répartie statique et dynamique).

## **2. Plan du mémoire**

Chapitre 1 : Aéronefs et charges de calcul

Chapitre 2 : Les chaussées aéronautiques

Chapitre 3 : Règles de conceptions et d'exploitation (méthode ACN / PCN)

Chapitre4 : Modélisation de la structure d'une chaussée souple type.

Chapitre 5 : Calculs numériques et résultats

Conclusion

**-CHAPITRE 1-**  
**AERONEFS ET CHARGES DE CALCUL**

---

## 1.1 Définition et classification

Les aéronefs, selon la définition de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), sont des machines capables de s'élever et de se maintenir dans l'atmosphère, qui incluent les avions, les hélicoptères, les dirigeables, les planeurs et autres engins similaires.

Pour la conception des aérodromes civils, l'OACI préconise la prise en considération des aéronefs munis d'ailes fixes et propulsés par des moteurs. Ils peuvent être classés en plusieurs sous-aéronefs de type Avions (Fixed-Wing Aircraft) : qui sont des aéronefs plus lourds que l'air, classés en catégories en fonction de leur poids maximum au décollage, de leur capacité de transport de passagers ou de marchandises, et de leur utilisation spécifique (par exemple, avions de ligne, avions de transport, avions de chasse, etc.).

Il est important de noter que l'OACI a développé une classification détaillée basée sur ces catégories principales, qui prennent en compte les différents aspects techniques, réglementaires et opérationnels pour répondre aux besoins de l'aviation civile internationale.

## 1.2 Caractéristiques générales des avions et numéro d'ACN

Les avions sont des aéronefs à moteur et à ailes fixes. Ils représentent la majeure partie du matériel aérien. Selon leur conception, les avions peuvent être utilisés pour le transport des voyageurs ou le transport des marchandises (Fret). Par définition un aérodrome est destiné principalement aux avions de différentes classes et performances. Pour la conception optimale d'un aérodrome il est nécessaire de tenir compte des caractéristiques techniques des avions devant fréquenter l'aérodrome et de leurs fréquences ou taux du trafic. L'étude du matériel aérien intéresse en particulier les responsables des problèmes d'infrastructure du fait que la conception générale de l'air de mouvement [4]

- Des caractéristiques des avions devant fréquenter l'aérodrome ou bien plus particulièrement le plus critique de point de vue dimensions et masses entre ces derniers ;
- Son poids et les caractéristiques de son train d'atterrissage et de son pneumatique influent largement sur la structure et l'épaisseur des chaussées à concevoir ;
- La susceptibilité de l'avion aux vents traversiers domine le choix de la direction d'envol des pistes ;

- 
- Des performances des avions, précisément leurs distances de référence, celles liées au décollage et à l'atterrissage, car elles influent directement sur la longueur réelle à prévoir pour la piste ;
  - L'envergure et la hauteur de l'avion influent sur les dimensions des hangars, le rayon de virage de l'avion influent sur la conception géométrique des circuits d'attente, sur l'implantation des ouvrages, les dimensions des aires etc.

Ces caractéristiques sont fournies par les constructeurs et sont présentées pour des raisons de planification et de conception d'aérodromes, sous forme de tableaux et fiches de caractéristiques propres à chaque avion. En général ces tableaux donnent les informations suivantes :

- Une cartouche indique la référence et la date de mise à jour du document sur lequel ont été prélevés l'ensemble des renseignements relatifs à l'avion considéré. (Sauf Pour les *ACN*)
- Caractéristiques générales de l'avion (constructeur, marque, séries etc.)
- Répartition des charges
- Le schéma des atterrisseurs
- La pression des pneumatiques
- Les numéros d'*ACN*.

Au niveau des fiches technique de classification chaque avion par ces masses spécifiques à savoir :

- Masse au roulage : c'est la masse maximale pour les évolutions au sol de l'avion, qui est la masse acceptable pendant les manœuvres au sol sur les aires de stationnement.
- Masse maximum au décollage : c'est la masse maximale de l'avion acceptable au décollage.
- Masse à vide opérationnelle : c'est la masse de l'avion à vide avec ses équipements permanents, un aménagement de cabine et un équipage de référence.

---

### 1.3 Répartition des charges

La répartition totale de la masse d'un avion entre l'atterrisseur avant et les atterrisseurs principaux est fonction de la position de centre de gravité (centrage). Cette répartition varie donc d'un avion à un autre selon la conception du train d'atterrissage, et est fournie par le constructeur.[5]

En l'absence d'indication précise, la répartition admise pour les trains d'atterrissage classiques est la suivante :

- 10% de la masse totale de l'avion sur l'atterrisseur d'avant
- 95% de la masse totale de l'avion sur les atterrisseurs principaux

Voir Figure 1.1 et 1.2

- **V** : exprime le pourcentage de la masse de l'avion transmise verticalement par l'atterrisseur du nez et l'atterrisseur principale à la chaussée. Ce pourcentage intervient directement dans le dimensionnement des chaussées. Pour la grande majorité des avions c'est la valeur de V correspondant à l'atterrisseur principale, qui est prise en considération lors des calculs, car le plus grand pourcentage de la masse est pris par le train principal.
- **H** : exprime le pourcentage de la masse de l'avion transmise horizontalement par l'atterrisseur principal lors de l'action de freinage de l'appareil. Le freinage des avions est réalisé par l'action de dispositifs appropriés sur les roues des atterrisseurs principaux, à laquelle s'ajoute pour les avions d'un certain tonnage, l'inversion de la poussée des réacteurs. Les efforts tangentiels exercés par les roues sur la chaussée ne sont pas pris en considération lors du dimensionnement des chaussées, l'expérience a montré que les efforts tangentiels sont absorbés par les chaussées normalement constituées, elles ne sont toutefois prises en compte que pour des études particulières comme celle des ouvrages sous piste.

Les charges statiques verticales et horizontales sont déterminées en multipliant la masse totale de l'avion considéré par la valeur du pourcentage V ou H.

Les dimensions typiques (détaillées) d'un avion gros porteur Boeing 747 sont présentées dans la Figure 1.3.

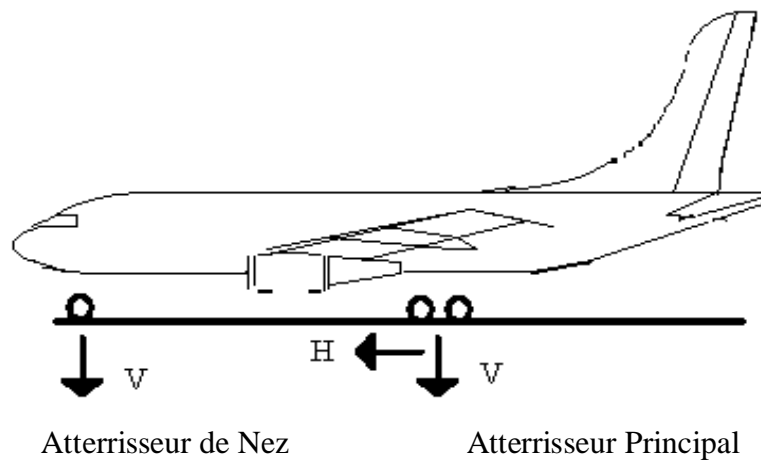


Figure 1.1 : l'atterrisseur d'avion

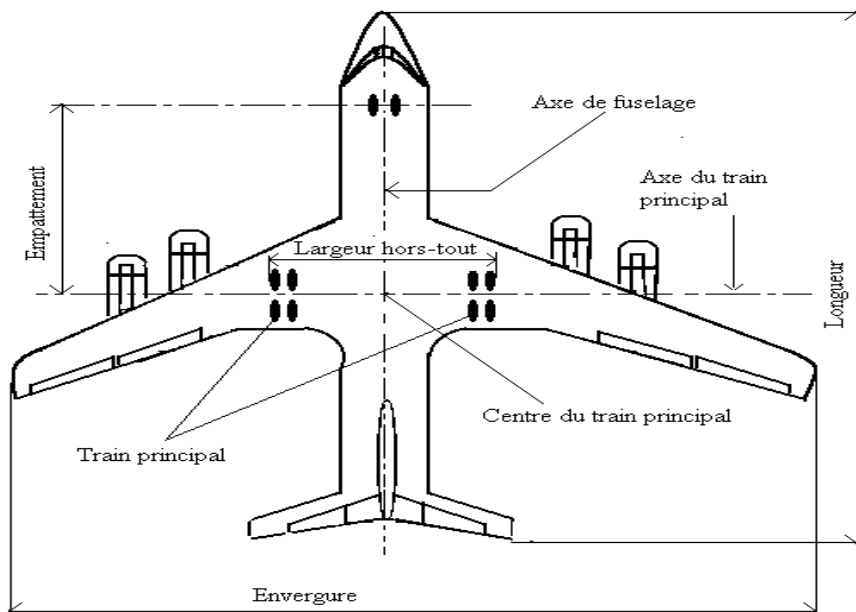


Figure 1.2: schémas d'avion

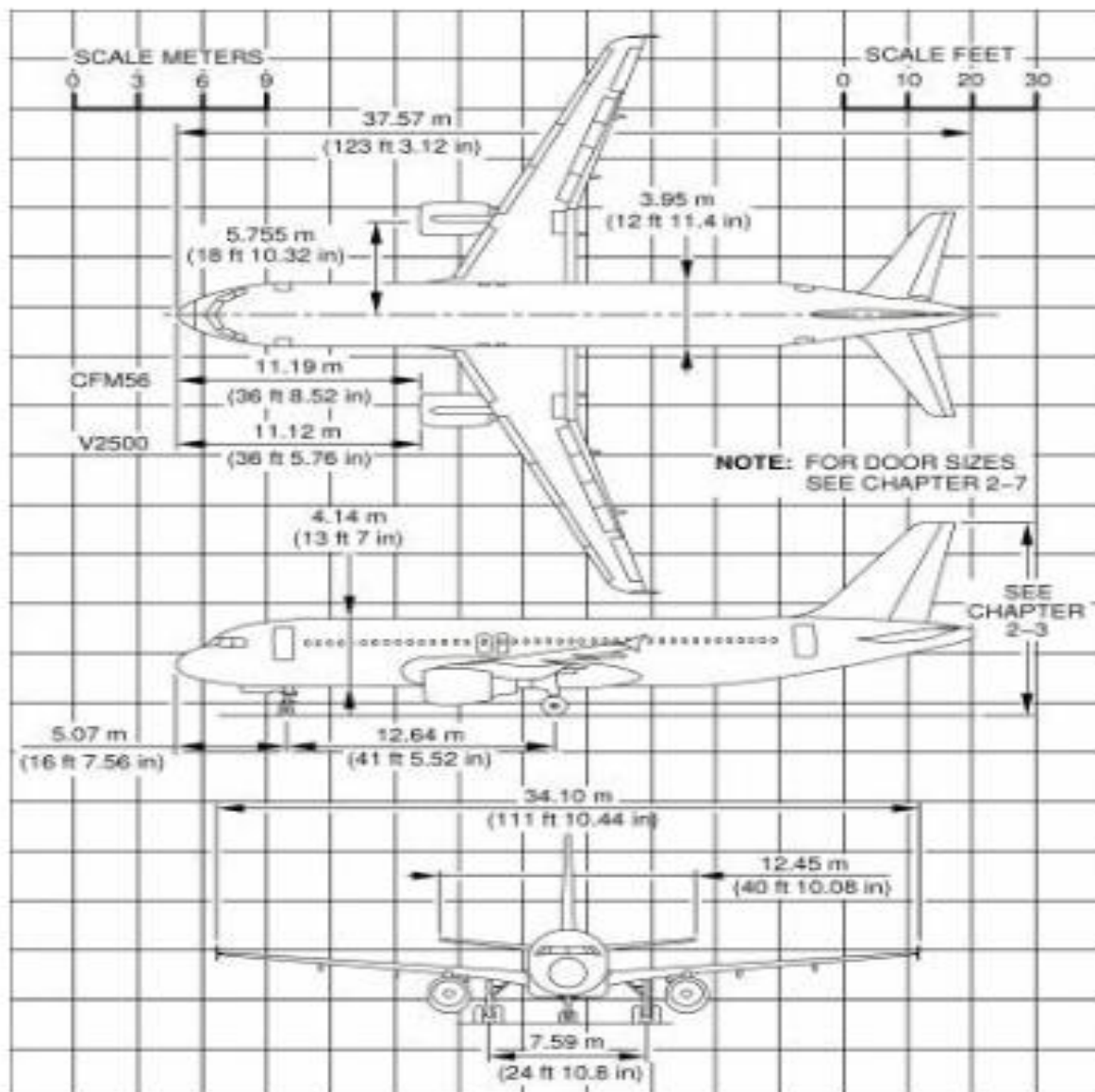


Figure 1.3: Dimensions type d'un Boeing 747




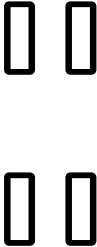
## 1.4 Les atterrisseurs

L'atterrisseur est constitué par l'ensemble des roues montées sur une même jambe. L'ensemble des atterrisseurs constitue le train d'atterrissage. Le train d'atterrissage des avions de transport commercial se compose généralement de deux atterrisseurs principaux et d'un atterrisseur secondaire, situé à l'avant. Parmi les exceptions figure le Boeing 747 doté de 4 atterrisseurs principaux et le DC 10-30 doté de 3 atterrisseurs principaux dont une centrale.

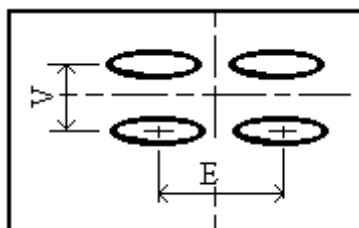


### 1.4.1 Types d'atterrisseur

Tableau 1.1 :Types d'atterrisseurs

| Type d'atterrisseur | Forme Géométrique   | Masses supportées | Pression de gonflage des pneumatiques | Exemples   |
|---------------------|---|-------------------|---------------------------------------|--|
| ROUE SIMPLE         |    | Jusqu'à 5 t       | de 0,3 à 0,6 MPa                      | avions légers  |
| JUMELAGE            |    | de 5 à 40 t       | de 0,6 à 1,2 MPa                      | - avions légers<br>- court et moyens courriers                 |
| TANDEM              |   | de 10 à 20 t      | de 0,4 à 0,8 MPa                      | avions militaires<br>(configuration rare)                      |
| BOGGIE              |  | de 20 à 90 t      | de 1 à 1,6 MPa                        | Tous types sauf avions légers<br>Principalement long-courriers |

Les atterrisseurs type jumelage et boggie sont caractérisés de point de vue dimensionnel par l'espacement longitudinal (l'empattement : E) et transversal (la voie: v) entre les roues :



### 1.4.2 Atterrisseur types

Le dimensionnement des chaussées (souples et rigide) doit tenir compte des sollicitations provoquées par les trains d'atterrissage des avions, pour cela, on considère que la charge à prendre est en fait un pourcentage de la masse maximal de l'avion. Cette charge est appliquée par chacun des atterrisseurs. Avec les trains d'atterrissage des avions connus, l'espacement entre les atterrisseurs est tel qu'il est légitime d'étudier individuellement l'action de chaque atterrisseur.

Compte tenu de la variété des caractéristiques géométriques des atterrisseurs, il été utile d'introduire des atterrisseurs – types représentatifs des trois catégories d'atterrisseurs les plus répandus : la roue simple, le jumelage et le boggie, dont les caractéristiques sont présentées au tableau suivant :

**Tableau1.2 :Dimensions et types d'atterrisseurs**

| <b>Atterrisseur-type</b> | <b>Voie -v-<br/>(cm)</b> | <b>Empattement-E-<br/>(cm)</b> |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| ROUE SIMPLE              | --                       | --                             |
| JUMELAGE                 | 70                       | --                             |
| BOGGIE                   | 75                       | 140                            |

L'établissement des abaques de dimensionnement des chaussées (souples ou rigides) ont été établis par le STBA sur la base de l'introduction de la notion des atterrisseurs-types représentatifs. [4]

### 1.4.3 La pression des pneumatiques

Les pressions des pneumatiques sont importantes pour le calcul des *ACN* et généralement pour lesquels les abaques de dimensionnement propre à chaque avion sont tracés. Au niveau de ce tableau, le constructeur fournit la pression des pneumatiques propre à chaque série et relative à l'atterrisseur d'aile (principal) et celui du nez(secondaire).

La valeur de la pression des pneumatiques utilisée dans la conception des abaques de dimensionnement de chaussées, et caractérisant chacun des atterrisseurs-types sont comme suit :

- Roue simple : 0,6 MPa
- Jumelage : 0,9 MPa
- Boggie : 1,2 MPa

## 1.5 Le numéro D'ACN

*L'ACN* : (Aircraft Classification Number) ou Numéro de Classification de l'Avion. C'est un nombre sans dimension qui exprime l'effet relatif d'un aéronef sur une chaussée pour une résistance type spécifiée du terrain de fondation. Ce numéro est transmis par le constructeur de l'avion pour des fins de planification des chaussées d'aérodrome.

### 1.5.1 Détermination de l'ACN

Le principe de calcul de l'ACN d'un avion est de rechercher une roue simple équivalente (RSE). La valeur de la charge sur une roue simple isolée gonflée à la pression standard de 1,25 MPa nécessitant la même épaisseur de chaussée est calculée. La valeur ainsi obtenue correspond à une charge de roue simple équivalente RSE. En notant RSE cette charge, l'ACN est définie comme suit :

$$ACN = \frac{2}{1000} RSE \quad (\text{RSE en Kg})$$

L'ACN est un nombre sans dimension. Le coefficient de la relation précédente a été choisi, pour procurer une gamme de valeur comprise entre 0 et 100 pour la grande majorité des avions existants. De manière à simplifier les publications, les ACN des avions ne sont calculés que pour 4 catégories de sol support caractérisées chacune par un CBR (chaussées souples) ou un module de réaction (chaussées rigide) ainsi que pour 2 masses (masse maximale au roulage, et la masse à vide en ordre d'exploitation).

Plusieurs types d'avions actuellement en service ont été évalués sur des chaussées rigides et souples sur la base des quatre catégories de sol support indiquées précédemment. Les résultats pour les principaux avions sont présentés dans les tableaux de caractéristiques propres à chaque avion et dans le Tableau 1.3, de ce manuel.

---

Selon la série de l'avion considéré, les numéros d'ACN sont présentés pour chaque type de structure de chaussée (souples et rigides), tenant compte des quatre classes de sol support (A, B, C et D). Deux masses sont considérées : la masse maximum (au décollage)  $M$  et la masse minimum (à vide opérationnelle)  $m$ , auxquelles correspondent les ACN max et ACN min respectivement. Les ACN correspondant à quelques types d'avions sont présentés dans l'appendice1 de ce manuel. Ces informations interviennent directement dans la détermination des charges admissibles.

## 1.6 Note sur la classification des avions

Pour des raisons de planification d'aérodromes, l'OACI a adopté un système de classification des avions basé sur les caractéristiques de performances et sur les dimensions des avions. Dans cette classification les performances d'un avion sont caractérisées par sa distance de référence, ses dimensions ; par son envergure et la largeur hors-tout de son train d'atterrissage principal

- La distance de référence

La distance de référence d'un avion est définie comme étant la longueur minimale nécessaire en atmosphère type, pente nulle et air calme, pour le décollage au poids maximal certifié au décollage. Cette distance est fournie par le constructeur. Il faut noter que la distance de référence d'un avion est déterminée uniquement pour le choix du chiffre de code et n'est pas appelée à influencer sur la longueur de piste effectivement offerte. Selon leurs distances de référence les avions sont classés en quatre classes notées de 1 à 4. Chaque chiffre correspond à un intervalle de valeurs.

- L'envergure et la largeur hors-tout du train d'atterrissage (voir Figure 1.2).

Selon la largeur hors-tout du train d'atterrissage, les avions sont classés en 5 classes désignés par les lettres : A, B, C, D et E.

En affectant un code constitué d'un chiffre (selon la distance de référence) et d'une lettre (selon l'envergure et la largeur hors-tout) à chaque avion, on peut aboutir à une classification des avions par groupe ayant le même code (Chiffre + lettre), A titre d'exemple :

---

Les avions Boeing 727-100, Boeing 737-200, Dc-9-10, le Vis count 800 appartiennent à la même classe ayant le code 4C (chiffre (4) et lettre (C)) :

D'après la classification ce code signifie que, ces avions ont en commun les caractéristiques suivantes :

- Distance de référence  $\geq 1800$  m
- Envergure : de 36 m à 52 m exclus
- Largeur hors-tout : de 9 à 14 m exclus

Une classification des avions représentatifs selon le numéro de code et la lettre de code est élaboré par l'OACI pour des fins de conception et d'exploitation des aéroports civils.[4]

### **1.7 Avions gros porteurs et a forte charge de sollicitation**

Pour la prise en considération des charges les plus élevées pouvant être appliquées par les avions sur les aéroports en considère les catégories : 4C et 4D et 4E. Dans la catégorie 4E on trouve principalement les Boeing 747,

**Tableau1.3 : CASSIFICATION DES AVIONS D'APRES LE CHIFFRE ET LA LETTRE DE CODE**  
(Source : OACI)

| Type d'avion            | Code | Distance de Référence de l'avion (m) | Envergure (M) | Largeur hors-tout du train principal |
|-------------------------|------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| BAC 1-11-200            | 4C   | 1884                                 | 27,0          | 5,2                                  |
| BAC 1-11-300            | 4C   | 2484                                 | 27,0          | 5,2                                  |
| BAC 1-11-400            | 4C   | 2420                                 | 27,0          | 5,2                                  |
| BAC 1-11-475            | 4C   | 2286                                 | 28,5          | 5,4                                  |
| BAC 1-11-500            | 4C   | 2408                                 | 28,5          | 5,2                                  |
| Boeing 727-100          | 4C   | 2502                                 | 32,9          | 6,9                                  |
| Boeing 727-200          | 4C   | 3176                                 | 32,9          | 6,9                                  |
| Boeing 737-100          | 4C   | 2499                                 | 28,4          | 6,4                                  |
| Boeing 737-200          | 4C   | 2295                                 | 28,4          | 6,4                                  |
| Boeing 737-Advanced-200 | 4C   | 2707                                 | 28,4          | 6,4                                  |
| Caravelle 12            | 4C   | 2600                                 | 34,3          | 5,9                                  |
| Concorde                | 4C   | 3400                                 | 25,5          | 8,8                                  |
| DC-9-10                 | 4C   | 1975                                 | 27,2          | 5,9                                  |
| DC-9-30                 | 4C   | 2134                                 | 28,5          | 6,0                                  |
| DC-9-40                 | 4C   | 2091                                 | 28,5          | 5,9                                  |
| DC-9-50                 | 4C   | 2451                                 | 28,5          | 5,9                                  |
| DC-9-80                 | 4C   | 2195                                 | 32,9          | 6,2                                  |
| Trident 1E              | 4C   | 2590                                 | 29,0          | 7,3                                  |
| 2E                      | 4C   | 2780                                 | 29,9          | 7,3                                  |
| 3                       | 4C   | 2670                                 | 29,0          | 7,3                                  |
| Viscount 800            | 4C   | 1859                                 | 28,6          | 7,9                                  |
| DC-10-40                | 4D   | 3124                                 | 50,4          | 12,6                                 |
| Ilyouchine 18V          | 4D   | 1980                                 | 37,4          | 9,9                                  |
| Ilyouchine 62M          | 4D   | 3280                                 | 43,2          | 8,0                                  |
| Lockheed L-100-20       | 4D   | 1829                                 | 40,8          | 4,9                                  |
| L-100-30                | 4D   | 1829                                 | 40,4          | 4,9                                  |
| Lockheed L-188          | 4D   | 2066                                 | 30,2          | 10,5                                 |
| Lockheed L-1011-1       | 4D   | 2426                                 | 47,3          | 12,8                                 |
| L-1011-200              | 4D   | 2469                                 | 47,3          | 12,8                                 |
| L-1011-500              | 4D   | 2844                                 | 47,3          | 12,8                                 |
| TU-134A                 | 4D   | 2400                                 | 29,0          | 10,3                                 |
| TU-154                  | 4D   | 2160                                 | 37,6          | 12,4                                 |
| Boeing 747-100          | 4E   | 3060                                 | 59,6          | 12,4                                 |
| Boeing 747-200          | 4E   | 3150                                 | 59,6          | 12,4                                 |
| Boeing 747-SR           | 4E   | 1860                                 | 59,6          | 12,4                                 |
| Boeing 747-SP           | 4E   | 2710                                 | 59,6          | 12,4                                 |

---

## 1.8 Le choix de la charge de calcul

### 1.8.1 Données relatives aux avions :

- **La masse des avions**

Il est nécessaire de connaître pour chaque avion à considérer dans le calcul :

- La masse au décollage : Pour un dimensionnement forfaitaire ;
- La masse au décollage et la masse à l'atterrissage pour un dimensionnement optimisée, pour l'ensemble des avions prévus.

- **L'atterrisseur :**

L'atterrisseur est défini comme étant l'ensemble de roue montée sur une même jambe. L'ensemble d'atterrisseurs constitue le train d'atterrissage. On introduit la fiction de « l'atterrisseur-type » représentatif de chacune des trois catégories d'atterrisseur les plus répandus (roue simple, jumelage et bogie), les caractéristiques des atterrisseurs-types sont présentés dans le tableau suivant :

- **Répartition de la masse sur les atterrisseurs**

Répartition statique : La répartition totale de la masse d'un avion entre l'atterrisseur avant et les atterrisseurs principaux est fonction du centrage de l'avion, donc. C'est-à-dire de la position du centre de gravité, et elle varie peu. Pour chaque type d'avion le pourcentage de répartition de la charge entre le train avant et le train d'atterrissage principale est donné par le constructeur (fiches techniques). Comme indiqué au chapitre 2, Pour les avions dont on ne dispose pas d'indication précises, on admettra que la répartition est de 10% sur l'atterrisseur avant et 95% sur les atterrisseurs principaux. De manière générale c'est l'atterrisseur principale qui fournit les sollicitations les plus sévères.

La masse des avions à considérer intervient dans les calculs sous forme d'une charge statique appliquée par chacun des atterrisseurs. On définit la charge réelle de calcul  $P$  qui est égale au produit de la masse au décollage de l'avion par le pourcentage correspondant à chaque atterrisseur principal.

La charge réelle à considérer dans le calcul  $P$  est :

$$P = M \times V_{statique}$$

Avec :

$M$  : masse au décollage de l'avion

$V$  statique : pourcentage de la masse supportée par chaque atterrisseur du train principal.[1]

## 1.9 Pondération des charges

Chaque partie de l'aire de mouvement (piste, voies de circulation ou aires de stationnement) doit être dimensionnée séparément pour tenir compte des conditions différentes de sollicitations. Toutes en étant soumises aux mêmes sollicitations, certaines chaussées peuvent subir des fatigues différentes. Par exemple :

- La circulation est lente et concentrée sur les aires de stationnement et au contraire, occasionnelle et dispersée sur les accotements ou les prolongements d'arrêt ;
- En conséquence des effets dynamiques, lorsque l'avion roule à grande vitesse (au niveau de la partie centrale de la piste au décollage et des mille premiers mètres au-delà du seuil à l'atterrissage), le phénomène de chargement est fugace et donc peu sévère. De plus la charge est diminuée par l'effet de la sustentation des ailes.
- Pour tenir compte de ces conditions de fatigue, les charges recensées sur chaque type d'aire sont pondérées selon les indications portées sur la Figure 2.3. Pour les aires de stationnement, seules les aires sur lesquelles stationnent effectivement les avions sont justiciables de la pondération par 1,2.

Après pondération, la charge à considérer dans le calcul est  $P'$  :

$$P' = P \times K_p$$

Avec :

$P'$  : la charge réelle pondérée propre à chaque partie de l'aérodrome

$P$  : La charge réelle de l'avion

$K_p$  : coefficient de pondération propre à chaque partie de l'aérodrome

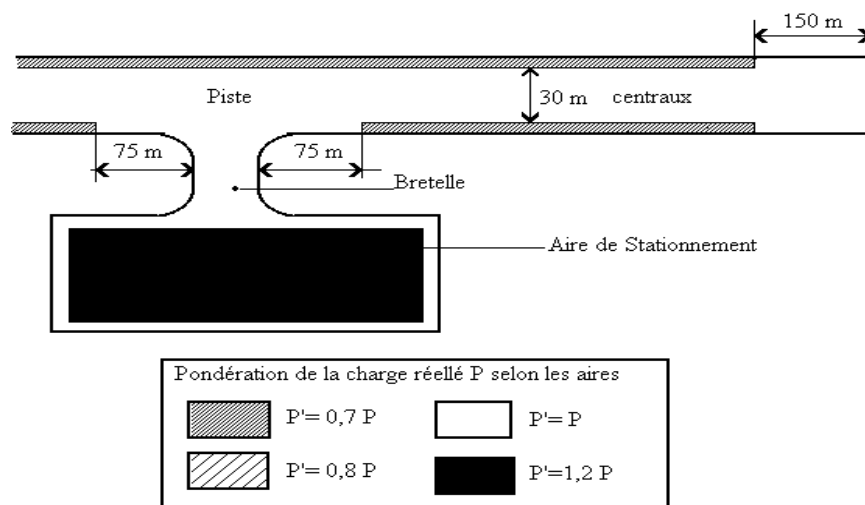


Figure 1.4 : Pondération des charges réelles selon la fonction des aires



- Les charges normales de calcul  $P''$

Concernant cette technique de pondération, Il est recommandé lors de l'étude d'un projet, d'examiner les économies qui pourront être faites par l'application de ces règles, et les difficultés éventuelles qui pourront en résulter lors de la construction, et d'adopter les réductions d'épaisseur (par pondération des charges) chaque fois qu'elles seront réellement avantageuses à court et à long terme. Ces règles de réduction d'épaisseur sont couramment utilisées dans beaucoup de pays [4]

### 1.10 Considérations relatives au trafic

Le trafic est l'ensemble de mouvement effectuer par un avion durant une période déterminée.

Il constitue l'un des paramètres prépondérants du dimensionnement des chaussées. Pour

Pouvoir donner toute la signification a ce terme (nécessaire au dimensionnement des

Chaussées), il est nécessaire de définir les concepts suivants :

Un mouvement réel est l'application d'une charge sur une chaussée par l'intermédiaire

D'un atterrisseur réel lors d'une manœuvre de décollage, d'atterrissage ou de roulage.

- **Le trafic normal** : est le trafic constitué par dix mouvements par jour de l'avion

Produisant la charge de calcul pour une durée de vie escomptée de dix ans au moins.

- **Le trafic réel** : est constitué par différents mouvements de charges réelles variées

Appliquées par l'intermédiaire d'atterrisseurs réels de différentes catégories.

- $P''$  correspondant à 10 mouvements par jour pendant 10 ans. Cette hypothèse est tout à fait raisonnable et prudente, lors de l'étude d'une chaussée nouvelle. Toutefois, il peut se faire que ce niveau de trafic soit manifestement inférieur au trafic prévisible de l'aérodrome ou qu'au contraire il l'excède largement. Il est alors nécessaire de tenir compte de l'intensité réelle escomptée du trafic. Dans ce cas la charge réelle pondérée  $P'$  doit être corrigée en fonction du nombre  $n$  de mouvements réels par jour.

$$P'' = \frac{P'}{Ct}$$

Avec :

$P''$  : la charge normale de calcul

$P'$  : la charge réelle pondérée

$Ct = c$ 'est le coefficient de correction du trafic

Ct peut être directement calculer par la formule :

$$C_t = 1,2 - 0,2 \log n$$

Dans notre étude, nous travaillerons avec un facteur de pondération[4]

### -Charge de calculs

Les charges de calculs considérés correspondent en taux charges normales de calcul pour la catégorie 4C, 4D et 4E, (pour un trafic normal de 10 mouvements par jour)

| Charge d'avion catégorie<br>4C | Charge d'avion catégorie<br>4D | Charge d'avion catégorie<br>4E |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 111 KN/m                       | 300 KN/m                       | 500KN/m                        |

## 1.11. Caractéristique générales des trois types d'avion

### 1.11.1 Caractéristiques générales Boeing 727 (catégorie 4C)

| Masse maxi au roulage (kg) | Masse maxi au décollage (kg) | Masse maxi à l'atterrissage (kg) | Masse à vide opérationnelle (kg) |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 77 200                     | 76 700                       | 64 700                           | 39 800                           |

Pression des pneumatiques Pression de gonflage standard (MPa)

| Att. principal | Att. de nez |
|----------------|-------------|
| 1.14           | 0.69        |

Répartition des charges

| Att. de nez<br>Centrage avant (% max) |                     | Att. principal<br>Centrage arrière (% max) |                     |
|---------------------------------------|---------------------|--|---------------------|
| V statique                            | V freinage constant | V statique                                 | V freinage constant |
| 10.89                                 |                     | 47.6                                       |                     |

Numéros d'ACN

| Masse de calcul (kg) | Classes           |    |    |    |                   |    |    |    |
|----------------------|-------------------|----|----|----|-------------------|----|----|----|
|                      | Chaussées souples |    |    |    | Chaussées rigides |    |    |    |
|                      | A                 | B  | C  | D  | A                 | B  | C  | D  |
| 77 200               | 42                | 44 | 50 | 55 | 42                | 44 | 45 | 55 |
| 39 800               | 21                | 22 | 24 | 25 | 20                | 20 | 22 | 25 |

Numéros d'ACN

| Masse de calcul (kg) | Classes           |   |   |   |                   |   |   |   |
|----------------------|-------------------|---|---|---|-------------------|---|---|---|
|                      | Chaussées souples |   |   |   | Chaussées rigides |   |   |   |
|                      | A                 | B | C | D | A                 | B | C | D |

Atterrisseurs

|                               | Voie (m) | SD (m) | Nb roues |                |
|-------------------------------|----------|--------|----------|----------------|
| <b>Atterrisseur principal</b> | 0.86     | 0      | 2        |                |
| <b>Config. atterrisseurs</b>  |          |        |          |                |
| 2-2-2                         |          |        |          |                |
|                               | X (m)    | Y (m)  | R (m)    | Pression (MPa) |
| <b>1</b>                      | 0        | 0.305  | 0.1379   | 0.69           |
| <b>2</b>                      | 16.23    | 2.43   | 0.2243   | 1.14           |
| <b>3</b>                      | 16.23    | 3.29   | 0.2243   | 1.14           |
| <b>4</b>                      | 0        | -0.305 | 0.1379   | 0.69           |
| <b>5</b>                      | 16.23    | -2.43  | 0.2243   | 1.14           |
| <b>6</b>                      | 16.23    | -3.29  | 0.2243   | 1.14           |

Visualisation des atterrisseurs [7]

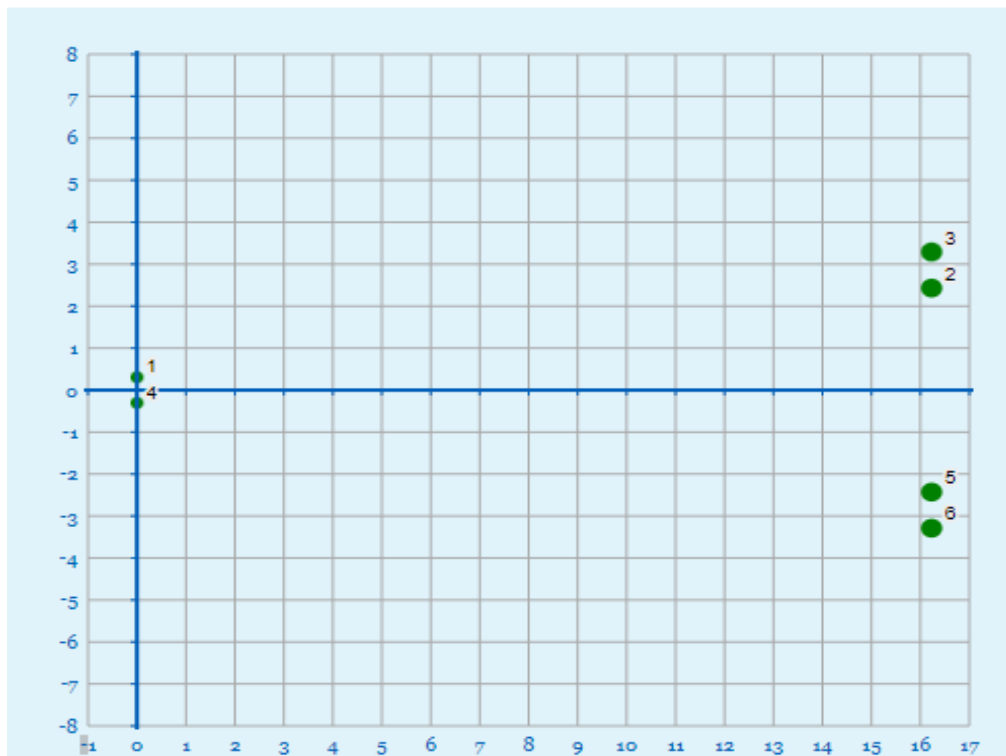


Figure 1.5 :Caractéristiques générales Boeing 727

### 1.11.2 Caractéristiques générales Iliouchine0000 62M (catégorie 4D)

| Masse maxi au roulage (kg) | Masse maxi au décollage (kg) | Masse maxi à l'atterrissage (kg) | Masse à vide opérationnelle (kg) |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 273500                     | 272100                       | 255800                           | 162890                           |

Pression des pneumatiques Pression de gonflage standard (MPa)

| Att. principal | Att. de nez |
|----------------|-------------|
| 1.12           | 0.96        |

Répartition des charges

| Att. de nez<br>Centrage avant (% max) |                     | Att. principal<br>Centrage arrière (% max) |                     |
|---------------------------------------|---------------------|--|---------------------|
| V statique                            | V freinage constant | V statique                                 | V freinage constant |
| 10.48                                 |                     | 24.08                                      |                     |

Numéros d'ACN

| Masse de calcul (kg) | Classes           |    |    |    |                   |    |    |    |
|----------------------|-------------------|----|----|----|-------------------|----|----|----|
|                      | Chaussées souples |    |    |    | Chaussées rigides |    |    |    |
|                      | A                 | B  | C  | D  | A                 | B  | C  | D  |
| <b>Max</b>           |                   |    |    |    |                   |    |    |    |
| <b>:</b>             | 34                | 37 | 43 | 59 | 31                | 37 | 44 | 52 |
| 273500               |                   |    |    |    |                   |    |    |    |
| <b>Min</b>           |                   |    |    |    |                   |    |    |    |
| <b>:</b>             | 18                | 19 | 21 | 27 | 17                | 19 | 22 | 26 |
| 162890               |                   |    |    |    |                   |    |    |    |

Numéros d'ACR

| Masse de calcul (kg) | Classes           |   |   |   |                   |   |   |   |
|----------------------|-------------------|---|---|---|-------------------|---|---|---|
|                      | Chaussées souples |   |   |   | Chaussées rigides |   |   |   |
|                      | A                 | B | C | D | A                 | B | C | D |

Atterrisseurs

|                               | Voie (m)  | SD (m) | Nb roues |
|-------------------------------|-----------|--------|----------|
| <b>Atterrisseur principal</b> | 1.12      | 1.8481 | 4        |
| <b>Config. atterrisseurs</b>  |           |        |          |
|                               | 2-4-4-4-4 |        |          |

Figure 1.6 : Caractéristiques générales Iliouchine0000 62M

## 1.11.3 Caractéristiques générales Boeing 747 (catégorie 4 E)

| Masse maxi au roulage (kg) | Masse maxi au décollage (kg) | Masse maxi à l'atterrissage (kg) | Masse à vide opérationnelle (kg) |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 318 880                    | 315 600                      | 204 100                          | 147 870                          |

Pression des pneumatiques (Pression de gonflage standard (MPa))

| Att. Principal | Att. de nez |
|----------------|-------------|
| 1.41           | 1.44        |

Répartition des charges

| Att. de nez<br>Centrage avant (% max) |                     | Att. principal<br>Centrage arrière (% max) |                     |
|---------------------------------------|---------------------|--|---------------------|
| V statique                            | V freinage constant | V statique                                 | V freinage constant |
| 13.8                                  |                     | 21.9                                       |                     |

Numéros d'ACN

| Masse de calcul (kg) | Classes           |    |    |    |                   |    |    |    |
|----------------------|-------------------|----|----|----|-------------------|----|----|----|
|                      | Chaussées souples |    |    |    | Chaussées rigides |    |    |    |
|                      | A                 | B  | C  | D  | A                 | B  | C  | D  |
| 318 880              | 38                | 41 | 49 | 67 | 38                | 44 | 53 | 61 |
| 147 870              | 15                | 16 | 17 | 21 | 15                | 16 | 19 | 22 |

Numéros d'ACN

| Masse de calcul (kg) | Classes           |   |   |   |                   |   |   |   |
|----------------------|-------------------|---|---|---|-------------------|---|---|---|
|                      | Chaussées souples |   |   |   | Chaussées rigides |   |   |   |
|                      | A                 | B | C | D | A                 | B | C | D |

## Atterrisseurs

|                               | Voie (m) | SD (m) | Nb roues |                |
|-------------------------------|----------|--------|----------|----------------|
| <b>Atterrisseur principal</b> | 1.1      | 1.757  | 4        |                |
| <b>Config. atterrisseurs</b>  |          |        |          |                |
| 2-4-4-4-4                     |          |        |          |                |
|                               | X (m)    | Y (m)  | R (m)    | Pression (MPa) |
| <b>1</b>                      | 0        | 0.455  | 0.2182   | 1.44           |
| <b>2</b>                      | 18.305   | 6.05   | 0.1967   | 1.41           |
| <b>3</b>                      | 18.305   | 4.95   | 0.1967   | 1.41           |
| <b>4</b>                      | 19.675   | 6.05   | 0.1967   | 1.41           |
| <b>5</b>                      | 19.675   | 4.95   | 0.1967   | 1.41           |
| <b>6</b>                      | 21.375   | 2.47   | 0.1967   | 1.41           |
| <b>7</b>                      | 21.375   | 3.57   | 0.1967   | 1.41           |
| <b>8</b>                      | 22.745   | 2.47   | 0.1967   | 1.41           |
| <b>9</b>                      | 22.745   | 3.57   | 0.1967   | 1.41           |
| <b>10</b>                     | 0        | -0.455 | 0.2182   | 1.44           |
| <b>11</b>                     | 18.305   | -6.05  | 0.1967   | 1.41           |
| <b>12</b>                     | 18.305   | -4.95  | 0.1967   | 1.41           |
| <b>13</b>                     | 19.675   | -6.05  | 0.1967   | 1.41           |
| <b>14</b>                     | 19.675   | -4.95  | 0.1967   | 1.41           |
| <b>15</b>                     | 21.375   | -2.47  | 0.1967   | 1.41           |
| <b>16</b>                     | 21.375   | -3.57  | 0.1967   | 1.41           |
| <b>17</b>                     | 22.745   | -2.47  | 0.1967   | 1.41           |
| <b>18</b>                     | 22.745   | -3.57  | 0.1967   | 1.41           |

## Visualisation des atterrisseurs [7]

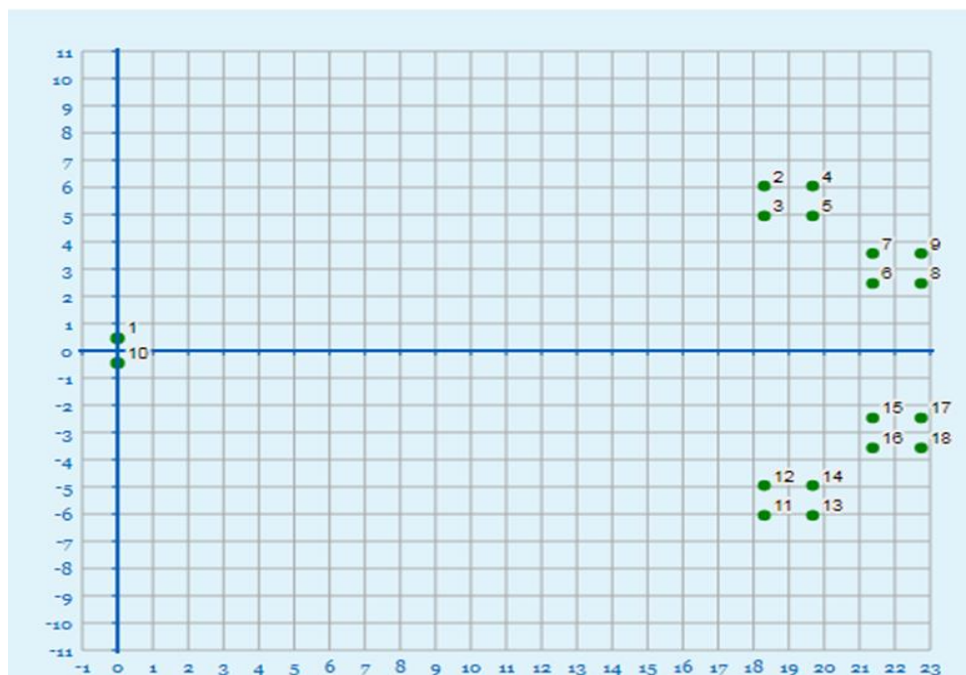


Figure 1.7 : Caractéristiques générales Boeing 747

**- CHAPITRE 2 -**

**LES CHAUSSEES AERONAUTIQUES**

---

## 2.1 Généralité

L'aménagement de l'aire de manœuvre d'un aérodrome implique la construction de chaussées spécialement conçues pour pouvoir répondre aux exigences techniques nécessaires à l'évolution des avions et spécifiques aux particularités des aérodromes. La chaussée d'aérodrome que ce soit propre à une Piste, une voie de circulation ou une aire de stationnement, est constituée par un ensemble de couches juxtaposées constituées par différents matériaux de qualités croissantes de bas en haut. Le choix de la nature des matériaux constituant ces différentes couches définit d'une manière générale le type de chaussée

## 2.2 Spécificités des chaussées aéronautiques

Relativement aux chaussées routières, les chaussées d'aérodrome se particularisent par leur aspect fonctionnel et structurel, différent et beaucoup plus important que celui des routes. Les charges appliquées aux chaussées aéronautiques peuvent être considérablement supérieures à ceux des routes. Certains boggies d'avions (Boeing 747) peuvent atteindre 90 tonnes, tandis que les routes sont généralement conçues pour l'action d'une charge d'essieu de 13 tonnes. L'intensité du trafic sur une chaussée aéronautique est sans commune mesure avec celle qui existe sur les routes, non pas de point de vue fréquence du trafic mais beaucoup plus de point de vue canalisation du trafic, aussi du fait de leurs grandes surfaces géométriques et leurs faibles pentes, les chaussées aéronautiques sont beaucoup plus exposées aux conditions climatiques que les chaussées routières.[6]

De ce fait, les chaussées aéronautiques sont appelées à satisfaire les conditions suivantes :

- Le chargement très élevé dus à la masse des avions exigé un calcul plus important des épaisseurs de chaussées.
- Les profils en long et travers de chaussées d'aérodrome doivent obéir à une certaine régularité exigée par le mode d'évolution au sol des avions.
- La variation de la fréquence du trafic et de sa dispersion sur l'aire de manœuvre, exigent des considérations spéciales de pondération des charges selon la fonction de chaque partie de la chaussée.



- 
- Les chaussées d'aérodrome doivent être dotées par des couches de surface qui leur assurent une résistance aux souffles (et chaleur) dégagés par les réacteurs des avions et à l'action chimique du carburant.

Les travaux d'entretien des chaussées d'aérodrome, exigent l'arrêt total de la circulation sur les chaussées à entretenir, ce qui implique la nécessité d'une conception initiale robuste et sûre, nécessitent un minimum d'entretien durant leur exploitation.

### 2.3 Structure des chaussées aéronautiques

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

- **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.

Le choix de l'épaisseur de la couche de forme est jusqu'à présent conditionné par son rôle fonctionnel, c'est-à-dire, par son épaisseur, cette dernière doit assurer le nivellement précis de la surface, en éliminant les irrégularités et les déformations, afin de garantir une surface plane et sûre pour les mouvements des aéronefs. Le rôle structurel n'est pas explicitement pris en

compte dans les méthodes de dimensionnement, quoique, les déformations non contrôlés (la fatigue par plastification) peuvent entraîner les dégradations de la chaussée : apparition de fissures en surface et tassement de la structure. Aussi les charges élevées dues au aéronefs gros porteurs sont souvent considérer comme charges ‘concentrées en un point’ et d’action statique, ce qui n’est pas toujours valable. Il est donc important de considérer la charge dans certaines situations comme charge répartie et ayant un impact dynamique sur la chaussée.[9]

## 2.4 Types de chaussées aéronautique de type ‘souple’

- **Chaussée souple**

C’est une chaussée dont la structure est constituée par une couche de roulement et d’une couche de base composée de matériaux traités aux liants hydrocarbonés et d’une couche de fondation en matériaux non traités.

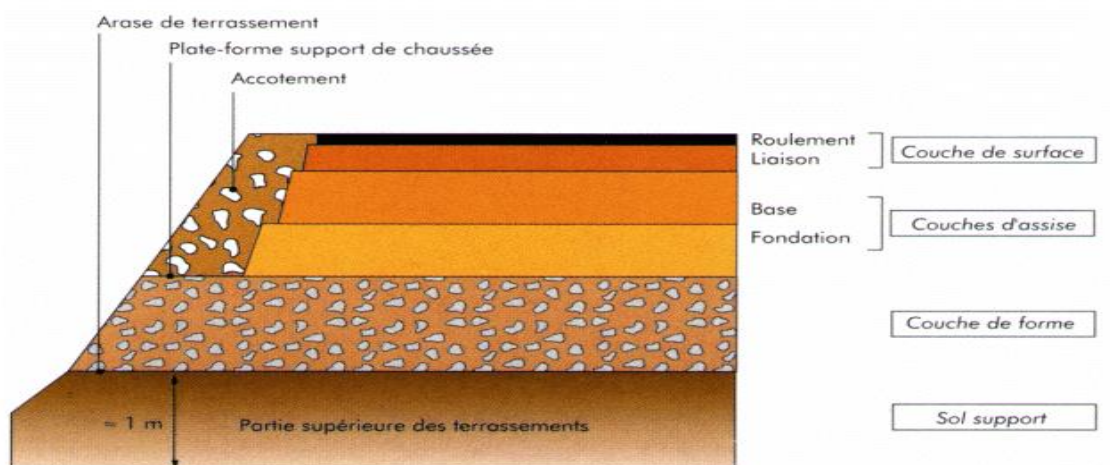
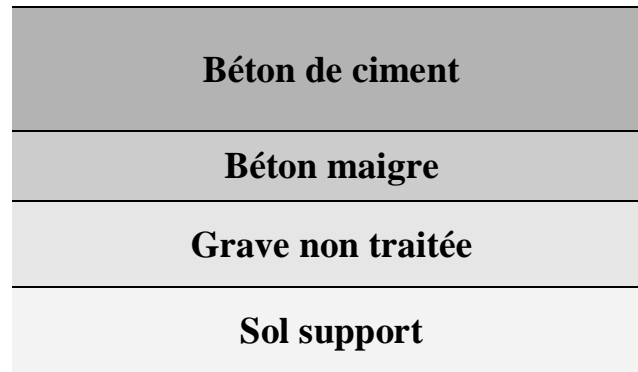


Figure 2.1: Corps chaussée souple

- **Chaussée rigide**

Une chaussée rigide est constituée principalement par une dalle en béton de ciment et une couche de fondation. Dans ce type de chaussée la couche de roulement et la couche de base sont confondus.



**Figure 2.2: Corps de chaussée rigide**

- **Chaussée composite**

C'est une chaussée résultant du renforcement d'une chaussée rigide par une chaussée souple. Cette structure est donc constituée par une couche de roulement en matériaux traités aux liants hydrocarbonés reposant sur une dalle en béton de ciment jouant le rôle d'une couche de base. Ce ne peut être utilisé pour les chaussées neuves.

- **Chaussée semi-rigide**

C'est une chaussée dont la structure est composée d'une couche de roulement constituée de matériaux traités aux liants hydrocarbonés et d'une couche de base constituée de matériaux traités aux liants hydrauliques. L'expérience aéronautique a montré que l'usage de ce type de chaussées présentent plusieurs inconvénients, elles sont à éviter.

Dans la suite de ce manuel, il n'est considéré que deux catégories principales de chaussées aéronautiques : les chaussées souples et les chaussées rigides.

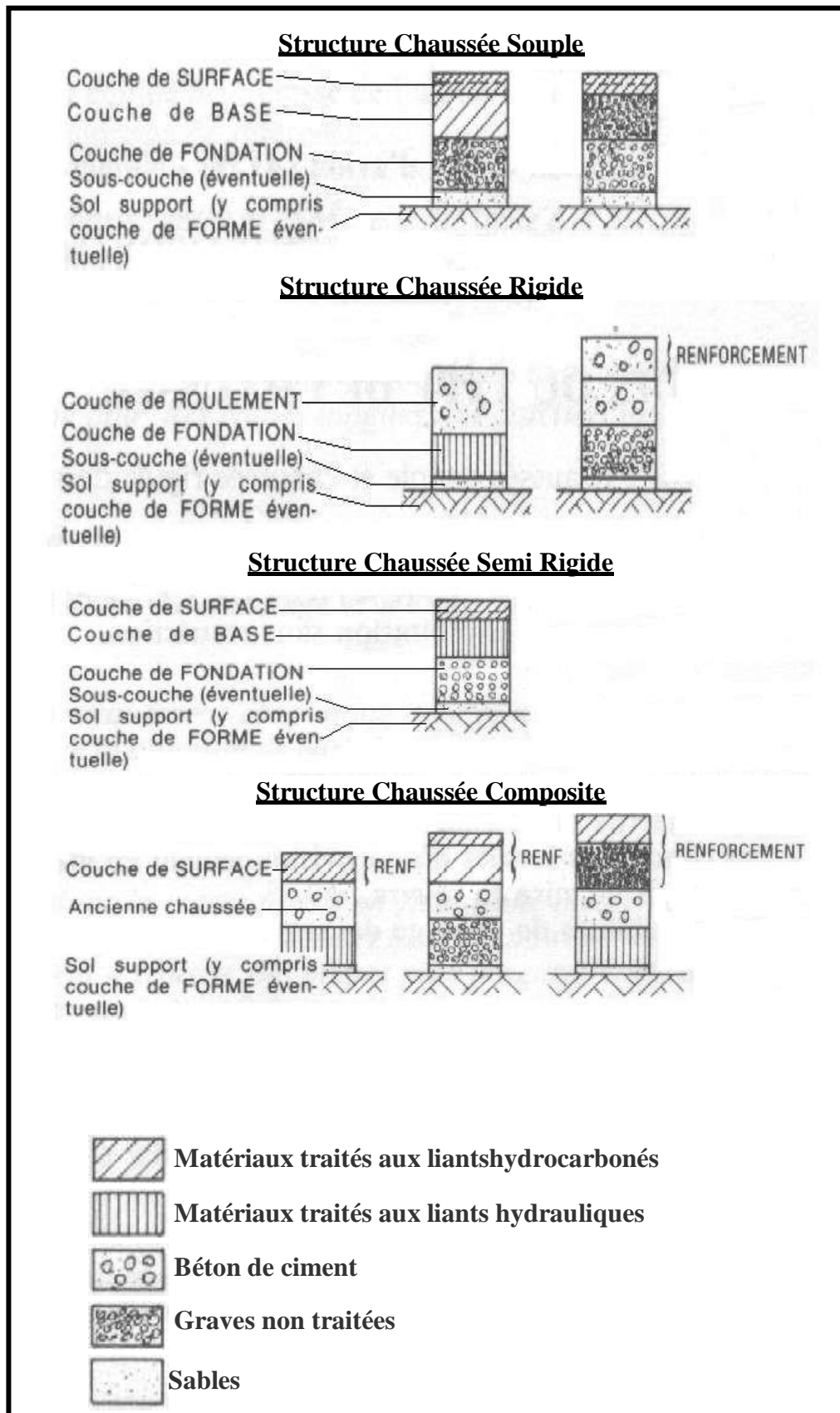


Figure 2.3 : Différentes structures de chaussées aéronautiques

## 2.5 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
- 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 sous-mentionnées et tenant compte des avantages et inconvénients que chaque type présente.

**Tableau 2.1 : Comparaison de chaussée souple et rigide**

|                      | <b>Chaussée Souple</b>  | <b>Chaussée Rigide</b>  |
|----------------------|---|---|
| <b>Avantages</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Renforcement et réparations très faciles</li> <li>• Absence de joints</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande dureté</li> <li>• Bonne répartition des charges sur le sous-sol</li> <li>• Imperméable, séchage rapide, nettoyage facile</li> <li>• Peu d'entretien</li> <li>• Bonne résistance aux carburants et souffles des réacteurs</li> <li>• Meilleure visibilité (teint clair)</li> </ul> |
| <b>Inconvénients</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entretien plus onéreux</li> <li>• Mauvaise résistance aux carburants et souffle des réacteurs</li> <li>• Fondation très importante</li> <li>• Moins bonne visibilité (teint sombre)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible élasticité</li> <li>• Risque de fissuration</li> <li>• Présence de joints donc de points faibles structurels.</li> <li>• Entretien courant des joints relativement onéreux</li> <li>• Réparation et renforcement difficiles.</li> </ul>   |

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.[3]

## 2.6 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 2.2 : Constitution de chaussée souple**

| Couche            | Composition                                | Constitution        | Abréviation | Épaisseurs minimales (en cm) |
|-------------------|--|---------------------|-------------|------------------------------|
| Couche de surface | Matériaux traités aux liants hydrocarbonés | Béton<br>Bitumineux | <b>BB</b>   | <b>5</b>                     |
| Couche de base    | Matériaux traités aux liants hydrocarbonés | Grave-<br>Bitume    | <b>GB</b>   | <b>10</b>                    |
| Couche de dation  | Matériaux non traités                      | Grave Non-Traité    | <i>GNT</i>  | <b>20</b>                    |

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 cette minimale serait exposée au chapitre dimensionnement de chaussées souples.

- **Pour les chaussées rigides :**

**Tableau 2.3 : Constitution de chaussée rigide**

| <b>Couche</b>                        | <b>Composition</b>                    | <b>Epaisseur minimale recom. (en cm)</b> |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Couche de Surface + (couche de base) | Dalle en béton de ciment              | <b>15</b>                                |
| Couche de fondation                  | Grave traités aux liants hydrauliques | <b>20</b>                                |

### 3.7 Choix de la couche de forme

La couche de forme d'une chaussée aéronautique est la couche située juste en dessous de la surface de la piste. Elle est conçue pour fournir une surface plane et uniforme, capable de résister aux charges des avions et de répartir ces charges sur la couche de base et le sol sous-jacent de manière efficace.

La couche de forme est généralement composée de matériaux granulaires tels que le sable, le gravier, la poussière de pierre ou d'autres agrégats appropriés. Ces matériaux sont compactés et nivelés pour créer une surface régulière et stable.

La couche de forme a plusieurs objectifs importants :

1. **Support structurel :** Elle fournit une plateforme solide et stable pour la couche de base et la surface de la piste, répartissant la charge des avions sur une zone plus large afin de réduire la contrainte exercée sur le sol sous-jacent.
2. **Drainage :** Elle doit être conçue pour permettre un bon drainage de l'eau de pluie ou de la fonte de neige, afin de minimiser les problèmes d'accumulation d'eau sur la piste.
3. **Nivellement :** Elle assure un nivellement précis de la surface, en éliminant les irrégularités et les déformations, afin de garantir une surface plane et sûre pour les mouvements des avions.
4. **Stabilité et résistance :** Elle doit être suffisamment stable et résistante pour supporter les charges répétées et les contraintes exercées par les avions pendant les opérations d'atterrissage, de décollage et de circulation au sol.

---

La conception et l'épaisseur de la couche de forme dépendent de divers facteurs, notamment le type d'aéronefs prévus, la classification de l'aéroport, les conditions géotechniques du site et les normes de conception spécifiques de l'OACI ou des réglementations nationales.

Il est essentiel de bien construire et entretenir la couche de forme pour assurer la performance et la durabilité de la chaussée aéronautique dans son ensemble [2]

## 2.8 Notion d'épaisseur équivalente

Les abaques utilisés pour la détermination des épaisseurs de chaussées (dimensionnement) sont basés sur la formule CBR établie expérimentalement par le corps of engineering américains. Cette formule donc, permet de calculer l'épaisseur réelle d'un massif homogène constitué par un matériau de référence (Grave non traitée, concassée et bien gradué et de module d'élasticité  $E=500$  MPa)

Dans la réalité, la chaussée est composée de plusieurs couches présentant des qualités mécaniques très différentes. La notion de coefficient d'équivalence permet de résoudre cette difficulté. Cette question a été étudiée par le LCPC suite aux essais américain du AASHO.

A titre indicatif, le coefficient d'équivalence d'une couche de module  $E$  est égale à :

$$C_e = \sqrt[3]{\frac{E}{500}} \quad E : \text{en MPa}$$

Le coefficient d'équivalence de certains matériaux (enrobais bitumineux par exemple) est variable dans la mesure où le module varie lui-même en fonction de certains paramètres physiques (température, fréquence de sollicitation) les valeurs proposées dans le dimensionnement sont donc en fait des moyennes. Pour tenir compte des qualités mécaniques des différentes couches constituant les chaussées aéronautiques souples, la notion de l'épaisseur équivalente est introduite. Chaque couche de matériau est caractérisée par son coefficient d'équivalence. L'épaisseur réelle de la couche multipliée par ce coefficient d'équivalence donne l'épaisseur équivalente propre à chaque couche.



Le tableau suivant présente les coefficients d'équivalence des matériaux neufs couramment utilisés pour la construction des chaussées, établit par le laboratoire français des ponts et chaussées (LCPC).[1]

**Tableau 2.4: Coefficient d'équivalent de matériaux**

| Matériaux neufs                           | Coefficient d'équivalence |
|---|---------------------------|
| Béton bitumineux                          | 2                         |
| Grave Bitume                              | 1,5                       |
| Grave émulsion                            | 1,2                       |
| Grave traitée aux liants hydrauliques     | 1,5                       |
| Grave non traitée, concassée bien graduée | 1                         |
| Sable traités aux liants hydrauliques     | 1                         |
| Grave roulée                              | 0.75                      |
| Sable                                     | 0.5                       |

## 2.9 Durée de vie d'une chaussée aéronautique

La durée de vie structurelle d'une chaussée étant définie comme la période à la fin de laquelle la portance de la chaussée devient insuffisante pour pouvoir recevoir et supporter sans risque, le trafic pour lequel elle a été initialement conçue. Une réduction du trafic ou un renforcement de la structure de la chaussée alors s'imposent.

En prenant en considération l'évolution du trafic, la rentabilité de l'investissement et de durabilité des matériaux constitutifs, Les chaussées aéronautiques sont conventionnellement dimensionnées pour une durée de vie normale de dix années. Une durée de vie plus longue peut être considérée spécialement pour les chaussés 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.[3]

**- CHAPITRE 3 –**

**REGLES DE CONCEPTIONS ET**

**D'EXPLOITATION(METHODE ACN/PCN)**

### 3.1 Principe de la méthode:

Le dimensionnement forfaitaire permet de calculer une chaussée en fonction d'une charge de référence correspondant à la charge maximum de l'avion réputé le plus contraignant. Le dimensionnement est calculé dans les conditions de trafic normal, soit dix mouvements par jour pendant dix ans de la charge de calcul.

Cette méthode est beaucoup plus recommandée dans les cas suivants:

- Étude d'un aérodrome sur lequel évolue un type d'avion nettement plus contraignant que les autres .

- Étude préliminaire en l'absence de prévisions fiables de trafic.

- Étude d'une chaussée rigide (la précision de la méthode est généralement suffisante) ;

L'application de la méthode nécessite les données suivantes:

- La charge normale de calcul  $P''$  correspondant au trafic normal (charge appliquée 10 fois par jour pendant 10 ans).
- Le CBR du sol support (pour le dimensionnement des chaussées souples).
- Le module de réaction  $K$  de la fondation.
  - La contrainte admissible de flexion par traction du béton (pour le dimensionnement des chaussées rigides). [1]

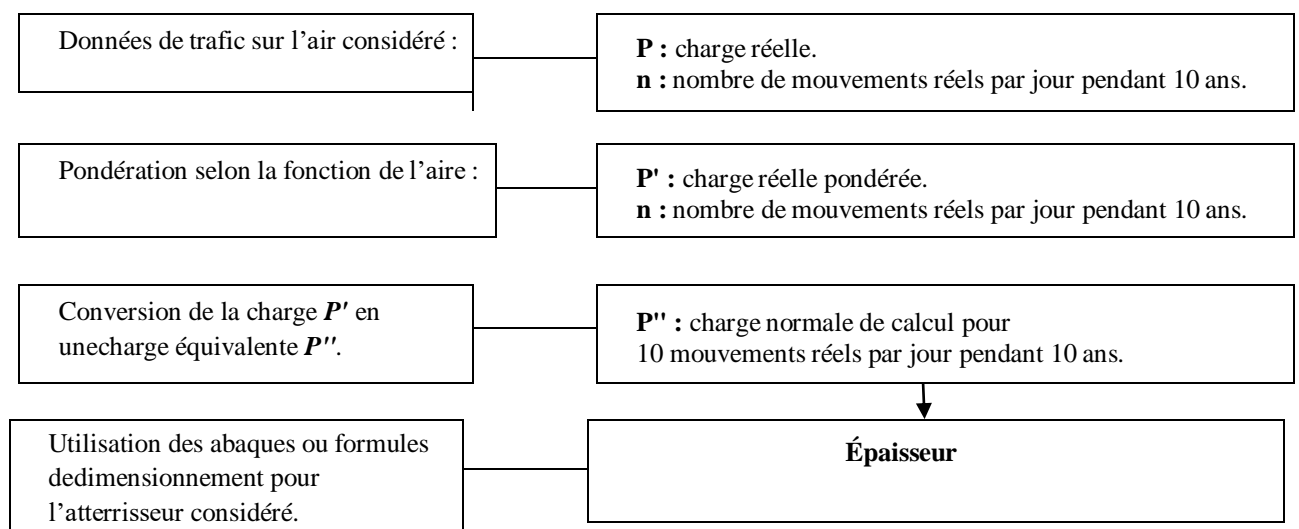


Figure 3.1: Principe du dimensionnement forfaitaire

### 3.2 Dimensionnement forfaitaire des chaussées souples

La durée de vie retenue pour une chaussée souple est de 10 ans. Le sol support est caractérisé par son indice *CBR* (*California bearing ratio*). L'épaisseur équivalente ( $e$ ) de la chaussée est donnée par la formule établie par le US Corps of Engineers ou par les abaques. La méthode décrite ci-après repose sur l'utilisation des abaques.

L'épaisseur équivalente totale est définie comme la somme pondérée par un coefficient d'équivalence des épaisseurs réelles des différentes couches constituant la chaussée.

La méthode de dimensionnement des chaussées souples peut se mettre en œuvre en utilisant deux abaques :

- ✚ Le premier donne l'épaisseur équivalente totale ( $e$ ) ; les paramètres d'entrée sont la charge et l'indice *CBR*. L'abaque s'utilise comme indiqué figure 3.2 ;
- ✚ Ensuite, il faut déterminer l'épaisseur équivalente minimale de matériaux traités à mettre en œuvre, à l'aide de l'abaque représenté en figure 3.2 (les paramètres d'entrée sont l'épaisseur équivalente totale ( $e$ ) précédemment déterminée et le *CBR* du sol support).

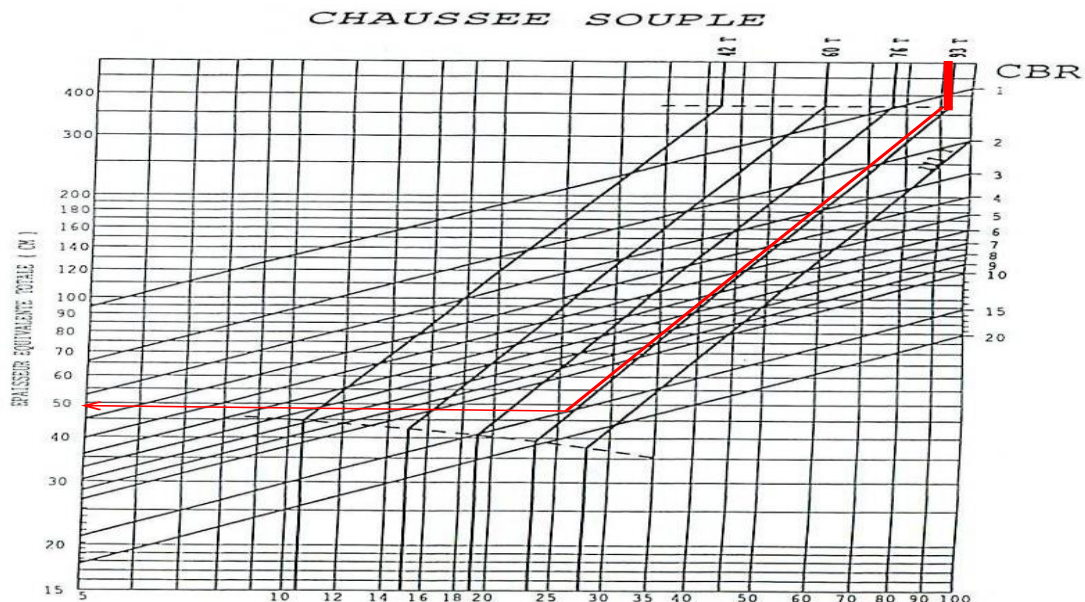


Figure 3.2: Détermination de l'épaisseur équivalente

---

### 3.3 Présentation de la méthode A.C.N. - P.C.N

Elaborée par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (O.A.C.I), la méthode A.C.N.

- P.C.N. est un système international normalisé de communication de renseignements permettant de déterminer l'admissibilité d'un avion sur un aéroport en fonction de la résistance des chaussées de la plate-forme concernée.

L'A.C.N. (Aircraft Classification Number) est un nombre exprimant l'effet d'un avion de type donné sur une chaussée de type également donné (souple ou rigide) pour une catégorie spécifiée de sol support.

Le P.C.N. (Pavement Classification Number) est un nombre exprimant la portance d'une chaussée donnée.

La méthode A.C.N. - P.C.N., dont les conditions d'application sont développées par la suite, peut se résumer par le principe général suivant:

Le P.C.N. d'une chaussée indique qu'un avion dont l'A.C.N. est inférieur ou égal à ce P.C.N. peut utiliser cette chaussée sans autre restriction que celle pouvant être liée à la pression des pneumatiques.

Ainsi, un avion peut utiliser sans restriction une chaussée si deux conditions sont simultanément vérifiées, à savoir que :

- l'A.C.N. de l'avion - déterminé pour le type de chaussée (souple ou rigide) et la catégorie de son sol support - soit inférieur ou égal au P.C.N. de cette chaussée,
- la pression des pneumatiques de l'avion n'excède pas la pression maximale admissible publiée pour la chaussée.
- Si l'une au moins de ces conditions n'est pas respectée, l'admissibilité de l'avion est soumise aux règles de la procédure de dérogation. [6]

#### 3.3.1 Détermination de L'A.C.N

##### I .Détermination théorique

L'A.C.N. d'un avion est un nombre qui, par définition, est égal à deux fois la charge, calculée en tonnes, sur une roue simple, gonflée à 1,25 MPa, équivalente (R.S.E.) à l'atterrisseur principal de l'avion considéré dont les pneus sont gonflés à la pression standard  $q$  donnée par le constructeur.

Sa détermination, pour un type de chaussée et pour une catégorie de sol support, résulte donc de deux étapes successives, à savoir :

- détermination, par la méthode américaine adaptée, de l'épaisseur équivalente du corps de chaussée (pour une chaussée souple) ou de celle de la dalle de béton (pour une chaussée rigide) qui devrait être associée à telle catégorie de sol support pour supporter l'atterrisseur à la pression  $q$ ,
- détermination de la charge en tonnes sur roue simple gonflée à 1,25 MPa correspondant à cette épaisseur.

L'A.C.N. ainsi obtenu n'est associé qu'à la pression  $q$ , au type de chaussée (souple ou rigide), et à la catégorie de sol support.

## II. Détermination pratique

Les A.C.N. des principaux avions existants sont fournis, à vide et à pleine charge, pour chacun des deux types de chaussées et pour quatre catégories de sol support - défini lui-même, soit par son C.B.R., pour les chaussées souples, soit par son module de réaction, pour les chaussées rigides comme indiqué dans le tableau 3.1:

**Tableau 3.1: Classification par catégories des sols supports de chaussée**

|          | <i>Catégorie du sol support</i> | <i>Valeurs du CBR ou du K (a)</i>                              |
|----------|---------------------------------|--|
| <i>A</i> | <i>Résistance élevée</i>        | $CBR > 13$<br>$K > 120 \text{ MN/m}^3$                         |
| <i>B</i> | <i>Résistance moyenne</i>       | $8 < CBR < 13$<br>$60 \text{ MN/m}^3 < K < 120 \text{ MN/m}^3$ |
| <i>C</i> | <i>Résistance faible</i>        | $4 < CBR < 8$<br>$25 \text{ MN/m}^3 < K < 60 \text{ MN/m}^3$   |
| <i>D</i> | <i>Résistance ultra-faible</i>  | $CBR < 4$<br>$K < 25 \text{ MN/m}^3$                           |

*K(a)* module de réaction *K* corrigé

### 3.3.2 Détermination des P.C.N.

#### I. Principe et codification

Le P.C.N. représentant la force portante d'une chaussée donnée, sa valeur est dépendante des caractéristiques de son sol support et des matériaux constituant son corps de chaussée.

Un P.C.N. déterminé « par expérience » à partir du trafic reçu par l'aérodrome peut également être publié lorsque les caractéristiques géotechniques déterminantes sont mal connues, soit parce qu'elles n'ont jamais fait l'objet d'une évaluation, soit parce que cette dernière est trop ancienne pour être valablement prise en compte.

La méthode d'évaluation du P.C.N. d'une chaussée est laissée à l'initiative de chaque pays membres de l'O.A.C.I.,

## II. Détermination du PCN par calcul

Le calcul forfaitaire du P.C.N. permet de déterminer ce dernier à partir des seules caractéristiques de la chaussée, sans qu'il soit par conséquent fait référence au trafic qu'elle reçoit. Il passe par la détermination, à l'aide de l'abaque de dimensionnement, de la

charge maximale admissible RSI pouvant lui être appliquée par une roue simple isolée gonflée à 0,6 MPa, charge maximale dont la valeur est ensuite majorée par un coefficient fonction lui-même de la catégorie du sol support. (Figure 3.3)

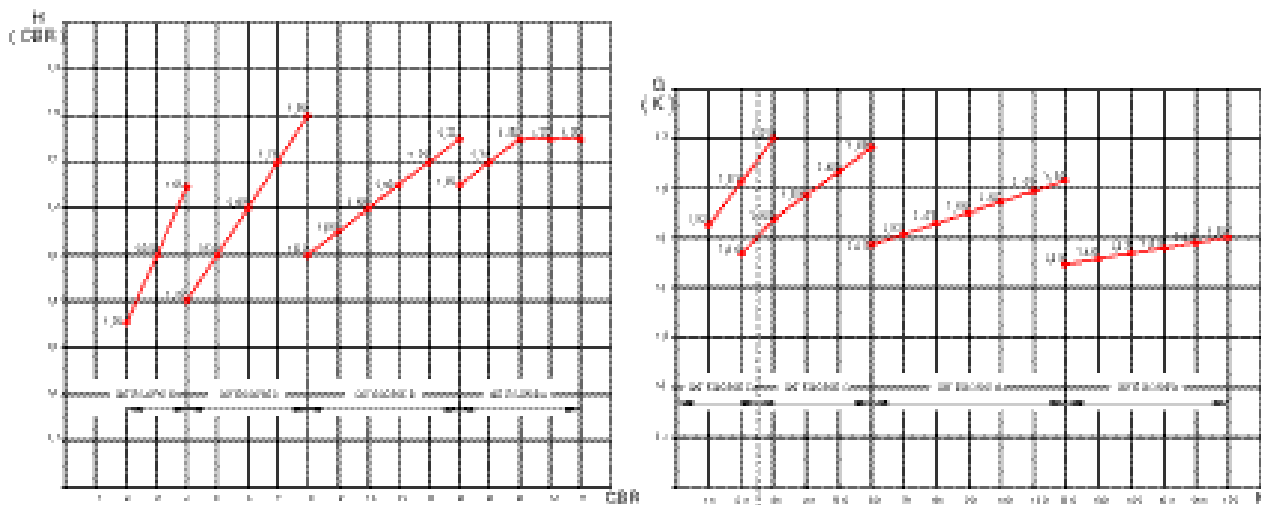


Figure 3.3 :Abaques de calcul forfaitaire du P.C.N

**- CHAPITRE 4 –**

**MODELISATION DE LA STRUCTURE D'UNE  
CHAUSSEE SOUPLE TYPE**



### 4.1 Structure de chaussée type

sur le prototype suivant (Figure 4.1) qui représente la structure d'une chaussée souple (propre à la partie centrale de la piste principale (11/29) de l'Aérodrome de Tébéssa).

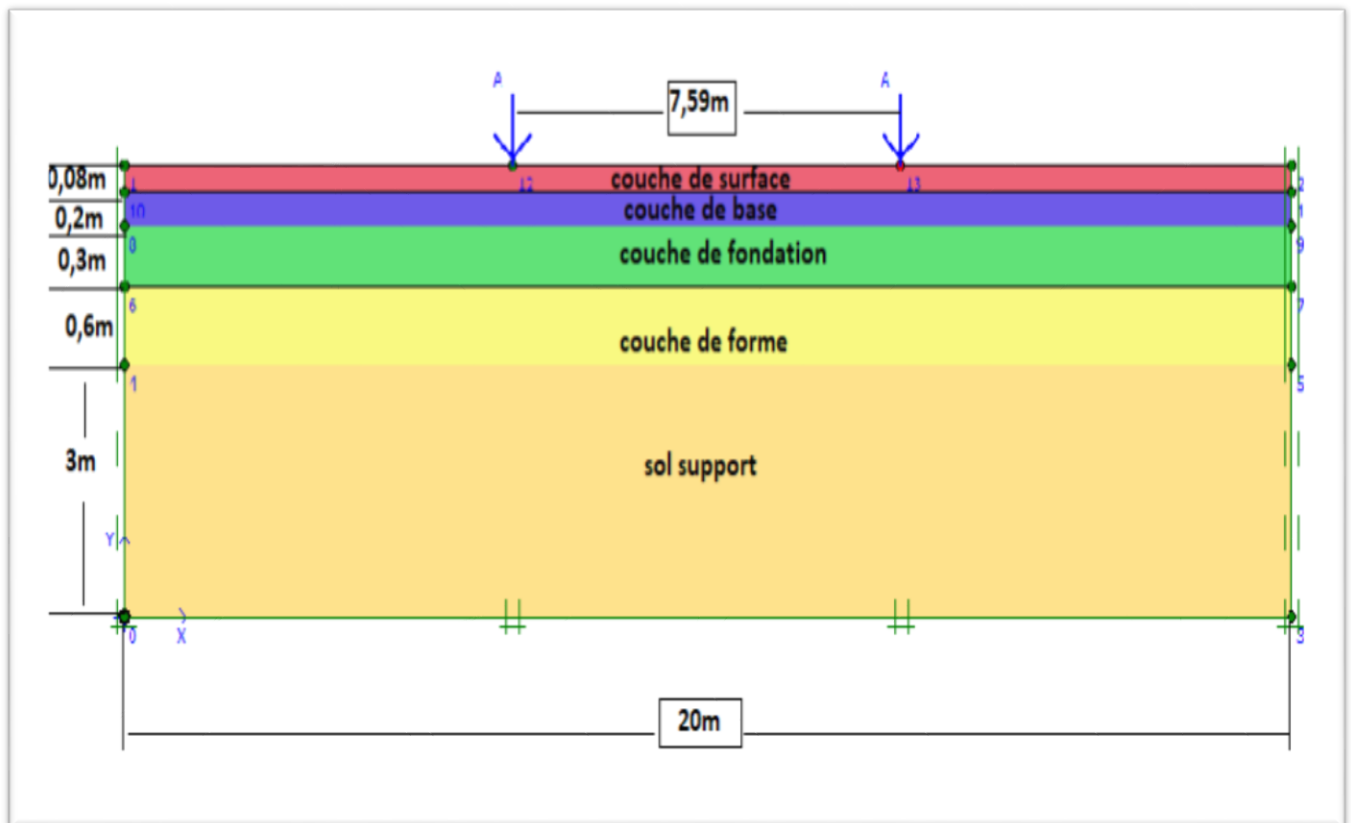


Figure 4.1 : Model de référence

-Le tableau suivant présente les matériaux propres à chaque couche de model :

Tableau 4.1 : Matériaux de structure

| Nom de couche | Couche de surface             | Couche de base            | Couche de fondation            | Couche de forme | Terrain naturel |
|---------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| Les matériaux | Béton bitumineux<br><b>BB</b> | Grave bitume<br><b>GB</b> | Grave non traite<br><b>GNT</b> | Tuffe           | Sol support     |

## 4.2 .Géométrie du model

La géométrie du modèle étudié est représentée sur la figure ci-dessus.

La hauteur du sol support  $H=3$  m,

La hauteur de la chaussée est 1,18 m

## 4.3 Arrangement généraux (général settings) du modèle.

Le choix s'est porté sur :

-Eléments à 15 nœuds pour le sol.

-Modèle 2D plane strain.

-Unités : m, k N , S.

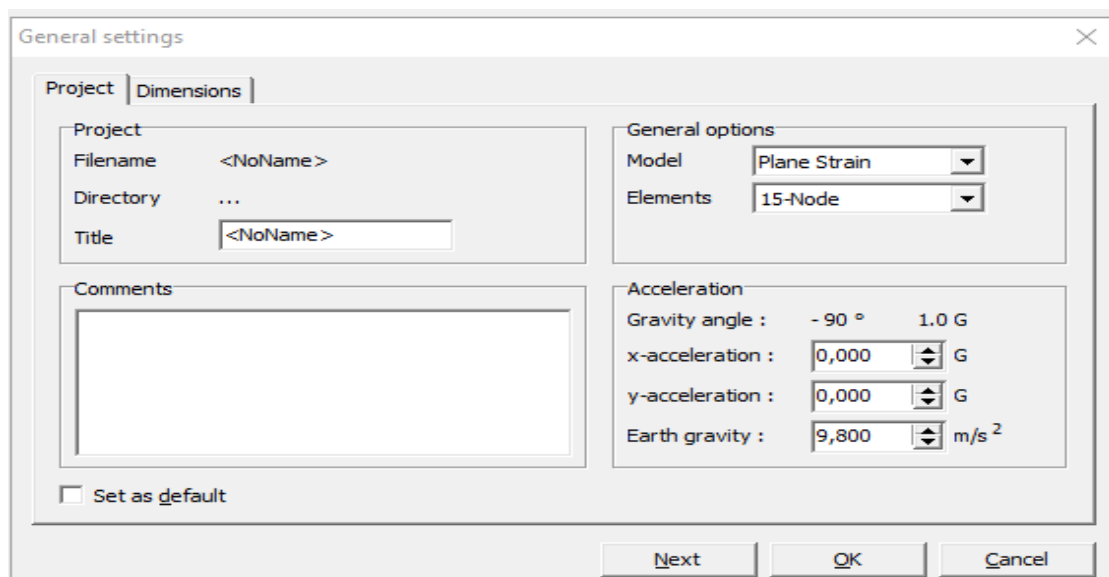


Figure 4.2 : Paramètre généraux du modèle

## 4.4Le Modèle Géométrique

La configuration du modèle considéré est schématiquement présentée dans la figure 4.3 qui représente la configuration géométrique de notre modèle. La structure de la chaussée souple considérée dans cette étude, est constituée par un système multicouche de qualité croissante de bas en haut ; Le système de chargement (dû à l'action de l'avion de calculs considéré : i.e. Boeing 747)

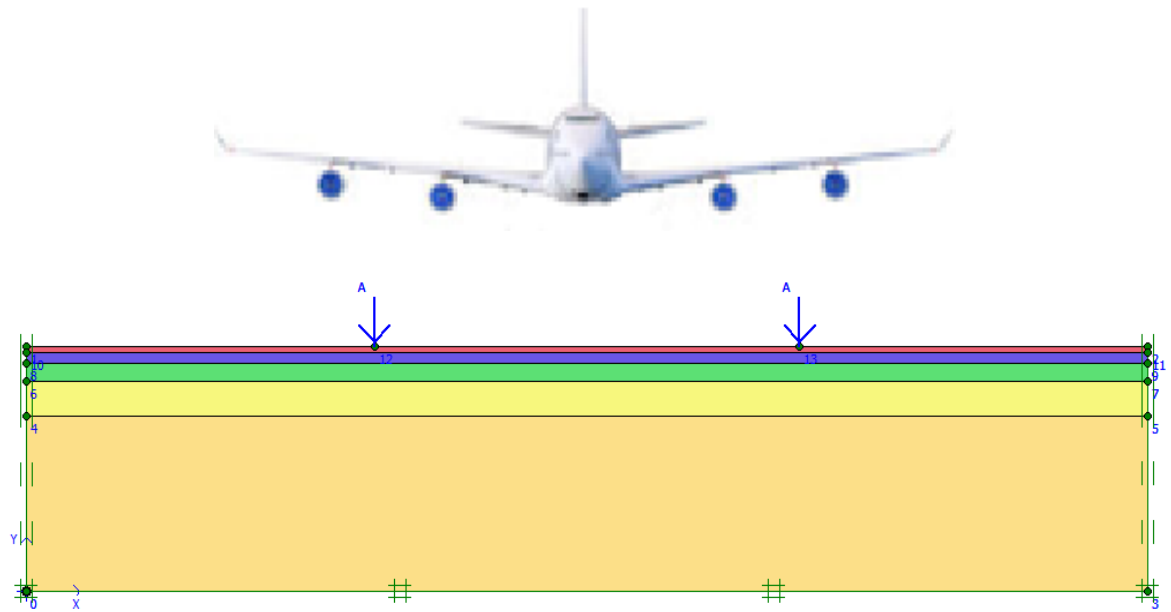


Figure 4.3 : Modèle géométrique

Dans ce modèle, il existe plusieurs types différents d'épaisseurs de couche forme, comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 4.2 : Les différent types de dimensions de la couche de forme

| Les épaisseurs        | 1 <sup>ère</sup> épaisseur | 2 <sup>ème</sup> épaisseur | 3 <sup>ème</sup> épaisseur | 4 <sup>ème</sup> épaisseur | 5 <sup>ème</sup> épaisseur |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| les dimensions en (m) | 0,2m                       | 0,4m                       | 0,6m                       | 0,8m                       | 1,0m                       |

### 4.5 Conditions de chargement

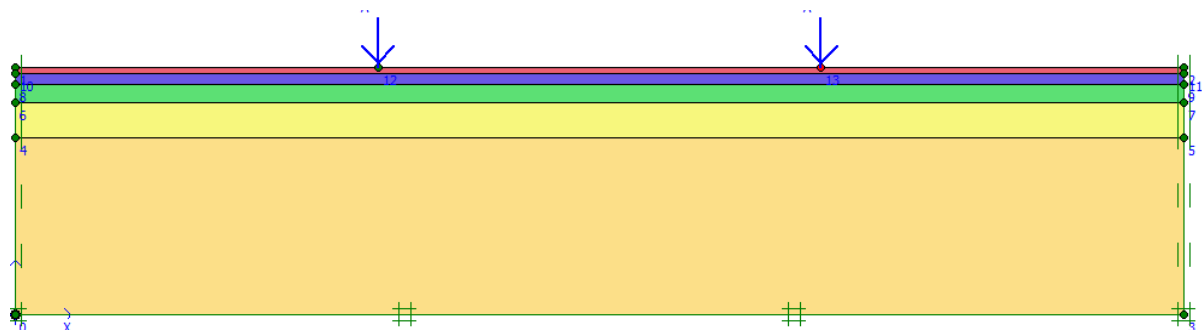


Figure 4.4 : Modèle géométrique présentée la charge concentre

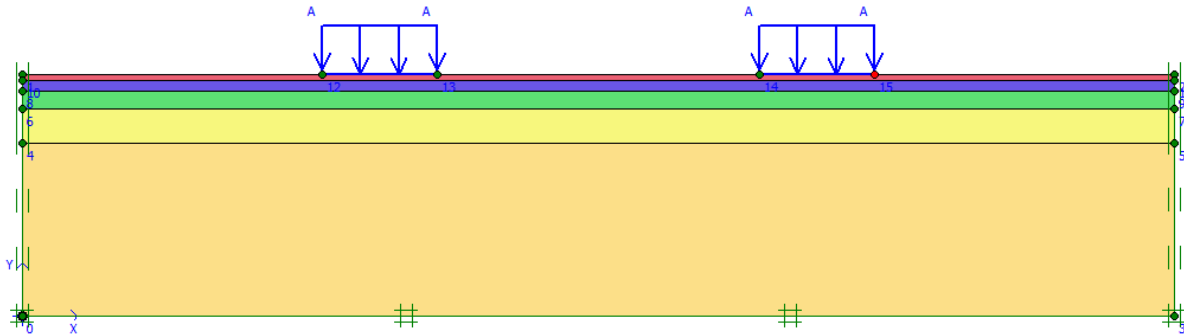


Figure 4.5 : Modèle géométrique présentée la charge répartie

-Il y a trois types de charge dans ce model : ces charges sont évaluées sur la base des masses au décollages propre aux avions de chaque catégorie (C, D et E), pondérées ensuite pour l'aire et le Trafic.

Tableau 4.3 : Les types des charges

| Charge de calcul 1 | Charge de calcul 2 | Charge de calcul 3 |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 111 KN/m           | 300 KN/m           | 500KN/m            |

#### 4.6 Caractéristique des matériaux

Les propriétés des couches de sols sont résumées dans le tableau

Tableau 4.4: Spécifications des matériaux

| Structure                 | Matériaux | Module d'Young KN/m <sup>2</sup> | Coefficient de poisson $\nu$ | Cohésions C kN/m <sup>2</sup> | Angle de frottement $\phi$ | Poids volumique $\gamma_{unsat}$ kN/m <sup>3</sup> |
|---------------------------|-----------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|
| Couche de surface (C.S)   | BB        | 6,000 E+06                       | 0.20                         | /                             | /                          | 24   |
| Couche de Base (C.B)      | GB        | 7,400 E+06                       | 0.35                         | /                             | /                          | 24   |
| Couche de fondation (C.F) | GNT       | 5,000 E+05                       | 0.25                         | 35                            | 48                         | 22   |
| Couche de forme (C.F)     | TUF       | 4,000 E+04                       | 0.3                          | 5,5                           | 30                         | 18   |
| Sol support               | Sol       | 2,000 E+04                       | 0,2                          | 18                            | 20                         | 16   |

## 4.7 Modélisation en Éléments finis

Le modèle de référence se fait par des éléments à 15 nœuds. Le nombre d'éléments est de 90 éléments et le nombre des nœuds est de 217 nœuds (figure 4.6)

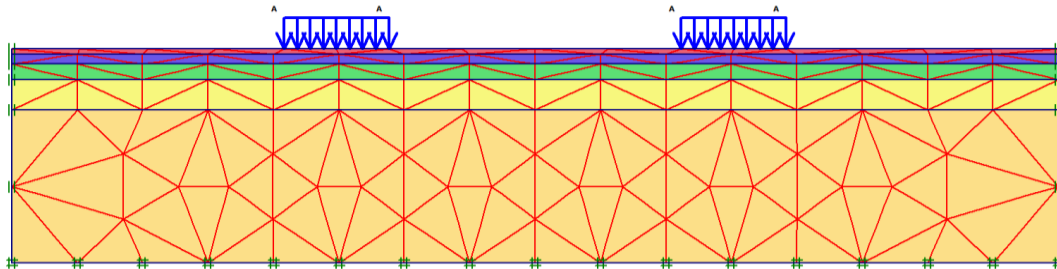


Figure 4.6 : Modèle en éléments finis

## 4.8. Conditions initiales

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles initiales ainsi que des contraintes initiales, pour notre modèle, aucune présence de nappe phréatique est déclarée, dans cette étape on calcule uniquement les contraintes initiales dues aux poids des couches de structures.

### 4.8.1. Contraintes initiales

Pour le calcul des contraintes initiales, il faut désactiver les éléments structuraux ainsi que l'élément de sol créé par défaut (figure 4.7). On génère alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de  $K_0$  par défaut. La valeur de  $K_0$  (figure 4.8) est proposée automatiquement d'après la formule de Jacky. On garde le poids du sol, ce qui correspond à une application totale de la gravité.

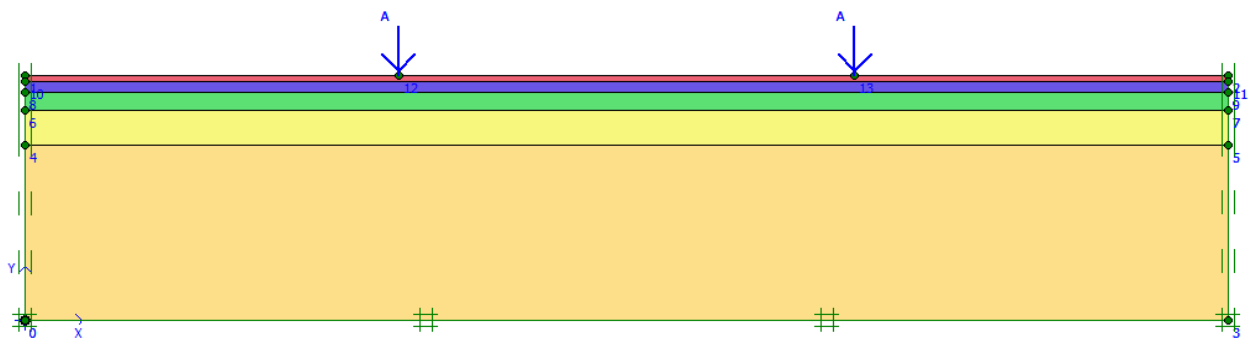


Figure 4.7 : Génération des contraintes initiales

K0-procedure

$\Sigma M$ -weight : 1,000

| Cluster | Material | OCR | POP | K0    |
|---------|----------|-----|-----|-------|
| 1       | MC       | N/A | N/A | 0,904 |
| 2       | MC       | N/A | N/A | 0,707 |
| 3       | MC       | N/A | N/A | 0,470 |
| 4       | Elastic  | N/A | N/A | 0,593 |
| 5       | Elastic  | N/A | N/A | 0,577 |

OK Cancel

Figure 4.8 : Evaluation de la valeur de K0(formule de Jacky)

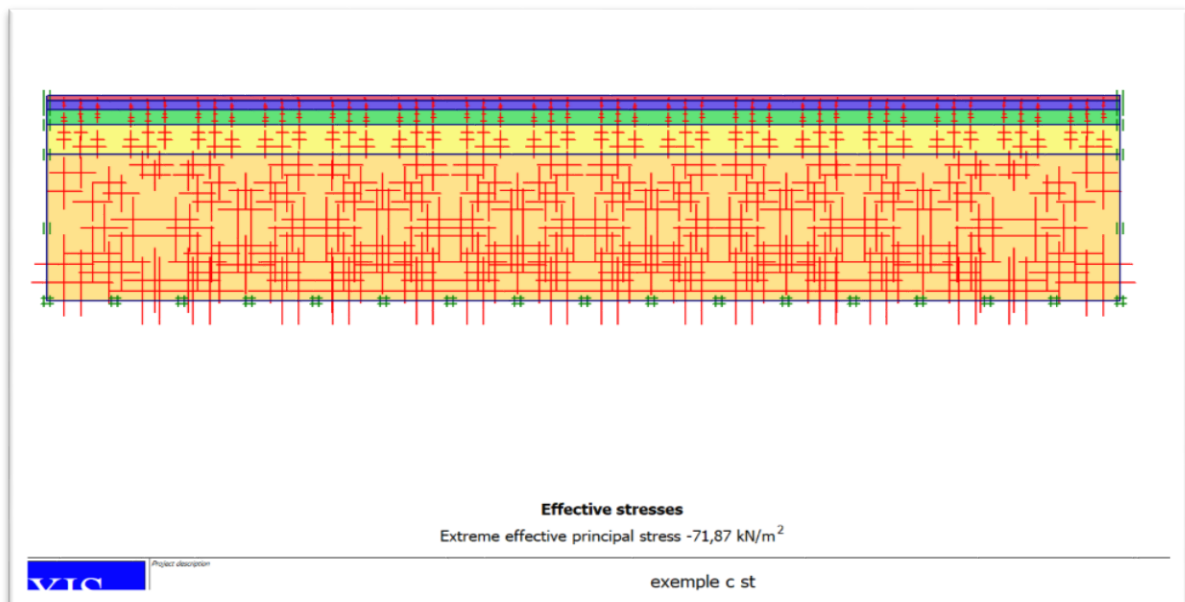


Figure 4.9 : Contraintes effectives du modèle

### 4.9 Type de calculs

Il y a deux types de calcul de chaque model :

Calculé plastic :

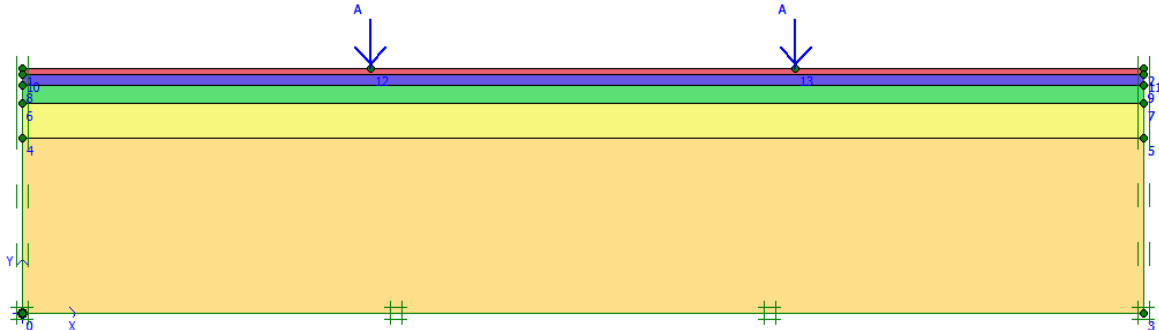


Figure 4.10 : Modèle de calculé plastic charge concentre

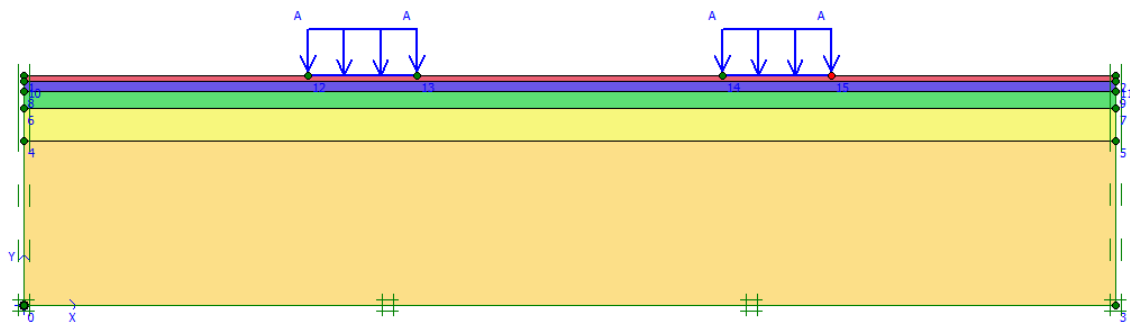


Figure 4.11 : Modèle de calculé plastic charge repartie

Calculé dynamique :

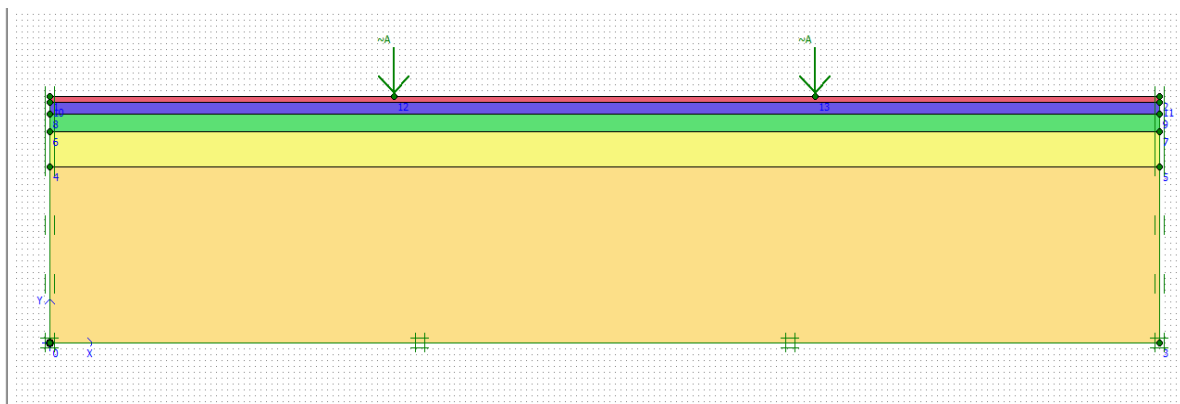


Figure 4.12 : Modèle de calculé dynamique charge concentre

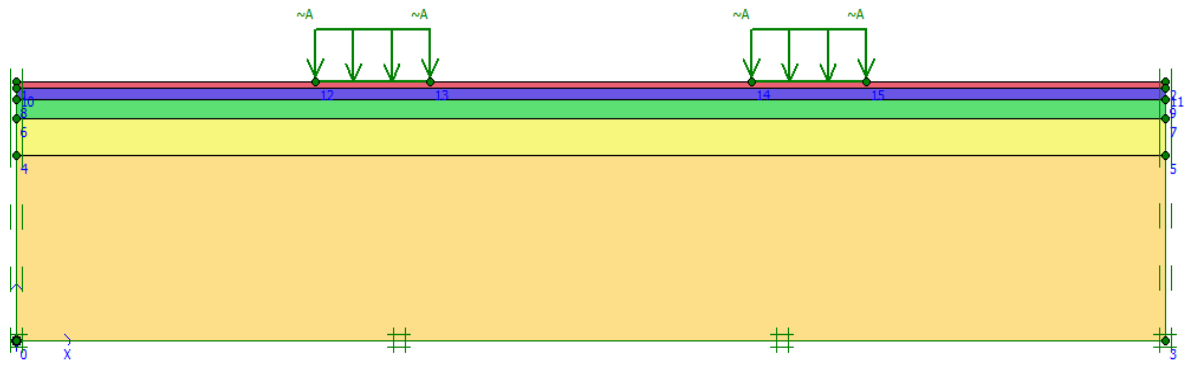


Figure 4.13 : Modèle de calcul dynamique charge répartie

#### 4.10. Simulation numérique

Pour simuler le comportement des massifs des sols, une modélisation numérique bidimensionnelle a été effectuée avec le logiciel PLAXIS (2D). Pour prendre en considération la rhéologie des matériaux de la structure de chaussée, est modélisée par le modèle élastique simple, la couche de base et couche de forme modélisé par le modèle Erato-plastique de de Mohr Coulomb

##### 4.10.1. Simulation de différentes épaisseurs de la couche de forme

L'épaisseurs a considéré dans la modélisation numérique dépend de l'approche méthodologique adopté pour simuler les chargements de l'avion et son effet sur la piste. Cinq catégories de l'épaisseurs et trois types de chargement sont considérées.



**- CHAPITRE 5 -**

**CALCULS NUMERIQUES ET RESULTATS**

## 5.1- Etapes de calculs

### 5.1.1. Calcul sous chargement concentré

Calcul sous charge statique

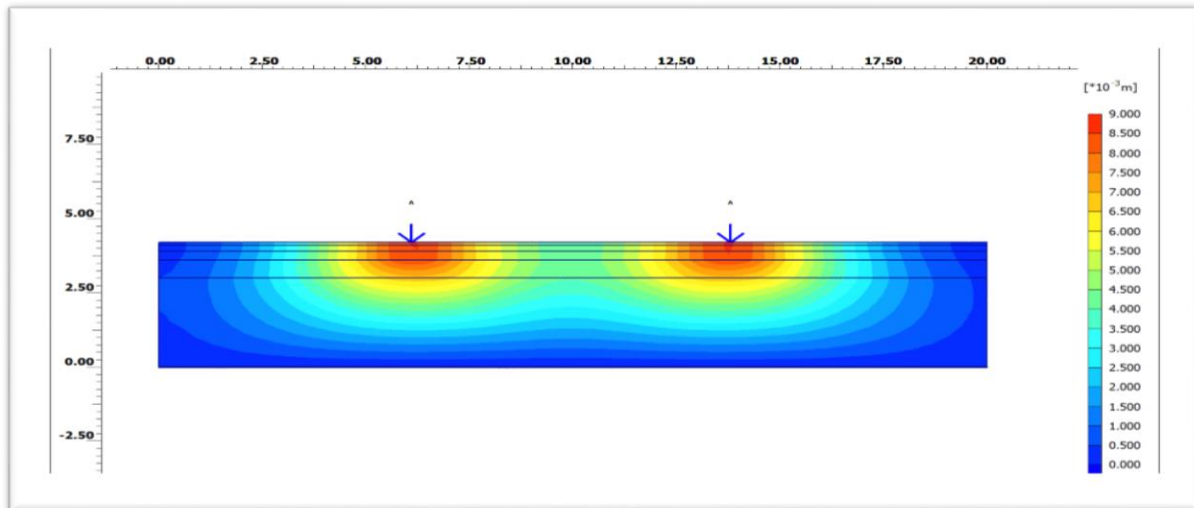


Figure 5.1 : Déplacement total charge concentré effet statique

calcul sous charge dynamique

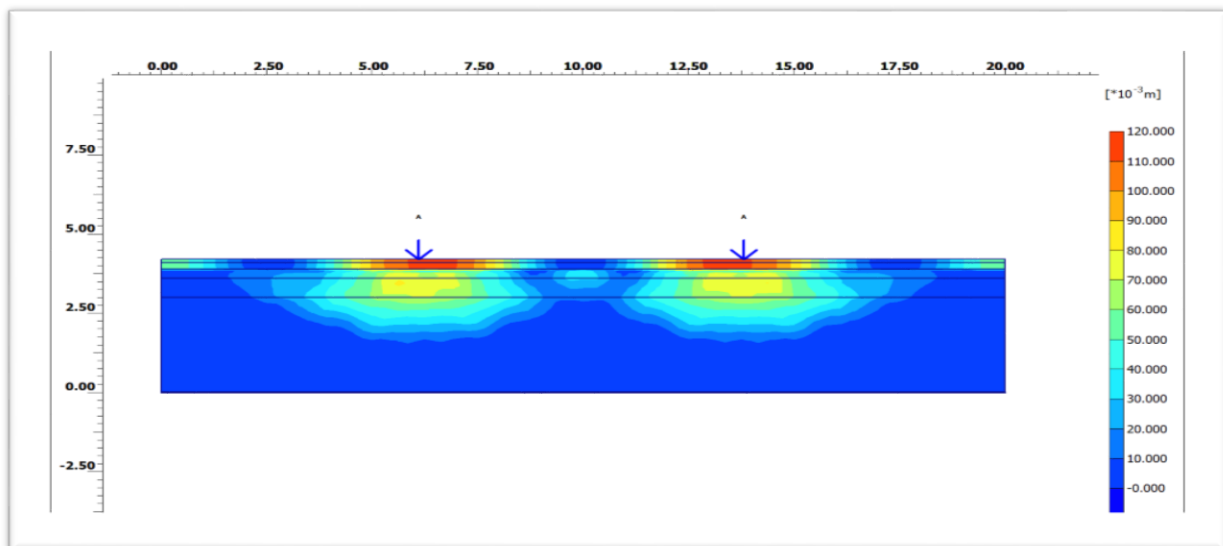


Figure 5.2: Déplacement total charge concentré effet dynamique

### 5.1.2 Calcul sous chargement repartie

calcul sous charge statique

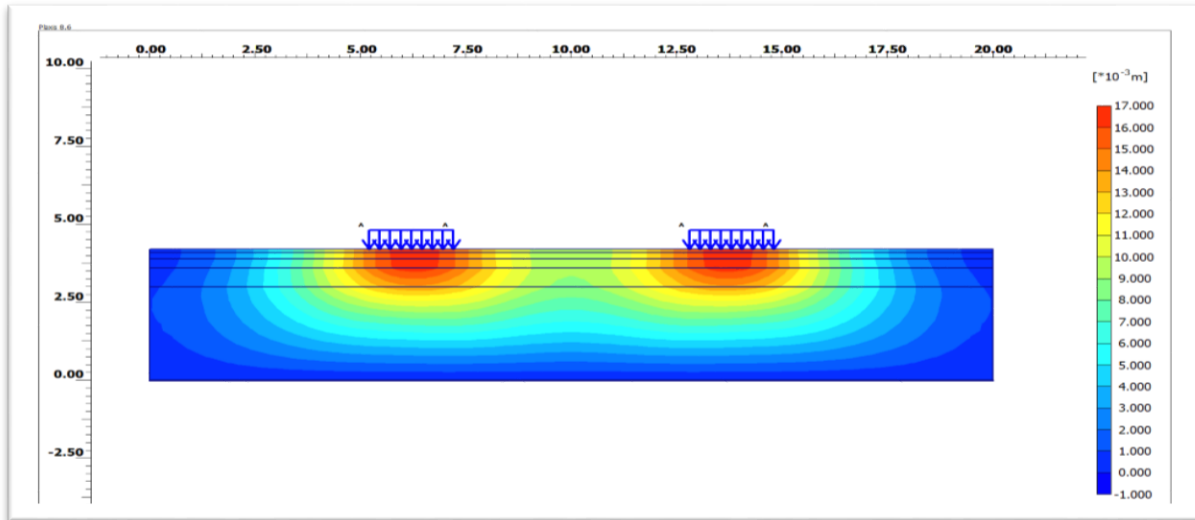


Figure 5.3 : Déplacement total charge repartie effet statique

calcul sous charge dynamique

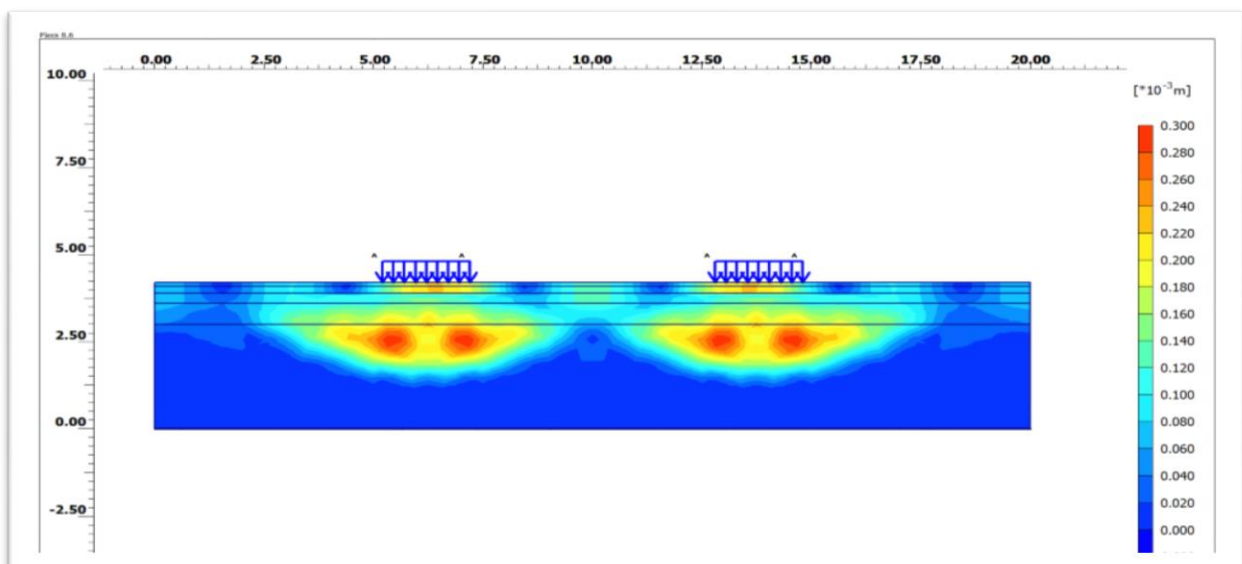


Figure 5.4 : Déplacement total charge repartie effet dynamique

## 5.2 Déformations calculés du model

Charge concentré

Tableau 5.1 : Deformed mesh -charge appliqué C1=111 kN/m

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <p>Plan 1 :<br/>épaisseur=0.2m</p> |  |
| <p>Plan 2 :<br/>épaisseur=0.4m</p> |  |
| <p>Plan 3 :<br/>épaisseur=0.6m</p> |  |
| <p>Plan 4 :<br/>épaisseur=0.8m</p> |  |
| <p>Plan 5 :<br/>épaisseur=1,0m</p> |  |

Tableau 5.2: Deformed mesh -chargeappliquéC2=300 kN/m

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <p>Plan 1 :<br/>épaisseur=0.2m</p> |  |
| <p>Plan 2 :<br/>épaisseur=0.4m</p> |  |
| <p>Plan 3 :<br/>épaisseur=0.6m</p> |  |
| <p>Plan 4 :<br/>épaisseur=0.8m</p> |  |
| <p>Plan 5 :<br/>épaisseur=1,0m</p> |  |

Tableau 5.3 : Deformed mesh - charge appliqu e C3=500 kN/m

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <p>Plan 1 :<br/> paisseur=0.2m</p> |  |
| <p>Plan 2 :<br/> paisseur=0.4m</p> |  |
| <p>Plan 3 :<br/> paisseur=0.6m</p> |  |
| <p>Plan 4 :<br/> paisseur=0.8m</p> |  |
| <p>Plan 5 :<br/> paisseur=1,0m</p> |  |

**Remarque :**

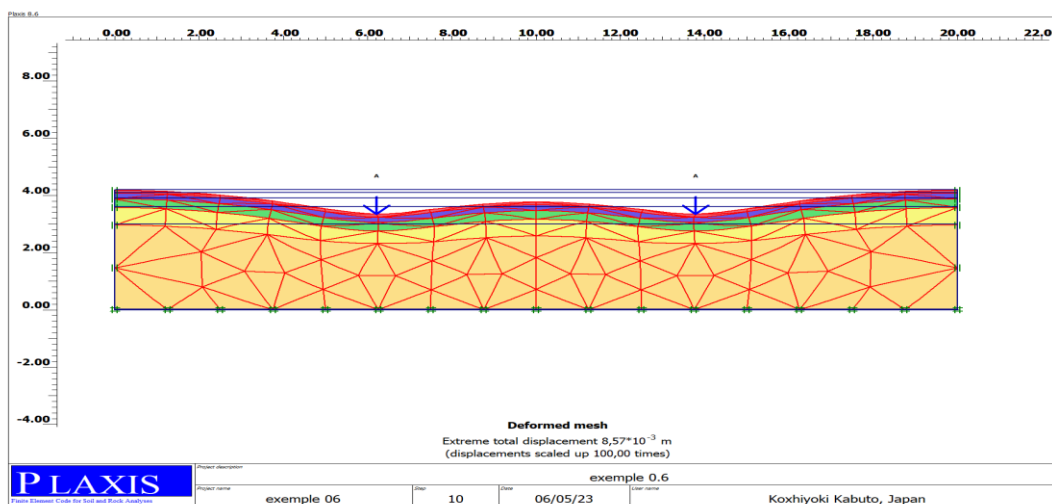
Nous remarquons dans les tableaux précédents(5.1/5.2/5.3) que les changements d'épaisseur de la couche de forme jouent un rôle majeur en affectant les déformations qui se produisent dans la couche de forme plus que les charges appliquées

**5.3. Comportement de la couche de forme (rôle structurel)**

Le comportement de la couche de forme en aéronautique est essentiellement d'ordre structurel. Cette couche assure la résistance mécanique de la structure de la chaussée, fournit une assise globale à la chaussée et assure une uniformité générale de la structure sous-chaussée. La sollicitation provoquée par les avions se traduit assez souvent par la plastification partielle ou totale d'une partie de la couche de forme, ce qui peut entraîner à long terme des déplacements (tassements) de plus en plus importants en cas de trafic dense.

**5.4. Déformation de la couche de forme (sous) chargement statique et dynamique**

-calcul sous charge statique :



**Figure 5.5 : Effet statique charge concentré**

:

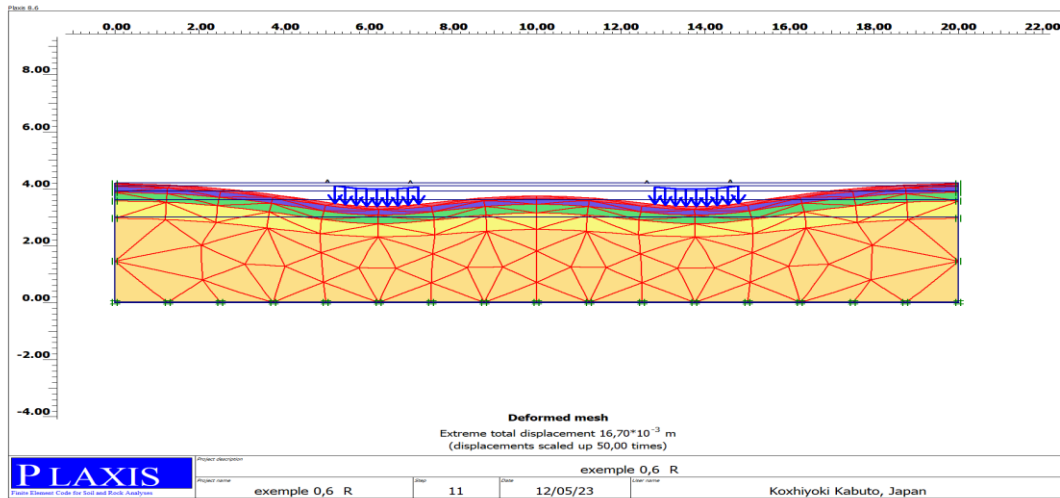


Figure 5.6 : Effet statique charge répartie

- Calcul sous chargement dynamique :

-

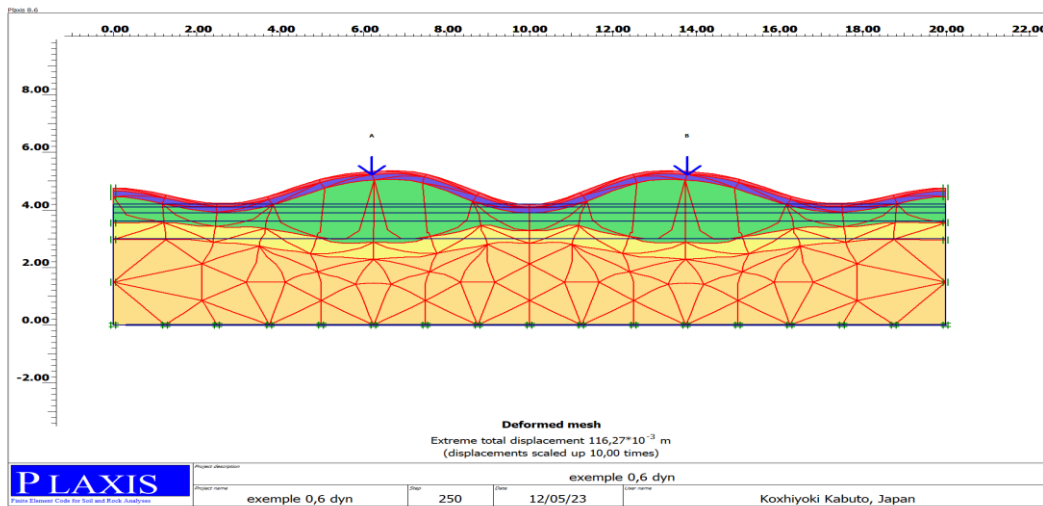


Figure 5.7: Effet dynamique charge concentré



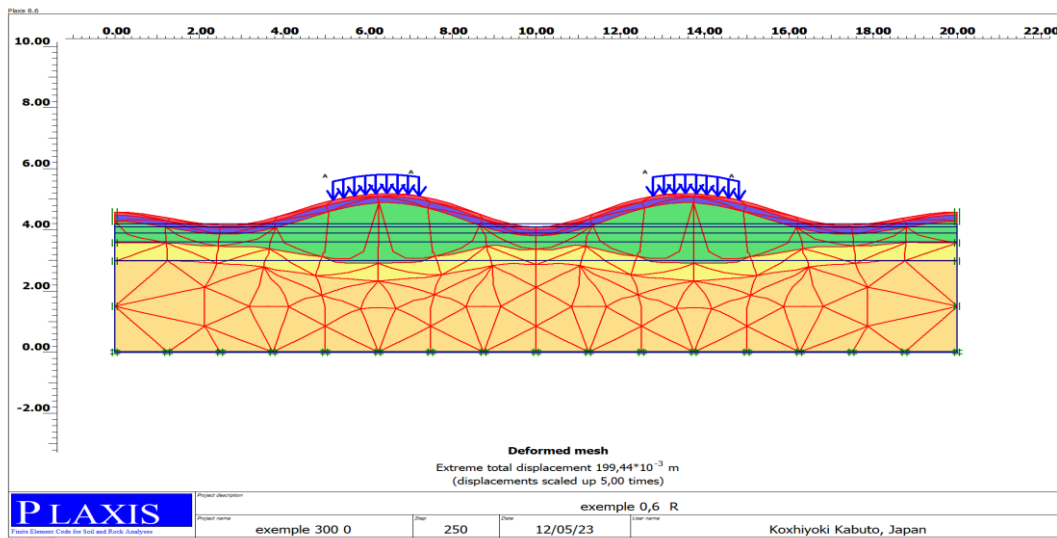


Figure 5.8 : Effet dynamique charge répartie

### 5.5. Plastification de la couche de forme sous chargement statice et dynamique

- Calcul sous charge statique :

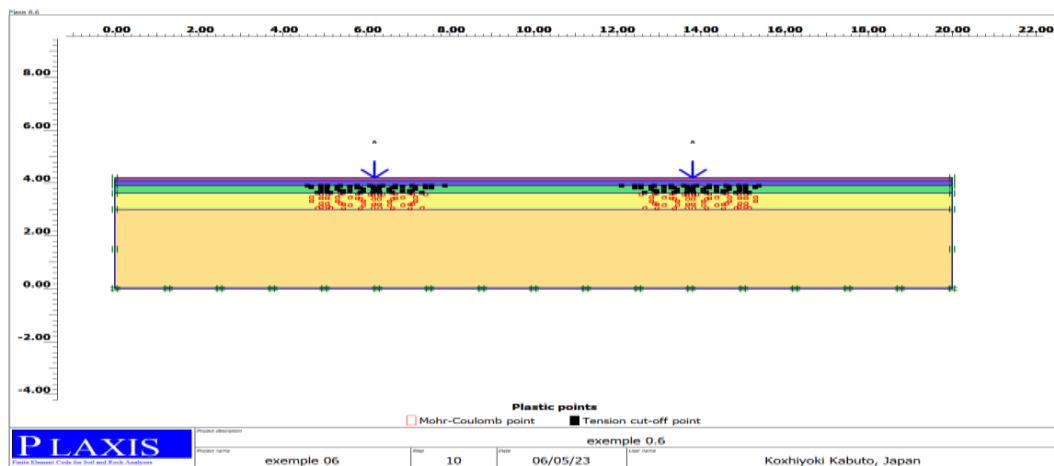


Figure 5.9 : plastification charge concentré l'effet statique

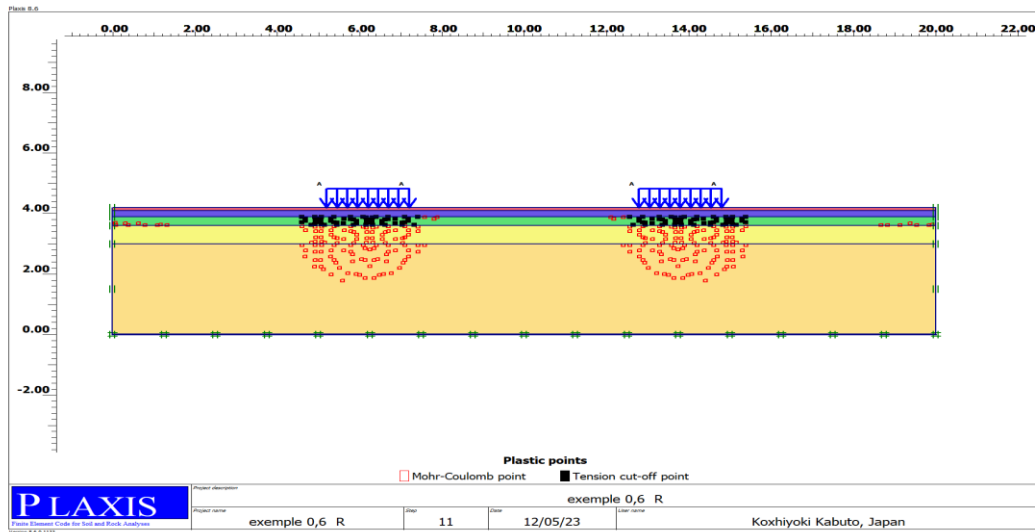


Figure 5.10 : plastification charge répartie l'effet statique

- Calcul sous charge dynamique :

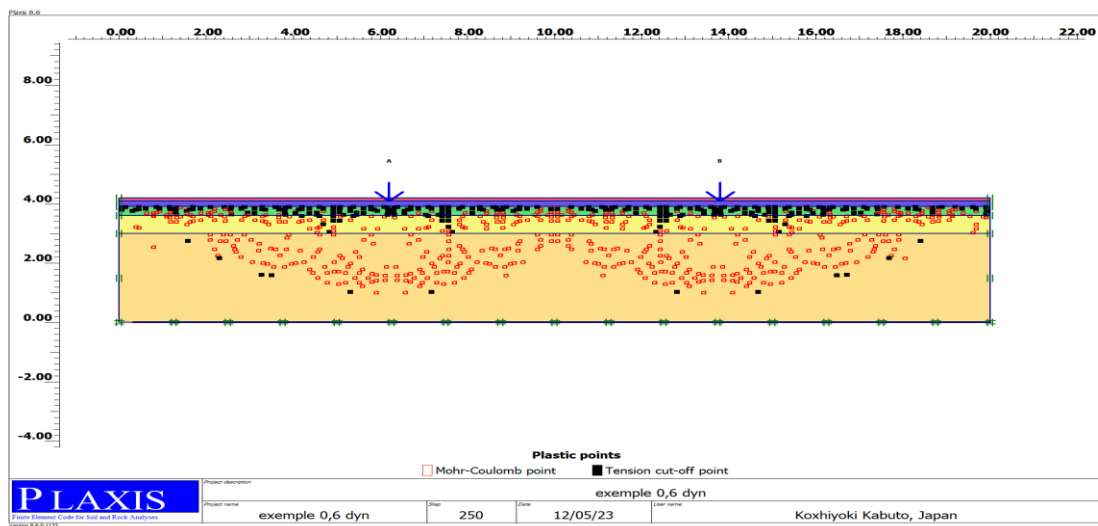


Figure 5.11 :Plastification charge concentré et effet dynamique

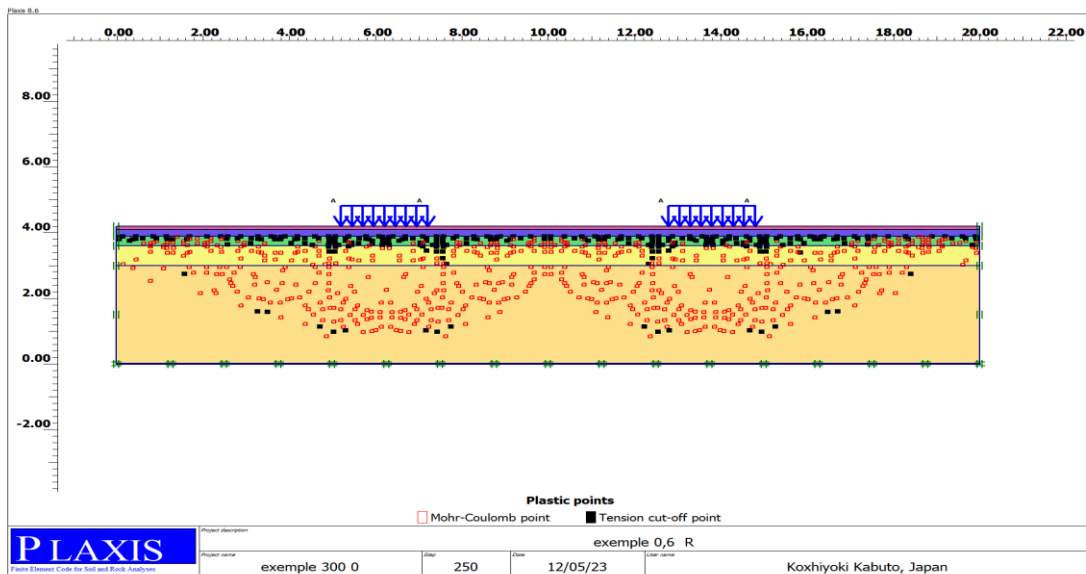


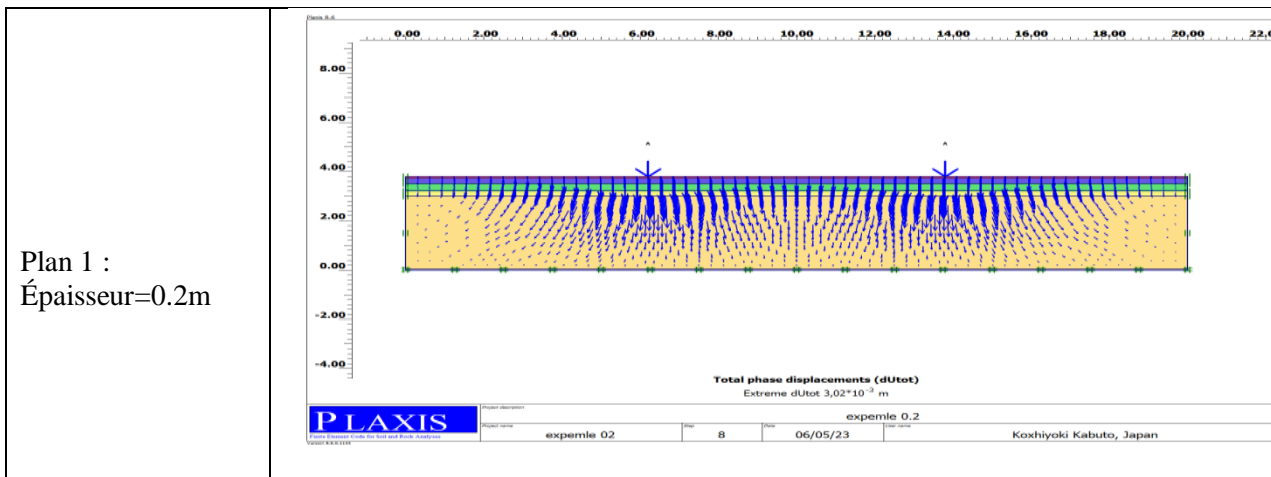
Figure 5.12:Plastification charge repartie et effet dynamique

### 5.6. Détermination de l'épaisseurs optimal

#### 5.6.1. Déplacement de phase total de model

Le tableau suivant présente le déplacement total (tableaux :5.4/5.5/5.6)

Tableau 5.4; Déplacement total - charge applique C1=111 kN/m



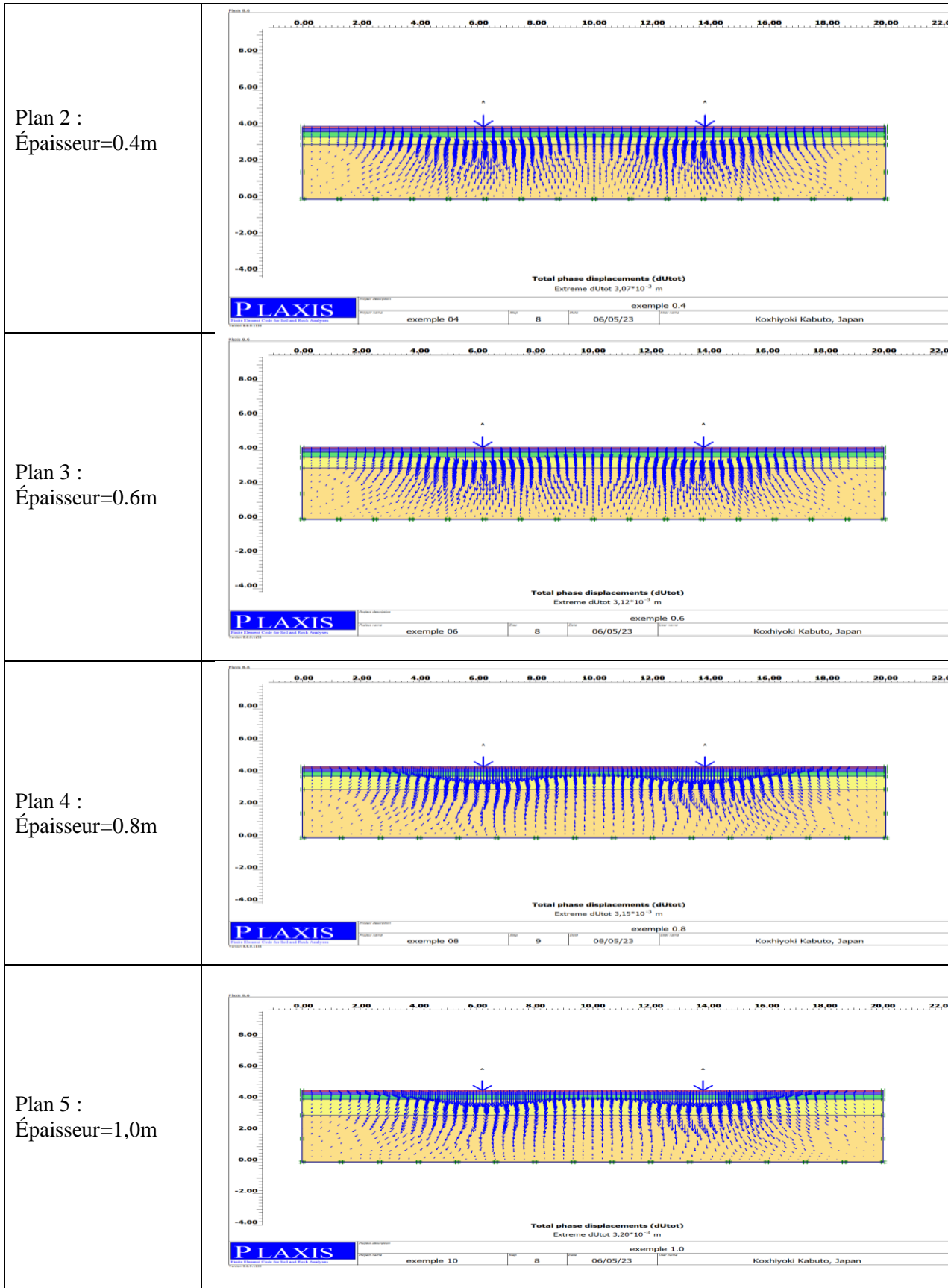


Tableau 5.5; Déplacement total - charge appliquée C2=300 kN/m

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <p>Plan 1 :<br/>Épaisseur=0.2m</p> | <p>Total phase displacements (dUtot)<br/>Extreme dUtot 8,22*10<sup>-3</sup> m</p> <p>PLAXIS<br/>exemple 02 10 06/05/23 Koohiyoki Kabuto, Japan</p> |
| <p>Plan 2 :<br/>Épaisseur=0.4m</p> | <p>Total phase displacements (dUtot)<br/>Extreme dUtot 8,40*10<sup>-3</sup> m</p> <p>PLAXIS<br/>exemple 04 10 06/05/23 Koohiyoki Kabuto, Japan</p> |
| <p>Plan 3 :<br/>Épaisseur=0.6m</p> | <p>Total phase displacements (dUtot)<br/>Extreme dUtot 8,57*10<sup>-3</sup> m</p> <p>PLAXIS<br/>exemple 06 10 06/05/23 Koohiyoki Kabuto, Japan</p> |
| <p>Plan 4 :<br/>Épaisseur=0.8m</p> | <p>Total phase displacements (dUtot)<br/>Extreme dUtot 3,15*10<sup>-3</sup> m</p> <p>PLAXIS<br/>exempla 08 9 06/05/23 Koohiyoki Kabuto, Japan</p>  |
| <p>Plan 5 :<br/>Épaisseur=1,0m</p> | <p>Total phase displacements (dUtot)<br/>Extreme dUtot 8,87*10<sup>-3</sup> m</p> <p>PLAXIS<br/>exemple 10 10 06/05/23 Koohiyoki Kabuto, Japan</p> |

Tableau 5.6 : Déplacement total - charge applique C3=500 kN/m

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <p>Plan 1 :<br/>Épaisseur=0.2m</p> |  |
| <p>Plan 2 :<br/>Épaisseur=0.4m</p> |  |
| <p>Plan 3 :<br/>Épaisseur=0.6m</p> |  |
| <p>Plan 4 :<br/>Épaisseur=0.8m</p> |  |
| <p>Plan 5 :<br/>Épaisseur=1,0m</p> |  |

### 5.6.2. La relation entre la déformation et l'épaisseur de la couche de forme

- relation entre la déformation et l'épaisseurs de la CF ,On remarque que la courbe presque est linéaire (figure 5.13./figure5.14. /figure5.15 /figure 5.16), donc le modèle est en mode Elasticité

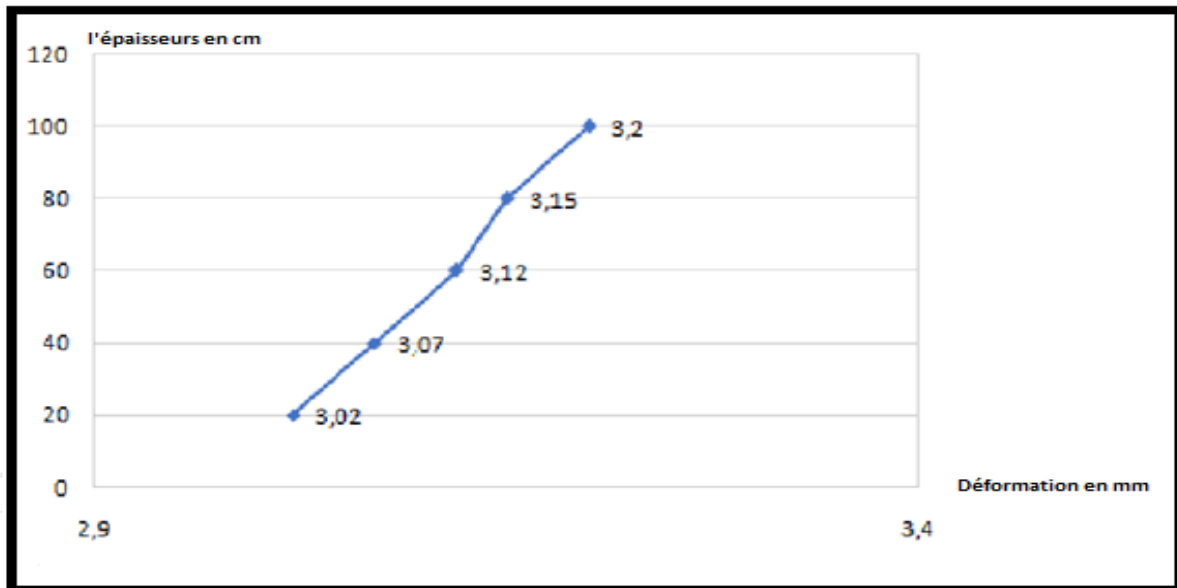


Figure 5.13 : Courbe de déformations pour la charge 111kN

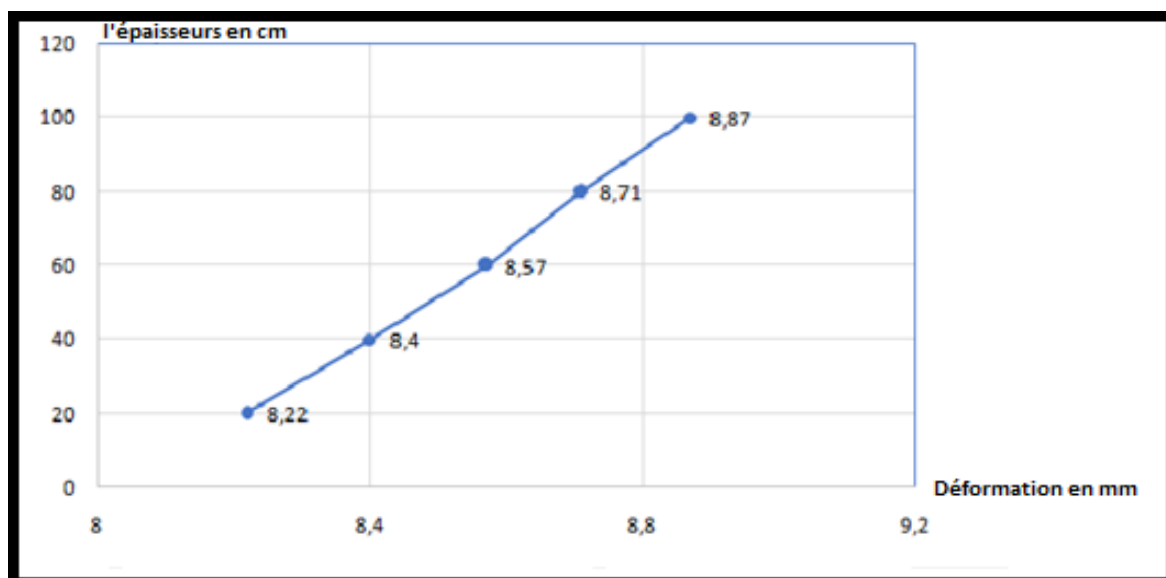


Figure 5.14 : Courbe de déformation pour la charge 300kN

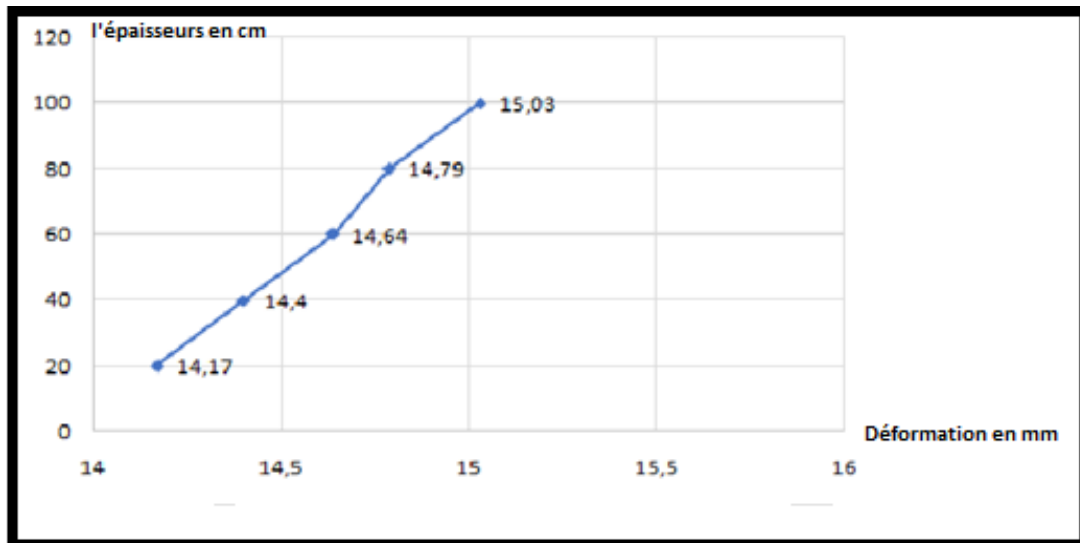


Figure 5.15 : Courbe de déformation pour la charge 500kN

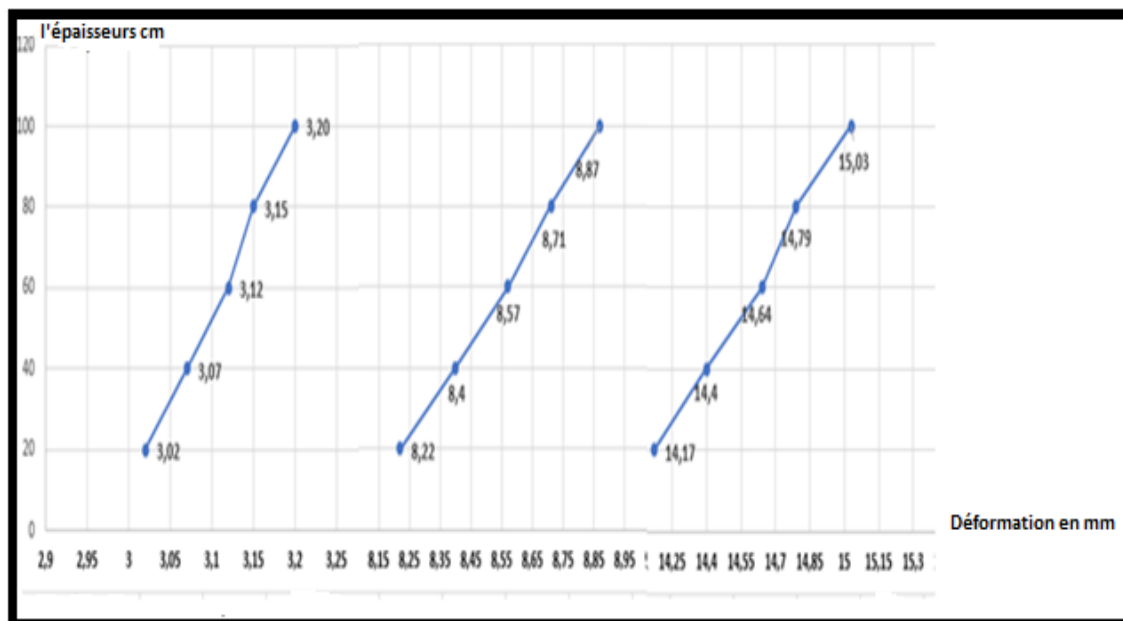


Figure 5.16 : Courbes totales pour toutes les charges

-Remarque : Les courbes de déformations globales

### 5.6.3. Estimation de l'épaisseur optimale de la couche de forme

#### I. Les points plastiques du modèle

Le tableau suivant présente les points plastiques (Tableaux :5.7/5.8/5.9)



Tableau 5.7; Points Plastiques- charge appliquée C1=111 kN/m

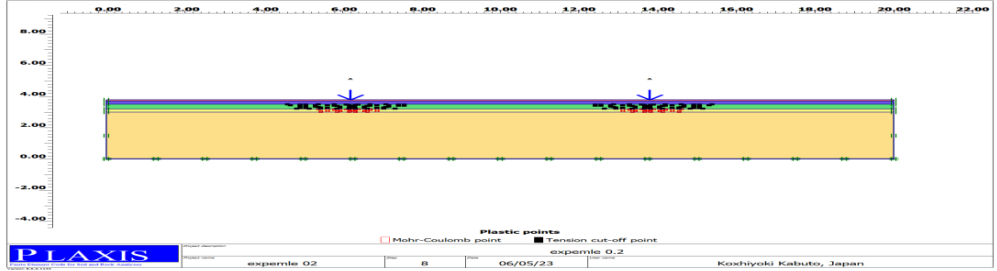
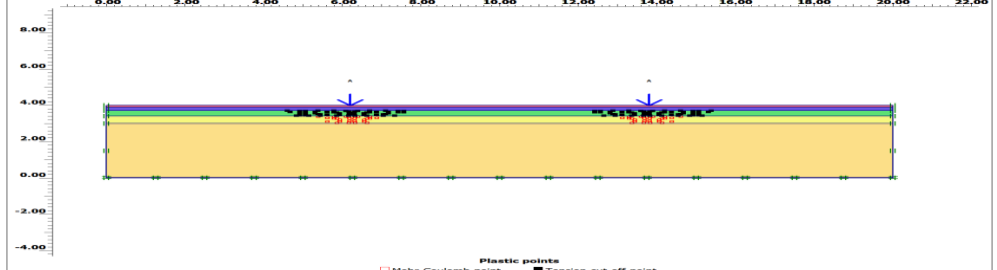
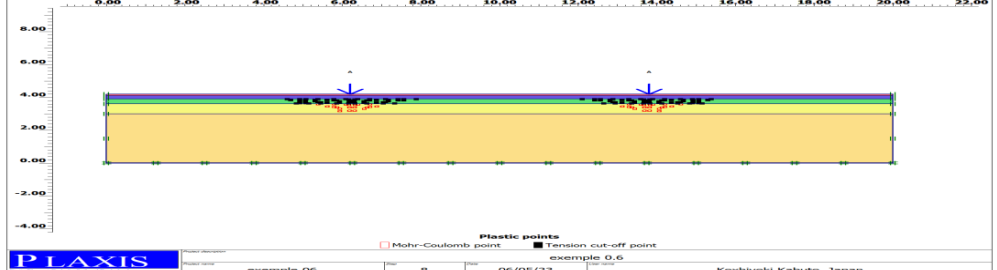
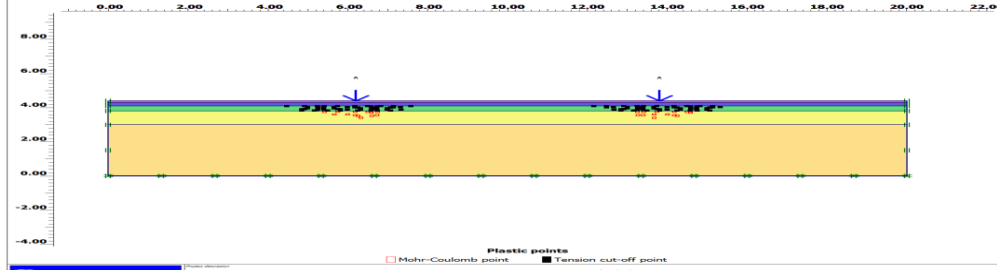
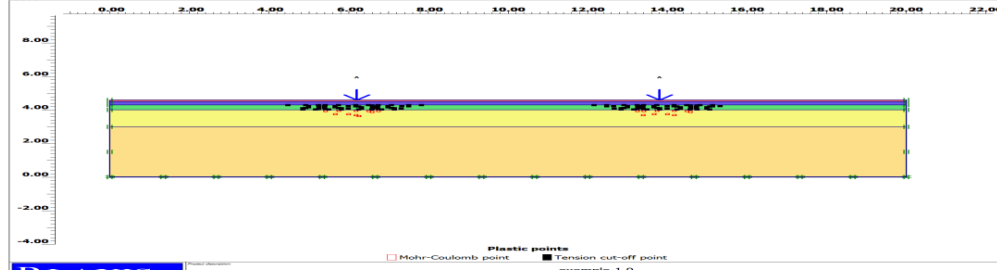
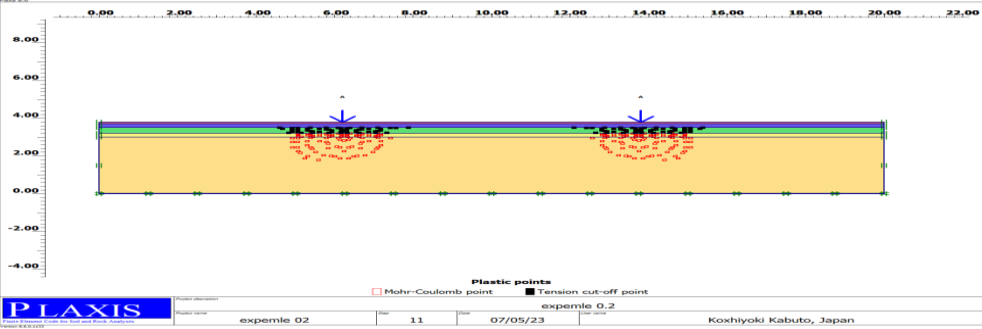
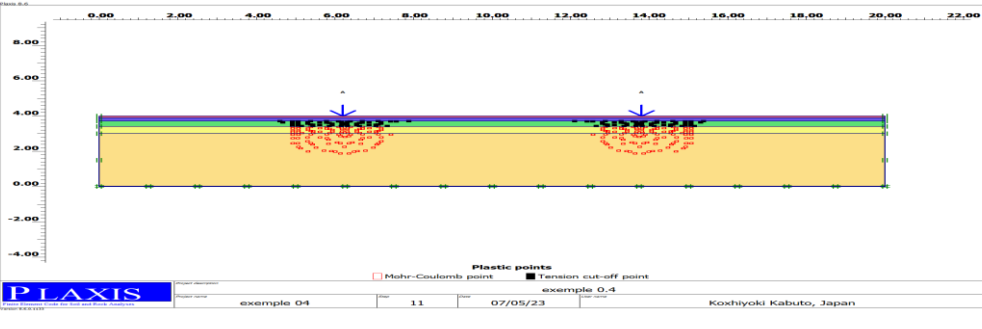
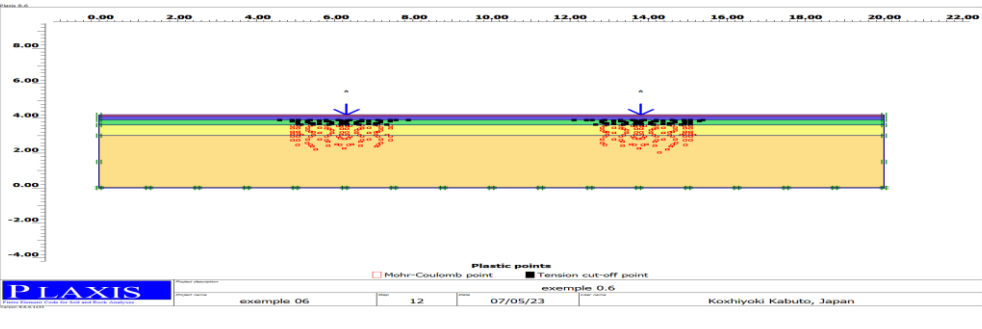
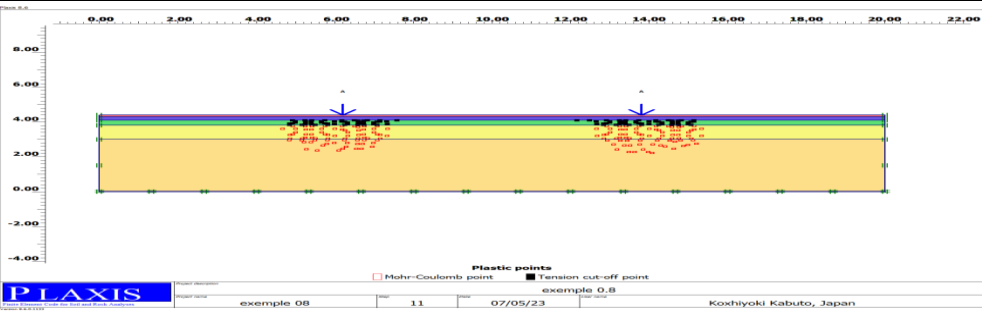
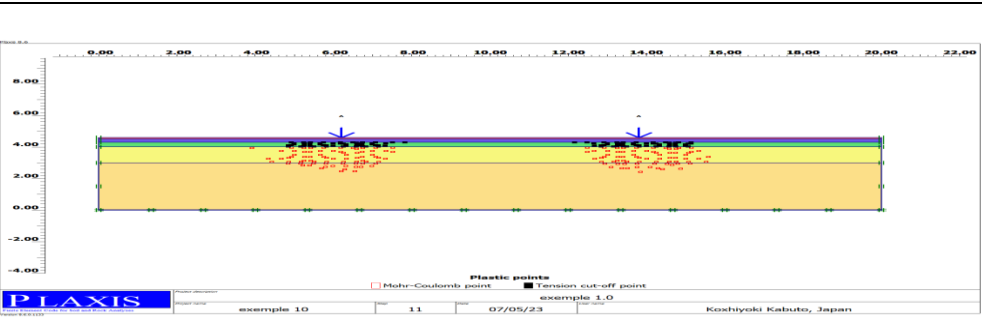
|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <p>Plan 1 :<br/>Épaisseur=0.2m</p> |    |
| <p>Plan 2 :<br/>Épaisseur=0.4m</p> |    |
| <p>Plan 3 :<br/>Épaisseur=0.6m</p> |   |
| <p>Plan 4 :<br/>Épaisseur=0.8m</p> |  |
| <p>Plan 5 :<br/>Épaisseur=1,0m</p> |  |

Tableau 5.8 : Points Plastiques - charge appliquée C2=300 kN/m

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <p>Plan 1 :<br/>Épaisseur=0.2m</p> |  |
| <p>Plan 2 :<br/>Épaisseur=0.4m</p> |  |
| <p>Plan 3 :<br/>Épaisseur=0.6m</p> |  |
| <p>Plan 4 :<br/>Épaisseur=0.8m</p> |  |
| <p>Plan 5 :<br/>Épaisseur=1,0m</p> |  |

Tableau 5.9: Points Plastiques - charge appliquée C3=500 kN/m

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <p>Plan 1 :<br/>Épaisseur=0.2m</p> |  <p>PLASTIC POINTS</p> <p>Legend: <span style="color:red">■</span> Mohr-Coulomb point, <span style="color:blue">■</span> Tension cut-off point</p> <p>Project: exemple 02, Date: 11, 07/05/23, Location: Koshiyoki Kabuto, Japan</p>   |
| <p>Plan 2 :<br/>Épaisseur=0.4m</p> |  <p>PLASTIC POINTS</p> <p>Legend: <span style="color:red">■</span> Mohr-Coulomb point, <span style="color:blue">■</span> Tension cut-off point</p> <p>Project: exemple 04, Date: 11, 07/05/23, Location: Koshiyoki Kabuto, Japan</p>   |
| <p>Plan 3 :<br/>Épaisseur=0.6m</p> |  <p>PLASTIC POINTS</p> <p>Legend: <span style="color:red">■</span> Mohr-Coulomb point, <span style="color:blue">■</span> Tension cut-off point</p> <p>Project: exemple 06, Date: 12, 07/05/23, Location: Koshiyoki Kabuto, Japan</p>  |
| <p>Plan 4 :<br/>Épaisseur=0.8m</p> |  <p>PLASTIC POINTS</p> <p>Legend: <span style="color:red">■</span> Mohr-Coulomb point, <span style="color:blue">■</span> Tension cut-off point</p> <p>Project: exemple 08, Date: 11, 07/05/23, Location: Koshiyoki Kabuto, Japan</p> |
| <p>Plan 5 :<br/>Épaisseur=1,0m</p> |  <p>PLASTIC POINTS</p> <p>Legend: <span style="color:red">■</span> Mohr-Coulomb point, <span style="color:blue">■</span> Tension cut-off point</p> <p>Project: exemple 10, Date: 11, 07/05/23, Location: Koshiyoki Kabuto, Japan</p> |

## II. Epaisseur optimale de la couche de forme

Le potentiel de plastification de la couche de forme, en fonction des chargements appliqués et pour plusieurs configurations géométriques de la couche de forme (épaisseurs) est présenté dans la Figure 5.17. On remarque que la configuration géométrique correspondant à une épaisseur de la couche de forme égale à 0,6 m représente une certaine limite de la zone de plastification partielle de la couche de forme. Donc pour un chargement moyen de type C2, le plus courant des aéronefs lourds, et pour un trafic dense supérieur à mouvements par jour, une épaisseur optimale de 0,6 m peut être préconisée.

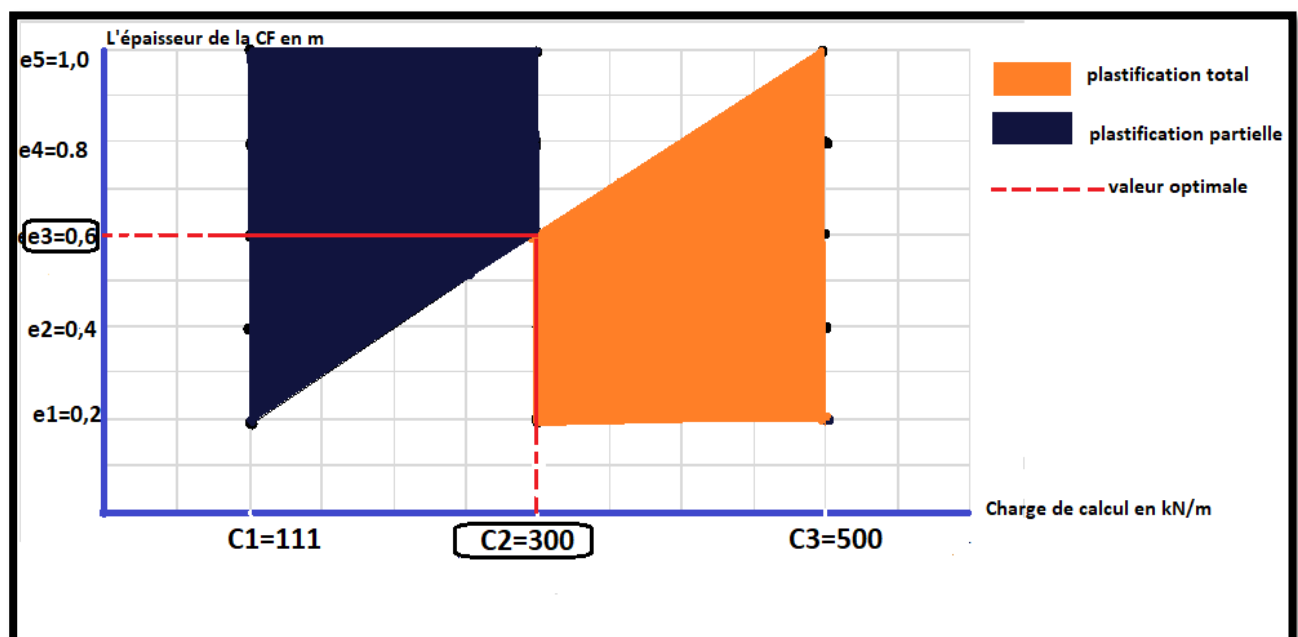


Figure 5.17 : Zones de plastifications en fonction des épaisseurs et des chargements

### Conclusion

La plasticité des sols est une propriété mécanique des sols qui fait référence à leur capacité à subir une déformation permanente lorsqu'ils sont soumis à une contrainte. Cette déformation est généralement causée par la compression ou le cisaillement du sol.

La plastification de la couche de forme peut être estimée par l'analyse des points plastiques au niveau de la couche, la prolifération de ces points 'plastiques' indique le degré de chargement de la couche de forme qui peut être à l'origine de la déformation de cette dernière et par conséquent le tassement de la structure et l'apparition des fissures en surface de la chaussée.

## **CONCLUSION**

## Conclusion

La présente analyse numérique a montré que le comportement de la couche de forme de point de vue structurel est largement associé à son épaisseur qui doit être suffisante pour pouvoir absorber les sollicitations transmises par les couches supérieures de la chaussée. En termes de conception l'analyse a montré que la considération du type de charge influe sur le comportement de la chaussée.

Les méthodes de conception actuelle ne prennent pas en considération l'effet de répartition de la charge due à la géométrie réelle des atterrisseurs, ainsi que l'effet dynamique de la charge provoqué par le passage d'un train d'atterrissage sur la chaussée. Les résultats obtenus montrent que tous ces paramètres influent de manière directe sur l'estimation des déformations de la chaussée surtout lorsque les charges sont très élevées et le Trafic est dense.

Il est clair que l'épaisseur optimale d'une couche de forme pour un aéroport dépend de plusieurs facteurs, tels que le type d'aéronefs qui l'utiliseront, les conditions du sol existant, les charges prévues et les exigences de conception spécifiques. Cependant, Il est important de noter que les épaisseurs généralement admises 30 à 60 cm sont des estimations générales et qu'elles peuvent varier en fonction des exigences spécifiques du projet, des types de chargement (avions de calculs) et de la nature et fréquence du trafic considéré.

En se basant sur les résultats obtenus on peut dire qu'une épaisseur moyenne de 60cm d'une couche de forme reste une valeur optimale pour pouvoir prendre en considération les différences de chargement et influence du trafic.

Dans tous les cas, il est toujours recommandé de consulter les normes et les recommandations de conception aéronautique spécifiques ainsi que de faire appel à des ingénieurs spécialisés dans la conception d'aéroports pour obtenir des conseils précis en fonction des données relatives à chaque projet

# Références bibliographiques

[1] Instruction sur le dimensionnement de chaussée d'aérodromes et la détermination des charges admissibles, DEUXIEME TIRAGE 1988, Ministre des transports/DGAC, Direction Générale de l'Avion Civile/SBA, Service des Bases Aériennes/ STBA, Service Technique des bases Aériennes.

[2] Direction générale de l'Aviation civile, Service technique de l'Aviation civile, Les chaussées aéronautiques, janvier 2007, INFORMATION TECHNIQUE STAC.

[3] Manuel de conception des aérodromes, Premier Edition - 2006, Organisation de l'aviation civile internationale.

[4] Dr. Rouili Ahmed, Editions et Distribution DAR RAIHANA Alger, ISBN : 9961-822-39-0, DL : 2121-2002. ETUDE ET CONCEPTION DES AERODROMES CIVILS

[5] DEFENCE ESTATES / MINISTRY OF DEFENCE, 3RD EDITION – FEBRUARY 2011. A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation, Design & Maintenance Guide 27.

[6] Revue générale des routes et des aérodromes, décembre 1986.

[7] Instruction technique sur les aérodromes civils. Disponible sur :  
[https://www.aviationcivile.gov.ma/wp-content/uploads/2020/11/Instruction-technique-n-3432-DGAC.DAC\\_.DIA\\_.SPL-du-26-Octobre-2020-relative-aux-caractéristiques-physiques-des-aérodromes-civils.pdf](https://www.aviationcivile.gov.ma/wp-content/uploads/2020/11/Instruction-technique-n-3432-DGAC.DAC_.DIA_.SPL-du-26-Octobre-2020-relative-aux-caractéristiques-physiques-des-aérodromes-civils.pdf)

[8] PLAXIS 2D version 8.6 manuel de référence.

[9] Site de l'OACI : <https://fr.calameo.com/read/0006872610666154ab19c>