



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 genie civil

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En : Travaux public

Spécialité : Voies et ouvrage d'art

Par : Gahfez ouadia

Sujet

**Analyse numérique de la stabilité d'une voie ferrée  
soumise à l'action de grandes charge statique et  
dynamique (model de charge 71 /UIC)**

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

M/Abdellah bouchoucha

Grade

Président

M/Ahmed rouili

Professeur

Rapporteur

M/Faisal Goudjil

Grade

Examineur

Promotion : 2020/2021

# *Dedicace*

*A Mon très cher père et ma très chère mère.*

*Témoignage d'affection et de grande reconnaissance,*

*Que Dieu les garde pour moi.*

*A toute ma famille, Mes très chers frères et ma sœur,*

*A tous ceux que j'aime,*

*Avec l'expression de tous mes sentiments de respect,*

*Je dedie ce modeste travail*

# *Remerciements*

Je remercie avant tout DIEU, le tout puissant, pour m'avoir guidé durant toutes mes années d'études et de m'avoir donné la volonté et le courage pour terminer ce travail.

Un grand remerciement à mon encadreur Pr. ROUILI Ahmed pour m'avoir proposé un sujet intéressant et pour la confiance qu'il m'a accordé. Il m'a dirigé tout au long de cette étude et m'a donné les grands axes de recherche. Je le remercie aussi pour sa disponibilité et sa gentillesse.

Mes remerciements également pour le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail. Et tous les responsables de l'université et les enseignants du Département génie civil.

Mes remerciements à toute ma famille frères et sœur et mes amis qui m'ont encouragé à réaliser ce travail.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à mener à terme ce travail.

## Liste des notations et abréviations

### Majuscules latines

QS1 : Sol médiocre

QS2 : Sol moyen

QS3 : Bon sol

A : surface de section

L : longueur de travers

E : Module d'Young.

H : hauteur de couche.

d : Diamètre de traverse en bois

S : surface de chargement.

T : Réaction tangentielle.

Tn: Réaction tangentielle d'une tranche n.

### Minuscules latines

$\nu$ : coefficient de Poisson

c : Cohésion

c': Cohésion effective.

C<sub>i</sub> : Cohésion d'une couche i du sol.

C<sub>u</sub> : Cohésion drainé.

K<sub>0</sub> : Coefficient des terres au repos

K<sub>x</sub> : Perméabilité générale.

K<sub>y</sub> : perméabilité horizontale.

### Caractères grecques

$\gamma$  : Poids volumique.

$\gamma_w$  : Poids volumique humide.

$\varphi$  : Angle de frottement

$\varphi'$  : Angle frottement effective.

$\varphi_i$  : Angle de frottement d'une couche i du sol.

$\varphi_m$  : Angle de frottement mobilisé.

$\theta$  : Inclinaison du plan de rupture.

$\theta_F$  : Angle indiquant la position de la structure stabilisante.

$\sigma$  : Contrainte normale mobilisée.

$\sigma_n$  : Contraintes normales.

$\sigma_i$  : Contrainte normale d'une couche  $i$ .

$\tau$  : Contraintes de cisaillement.

$\tau_f$  : Contrainte mobilisée de cisaillement.

$\psi_i$  : Angle de dilatance de la couche  $i$  du sol

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre 2**

**Tableau 2.1** valeurs des coefficients .....15

**Tableau 2.2** Valeurs des X et Y .....18

### **Chapitre 3**

**Tableau 3.1** Caractéristique mécaniques des matériaux .....30

**Tableau 3.2** Caractéristique mécaniques des traverses et rail .....31

### **Chapitre 5**

**Tableau 5.1** L'influence du chargement sur la structure d'assise ferroviaire.....66

## Liste des figures

Figure	Titre	Page
<b>Chapitre 2</b>		
<b>Fig.2.1</b>	Constituant de la voie ferre .....	<b>05</b>
<b>Fig.2.2</b>	Le Rail profiles (Esveld, 2001) .....	<b>06</b>
<b>Fig.2.3</b>	Différents Systèmes d’attaches et d’ancrages.....	<b>07</b>
<b>Fig.2.4</b>	Les Semelle en élastomère .....	<b>07</b>
<b>Fig.2.5</b>	La traverse en bois. ....	<b>08</b>
<b>Fig.2.6</b>	La traverse en acier.....	<b>09</b>
<b>Fig.2.7</b>	Les différents types de la Traverse Bi- Blocs .....	<b>11</b>
<b>Fig.2.8</b>	Profil en travers schématique des couches d'assise d'une voie....	<b>13</b>
<b>Fig.2.9</b>	Repère fixe et repère mobile.....	<b>14</b>
<b>Fig.2.10</b>	Répartition De Charge Statique Sous Le Bogie De Train.....	<b>17</b>
<b>Fig.2.11</b>	La Force De Forme "M.....	<b>17</b>
<b>Fig.2.12</b>	Signal de force en M (Passage d’un bogie sur un blochet).....	<b>19</b>
<b>Fig.2.13</b>	Force appliquée sur le ballast.....	<b>19</b>
<b>Fig.2.14</b>	Passage des trois bogies sur un blochet.....	<b>20</b>
<b>Fig.2.15</b>	Modèle de charges 71.....	<b>21</b>
<b>Fig.2.16</b>	Coefficient $\alpha$ proposé par l’IN3128.....	<b>21</b>
<b>Fig.2.17</b>	Différents modèles de voie disponibles.....	<b>24</b>
<b>Chapitre 3</b>		
<b>Fig.3.1</b>	Géométrie de la structure d'assise ferroviaire .....	<b>29</b>
<b>Fig.3.2</b>	Géométrie du model numérique .....	<b>30</b>
<b>Fig.3.3</b>	Informations générales du maillage en Plaxis 2D .....	<b>31</b>
<b>Fig.3.4</b>	Maillage du modèle .....	<b>32</b>
<b>Fig.3.5</b>	Les conditions initiales .....	<b>32</b>
<b>Fig.3.6</b>	Champ des contraintes effectives avant chargement .....	<b>33</b>
<b>Fig.3.7</b>	Point plastic avant chargement.....	<b>33</b>
<b>Fig.3.8</b>	Déformation totale du maillage avant chargement .....	<b>34</b>
<b>Fig.3.9</b>	Déplacement vertical avant le chargement .....	<b>34</b>
<b>Fig.3.10</b>	Déplacement horizontal avant le chargement.....	<b>35</b>

## Chapitre 4

<b>Fig.4.1</b>	Éléments finis triangulaire à 15-nœuds.....	<b>37</b>
<b>Fig.4.2</b>	Paramètre général de Project.....	<b>37</b>
<b>Fig.4.3</b>	Démentions et les unités du Project.....	<b>38</b>
<b>Fig.4.4</b>	Champ des phases du calcul.....	<b>39</b>
<b>Fig.4.5</b>	Information de calcul en phase.....	<b>40</b>
<b>Fig.4.6</b>	Déformation totale du maillage après chargement.....	<b>40</b>
<b>Fig.4.7</b>	Déplacement vertical après chargement.....	<b>41</b>
<b>Fig.4.8</b>	Déplacement horizontal après chargement.....	<b>41</b>
<b>Fig.4.9</b>	Champ des contraintes effectives après chargement.....	<b>42</b>
<b>Fig.4.10</b>	Point plastic après chargement.....	<b>42</b>
<b>Fig.4.11</b>	Déformation totale du maillage après combinaison.....	<b>43</b>
<b>Fig.4.12</b>	Déplacement vertical après combinaison.....	<b>43</b>
<b>Fig.4.13</b>	Déplacement horizontal après combinaison.....	<b>44</b>
<b>Fig.4.14</b>	Champ des contraintes effectives après combinaison.....	<b>44</b>
<b>Fig.4.15</b>	Point plastic après combinaison.....	<b>45</b>
<b>Fig.4.16</b>	Information de calcul dynamique .....	<b>46</b>
<b>Fig.4.17</b>	Déformation totale du maillage .....	<b>46</b>
<b>Fig.4.18</b>	Déplacement vertical après chargement dynamique.....	<b>47</b>
<b>Fig.4.19</b>	Déplacement horizontal après le chargement dynamique.....	<b>47</b>
<b>Fig.4.20</b>	Champ des contraintes effectives après chargement dynamique	<b>48</b>
<b>Fig.4.21</b>	Point plastic après le chargement dynamique.....	<b>48</b>
<b>Fig.4.22</b>	Coupe de calcul de déplacement total avant chargement.....	<b>49</b>
<b>Fig.4.23</b>	Coupe de calcul de déplacement total après chargement .....	<b>49</b>
<b>Fig.4.24</b>	Coupe de calcul de déplacement du l'effort d'acet unique.....	<b>50</b>
<b>Fig.4.25</b>	Coupe de calcul de déplacement total après la combinaison.....	<b>50</b>
<b>Fig.4.26</b>	Coupe de calcul de déplacement total après le c.dynamique.....	<b>51</b>
<b>Fig.4.27</b>	Déformation totale du maillage après chargement.....	<b>51</b>
<b>Fig.4.28</b>	Déplacement vertical après chargement.....	<b>52</b>
<b>Fig.4.29</b>	Déplacement horizontal après chargement.....	<b>52</b>
<b>Fig.4.30</b>	Champ des contraintes effectives après chargement.....	<b>53</b>
<b>Fig.4.31</b>	Point plastic après chargement.....	<b>53</b>

<b>Fig.4.32</b>	Déformation totale du maillage après combinaison.....	<b>54</b>
<b>Fig.4.33</b>	Déplacement vertical après combinaison.....	<b>54</b>
<b>Fig.4.34</b>	Déplacement horizontal après combinaison.....	<b>55</b>
<b>Fig.4.35</b>	Champ des contraintes effectives après combinaison.....	<b>55</b>
<b>Fig.4.36</b>	Point plastic après combinaison.....	<b>56</b>
<b>Fig.4.37</b>	Déformation totale du maillage après chargement dynamique...	<b>56</b>
<b>Fig.4.38</b>	Déplacement vertical après chargement dynamique.....	<b>57</b>
<b>Fig.4.39</b>	Déplacement horizontal après le chargement dynamique.....	<b>58</b>
<b>Fig.4.40</b>	Champ des contraintes effectives après chargement dynamique..	<b>59</b>
<b>Fig.4.41</b>	Point plastic après chargement dynamique.....	<b>58</b>
<b>Fig.4.42</b>	Coupe de calcul de déplacement total après chargement.....	<b>59</b>
<b>Fig.4.43</b>	Coupe de calcul de déplacement total après combinaison .....	<b>59</b>
<b>Fig.4.44</b>	Coupe de calcul de déplacement total après le c.dynamique.....	<b>60</b>

## **Chapitre 5**

<b>Fig.5.1</b>	Comparaison entre les déformations (80 kN) .....	<b>61</b>
<b>Fig.5.2</b>	Comparaison entre les déformations (250 kN) .....	<b>62</b>
<b>Fig.5.3</b>	Comparaison entre les déplacements verticaux (80 kN) .....	<b>62</b>
<b>Fig.5.4</b>	Comparaison entre les déplacements verticaux (250 kN) .....	<b>63</b>
<b>Fig.5.5</b>	Comparaison entre les déplacements horizontaux (80kN) .....	<b>63</b>
<b>Fig.5.6</b>	Comparaison entre les déplacements horizontaux (250kN) .....	<b>64</b>
<b>Fig.5.7</b>	Comparaison entre les contraintes (80 kN) .....	<b>65</b>
<b>Fig.5.8</b>	Comparaison entre les contraintes (250 kN) .....	<b>65</b>
<b>Fig.5.9</b>	Comparaison entre les points plastic (80kN) .....	<b>67</b>
<b>Fig.5.10</b>	Comparaison entre les points plastic (250 kN) .....	<b>67</b>
<b>Fig.5.11</b>	Comparaison entre les coupes de calcul du dép. total (80 kN)....	<b>68</b>
<b>Fig.5.12</b>	Comparaison entre les coupes de calcul du dép. total (250kN)....	<b>69</b>

## **RESUME:**

De nos jours la densité, la rapidité et la fiabilité des réseaux ferroviaires sont des indicateurs indiscutables du développement du transport public dans un Pays. La modernisation des trains (TGV), qui devient de plus en plus rapide ainsi que la croissance de la fréquence du trafic ferroviaire, provoque inévitablement des dégradations importantes au niveau de la superstructure et de l'infrastructure de la voie, plus prononcées que pour les voies classiques. Ces dégradations sont généralement liées aux chargements importants de nature combinée (statiques et dynamiques) ce qui provoque la fatigue prématurée de la voie et l'instabilité de toute la structure de la voie. La nature compliquée du chargement de la voie due au passage des trains reste un axe majeur d'investigation pour une meilleure approche de conception, Il est donc nécessaire d'étudier l'effet des charges statiques et dynamiques sur l'instabilité des voies ferrées en raison des contraintes et des déformations causées par ces grandes charges.

Le but de ce travail est de comprendre le comportement de la voie sous l'action des charges 'normalisées' proposées par l'UIC (Union International des Chemins de Fer). Ce modèle de chargement, appelé UIC 71, est intégré dans la présente analyse dans un modèle numérique non linéaire bidimensionnel développé en utilisant le Logiciel Plaxis, validé par un modèle de référence, en tenant compte de la géométrie, des conditions aux limites, du type et rhéologie des matériaux ainsi que du modèle de chargement type 71.

Les résultats de l'analyse effectuée confirment la bonne qualité de la simulation numérique du comportement de la voie sous l'action du chargement UIC 71, obtenus en utilisant le modèle numérique proposé. Les résultats en termes de répartitions des charges et déplacement dues aux effets statiques est dynamique du chargement UIC 71, et leur effet sur la stabilité de la voie sont discutés.

**Mot-clé :** UIC, modèle de chargement UIC 71, modèle numérique, stabilité de la voie.

## **Abstract:**

Nowadays the density, speed and reliability of railways lines are indisputable indicators for the development of public transport in a country. The modernization of trains (TGV), which is becoming faster and faster as well as the increase in the frequency of rail traffic, inevitably causes significant degradations in the superstructure and infrastructure of the railway, more pronounced than for classic one. These degradations are generally linked to significant loads of a combined nature (static and dynamic) which causes premature fatigue of the way and instability of the entire railway structure. The complicated nature of the loading of the way due to the passage of trains remains a major axis of investigation for a better design approach, it is therefore necessary to study the effect of static and dynamic loads on the instability of railways due to the stresses and strains caused by these large loads.

The aim goal of this work is to understand the behavior of the way under the action of "standardized" loads proposed by the UIC (International Union of Railways). This loading model, called UIC 71, is integrated in the present analysis in a two-dimensional nonlinear numerical model developed using the Plaxis software, validated by a reference model, taking into account the geometry, the boundary conditions, the type and rheology of materials as well as of the loading model type 71.

The results of the analysis carried out confirm the good quality of the digital simulation of the behavior of the track under the action of UIC 71 loading, obtained using the proposed digital model. The results in terms of load distribution and displacement due to static and dynamic effects of UIC 71 loading, and their effect on track stability are discussed.

**Key-word:** UIC, loading model 71, numerical model, stability of railways.

## المخلص:

في الوقت الحاضر، تعد كثافة وسرعة وموثوقية خطوط السكك الحديدية مؤشرات لا جدال فيها لتطوير النقل العام في أي بلد. إن تحديث القطارات (TGV)، الذي أصبح أسرع وأسرع بالإضافة إلى زيادة تواتر حركة السكك الحديدية، يتسبب حتماً في تدهور كبير في البنية الفوقية والبنية التحتية للسكك الحديدية، أكثر وضوحاً من التدهور الكلاسيكي. ترتبط هذه التدهورات بشكل عام بأحمال كبيرة ذات طبيعة مشتركة (ستاتيكية وديناميكية) والتي تسبب التعب المبكر للطريق وعدم استقرار هيكل السكك الحديدية بأكمله. تظل الطبيعة المعقدة لتحميل الطريق بسبب مرور القطارات محوراً رئيسياً للتحقيق من أجل تصميم أفضل، لذلك من الضروري دراسة تأثير الأحمال الستاتيكية والديناميكية على عدم استقرار السكك الحديدية بسبب الضغوط والتوترات الناجمة عن هذه الأحمال الكبيرة.

الهدف من هذا العمل هو فهم سلوك الطريق تحت عمل الأحمال "الموحدة" المقترحة من قبل UIC (الاتحاد الدولي للسكك الحديدية). تم دمج نموذج التحميل هذا، المسمى UIC 71، في التحليل الحالي في نموذج رقمي غير خطي ثنائي الأبعاد تم تطويره باستخدام برنامج Plaxis، والذي تم التحقق من صحته من خلال نموذج مرجعي، مع مراعاة الهندسة وشروط الحدود ونوع المواد وريولوجيتها كذلك نموذج التحميل 71.

تظهر نتائج النماذج الرقمية المطورة التي تم الحصول عليها من محاكاة سلوك المسار جودة جيدة للنمذجة الرقمية التي سمحت لنا بمقارنة الملاحظات المتعلقة بسلوك هيكل السكة الحديدية تحت تحميل UIC 71، والتي تم الحصول عليها باستخدام النموذج الرقمي المقترح. تمت مناقشة النتائج من حيث توزيع الحمولة والإزاحة بسبب التأثيرات الثابتة والديناميكية لتحميل UIC 71، وتأثيرها على ثبات المسار.

**كلمات مفتاحية:** نموذج الاحمال 71, المنظمة العالمية لسكك الحديدية، نموذج رقمي، استقرار السكك الحديدية.

# Table des matières

**Dédicace**

**Remerciements**

**Liste des abréviations et symboles**

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**Résumé**

**Abstract**

**Résumé en arabe**

**Table des matières**

## **CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE**

1. INTRODUCTION : ..... 1

## **CHAPITRE II : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

2.1 INTRODUCTION : ..... 4

2.2 VOIE FERROVIAIRE : ..... 4

2.3 CONSTITUANTS DE LA VOIE FERREE : ..... 5

2.3.1 LE RAIL : ..... 5

2.3.2 LE SYSTEME D'ATTACHE : ..... 6

2.3.3 LA SEMELLE : ..... 7

2.3.4 LES TRAVERSES : ..... 8

2.3.5 LES COUCHES D'ASSISE : ..... 12

2.3.5.1 Couche de ballast : ..... 12

2.3.5.2	La sous couche :.....	13
2.3.5.3	LA PLATE FORME :.....	13
2.4	RAPPEL SUR LES PROBLEMES DE DYNAMIQUE DES STRUCTURES : .....	14
2.4.1	PROBLEME DE CHARGE MOBILE :.....	14
2.4.2	REPERE MOBILE :.....	15
2.4.3	CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA VOIE :.....	15
2.5	Actions dues au trafic Tram-Train.....	16
2.5.1	Les charges verticales :.....	17
2.5.1.1	La charge statique :.....	17
2.5.2	Les surcharges Dynamiques :.....	18
2.5.3	Le modèle de charge 71.....	21
2.5.4	LES EFFORTS LONGITUDINAUX : .....	23
2.5.4.1	Les forces d'accélération et de freinage.....	23
2.5.5	LES EFFORTS TRANSVERSAUX (LATERAUX) :.....	23
2.5.5.1	L'effort de lacet : .....	24
2.5.5.2	Les forces centrifuges :.....	24
2.6	MODELES GLOBAUX DE VOIE : .....	24
2.6.1	Modèle Unidimensionnel (1D):.....	25
2.6.2	Modèle Tridimensionnel (3D) :.....	25
2.7	METHODES DE RESOLUTION .....	26
2.7.1	METHODE DES ELEMENTS FINIS : .....	26
2.7.1.1	Calcul dans le repère fixe avec une source mobile :.....	26
2.7.1.2	Calcul dans le repère mobile avec source fixe :.....	26
2.8	QUELQUES ETUDES EXISTANTES :.....	27

### **CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE**

3.1	INTRODUCTION :	28
3.2	Modélisation de la structure par Plaxis :	28
3.2.1	Présentation du Plaxis :	28
3.2.1.1	Définition :	28
3.2.1.2	modèle de mohr-coulomb :	29
3.3	Description géométrique du modèle :	29
3.3.1	Conditions aux limites :	30
3.3.2	Géométrie et propriétés des matériaux :	31
3.3.2.1	Géométrie du modèle :	31
3.3.2.2	Caractéristique des matériaux :	31
3.4	Génération du maillage :	32
3.4.1	Définition des conditions initiales :	33

## **CHAPITRE IV : CALCUL NUMERIQUE**

4.1	INTRODUCTION .....	37
4.2	Procédure de calcul :	37
4.3	Les phase de calcul :	39
4.4	Examen des résultats :	40
4.5	Calcul de la première charge du model 71 (80 kN/m) :	41
4.5.1	Chargement statique :	41
4.5.2	Combinaison avec l'effort de l'acet :	43
4.5.3	Calculs dynamiques :	46
4.5.4	Les coupes de calcul de déplacement total .....	50
4.6	Calcul de la deuxième charge du model 71 (250kn/m) :	52
4.6.1	Calcul statique .....	52
4.6.2	Combinaison avec l'effort de l'acet :	55

4.6.3	Calculs dynamiques :.....	57
4.6.4	Les coupes de calcul de déplacement total.....	60

## **CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATION**

5.1	Introductions:.....	62
5.2	Comparaison et discussion des résultats :.....	62
CHAPITRES VI : CONCLUSION GENERALE.....		72

# **CHAPITRE I : INTRODUCTION**

## 1. INTRODUCTION :

Un des pionniers dans l'histoire des chemins de fer était G. Stephenson, qui a construit sa première locomotive de vapeur en 1813 <sup>(1)</sup>. Durant les années récentes, les transports ferroviaires, aussi bien pour les voyageurs que pour les marchandises, se sont beaucoup développés avec comme conséquence un trafic qui devient beaucoup plus rapide et plus sûr que les routes.

Beaucoup de recherches sur la voie en général ont été réalisées pour répondre aux exigences du trafic ferroviaire classique. Cependant l'apparition des T.G.V (trains à grande vitesse) s'est accompagnée de lignes tolérant de grandes vitesses de circulation et capables de reprendre les efforts engendrés. Toutefois, la durée de vie de ces lignes reste mal estimée car effectivement, ces voies semblent se dégrader plus rapidement que les voies classiques.

En grande partie, cette dégradation est liée à l'instabilité des super structures causée par des charges importantes statique et dynamique qui constituent généralement des phénomènes ponctuels, de faible ampleur et d'effets limités. Mais par leur diversité et leur fréquence, ils sont néanmoins responsables de dommages et de préjudices importants et coûteux. L'ensemble des dommages occasionnés par les glissements dus aux trafics ferroviaires, ont des conséquences humaines et socio-économiques considérables.

Il semble donc intéressant et nécessaire d'étudier l'effet des charges statique et dynamiques sur l'instabilité des voies ferrées et connaître le comportement des matériaux constituant.

Des recherches effectuées dans ce cadre et pour la plupart expérimentales ont permis de distinguer le fonctionnement de la structure en temps court lors de la circulation de la charge et du fonctionnement en temps long lorsque s'accumulent les effets non réversibles sur la forme des grains, leur granulométrie, leur porosité, Soit la perte des caractéristiques géométriques qui rendent moins durable une superstructure.

Des modèles théoriques ont tenté de décrire le phénomène physique en cause Mais ils se sont heurtés très vite à l'insuffisance ou à l'inadéquation des lois des milieux continus, La modélisation non linéaire a fait l'objet de nombreuses études expérimentales et numériques, certains aspects du comportement des matériaux restent encore à éclairer. Notre contribution a consisté à trouver un outil de calcul qui permet de vérifier la stabilité d'une voie ferrée soumise à de grande charge et d'évaluer les déplacements, les contraintes et les déformations afin d'apprécier ce type de structures, et d'analyser en détail les comportements physiques des matériaux. Le recours à l'analyse non linéaire par la méthode des éléments finis est la procédure la plus appropriée pour répondre à ces attentes.

Rappelons que le principal rôle de la couche de ballast dans une voie ferrée est de transmettre au sol la charge exercée par le rail sur le blochet. L'énergie mise en circulation des trains, se dissipe en partie dans le ballast de façon irréversible. Le ballast est donc le siège d'un tassement vertical et latéral sous les blochets suite à l'application répétée des charges dues à la circulation des trains. Un autre facteur important intervient dans la stabilité fonctionnelle et

structurelle de la voie : c'est le sol support, ce dernier est pris en considération lors de la conception par la nature du matériau (sol) constituant, ces paramètres géotechniques, son épaisseur finale et sa catégorie (classification) normalisée selon l'UIC.

Vu le progrès important dans le domaine de l'informatique, on a utilisé le logiciel PLAXIS, qui permet de modéliser précisément un modèle numérique développé basé sur un modèle de référence (expérimental) disponible dans la littérature spécialisée. Le modèle numérique est développé en prenant en considération, la géométrie, les matériaux, les conditions aux limites et les conditions (phasage) de chargement du modèle expérimental de référence.

Le modèle numérique développé dans cette étude est basé sur un modèle de référence (global) disponible dans la littérature spécialisée. Le modèle numérique est développé en prenant en considération, la géométrie, les matériaux, les conditions aux limites et les conditions (phasage) de chargement du modèle expérimental de référence.

Le choix des modèles à étudier qui consiste à essayer d'extraire les résultats des différentes sollicitations d'effet statique et dynamique sur la structure d'assise ferroviaire appliqueront une combinaison des charges roulante verticales et un effort d'acet horizontale du model de charge 71 selon l'Eurocode 1 (NFEN 1991-2).

Donc, il a été jugé convenable de faire une comparaison des résultats numériques qui permette de vérifier la précision du modèle numérique développé, c'est-à-dire :

- Comparer entre l'effet de la charge statique est surcharge dynamique sur l'instabilité.
- L'influence de l'effort d'acet sur le système, la voie ferre et le développement de l'instabilité par le phénomène de la fatigue.

Pour ce faire, on a fait un mémoire qui s'articule autour de cinq chapitres :

Après une introduction générale, commençant par une synthèse bibliographique dans le chapitre 2, où on va présenter une description succincte de la structure des voies ferroviaires et leurs constituants. Par la suite un rappel sur les problèmes de la dynamique des structures puis quelques caractéristiques techniques de la voie ferrée. On présentera également dans ce chapitre les différents efforts exercés sur la voie principalement les efforts verticaux, inclus le modèle de charge 71.

Le troisième chapitre, on commencera par présenter en détail notre modèle numérique développé qui est basé sur un modèle de référence (global) disponible dans la littérature spécialisée. Le modèle numérique est développé en prenant en considération, la géométrie, les matériaux, les conditions aux limites et les conditions (phasage) de chargement du modèle expérimental de référence.

Ensuite Le quatrième chapitre est consacré au développement du modèle numériques en utilisant le Plaxis, dans cette étape l'analyse est effectuée uniquement en 2D.

Notre analyse du comportement est basée principalement sur la combinaison de l'effort de lacet avec la variation des charges du modèle de charge 71 selon l'Eurocode 1 (NFEN 1991 2).

Il faut noter que : pour se conformer au modèle expérimental, le type de traverse considéré est du type bibloc

Le cinquième chapitre consacrée pour l'interprétation des résultats Le choix des modèles à étudier qui consiste à essayer d'extraire les résultats des différentes sollicitations sur la structure d'assise ferroviaire avant le chargement, et appliquer des charge roulante verticale combiner avec un effort d'acet sur la structure d'assise ferroviaire, ensuite comparer ces résultats. La comparaison des résultats numériques permette de vérifier du modèle numérique développé et ainsi le validé.

Finir par sixième chapitre qui présente une conclusion générale.

Plan du mémoire :

Ce mémoire est constitué de 5 chapitres distincts :

- **Chapitre I** : introduction générale
- **Chapitre II** : synthèse bibliographique
- **Chapitre III** : développement du model numérique
- **Chapitre IV** : calcul numérique
- **Chapitre V** : résultat et interprétation
- **Chapitre VII** : conclusion générale
- La bibliographie

**CHAPITRE II : SYNTHESE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

## CHAPITRE II : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

### 2.1 INTRODUCTION :

On désigne d'une façon générale sous le nom de chemins de fer : des voies munies de rails, sur lesquelles circulent des trains remorqués par des locomotives. Le chemin de fer comme un service public crée pour la satisfaction des besoins du public et des structures industrielles en matière de transport de masse. C'est un système de transport collectif guidé de personnes et de marchandises. Il constitue une alternative très importante aux autres modes de transport : la voiture, les camions, ce qui constitue une réponse à l'allègement de la congestion des grandes agglomérations. Le Chemin de fer sous toutes ces formes : Métro, TGV, Tram VF. Reste à nos jours un moyen de transport assez rentable économiquement et techniquement, est assez répandu à travers le monde.

### 2.2 VOIE FERROVIAIRE :

Depuis les premières lignes de chemin de fer au dix-neuvième siècle, la structure des voies ferrées de même que les moyens de locomotion ont bien évolué. Les différents composants des voies ferrées sont venus les uns après les autres au gré des tentatives empiriques. Actuellement, les voies ferrées sont de deux grands types : les voies ferrées sur dalles, et les voies ferrées ballastées.

Ce qui suit présente succinctement les voies ferrées ballastées, qui font d'ailleurs l'objet du présent travail. La première section présente quelques constituants de la voie ferrée ballastée et leurs caractéristiques techniques, géométriques et fonctionnelles <sup>(2)</sup>. Puis dans la seconde section, une étude de la traverse bi-bloc, phase de fabrication et de service sera évoquée.

Il existe plusieurs normes d'écartement des voies <sup>(2)</sup> :

- Voie normale (1,435m), c'est la norme la plus répandue dans le monde.
- Voie métrique (1m), souvent utilisée dans les chemins de fer de montagne.
- Voie étroite (écartement intérieur à 1m, souvent 0,60m) utilisée notamment dans les chemins de fer industriels.
- Voie large (1,520m; 1,600m; 1,668m).

## 2.3 CONSTITUANTS DE LA VOIE FERREE :

La voie ferrée est constituée par un assemblage d'éléments d'élasticités et amortissements variables, elle-même déformable, qui transmettent à la plateforme la charge des roues. La voie classique comporte deux rails dont l'inclinaison et l'écartement sont maintenus par des traverses reposant sur une épaisseur variable de ballast, en principe isolé de la plateforme par une sous couche (figure 2.1).

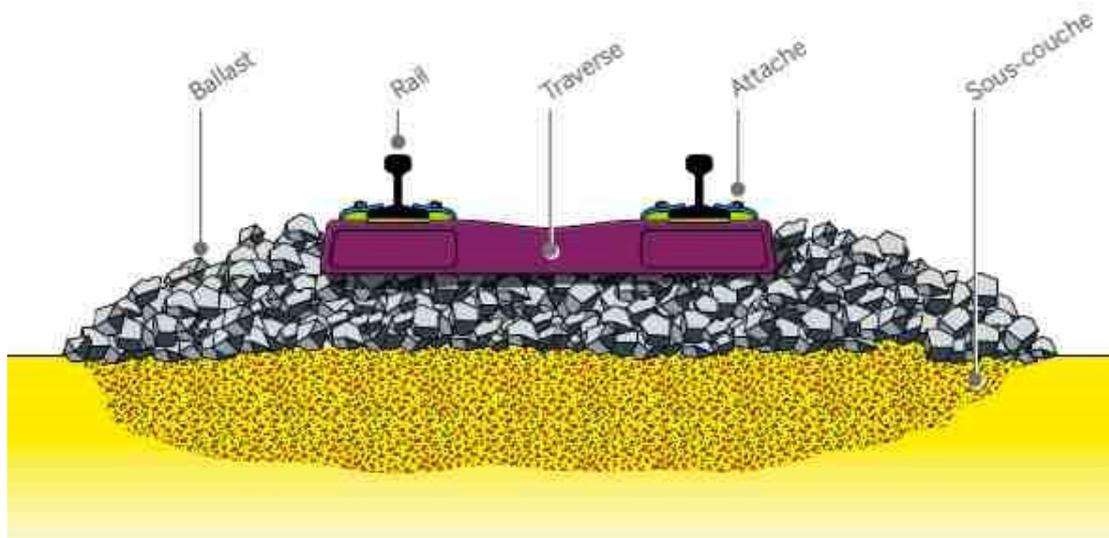


Figure 2.1 Constituants De La Voie Ferrée.

### 2.3.1 LE RAIL :

Le rail est le premier élément en contact entre le véhicule et la voie. Il se charge de transmettre et de répartir les forces du véhicule sur plusieurs traverses. Les caractéristiques du rail sont données par la géométrie du profil et le type de matériau. Le profil de la section est conçu pour avoir une bonne répartition des contraintes dans le rail. Pour les voies ferrées modernes, le rail à double champignon qui assure mieux le contact roue-rail est le plus utilisé. La figure 2.2 présente un exemple d'une section de rail standard U.I.C<sup>(3)</sup>. (dont le poids est de 60 kg/m)<sup>(4)</sup>. L'épaisseur de l'âme doit tenir compte des efforts tranchants et aussi des sollicitations au voisinage des trous d'éclissage. La largeur du patin décide la rigidité du rail dans le plan horizontal et détermine le taux de compression sur la traverse. D'autre part, l'acier du rail doit avoir les qualités pour assurer la résistance à l'abrasion, l'absence de fragilité, la soudabilité en vue de la confection des barres de grandes longueurs et avoir un prix acceptable.

La pose des rails se fait normalement avec des joints de dilatation, les rails de 18 ou 36m de long, coulissant librement dans les éclisses (pièces qui assurent la jonction et la continuité électrique de deux rails successifs), en plus il ya la technique des « barres longues » ou LRS (longs rails soudés), dans laquelle les coupons de rail de 80 m sont soudés en atelier en longueurs de 320 à 400m. Ces barres sont posées sur de très grandes longueurs, sans limite réelle, les soudures nécessaires étant réalisées sur place. Les contraintes de dilatation sont absorbées par le frottement des traverses sur le ballast. Cela suppose réunies certaines conditions de stabilité de la plate forme et de rayon de courbure minimum.

Le rail a souvent une fonction de sécurité en tant que conducteur électrique, il sert de circuit aux courants de signalisation, ce qui permet de mettre au rouge automatiquement un signal lorsqu'un véhicule court-circuite les deux rails.

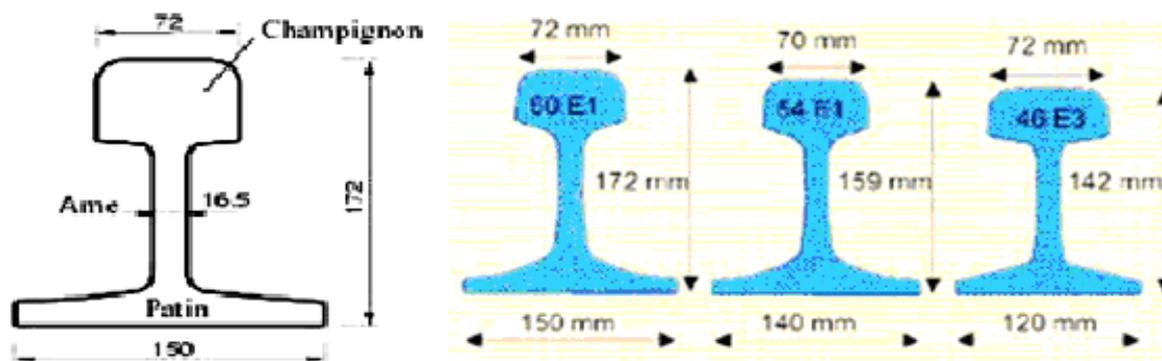


Figure 2.2 Le Rail profiles (Esveld, 2001) <sup>(4)</sup>.

### 2.3.2 LE SYSTEME D'ATTACHE :

C'est la partie qui transmet les charges entre le rail et les traverses. Plusieurs types et techniques d'attache, selon le type des traverses, sont utilisés toujours dans le but d'améliorer la fixation du rail sur les traverses et d'amortir la charge. L'attache la plus fréquente c'est l'attache élastique NABLA RNTN <sup>(5)</sup>.

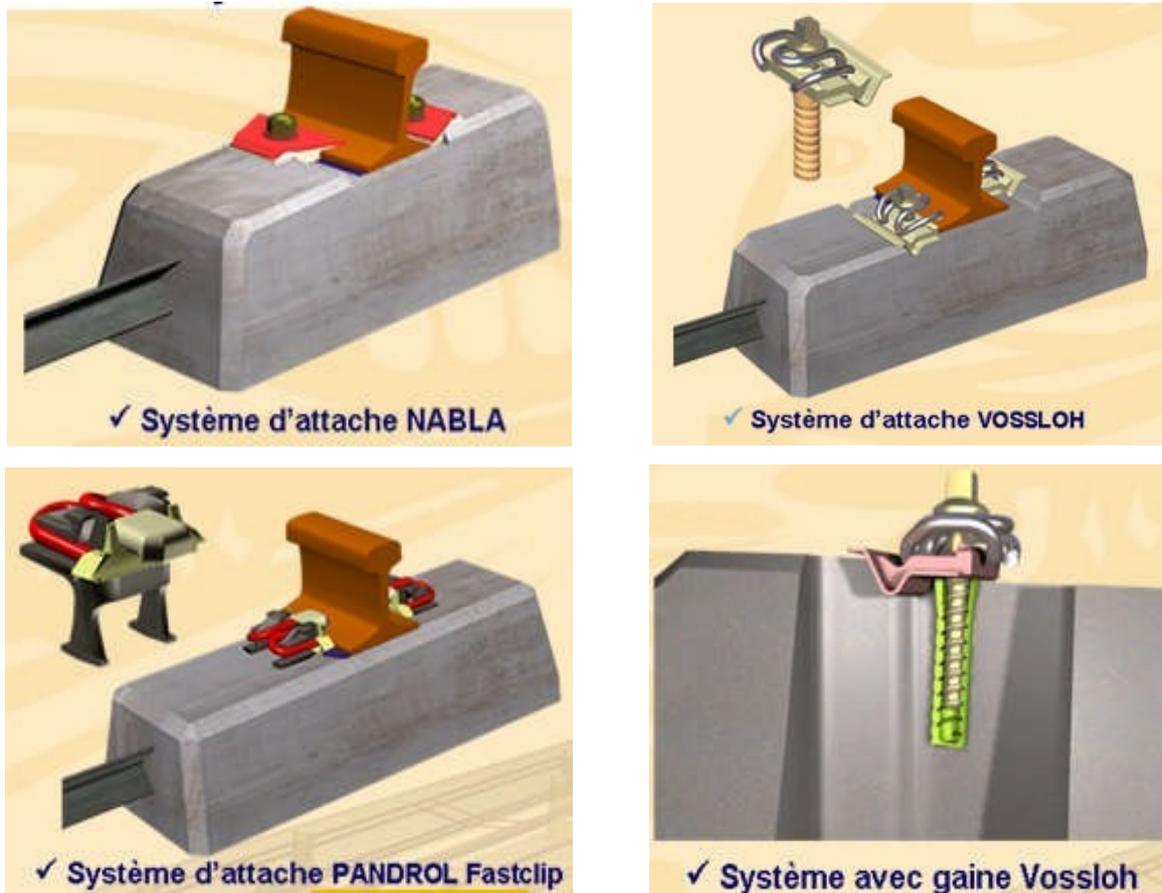
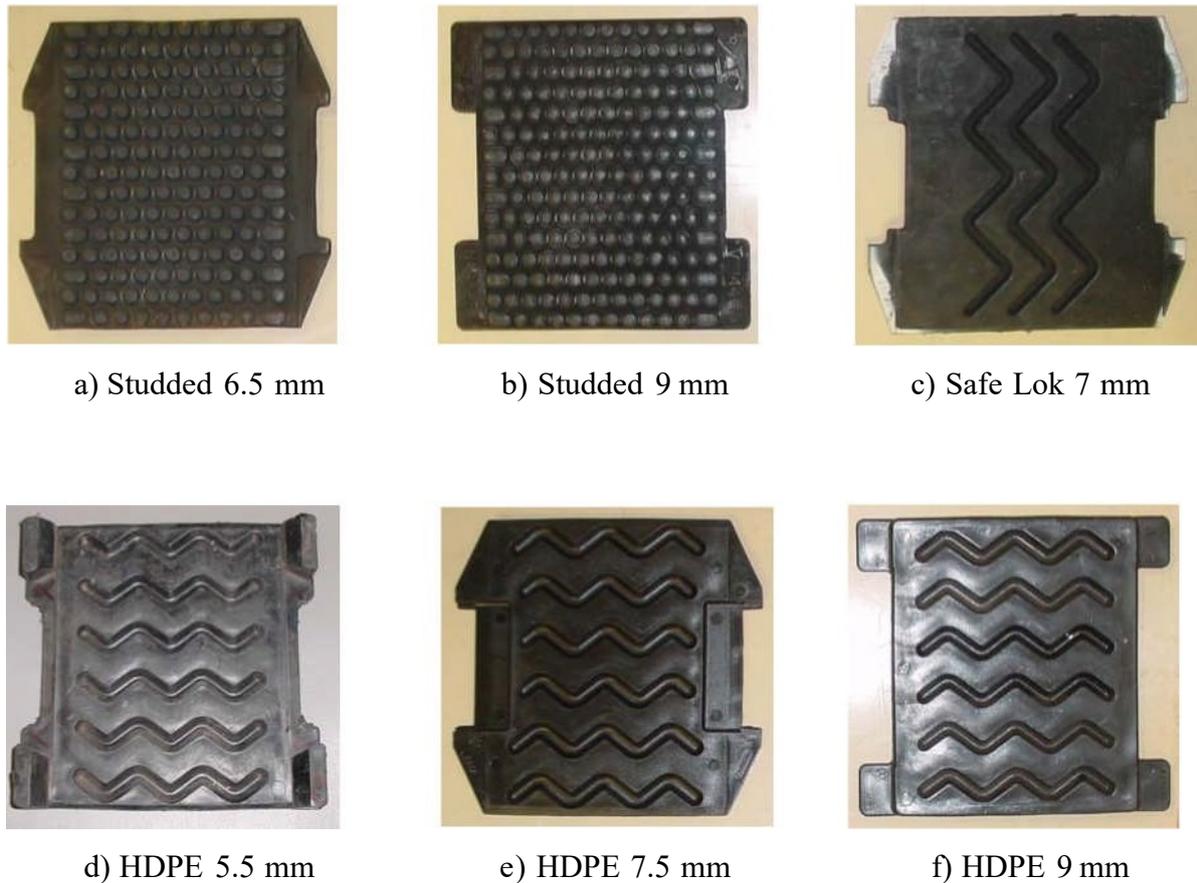


Figure 2.3 Différents Systèmes d'attaches et d'ancrages <sup>(5)</sup>.

### 2.3.3 LA SEMELLE :

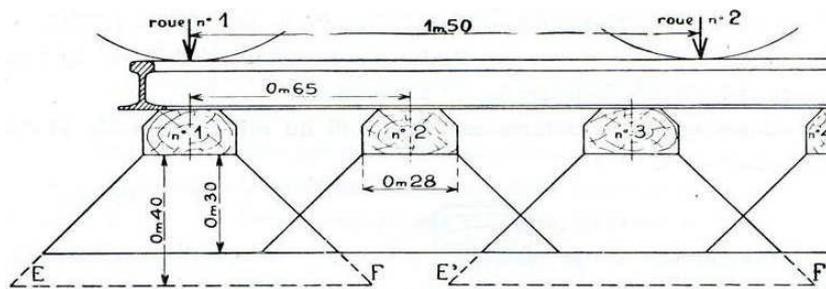
Généralement en élastomère (9 mm d'épaisseur), la semelle à une capacité d'amortissement importante qui peut réduire considérablement les charges exercées sur les traverses (surtout pour la partie en haute fréquence), sa rigidité statique (C) est de 0.3 à 2 MPa <sup>(5)</sup>.



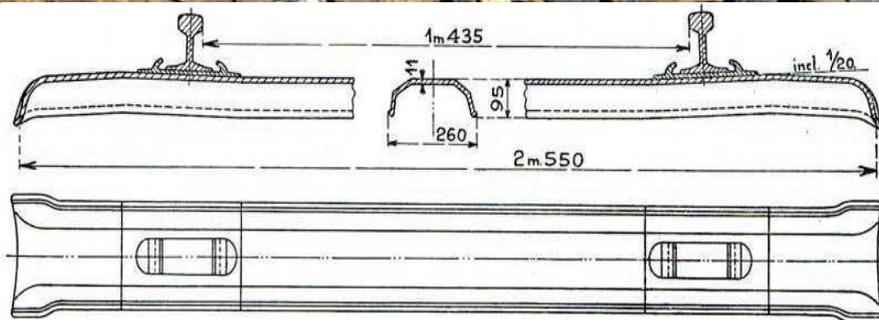
**Figure 2.4** Les Semelle en élastomère.

### 2.3.4 LES TRAVERSESES :

La traverse ferroviaire est une composante principale de l'infrastructure ferroviaire. La première traverse utilisée était en bois (comme le pin, chêne, l'hêtre, l'azobé) (figure 2.5), après elle a été remplacée par une autre en acier (figure 2.6) ; puis en béton armé, pour des raisons de coût, de performances et de durée de vie



**Figure 2.5** La traverse en bois.



**Figure 2.6** La traverse en acier.

Du point de vue structurel, on distingue deux types de traverses en béton armé : monobloc et bi-bloc <sup>(6)</sup>. Cette dernière (bi-bloc) est constituée de 2 blochets en béton armé reliés par une entretoise en acier qui travaille normalement en traction (figure 2.7), La transmission des efforts entre le rail et le ballast se fait par des traverses qui jouent des importants rôles :

- Transmission des charges du rail au ballast,
- Maintien de l'écartement des deux files de rails,
- la masse et la rigidité du blochet assurent la stabilité de la voie,

- Maintien de l'inclinaison au 1/20 du rail.

Mécaniquement, les traverses sont soumises aux charges transmises par le rail, en général excentrées du fait des efforts latéraux exercés par la locomotive sur la voie et de la réaction du ballast qui dépend beaucoup aux conditions d'appuis des traverses.

Les principaux avantages de la traverse bi-bloc sont <sup>(6)</sup>:

- La légèreté
- L'adaptation à tous les types de poses et de terrains ;La facilité de pose et d'entretien ;
- Sa durée de vie moyenne :
- 50 ans pour une traverse en béton ;25 ans pour une traverse en bois.

Autres caractéristiques :

- Nombre de traverses par kilomètre de voie :
- 1732 traverses en bois 1666 traverses en béton

Masse :

- 70 à 80 kg pour les traverses en bois.245 kg pour les traverses en béton.

Dimensions :

- Largeur : 0,22m traverse en bois et 0,29m traverse en béton
- Longueur : 2,60m traverse en bois et 2,40m traverse en béton
- Épaisseur : 0,13m traverse en bois et 0,22m traverse en béton

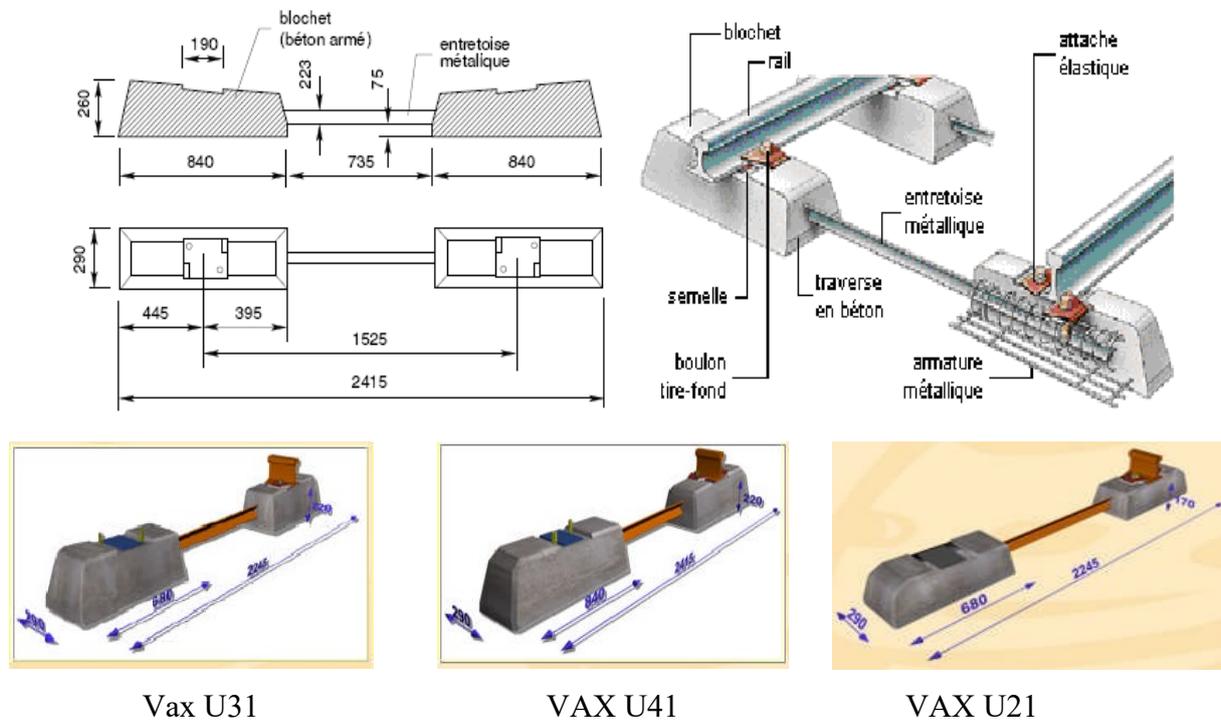


Figure 2.7 Les différents types de la Traverse Bi- Blocs <sup>(6)</sup>

### 2.3.5 LES COUCHES D'ASSISE :

Elles comprennent la couche de ballast, la sous couche et la plate forme (figure 2.8). Le dimensionnement des couches d'assise doit assurer la résistance à la fatigue du sol et doit mettre « hors gel » les sols sensibles.

#### 2.3.5.1 Couche de ballast :

Le ballast est un granulat de 25/50 mm provenant du concassage des roches extraites dans des carrières des pierres dures (granite, diorite, rhyolite, quartzite, grès) <sup>(7)</sup>. Il constitue un élément support de la voie et fait partie de la superstructure. Il est disposé en couches sous et autour des traverses. L'épaisseur de la couche de ballast sous les traverses est de 25 à 30 cm environ. Les fonctions du ballast sont les suivantes :

- Répartir sur la plate forme les charges concentrées qu'elle reçoit des traverses.
- Amortir une partie très importante de la vibration grâce à ses propriétés rhéologiques.
- Assurer, en raison de sa granulométrie, le drainage rapide de la voie.
- Permettre de rectifier rapidement le nivellement au moyen du bourrage et dressage mécanisé.

- Ancrage latéral (circulation en courbe) et longitudinal de la voie (accélération, freinage).

La qualité du ballast est définie dans la norme européenne “NF EN 13450”. Et doit répondre aux critères suivants :

- granulométrie et propreté qui assurent un bon drainage
- angularité pour la résistance au cisaillement
- insensibilité à l’eau et au gel
- homogénéité de la forme des grains, en évitant les formes allongées ou aplaties
- bonne résistance mécanique aux efforts

### **2.3.5.2 La sous couche :**

La sous-couche est une couche d'adaptation interposée entre le ballast et la plate-forme. Elle comprend, du haut vers le bas:

- **Couche sous- ballast** : en grave propre, bien graduée. Cette couche existe dans tous les cas, même sur les plates-formes les plus rocheuses, elle sert de couche d'égalisation et contribue à réduire la raideur de l'assise, Son épaisseur varie en fonction du trafic et de la nature des traverses.
- **Couche de fondation** : en grave propre, bien graduée. Cette couche permet la circulation des engins de chantier. Son épaisseur minimum est de 15 cm. Celle-ci n'est pas nécessaire sur les meilleurs sols.
- **Couche anti-contaminant**, en sable pour éviter la remontée de particules terreuses qui polluent.

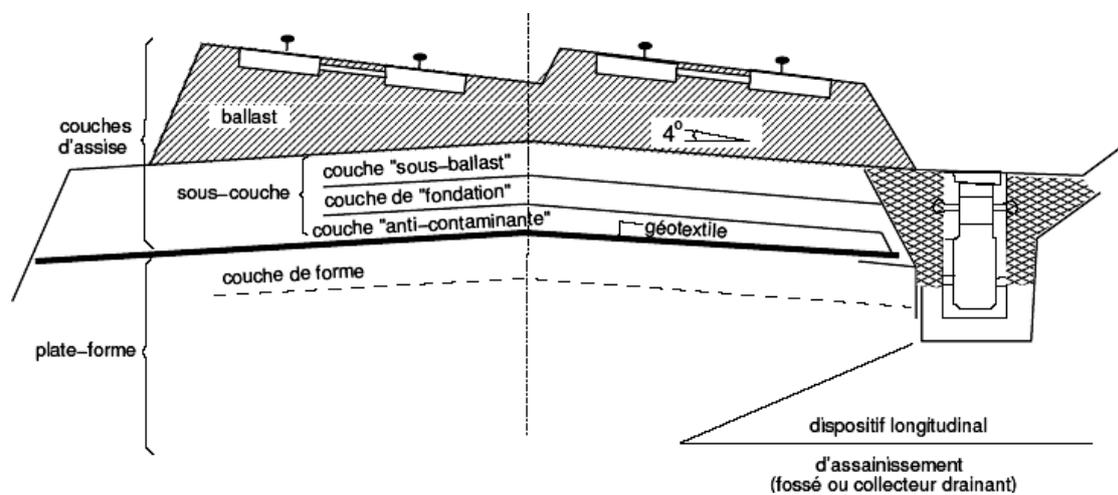
### **2.3.5.3 LA PLATE FORME :**

La plate-forme est la partie supérieure de l'ouvrage en terre supportant la Sous-couche. Elle est constituée de sol rapporté dans le cas d'un remblai ou du sol en place dans le cas d'un déblai. La qualité du sol de la plate-forme est un facteur prédominant pour les déformations.

La qualité de la plate-forme dépend de deux paramètres:

la nature géotechnique du sol, les conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales (pas d'engorgement d'eau dans le sol) [UIC94]. On distingue quatre classes de qualité QSi de sols :

- **QSo**: sols "impropres" à la réalisation d'une plate-forme correcte, on procède à la substitution du matériau sur une certaine épaisseur.
- **QS1** : sols "médiocres" à la réalisation mais acceptables tels quels.
- **QS2** : sols "moyens".
- **QS3** : "bons" sols.



**Figure 2.8.** Profil en travers schématisé des couches d'assise d'une voie en courbemet en Œuvre dans le cas d'une plate-forme argileuse d'après Alias <sup>(7)</sup>.

## 2.4 RAPPEL SUR LES PROBLEMES DE DYNAMIQUE DES STRUCTURES :

### 2.4.1 PROBLEME DE CHARGE MOBILE :

On s'intéresse au problème où la charge se déplace avec une vitesse constante  $v$  sur une ligne droite dans un domaine (ou sur sa surface libre). La charge est soit constante, soit variable en fonction du temps (harmonique). On peut définir la forme générale d'une charge mobile sur une ligne  $e$  comme suit :

$$f(x, t) = f_0(t) \delta(x - vt) \dots \dots \dots (2.1)$$

Où  $f_0(t)$  est le vecteur d'amplitude qui ne dépend que du temps,  $\delta$  est la fonction de Dirac.

### 2.4.2 REPERE MOBILE :

Dans les études des problèmes de charge mobile avec une vitesse constante, plusieurs auteurs (Fryba <sup>(8)</sup>, Eringen et Suhubi <sup>(9)</sup>, etc.) préfèrent passer dans un repère mobile qui s'attache à la position de la charge. Ce fait est réalisé par un changement de variable par exemple, si la charge se déplace suivant l'axe (Ox) avec une vitesse ( $v$ ), on a le changement de variable suivant :

$$x^* = x - vt; \quad y^* = y; \quad z^* = z \dots \quad (2.2)$$

Le problème est réécrit dans ce nouveau repère avec les variables  $x^*$ ,  $y^*$ ,  $z^*$ . Dans certains cas, par exemple si la charge est constante ou harmonique, le problème se simplifie beaucoup dans le repère mobile (Figure 2.1).

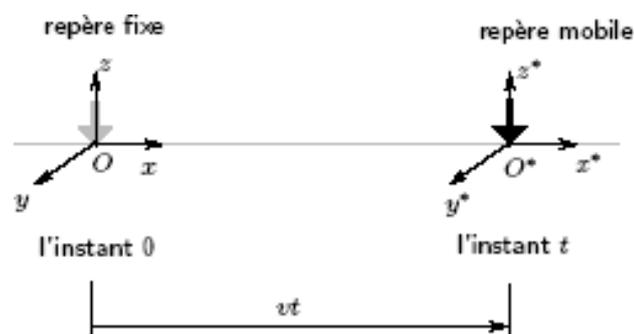


Figure 2.9 Repère fixe et repère mobile.

### 2.4.3 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA VOIE :

On caractérise l'élasticité de la voie sous charge à l'aide d'un certain nombre de paramètres <sup>(7)</sup>

**Module de voie K :** .....  $K = r/z ..$  (2.3)

$z$  : l'enfoncement correspondant à une charge  $r$  uniformément répartie sur un rail.

**Coefficient d'élasticité de traverse  $\rho$  :** .....  $\rho = R/z ..$  (2.4)

$z$  : l'enfoncement correspondant à la réaction verticale  $R$  d'une traverse par file de rail.

En désignant par  $l$  la distance entre deux traverses consécutives,  $\rho$  peut être reliée à  $K$  par la relation suivante :

$$\rho = \frac{R}{z} = R \frac{K}{r} = lr \frac{K}{r} = kl \dots \quad (2.5)$$

Cette relation n'est qu'approximative car elle ne tient pas compte de l'action des traverses voisines.

### Coefficient de ballast C :

$$c = \frac{p}{s} = \frac{R}{zs} = \frac{p}{z} \dots \quad (2.6)$$

$p$  : la pression moyenne exercée sur la surface  $S$  (d'appui de la traverse).

### Coefficient d'élasticité de la voie $\rho_n$ :

En fait la voie est constituée par une chaîne de matériaux ayant chacune sa propre élasticité (plateforme, sous-couche en matériaux granulaires, ballast, traverse, semelle, rail).

Si  $\rho_n$  est le coefficient d'élasticité d'un de ces éléments, on a par définition :

$$\rho_n = \frac{R}{z_n} \quad \text{Donc} \quad z = \sum z_n = \sum \frac{R}{\rho_n} = R \sum \frac{1}{\rho_n} \quad \text{D'où} \quad \frac{1}{\rho} = \sum \frac{1}{\rho_n} \dots \quad (2.7)$$

Voici quelques valeurs des coefficients  $\rho$  (Tableau 2.1):

• âme du rail	de 5000 A 10000 x 10 <sup>4</sup> N/mm
• traverses en bois	de 50 À 80 x 10 <sup>4</sup> N/mm
• traverses en béton	de 1200 À 1500 x 10 <sup>4</sup> N/mm
• ballast bourré	de 10 À 30 x 10 <sup>4</sup> N/mm
• semelle caoutchouc	de 10 À 20 x 10 <sup>4</sup> N/mm

Remarque : L'élasticité du ballast augmente avec l'épaisseur, mais diminue avec l'âge et la pollution.

## 2.5 Actions dues au trafic Tram-Train

Les véhicules exercent sur la voie des efforts dans trois directions : longitudinale, transversale et verticale.

Dans le cadre des ouvrages d'art non courants étudiés, les actions dues aux circulations de tram-train à considérer sont :

- Les charges verticales
- Les effets dynamiques
- Les forces d'accélération et de freinage
- L'effort de lacet
- Les forces centrifuges

En outre, il convient de prendre aussi en compte les charges de superstructures. En effet, celles-ci répondent aux spécificités liées à la circulation du trafic tram-train. (NF EN 1991-2)

### **2.5.1 Les charges verticales :**

Ils sont beaucoup plus importants, sont représentés par des charges statiques (poids propres des véhicules) et des surcharges dynamiques dues à l'interaction roue - rail.

#### **2.5.1.1 La charge statique :**

Est distribuée sur les essieux du véhicule. En fonction des poids des rails et de l'espacement des traverses (Figure 2.2), U.I.C a classé les voies en trois catégories

- A=16 t par essieu
- B=18 t par essieu
- C=17 t par essieu

Ces trois catégories sont elles mêmes décomposées chacune en trois sous groupes d'indice 2, 3, 4 caractérisés par le rapport entre le poids total du véhicule et la longueur mesurée entre ses deux extrémités :

- Sous-catégorie 2 : 6,4 t/m
- Sous-catégorie 3 : 7,2 t/m
- Sous-catégorie 4 : 8,0 t/m

L'ensemble des lignes de la S.N.C.F est classé en catégorie C4 (C=20 t ; 8 t/m).

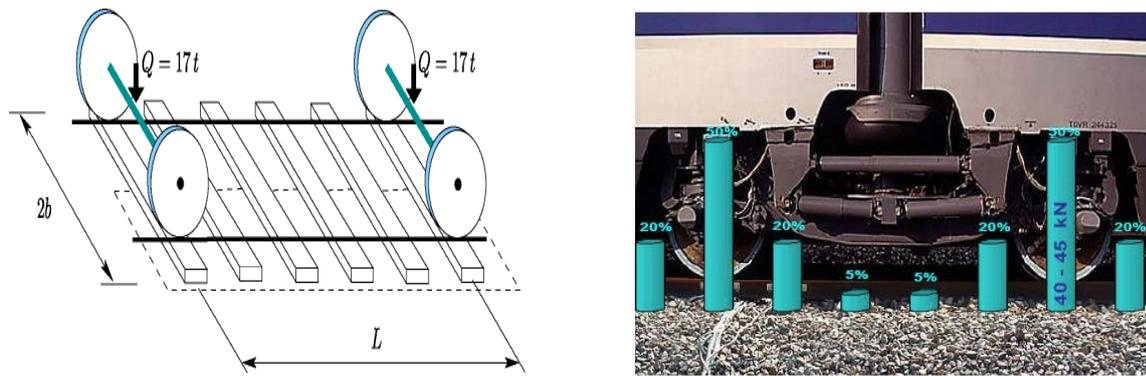


Figure 2.10 Répartition De Charge Statique Sous Le Bogie De Train.

### 2.5.2 Les surcharges Dynamiques :

sont des signaux aléatoires dont la dispersion croit avec la vitesse et des défauts des roues et des rails (elle peut atteindre 0.5 fois de la charge statique). On distingue deux types de défauts:

- **défauts locaux au contact roue- rail** : ces défauts sont représentés par l'existence des joints, d'empreintes ou d'ondulations sur la surface du rail ou bien de modifications de la forme des roues.
- **défaut global de la voie** : c'est le défaut vertical du profil du rail avec la longueur, ce type de défaut cause des vibrations en basses fréquences.

Des essais à réaliser consistent à simuler le passage d'un train sur trois traverses en appliquant un signal sur chaque traverse avec un certain décalage en temps reproduisant le passage d'un bogie (Figure 2.3). Comme le train comporte plusieurs bogies, il faut appliquer successivement plusieurs signaux, chaque cycle correspond au passage d'un bogie.

Le signal appliqué a la forme de la lettre "M". Les deux pics du "M" représentent les essieux du bogie (figure 2.11)

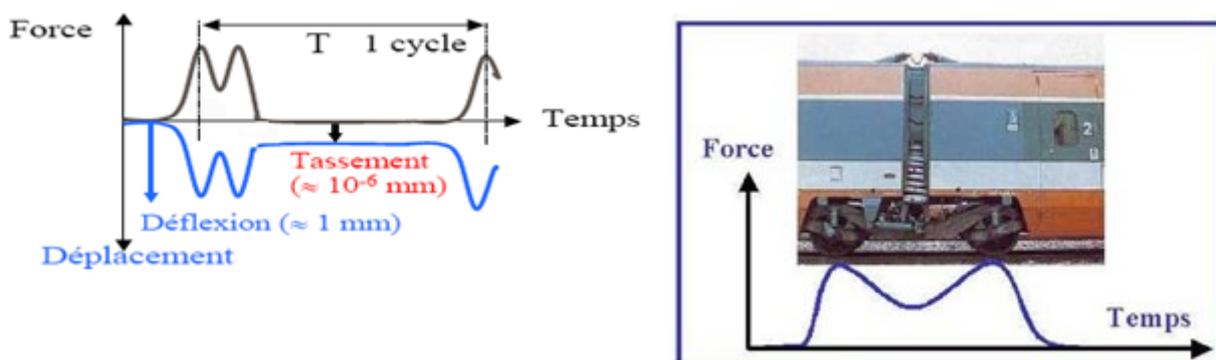


Figure 2.11 La Force De Forme "M"

D'après les calculs de SAUVAGE<sup>(10)</sup> et leur adaptation par Alaoui et Naciri <sup>(11)</sup>, sous forme d'une relation analytique continue, on peut représenter la force verticale exercée par le rail sur un blochet lors du passage d'un bogie par la formule analytique suivante :

Où :

**Q** est la charge par essieu (N) qui vaut 20 tonnes, « V » est la vitesse du train (m.s-1)

**t** est le temps (s), « d » est la distance entre les traverses (d = 0,6 m)

**a** est une distance critique (a= 3m qui est équivalent à 5d), « L » est la distance entre les deux essieux d'un bogie (L = 3m)

« XY » sont des variables sans dimensions comprises entre (0 et 1) qui dépendent du module d'Young « Es » du sol, sont présentées dans le tableau 2.2 <sup>(12)</sup>

Es (MPa)	10	30	60	80	100
X	0.82	0.715	0.64	0.625	0.61
Y	0.23	0.32	0.38	0.41	0.43

**Tableau 2.2.** Valeurs des « X et Y »

Supposons que la charge est répartie uniformément sur les traverses dont la largeur est  $2b = 2,415$  m, la charge en espace à chaque instant « t » peut être représentée par :

$$F(x_1, x_2, t) = \frac{QY}{2b} \left[ X \left( \frac{vt - x_1 - a}{d} \right)^2 + X \left( \frac{vt - x_1 - a - L}{d} \right)^2 \right] H(b - |x_2|) \dots \dots \dots (2.9)$$

Où  $H(\dots)$  est la fonction de Heaviside.

Cette charge dans le repère mobile s'écrit :

$$F(X_1, X_2) = \frac{QY}{2b} \left[ X \left( \frac{X_1 + \frac{L}{2}}{d} \right)^2 + X \left( \frac{X_1 - \frac{L}{2}}{d} \right)^2 \right] H(b - |X_2|) \dots \dots \dots (2.10)$$

La figure (2.12) montre les signaux de force en temps

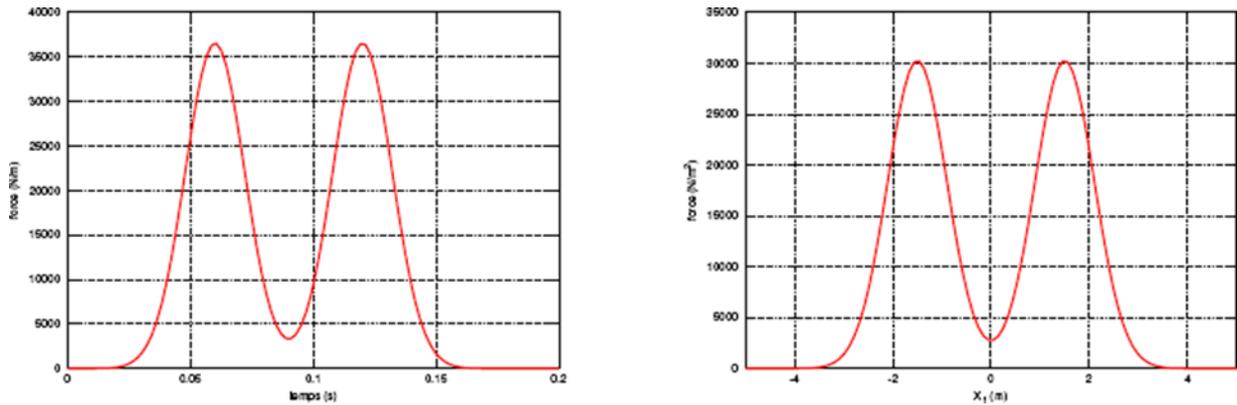


Figure 2.12. Signal de force en M (Passage d'un bogie sur un blochet).

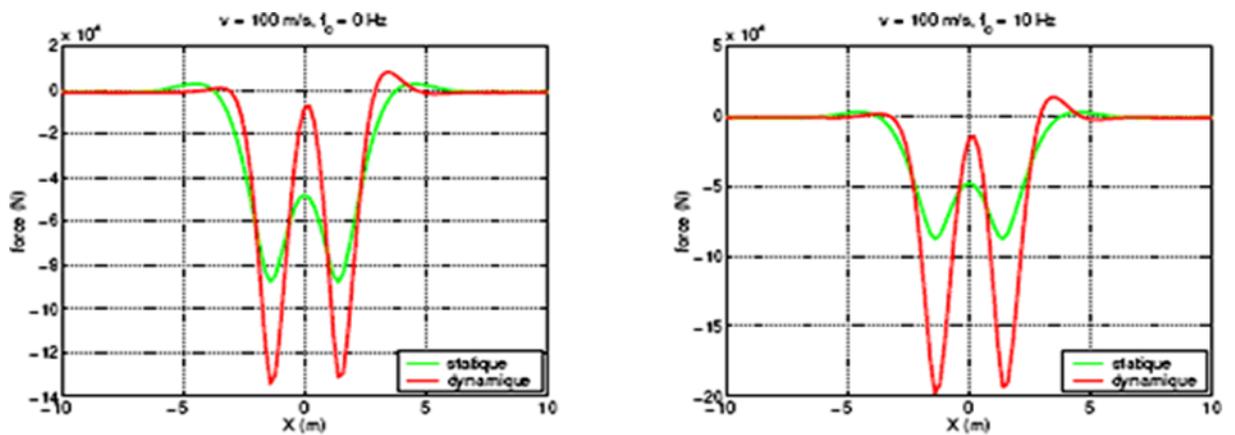


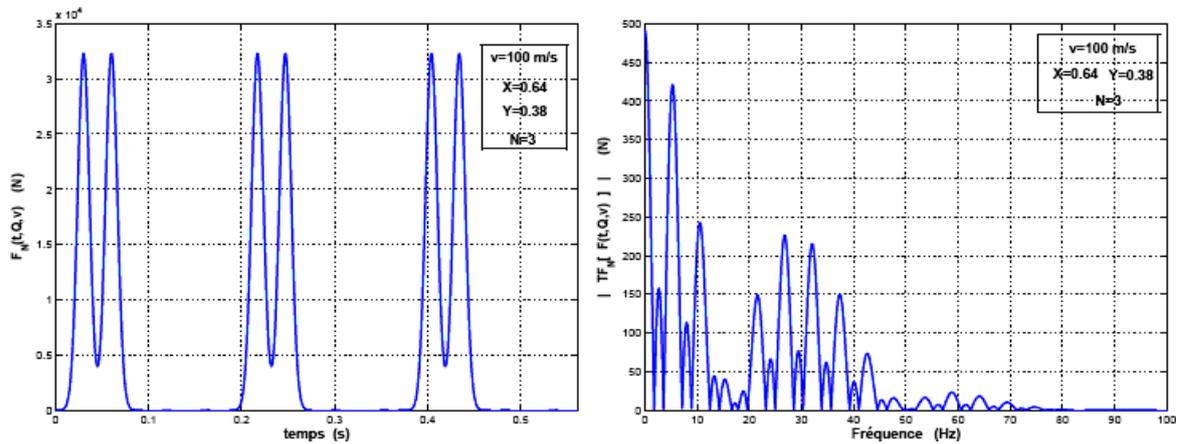
Figure 2.13 Force appliquée sur le ballast.

La charge exercée sur un blochet lors du passage de "N" bogies peut être écrite sous la forme :

$$F(t, Q, v) = \sum_{n=0}^{N-1} F(t, Q, v, n) = \frac{QY}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \left[ X \left( \frac{vt - nd_b - a}{d} \right)^2 + X \left( \frac{vt - nd_b - a - L}{d} \right)^2 \right]; t \in [0, Nd_b/v] \dots (2.11)$$

Où ( $db=18,7$  m) représente la distance entre deux bogies consécutifs à l'échelle réelle.

La figure 2.14, montre la charge exercée sur un blochet lors du passage des trois bogies et sa transformée de Fourier pour  $v = 100$  m/s,  $X = 0,64$  et  $Y = 0,38$ .



**Figure 2.14.** Passage des trois bogies sur un blochet.

Ce type de signal a été utilisé par Guérin(1996) <sup>(13)</sup>, Bodin (2000) <sup>(14)</sup> et Al-Shaer. Il contient un spectre de fréquences assez large. La complexité de ce type de signal peut causer diverses anomalies en particulier quand le matériau granulaire se comporte de façon non linéaire.

Dans le cadre des autres études expérimentales, on n'a pas essayé de reproduire ce type de chargement, mais on a plutôt opté pour un signal sinusoïdal qui s'écrit sous la forme :

$$F(t) = F_0 + \Delta F(1 + \sin 2\pi ft); \dots \dots \dots (2.12)$$

Où  $F_0 = 0,5 \text{ kN}$  et  $\Delta F$  varie de  $0,5$  à  $3 \text{ kN}$  avec un incrément de  $0,5 \text{ kN}$ ,  $f$  varie de  $10$  à  $65 \text{ Hz}$ .

On peut avoir une autre forme harmonique  $f(t) = e^{i\omega_0 t}$ .

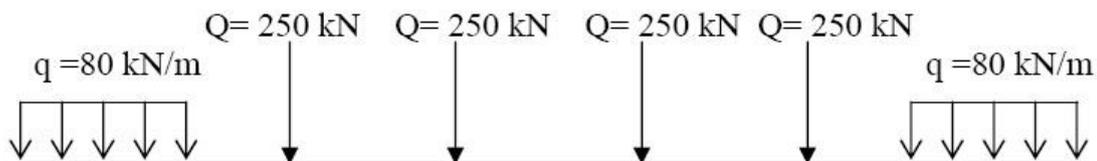
Avec cette forme pour une valeur non nulle de  $\omega_0$ , la charge mobile oscille avec une fréquence constant  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ .

Les intervalles de fréquences qui peuvent être induits par un train en mouvement sont :

- masse suspendue :  $0 - 20 \text{ Hz}$
- masse non suspendue :  $20 - 125 \text{ Hz}$
- Ondulation de la voie, soudage, roues plates:  $200 - 2000 \text{ Hz}$

### 2.5.3 Le modèle de charge 71

Le modèle de charge 71 représente l'effet statique dû à un trafic ferroviaire standard. Il ne décrit pas de charges réelles. Il a été sélectionné afin que ses effets, les majorations dynamiques étant prises en compte séparément, représentent ceux du trafic réel. La disposition et les valeurs caractéristiques des charges verticales doivent être les suivantes :

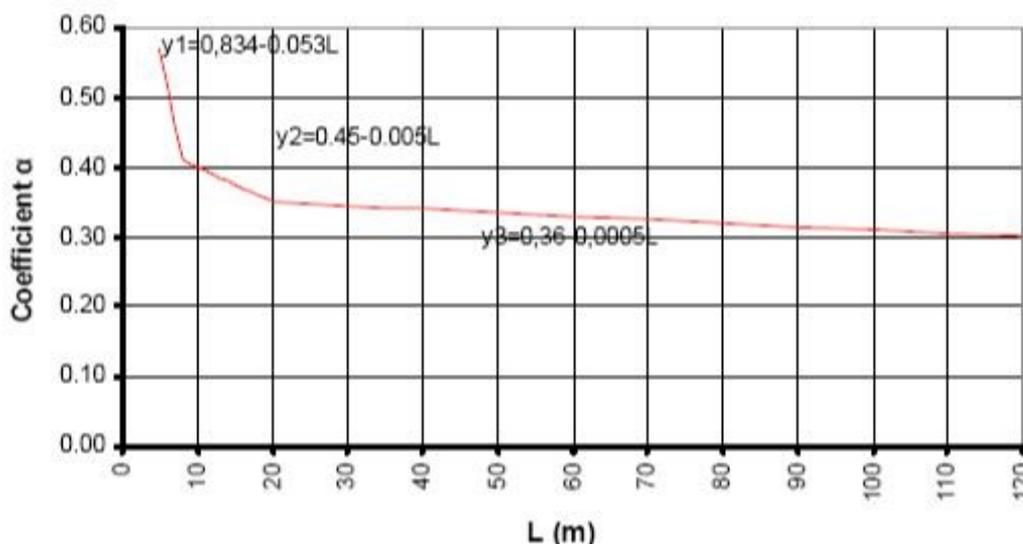


**Figure 2.15:** Modèle de charges 71

La charge uniformément répartie doit être appliquée selon les lignes d'influence.

L'Eurocode propose de multiplier ces valeurs caractéristiques par un coefficient  $\alpha$  sur les lignes où un trafic ferroviaire plus lourd ou plus léger que le trafic normal circule. Le coefficient  $\alpha$  prend des valeurs comprises entre 0,75 et 1,46. Il doit également être appliqué aux forces centrifuges, l'effort de lacet si  $\alpha > 1$  et les forces d'accélération et de freinage.

Parmi l'ensemble des modèles présentés dans les Eurocodes, l'IN3128 propose d'utiliser exclusivement, pour les Tram-Train sur voies dédiées, le modèle de charge 71 affecté d'un coefficient  $\alpha \leq 1$ . Il est suggéré de choisir le coefficient  $\alpha$  en fonction de la portée conformément à la loi suivante :



**Figure 2.16 :** Coefficient  $\alpha$  proposé par l'IN3128

$L$  = portée pour les travées isostatiques et  $L = \min(L_1, L_2, \dots, L_n)$  pour les ponts continus de portées  $L_1, L_2, \dots, L_n$ .

Le modèle de charge UIC affecté du coefficient  $\alpha$  "couvre" les effets de trams-trains à 125 kN par essieu en charge exceptionnelle (3 modèles de rame) pouvant circuler dans les configurations suivantes :

- Convoi constitué d'une seule rame
- Convoi à 2 rames
- 2 Convois à une rame distants de 30 m
- de convois de 4 rames vides (70 kN par essieu)
- de charges routières réparties du type A(l) et Bc(du titre II du fascicule 61) pour un pont de classe 3 à une seule voie chargée de 3,6 m de large
- d'un train de maintenance occasionnel prévu pour le meulage des rails, circulant à faible vitesse et de 180 kN/essieu

## 2.5.4 LES EFFORTS LONGITUDINAUX :

Sont peu importants et ne posent d'éventuels problèmes que sur certains ouvrages d'art à fixation directe.

### 2.5.4.1 Les forces d'accélération et de freinage

Les forces d'accélération et de freinage agissent au niveau supérieur des rails, dans le sens longitudinal de la voie. Elles doivent être considérées comme des charges linéaires uniformes sur la longueur d'influence  $L_{a,b}$  de leurs effets pour l'élément structurel considéré. La direction des forces d'accélération et de freinage doit tenir compte des sens des déplacements autorisés sur chaque voie.

Ces forces doivent être combinées avec les charges verticales correspondantes.

D'après l'Eurocode (trains à vitesse  $> 200\text{km/h}$ ), les valeurs caractéristiques des forces d'accélération et de freinage pour le modèle de charge 71 valent :

$$\text{Force d'accélération : } Q_{\text{lack}} = 33 \text{ [kN/m]} L_{a,b} \text{ [m]} \leq 1000 \text{ [kN]}$$

$$\text{Force de freinage : } Q_{\text{lbk}} = 20 \text{ [kN/m]} L_{a,b} \text{ [m]} \leq 6000 \text{ [kN]}$$

Ces valeurs ne doivent être multipliées que par le coefficient  $\alpha$ .

## 2.5.5 LES EFFORTS TRANSVERSAUX (LATERAUX) :

Sont moins importants, mais en même temps le ballast est beaucoup moins rigide dans la direction latérale.

### **2.5.5.1 L'effort de lacet :**

L'effort de lacet doit être considéré comme une force concentrée agissant horizontalement au niveau supérieur des rails et perpendiculairement à l'axe de la voie. Il doit être appliqué aussi bien dans le cas des voies en alignement que dans celui des voies en courbe. La valeur caractéristique de l'effort de lacet doit être prise égale à  $Q_{sk} = 100$  kN et elle ne doit être multipliée que par le coefficient  $\alpha$  si celui est supérieur à 1. L'effort de lacet doit toujours être combiné avec une charge verticale de trafic.

Aucune modification par rapport aux valeurs données par les Eurocodes ne convient dans ce cas

Ce effort peuvent être causés par le phénomènes suivants :

- Le mouvement de lacet dans la voie dans la position statique du rail, chaque roue repose sur le sommet du rail. De part et d'autre de cette position médiane, dans un mouvement de lacet, l'essieu peut occuper diverses positions limitées par le jeu provenant des tolérances de construction et d'entretien de l'essieu et de la voie.
- La position faiblement incliner des rails aux sense de l'axe de la voie

### **2.5.5.2 Les forces centrifuges :**

la force centrifuge et le dévers de la voie doivent être pris en compte. Il convient d'appliquer les forces centrifuges comme agissant horizontalement vers l'extérieur, à une hauteur de 1,80 m au-dessus du plan de roulement et il faut les combiner avec la charge verticale de trafic.

Ce effort peuvent être causés par le phénomènes suivants :

- Le mouvement en courbe : quand le train circule sur les rails en courbe avec une certaine vitesse, une force centrifuge apparaît et s'applique au véhicule. Cette force centrifuge provoque des efforts latéraux sur la voie.

## **2.6 MODELES GLOBAUX DE VOIE :**

Deux modèles globaux de voie sont construits en combinant les hypothèses des composants : véhicules, rail, semelles, traverses, ballast, sous-couches et le sol.

### 2.6.1 Modèle Unidimensionnel (1D) :

L'infrastructure de la voie est représentée par un système de masses ressorts amortisseurs, et décomposée en deux types :

- **Le modèle simple A** : représente une voie posée sur une fondation élastique. Il est modélisé par un système de poutre- ressort- amortisseur.
- **Le modèle complexe B** : représente la structure des voies ballastées. Il est modélisé par le couplage entre une poutre et un système multicouche de masses- ressorts- amortisseurs.

### 2.6.2 Modèle Tridimensionnel (3D) :

Les constituants de la voie sont représentés par des éléments solides, et décomposés en deux types :

- **Le modèle simple C** : Il ne représente pas précisément la structure de la voie, mais il permet de trouver les éléments privilégiés qui influencent la réponse dynamique du système comme la vitesse critique ou la fréquence critique.

Quelques exemples de modèle simple peuvent être cités : Une poutre sur un demi-espace soumise à des charges mobiles et un massif multi couches soumis à des charges mobiles.

- **Un modèle complexe D** : Il représente précisément la structure de la voie. Il doit tenir compte de la non linéarité dans le ballast, les sous couches et le sol. De plus une loi de comportement bien adaptée doit être introduite pour définir le modèle continu du ballast.

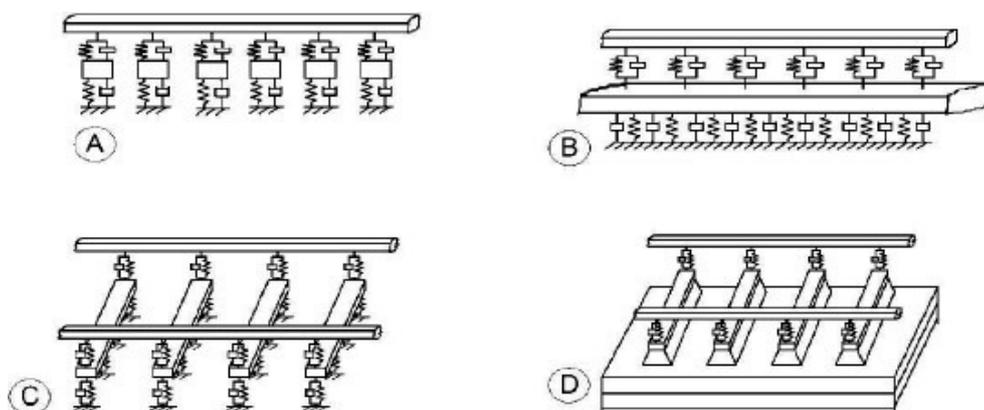


Figure 2.17 Différents modèles de voie disponibles

## 2.7 METHODES DE RESOLUTION

Concernant les méthodes de calculs, une seule méthode est utilisée dans notre étude :

### 2.7.1 METHODE DES ELEMENTS FINIS :

C'est une méthode de discrétisation des milieux continus qui permet une résolution par un calcul numérique. Elle est particulièrement indiquée pour les géométries complexes. Malheureusement, les calculs sont généralement lourds et longs, et très dépendants du nombre de degrés de liberté (ddl). Dans un cas élastique (linéaire ou non), l'équation dynamique en éléments finis est établie en discrétisant la formulation variationnelle de Galerkin. Cela donne le système suivant :

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = F(t) \dots \dots \dots (2.14)$$

$$U(t=0) = U_0; \dot{U}(t=0) = V_0 \dots \dots \dots (2.15)$$

Où M : est la matrice des masse, C : la matrice d'amortissement, K : la matrice de rigidité,  $\ddot{U}$  : l'accélération,  $\dot{U}$  : la vitesse et U : le déplacement.

Dans les cas non-linéaires, plusieurs difficultés surviennent : d'une part la taille du maillage (et donc le nombre de ddl) doit être suffisamment grande pour permettre d'atteindre la convergence de la solution ; d'autre part, les non- linéarités réclament en général des zones finement maillées; enfin le pas de temps doit également être suffisamment petit pour assurer la stabilité.

Le calcul des structures soumises aux charges mobiles par la méthode des éléments finis a été le sujet de plusieurs recherches depuis une dizaine d'années. Il ya deux méthodes qui sont le plus souvent utilisés :

#### 2.7.1.1 Calcul dans le repère fixe avec une source mobile :

La position de la force dans ce cas change à chaque pas de temps.

#### 2.7.1.2 Calcul dans le repère mobile avec source fixe :

Dans le but de diminuer la taille du domaine de calcul qui doit être très grande pour une charge mobile, Actuellement, des programmes de calcul extrêmement puissant, tels PLAXIS ANSYS, ADINA et bien d'autres, permettent de modéliser précisément le comportement des structures complexes.

## 2.8 QUELQUES ETUDES EXISTANTES :

On peut citer quelques modèles existants pour le dimensionnement des voies ferrées. Balsan <sup>(15)</sup> a réalisé une analyse en 3D par méthode des éléments finis du comportement de la structure d'assise dans les essais de Vienn-Asernal et de Derby.

Sauvage <sup>(16)</sup> et ensuite Proflidis <sup>(17)</sup> ont développé en utilisant le code Rosalie du LCPC des modèles assez complexes (rail, traverses, blochets, semelles) pour étudier le comportement des voies soumises à des efforts verticaux et statiques.

Un autre modèle, appelé modèle RB3D a été développé par le CERAM (Alaoui et Naciri (1995) <sup>(11)</sup>, Guérin <sup>(13)</sup>, il permet d'évaluer les évolutions des défauts de voie à partir de la charge des essieux (avec la surcharge dynamique dépendante de la vitesse).

Récemment Bodin a étendu ce modèle pour obtenir le modèle RB3L qui permet de considérer aussi l'influence des efforts latéraux <sup>(18)</sup>

Il n'existe encore que très peu d'études dynamiques pour le dimensionnement des voies ballastées et la traverse bi-bloc.

Aubry et al <sup>(19)</sup>, ont calculé en utilisant le logiciel MISS3D (qui est développé à l'Ecole Centrale de Paris) une structure de voie où la couche de ballast est considérée comme un matériau élastoplastique.

Nguyen <sup>(13)</sup> présente dans sa thèse une étude plus vaste de la modélisation dynamique des voies ferrées.

## **CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE**

## CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

### 3.1 INTRODUCTION :

La recherche en mécanique des voies ferrées est toujours réalisée avec deux approches parallèles l'expérience et la simulation. Pour la simulation numérique, la première tâche est de modéliser la structure et aussi l'excitation, selon le problème auquel on s'intéresse, Des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années, tant dans le domaine des performances pures que dans celui de l'exploitation.

Ces progrès ont été rendus possibles par le développement des méthodes de Dimensionnement (évolution considérable des puissances de calcul et l'introduction de la méthode des éléments finis) et l'amélioration progressive des connaissances sur les comportements mécaniques réels des matériaux.

Cela nous a permis la mise en œuvre un modèle volumiques simulant le comportement de la structure d'assise ferroviaire, les composantes seront modélisées de façon plus ou moins détaillées, On va présenter brièvement ci-dessous le modèles qui fait l'objet de notre étude.

### 3.2 Modélisation de la structure par Plaxis :

#### 3.2.1 Présentation du Plaxis :

##### 3.2.1.1 Définition :

PLAXIS est un logiciel des éléments finis en deux et en trois dimensions de géotechnique, développé par la société néerlandaise éponyme PLAXIS. Ce logiciel fut développé en premier lieu dans les années 1970 afin de pouvoir analyser le cas du barrage d'Osterschelde en Allemagne. Actuellement, PLAXIS 2D et 3D version 10.0 est la dernière version. Il permet de résoudre deux types de problèmes : Ceux qui sont axisymétriques (d'où provient le nom PLAXIS pour Plasticité et Axisymétrique) et ceux qui sont répondants aux hypothèses de déformations planes. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc).

PLAXIS offre une large gamme de modèles décrivant le comportement des matériaux (11 en tout) et permet également à l'utilisateur de créer et de définir son propre modèle. Parmi ceux-ci, des modèles linéaires et non-linéaires ainsi que dépendants du temps sont proposés. Il est donc possible de procéder à l'analyse statique et dynamique. Les modèles prennent également

en compte l'écoulement de l'eau à travers les sols modélisés ainsi que la génération de pressions inertielles offrant la possibilité d'effectuer des calculs en contraintes totales ou effectives, mais aussi de donner au sol des caractéristiques telles que drainé, non-drainé et non poreux. Dans notre situation, nous utilisons le modèle de Mohr-Coulomb. <sup>(15)</sup>

### 3.2.1.2 modèle de mohr-coulomb :

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vue les résultats obtenus dans les calculs. Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan \phi + c$$

Où :  $\sigma_n$  et  $\tau$  sont respectivement les contraintes normales et tangentielles de cisaillement, et  $c$  et  $\phi$  respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau.

Ce modèle comporte cinq paramètres :

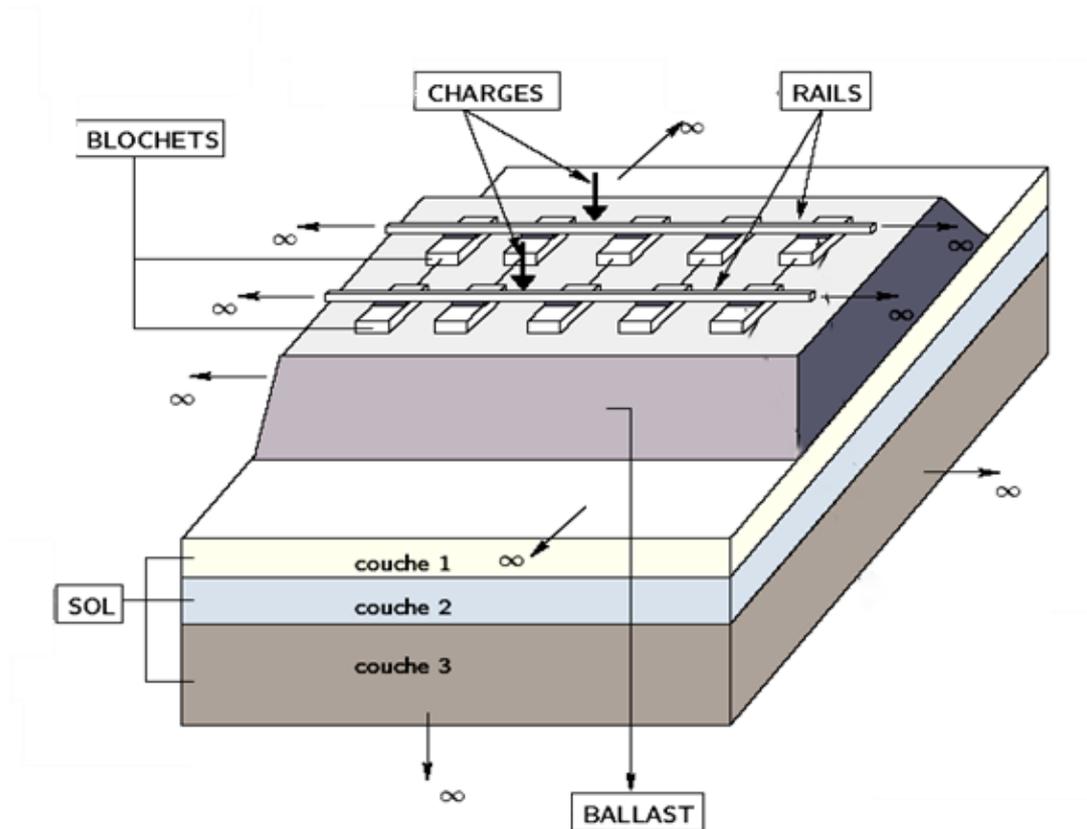
- Le module d'Young  $E$
- Le coefficient de Poisson  $\nu$  (paramètres d'élasticité)
- La cohésion  $c$ .
- L'angle de frottement  $\phi$

### 3.3 Description géométrique du modèle :

- Le modèle comprend :
- **Le rail** : la méthode des éléments finis permet d'obtenir une modélisation assez fine du rail, néanmoins, vu les dimensions des divers éléments de la modélisation de la structure. Cette raison nous a conduits à modéliser le rail par une section rectangulaire présentant la même inertie que celle du rail réel.
- **Les Traverses** : Élément de traverse bibloc, en béton, servant d'appui à un rail (une traverse est composée de deux blochets reliés par une entretoise métallique).
- **La plate-forme** : Les différentes couches d'assise (ballast, grave, sable) prises en compte dans la modélisation sont reprises de la fiche UIC 714, leurs épaisseurs résultent d'un modèle de calcul élaboré à l'aide d'observations.

Un seul type de plateformes on as étudiées : Plate-forme P2 constituée d'un sol dit QS2 de qualité moyenne

- **Model de charge 71** (voir chapitre 2)



**FIGURE 3.1 :** Géométrie de la structure d'assise ferroviaire

### 3.3.1 Conditions aux limites :

Les conditions aux limites se présentent sous deux formes :

- Conditions de déplacements imposées à cause de la symétrie :
  - Symétrie par rapport au plan  $(y, z)$ , pour tout point d'abscisse  $x=0$  on impose  $u=0$
  - Symétrie par rapport au plan  $(x, z)$ , pour tout point  $y=0$  on impose  $v=0$
- Conditions de déplacements imposées aux limites du modèle :
  - Pour  $x=0$  et  $x=7$  on impose  $u=0$
  - Pour  $y=0$  et  $y=7$  on impose  $v=0$
  - Pour  $z=0$  on impose  $w=0$

### 3.3.2 Géométrie et propriétés des matériaux :

#### 3.3.2.1 Géométrie du modèle :

La géométrie du modèle étudié est représentée sur la (Figure 3.2) de la structure d'assise  $H=3.50$  m, de plusieurs couches de matériaux ballaste, grave, sable et sol de qualité QS2. Cette multicouche est constituée par des granules bien gradués à base de gravier et de sable, de la partie supérieure de la plateforme.

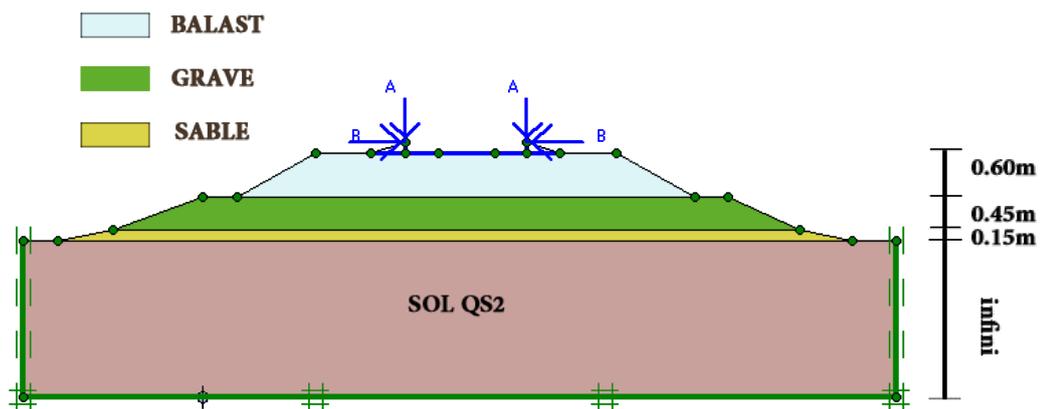


FIGURE 3.2 : géométrie du model numérique

#### 3.3.2.2 Caractéristique des matériaux :

- Propriétés des couches de matériaux :

Les propriétés des couches de sols sont résumées dans le (Tableau 3.1)

Matériaux	$\gamma_{unsat}$	$\gamma_{sat}$	$E(Mpa)$	$\nu$	$C(KN/m^2)$	$\Phi$
Ballast	23.500	24.610	$3 \cdot 10^4$	0.2	5	45
Grave	18	22	$2 \cdot 10^4$	0.33	4	35
Sable	17	20	$1.3 \cdot 10^4$	0.3	1	31
Sol QS2	17	19	$2 \cdot 10^4$	0.33	8	29
Modélé	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb

TABLEAUX 3.1 : Caractéristique mécanique des matériaux

- Propriétés des traverses et rail :

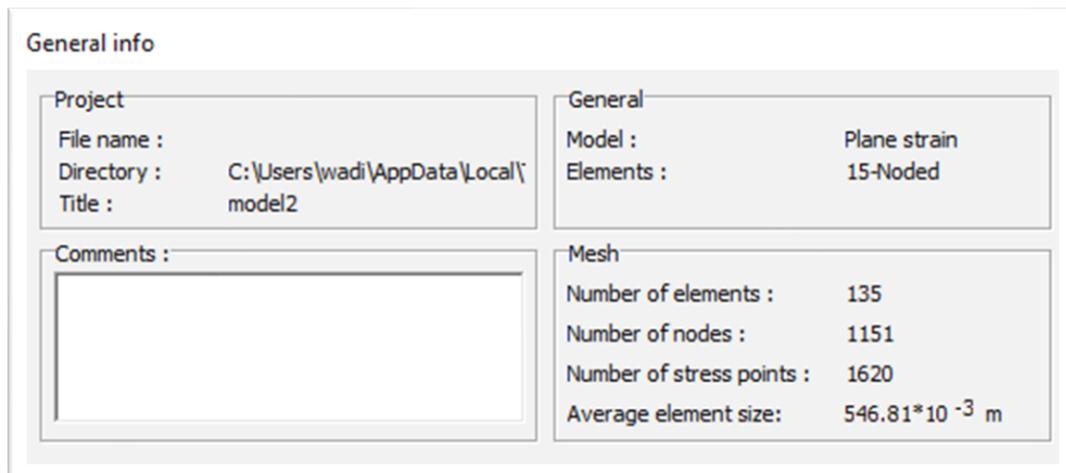
Les propriétés des traverses sont résumées dans le (Tableau 3.2) :

	RAIL	TRAVERSE	
		Entretoise	Blochet (béton)
Type de comportement	Élastique	Élastique	Élastique
EA (Kn/m) -rigidité normal	4.5*106	3.29*105	4.62*105
EI (Kn.m <sup>2</sup> /m) rigidité de flexion	8.437.107	98.847	1863.4
d(m) diamètre	15	0.06	0.22
L (m) longueur	/	0.03	0.29
V coefficient de poisson	0.03	0.3	0.2

**TABLEAUX 3.2** : Caractéristique mécaniques des traverses et rail

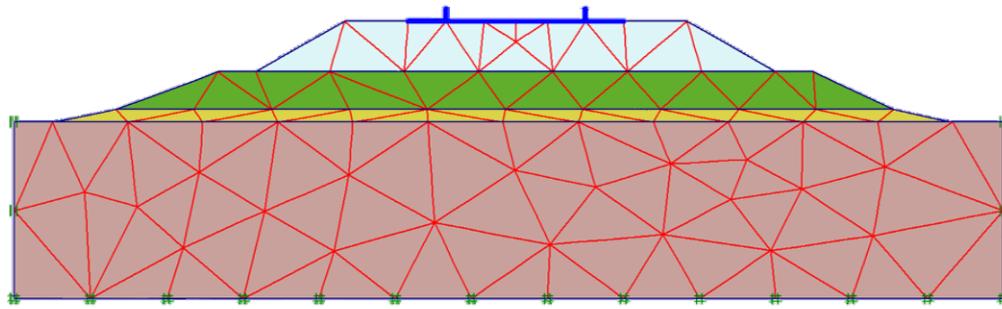
### 3.4 Génération du maillage :

Le maillage est représenté sur la (Figure). Ce modèle se fait par des éléments à 15 nœuds. Le nombre d'éléments est de 135 éléments et le nombre de nœuds est de 1151 nœuds qui résulte 1620 points sollicités comme il est représenté sur la (Figure 3.3).



**FIGURE 3.3:** Présentation des informations générales du maillage en Plaxis 2D

La figure suivante représente le maillage de notre modèle étudié comme ci-dessous :

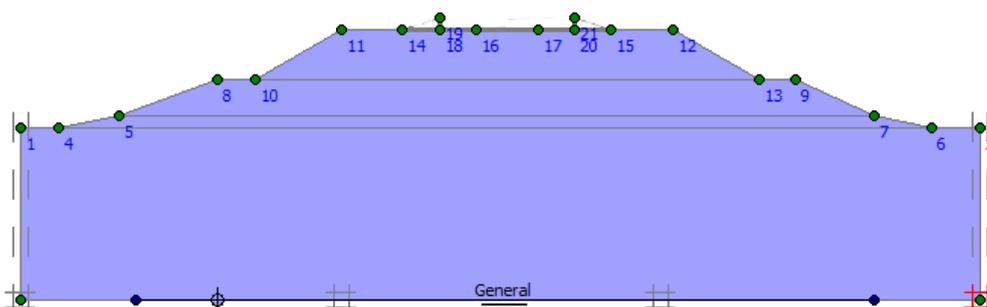


**FIGURE 3.4 :** Maillage du modèle

### 3.4.1 Définition des conditions initiales :

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles ainsi que les conditions initiales. La fonction 'initial conditions' est utilisée pour définir le niveau de la nappe phréatique initiale est à 0 m de la surface (Figure5).

Les contraintes initiales dans un sol sont influencées par le poids du matériau et par l'histoire de sa formation sous charge cet état de contrainte est caractérisé généralement par une contrainte effective verticale et les déplacements du sol, les déformations du sol total, Les contraintes totales et effectives dans le sol.



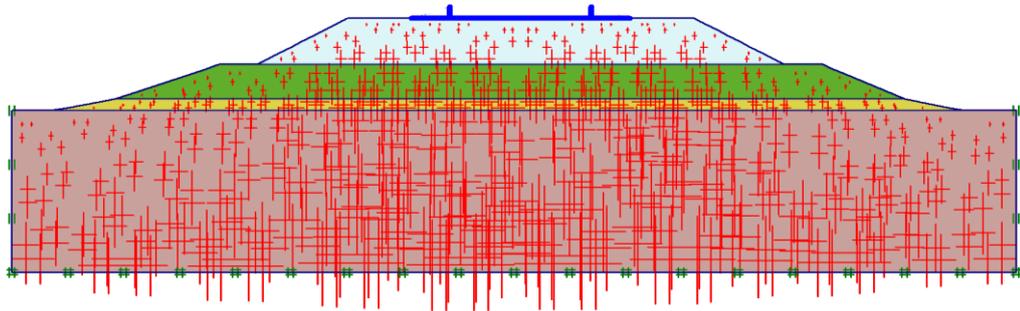
**FIGURE 3.5 :** Les conditions initiales

Le calcul de procédure K0 est effectué en définissant un facteur  $\sum M = - \text{weight} = 1.000$

Le coefficient K0 est déduire à l'aide de formule de JACKY tel que :

-  $K_0 = 1 - \sin\phi$  et  $\phi$  est l'angle de frottement

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

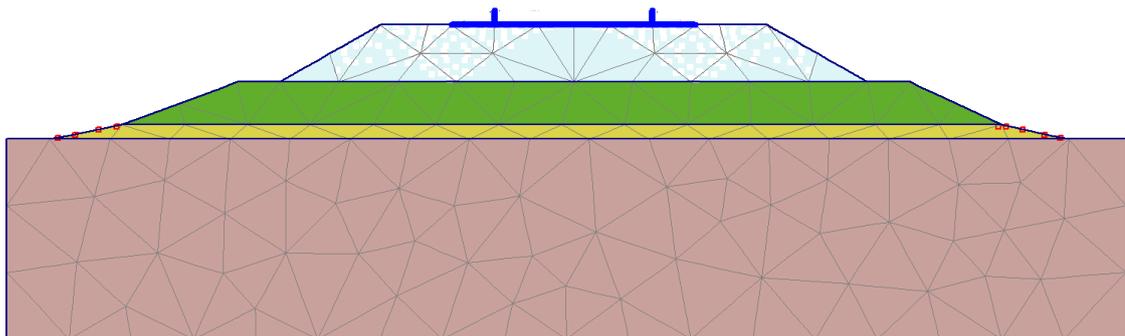


### Effective stresses

Extrême effective principal stress -60.11 KN/m<sup>2</sup>

**Figure 3.6 :** Champ des contraintes effectives avant chargement

La figure suivante représente les points plastique avant le chargement comme ci-dessous :

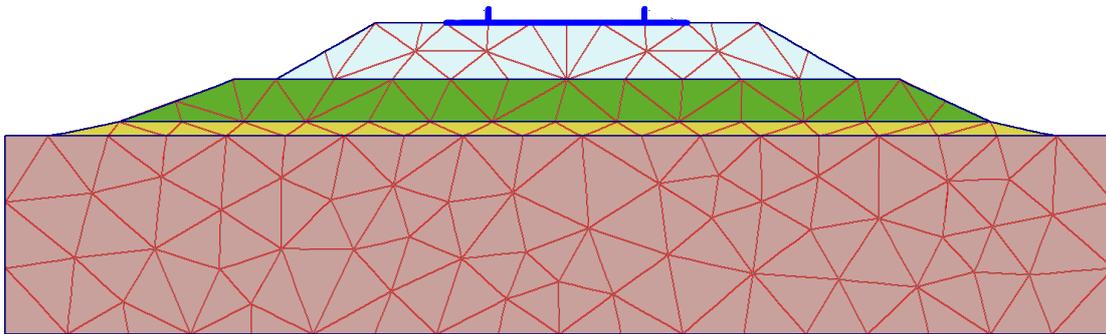


### Point plastic

- Mohr-coulomb point
- Tension Cut-off point

**Figure 3.7 :** Point plastiques avant chargement.

La figure suivante va représenter déformation totale du maillage avant le chargement comme ci-dessous :

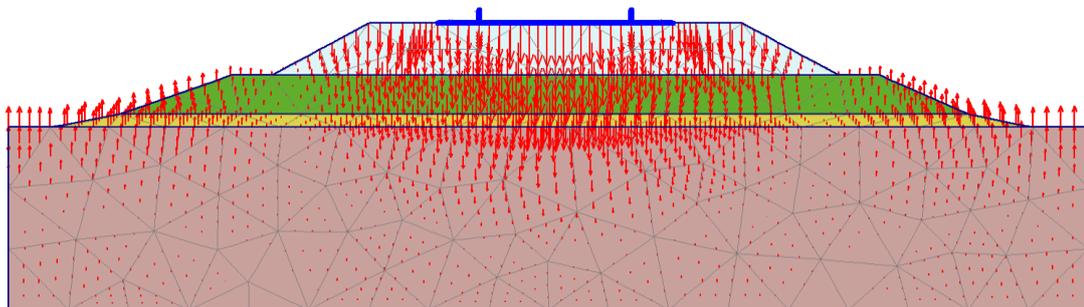


### Deformed mesh

Total Deformed mesh  $535.88 \cdot 10^{-6}$  m

**Figure 3.8** Déformation totale du maillage avant chargement

La figure suivante va représenter déplacement verticale avant le chargement comme ci-dessous :

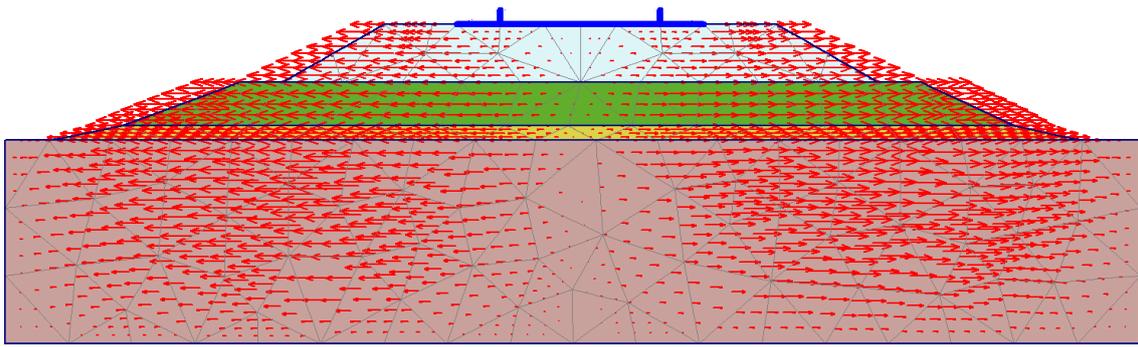


### Vertical displacement

Extrême UY displacement  $251.68 \cdot 10^{-6}$  m

**Figure 3.9** Déplacement vertical avant le chargement

La figure suivante va représenter déplacement horizontale avant le chargement comme ci-dessous :



### Horizontal displacement

Extrême UX displacement  $535.86 \cdot 10^{-6}$  m

**Figure 3.10** Déplacement horizontal avant le chargement

## **CHAPITRE IV : CALCUL NUMERIQUE**

## CHAPITRE IV : CALCUL NUMERIQUE

### 4.1 INTRODUCTION

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur (méthode Des différences finies et méthode des éléments finies) a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et d'algorithmes de résolution des divers aspects du comportement des sols.

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projet de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères, pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Conditionnée par les progrès effectués dans le domaine informatique et les acquis des mathématiques dans la théorie de l'énergie, des méthodes de projection et des méthodes d'approximation, Cette étude s'est appuyée sur le programme Plaxis <sup>(21)</sup> pour définir la forme de base et ses dimensions et extraire les contraintes affectant cette Structures assise ferroviaire, Et aussi comparer et trouver le comportement de la matière lorsqu'elle influence par la force verticale combiner a la force transversal (effort d'acet) notre cas d'étude.

La présentation des résultats dans notre modèle été donnée avec l'objectif : premièrement de présenter et commenter le comportement numérique, en termes de contraintes et déformation calculés.

Deuxièmement, La comparaison directe est faite entre les effets de charge dynamique et statique engendrer par les charges verticales du model de charge71 combiner avec l'effort de lacet.

### 4.2 Procédure de calcul :

Le PLAXIS-Input est chargé par le 'général setting', utilisé pour la sélection des arrangements initiales divers de la présente analyse numérique, les plus importants sont :

Le titre du projet (duquel dérive le nom-de fichier).

Le type d'analyse à effectuer ('axisymétrique' ou 'plain strains').

Les types d'éléments finis (à 6-nœuds ou à 15-nœuds).

Les dimensions de la surface de dessin.

Dans la présente étude les conditions de 'plain strain' été assumées, des éléments finis à 15 nœuds été sélectionnés pour la modélisation du sol. La figure 4.1 montre un élément fini typique, à 15 nœuds avec les points de contraintes correspondant.

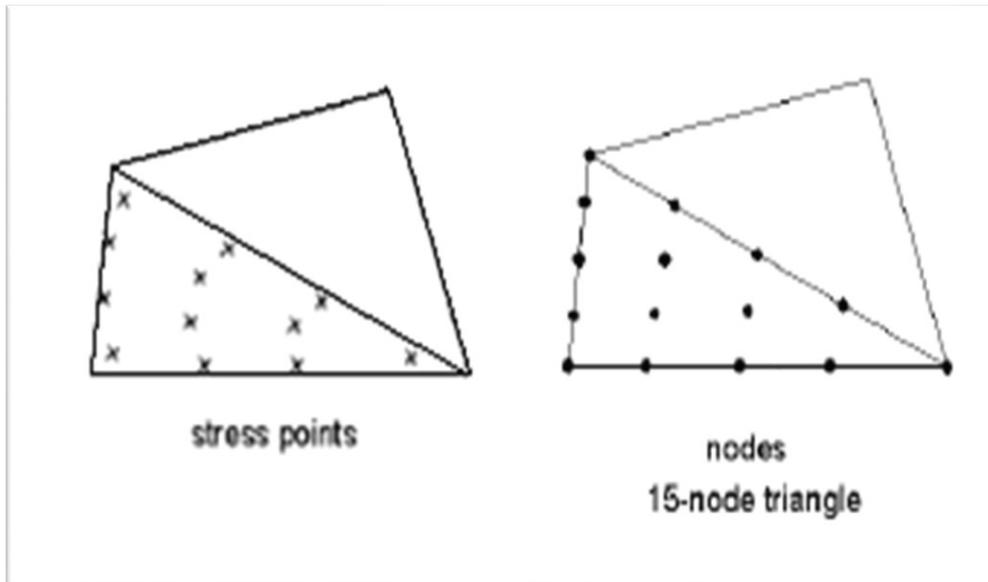


Figure 4.1 : Éléments finis triangulaire à 15-nœuds.

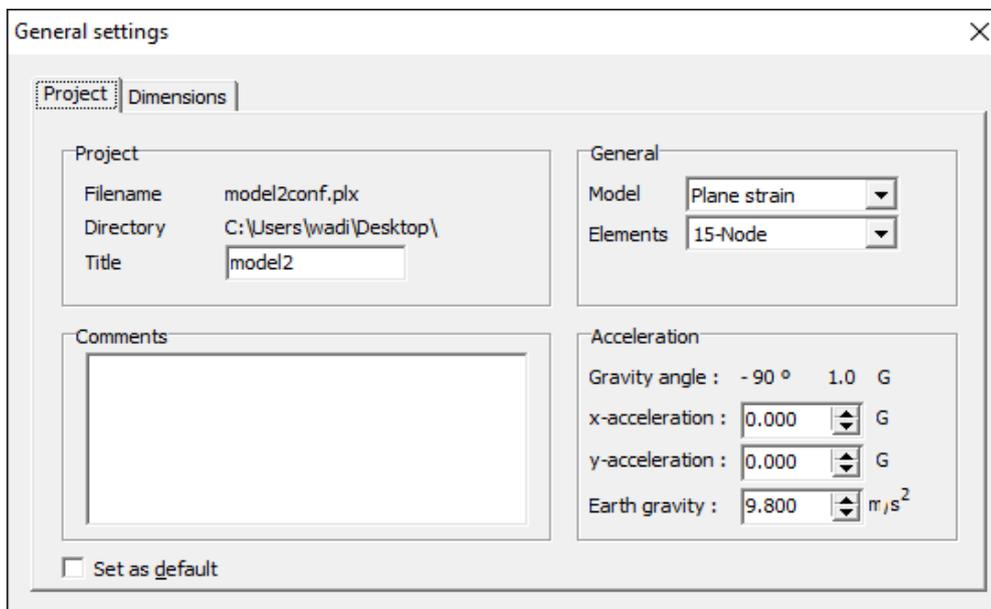


Figure 4.2 : Paramètre général de Project

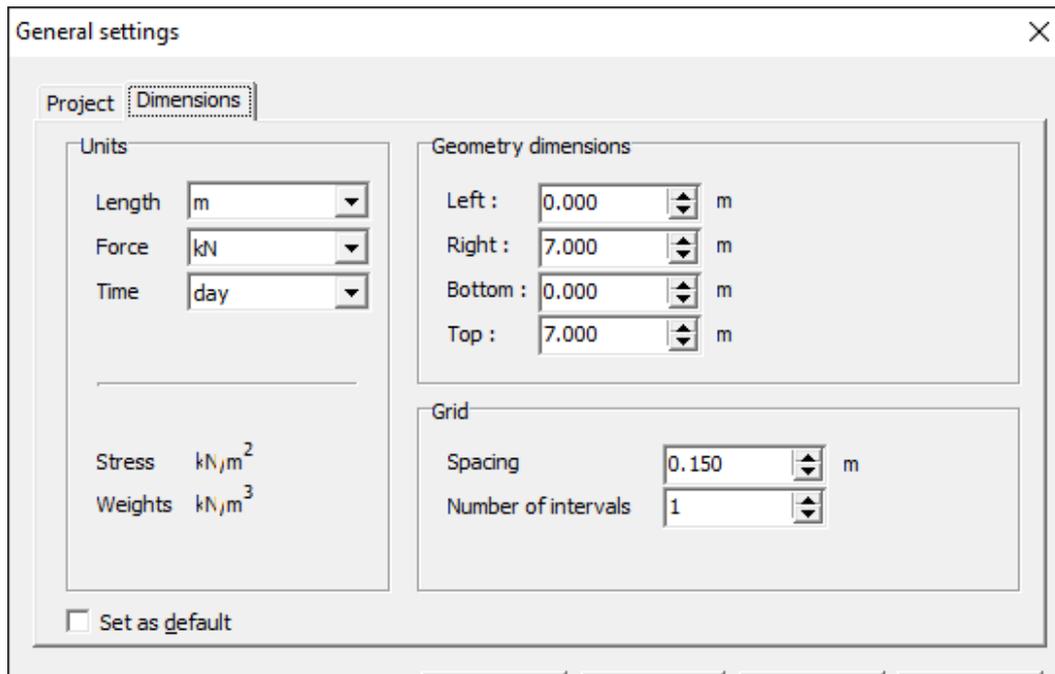


Figure 4.3 : Démentions et les unités du Project

### 4.3 Les phase de calcul :

Le calcul du modèle de référence se fait en 4 phase :

**Phase 0** : Initiation des contraintes (**procédure K<sub>0</sub>**) ; on détermine les

Contraintes effectives initiales.

**Phase 1** : validation des couches de structure d'assise avec les charges verticales statique du model de charge 71, Cette phase est caractérisée par :

Calcul plastique.

Choisir la phase 0 comme phase initiale

Activation du traverse et rail

**Phase 2** : validation des couches de structure d'assise avec les charges verticales du model de charge 71 combiner avec l'effort de lacet.

Cette phase est caractérisée par :

- Calcul plastique

- Stage de construction
- Choisir la phase 1 comme phase initiale
- Activation la charges sur là de structure d'assise

### Phase 3 : maitre les paramètres dynamiques

Cette phase est caractérisée par :

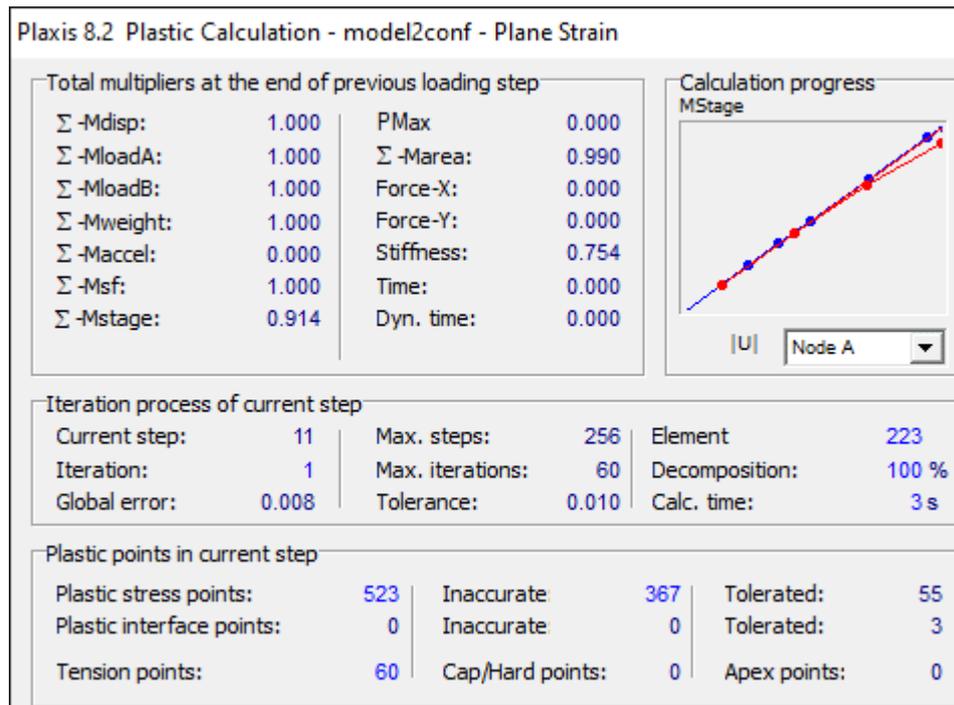
Calcul dynamique

## 4.4 Examen des résultats :

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

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	F
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0.00 ...	0	0
✓ <Phase 1>	1	0	Plastic	Staged construction	0.00 ...	1	0
✓ <Phase 2>	2	1	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0.00 ...	1	0
✓ <Phase 3>	3	2	Dynamic analysis	Total multipliers	0.01 s	1	0

**Figure 4.4:** Champ des phases du calcul

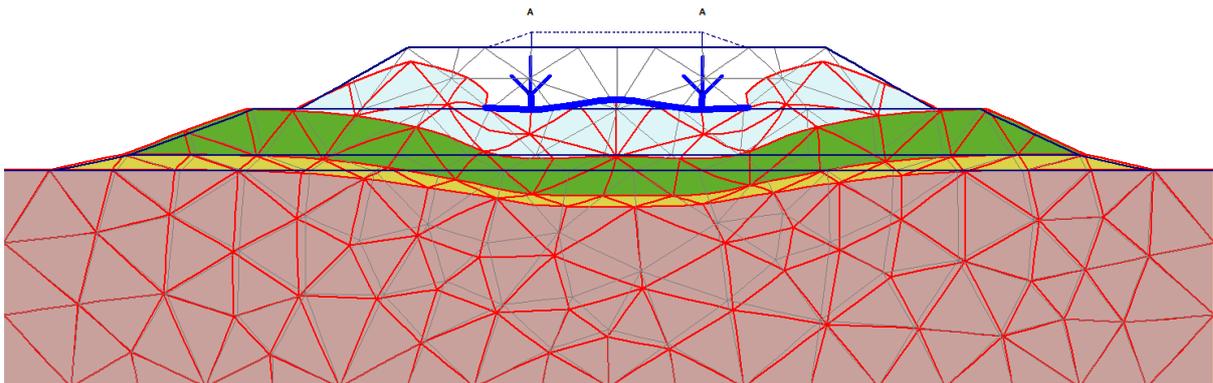


**Figure 4.5 :** Information de calcul en phase

#### 4.5 Calcul de la première charge du model 71 (80 kN/m) :

##### 4.5.1 Chargement statique :

La figure suivante va représenter la déformation totale du maillage après le chargement comme ci-dessous :

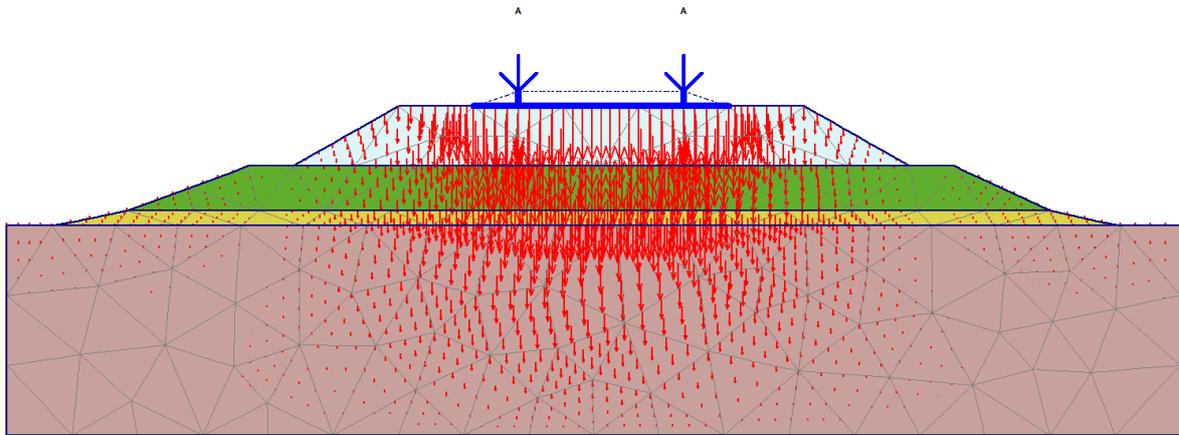


**Deformed mesh**

Extrême total displacement  $6.03 \cdot 10^{-3} \text{m}$

**Figure 4.6:** Déformation totale du maillage après chargement

La figure suivante va représenter le déplacement vertical après le chargement comme ci-dessous :

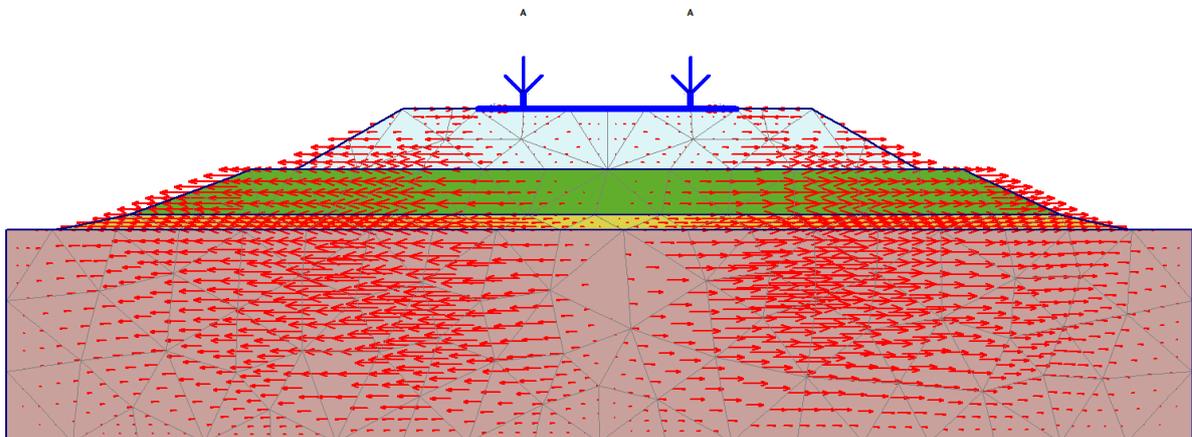


### Déplacement vertical

Extrême déplacement total  $6.22 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.7:** Déplacement vertical après chargement

La figure suivante va représenter le déplacement horizontal après chargement comme ci-dessous :

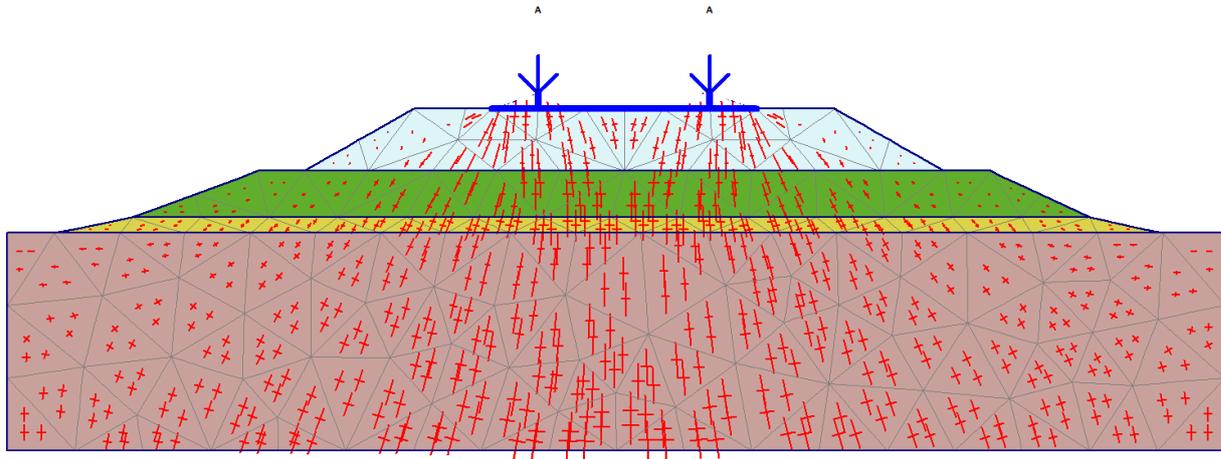


### Déplacement horizontal

Déplacement horizontal  $1.22 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.8 :** Déplacement horizontal après chargement

La figure suivante va représenter les contraintes effectives après chargement comme ci-dessous :

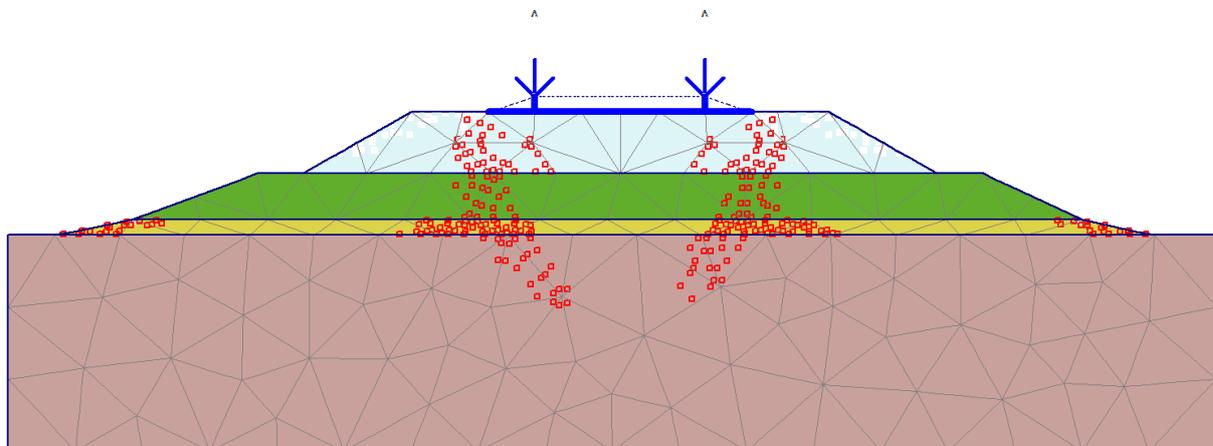


### Total contrainte effective

Effective mean stress  $-180.56 \text{ kn/m}^2$

**Figure 4.9 :** Champ des contraintes effectives après chargement

La figure suivante va représenter les point plastic après le chargement comme ci-dessous :



### Point plastic

■ Mohr-coulomb point

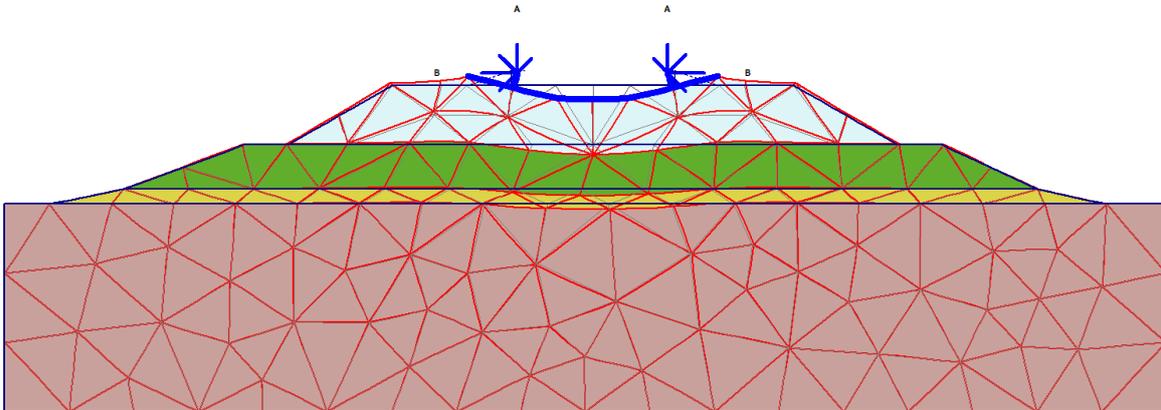
□ Tension Cut-off point

**Figure 4.10 :** Point plastique après chargement

## 4.5.2 Combinaison avec l'effort de l'acet :

La figure suivante va représenter la déformation totale du maillage après la combinaison

comme ci-dessous :

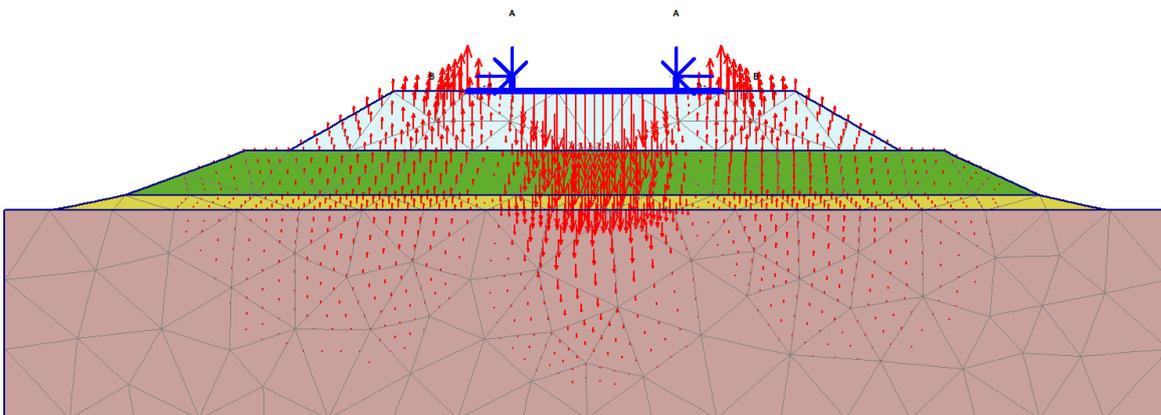


### Deformed mesh

Extrême déplacement total  $1.38 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.11:** Déformation totale du maillage après la combinaison

La figure suivante va représenter le déplacement vertical après la combinaison comme ci-dessous :

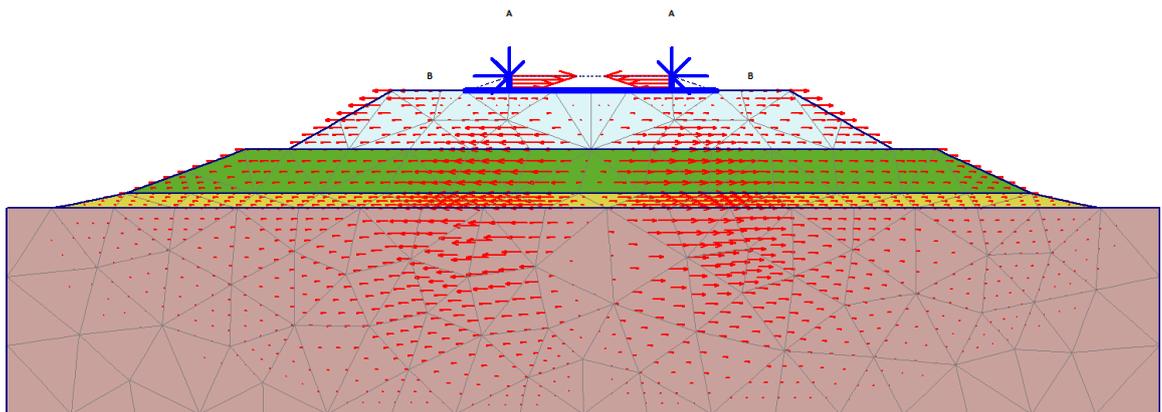


### Déplacement vertical

Extrême déplacement total  $1.38 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.12:** Déplacement vertical après la combinaison

La figure suivante va représenter le déplacement horizontal après chargement comme ci-dessous :

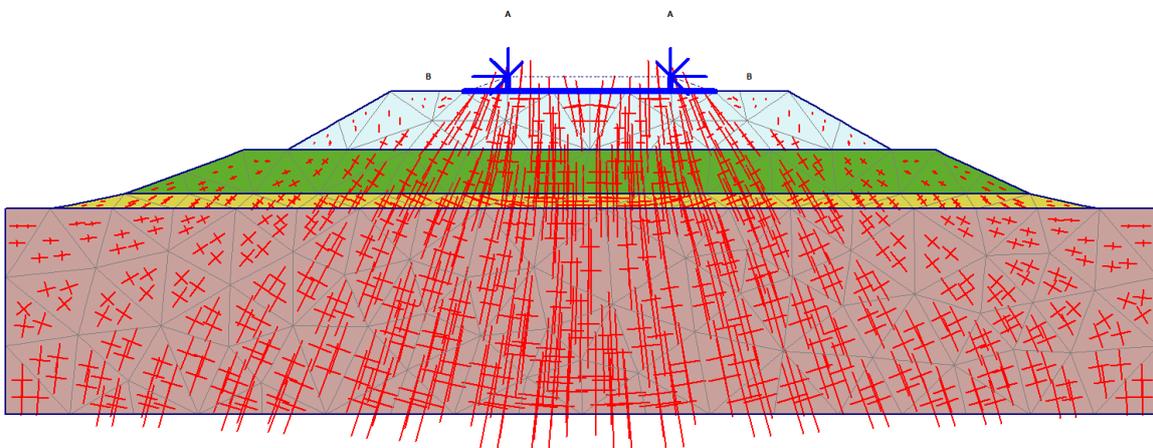


### Déplacement horizontal

Extrême déplacement total  $678.42 \cdot 10^{-6}$  m

**Figure 4.13:** Déplacement horizontal après la combinaison

La figure suivante va représenter les contraintes effectives après la combinaison comme ci-dessous :

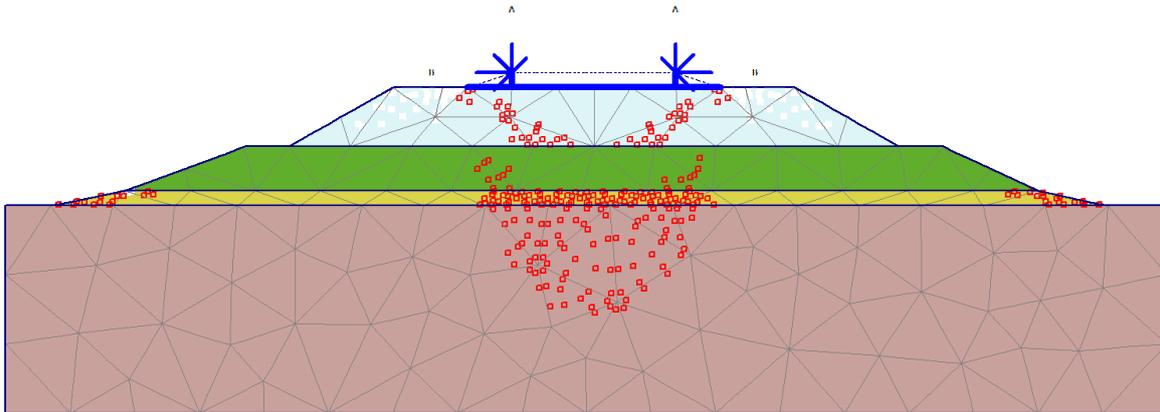


### Total contrainte effective

Effective mean stress  $-94 \text{ kn/m}^2$

**Figure 4.14 :** Champ des contraintes effectives après combinaison

La figure suivante va représenter les point plastic après la combinaison comme ci-dessous :



### Point plastic

■ Mohr-coulomb point

□ Tension Cut-off point

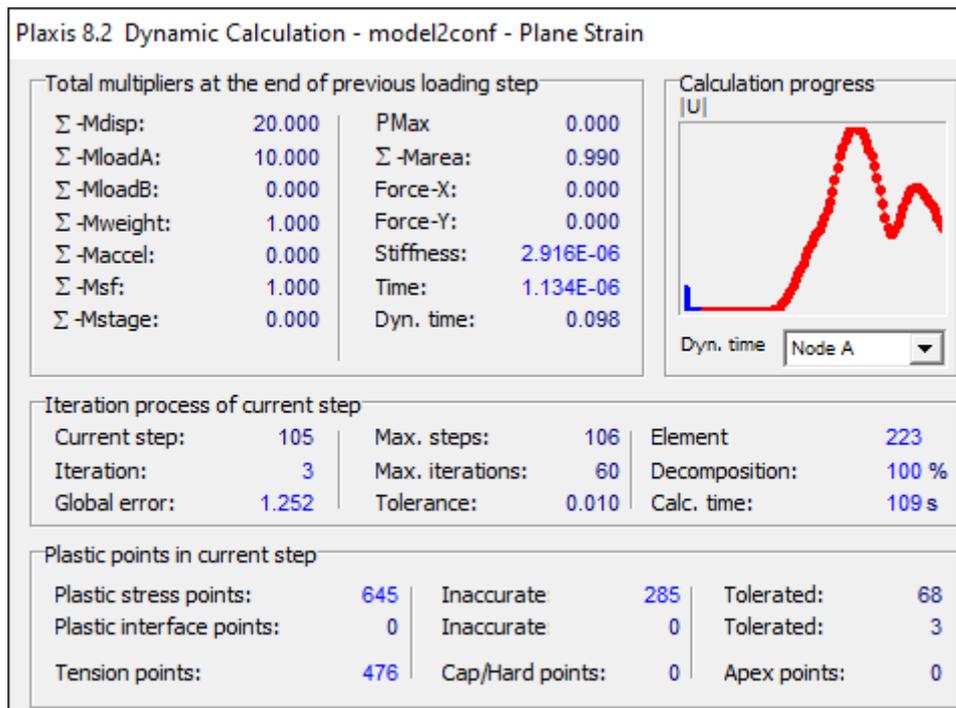
**Figure 4.15** : Point plastique après la combinaison

### 4.5.3 Calculs dynamiques :

Pour un calcul dynamique plus fiable des (dynamique absorbent boundaries) sont ajouté aux limites du modèle pour éviter une réflexion des efforts dynamique. (Voir figure 3.2)

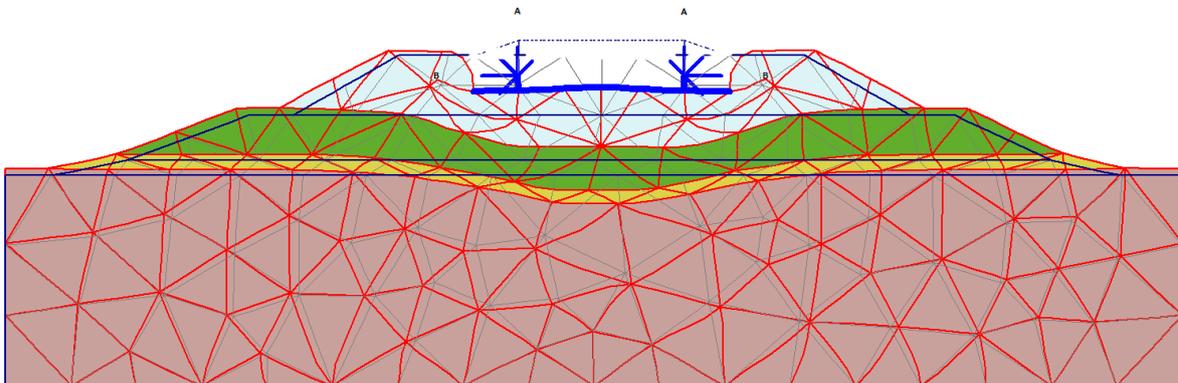
La fréquence, l'amplitude et l'intervalle du temps sont adopté de l'étude de Guérin (1996) <sup>(13)</sup>, Bodin (2000) <sup>(14)</sup> et Al-Shaer ,10hz,10hz,0.1s respectivement

La figure suivante va représenter Information de calcul comme ci-dessous :



**Figure 4.16 :** Information de calcul dynamique

La figure suivante représente la déformation totale du maillage comme ci-dessous :

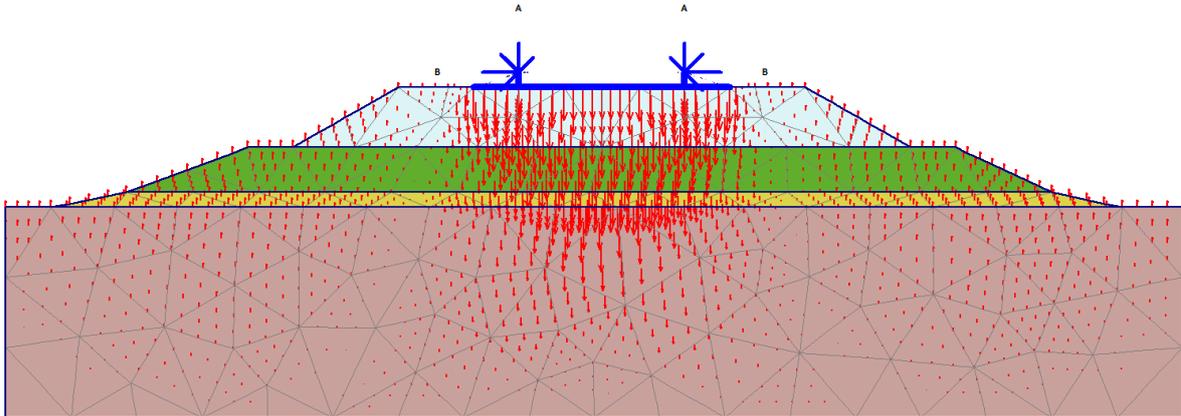


### Deformed mesh

Extrême déplacement total  $179.68 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.17:** Déformation totale du maillage

La figure suivante va représenter déplacement verticale après chargement dynamique comme ci-dessous :

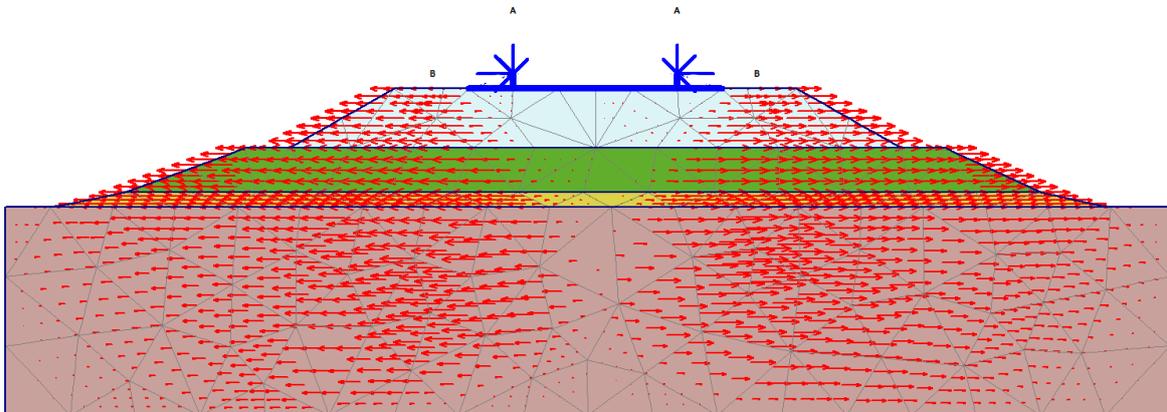


### Vertical displacement

Extrême UY displacement  $179.68 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.18** Déplacement vertical après chargement dynamique

La figure suivante va représenter déplacement horizontale après le chargement dynamique comme ci-dessous :

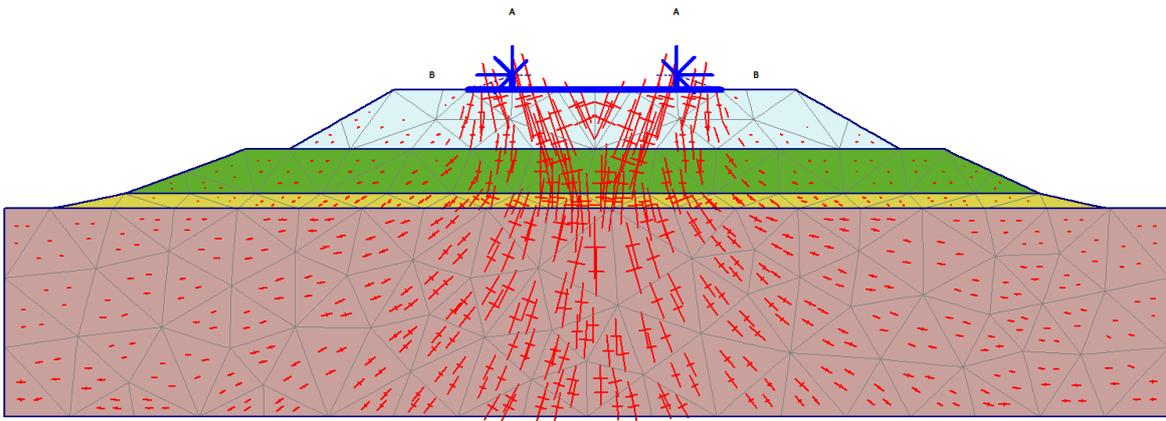


### Horizontal displacement

Extrême UX displacement  $86.29 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.19** Déplacement horizontal après le chargement dynamique

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

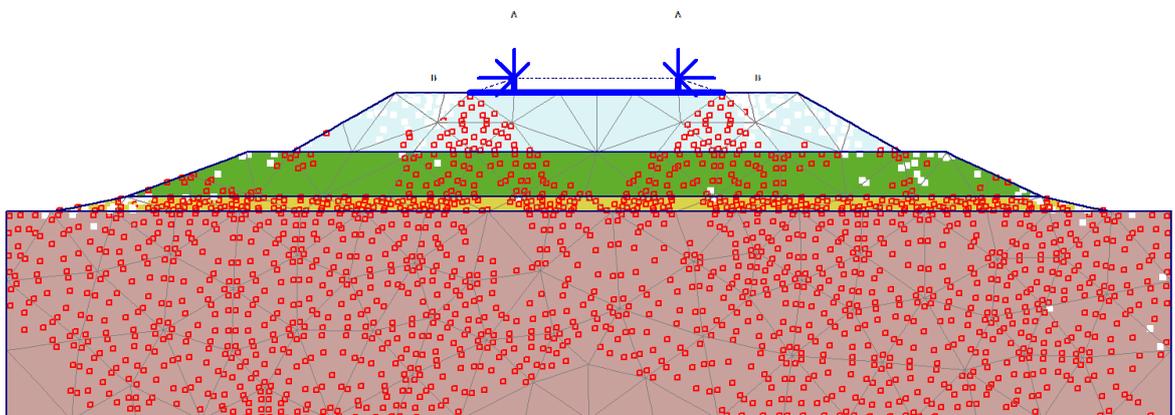


### Effective stresses

Extrême effective principal stress -933.95 KN/m<sup>2</sup>

**Figure 4.20 :** Champ des contraintes effectives après chargement dynamique

La figure suivante représente les points plastique après le chargement dynamique comme ci-dessous :



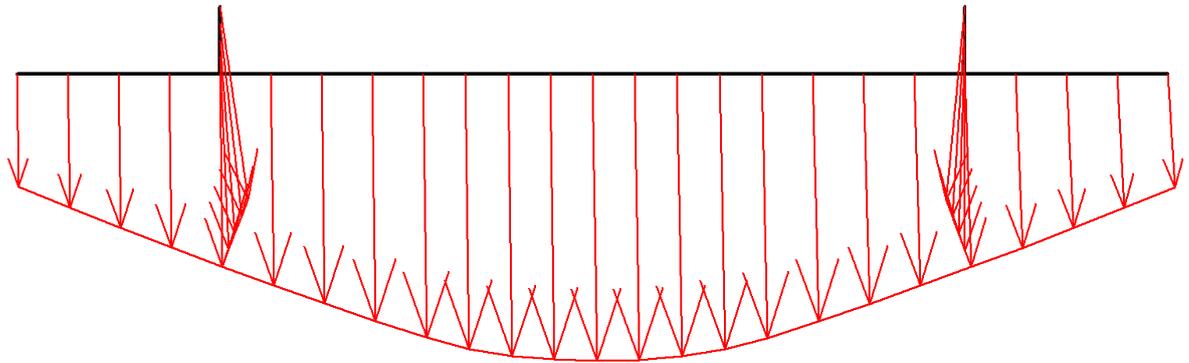
### Point plastic

- Mohr-coulomb point
- Tension Cut-off point

**Figure 4.21 :** Point plastique après le chargement dynamique

#### 4.5.4 Les coupes de calcul de déplacement total

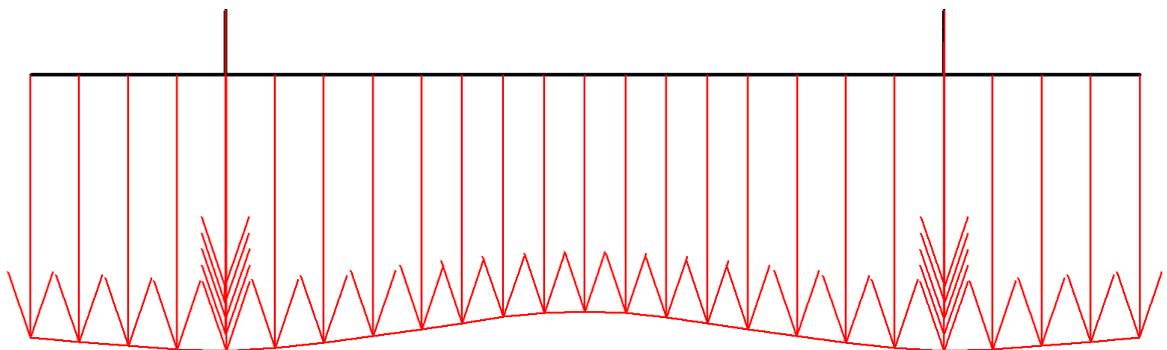
Les figures suivantes vont représenter une coupe de calcul de déplacement total des différents modèles de calcul pour la première charge du modèle de charge 71 :



**Total displacement**

$$251.71 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

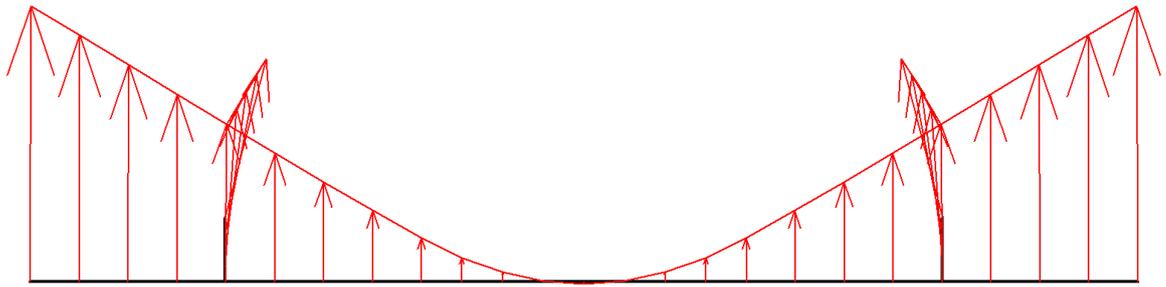
**Figure 4.22** : Coupe de calcul de déplacement total avant chargement



**Total displacement**

$$6.22 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

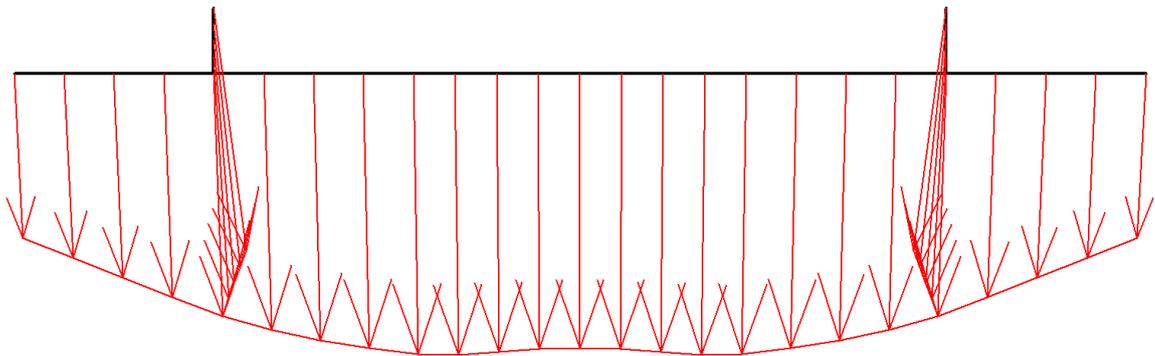
**Figure 4.23** : Coupe de calcul de déplacement total après chargement statique



**Total displacement**

$$54.84 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

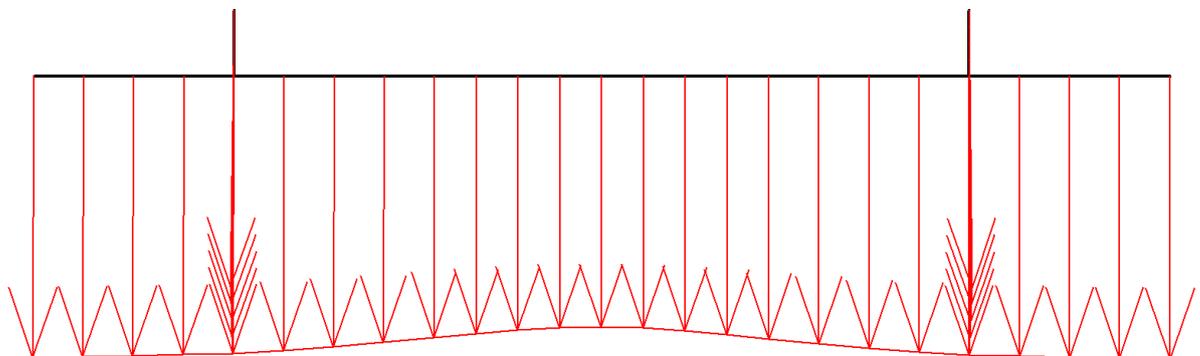
**Figure 4.24 :** Coupe de calcul de déplacement du l'effort d'acet unique



**Total displacement**

$$7.17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

**Figure 4.25 :** Coupe de calcul de déplacement total après la combinaison des charges vertical avec l'effort transversale



**Total displacement**

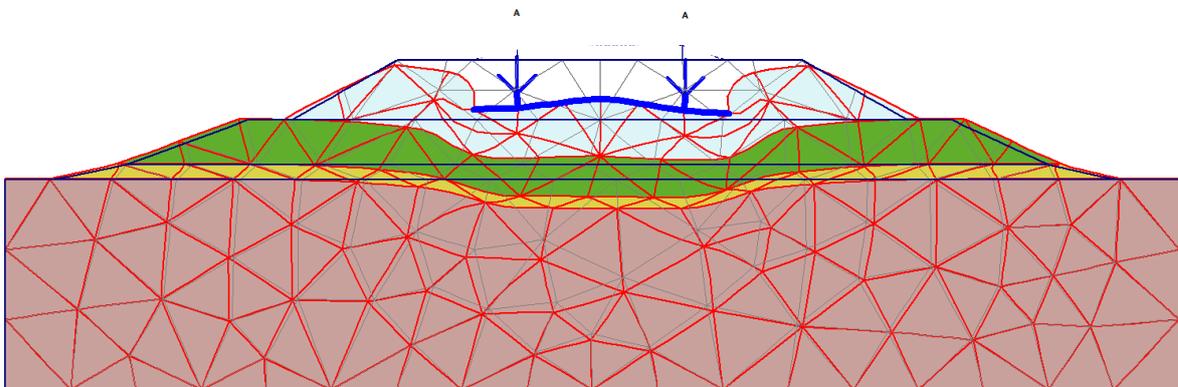
$$179.68 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

**Figure 4.26 :** Coupe de calcul de déplacement total après le chargement dynamique

#### 4.6 Calcul de la deuxième charge du model 71 (250kn/m) :

##### 4.6.1 Calcul statique

La figure suivante va représenter la déformation totale du maillage après le chargement comme ci-dessous :

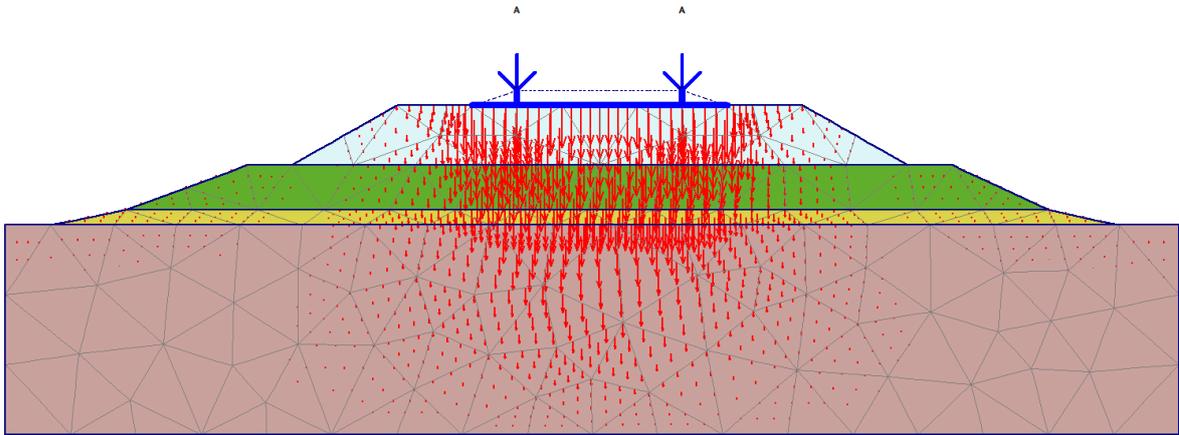


##### Deformed mesh

Extrême déplacement total  $26.83 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

**Figure 4.27:** Déformation totale du maillage après chargement

La figure suivante va représenter la déformation totale vertical après le chargement comme ci-dessous :

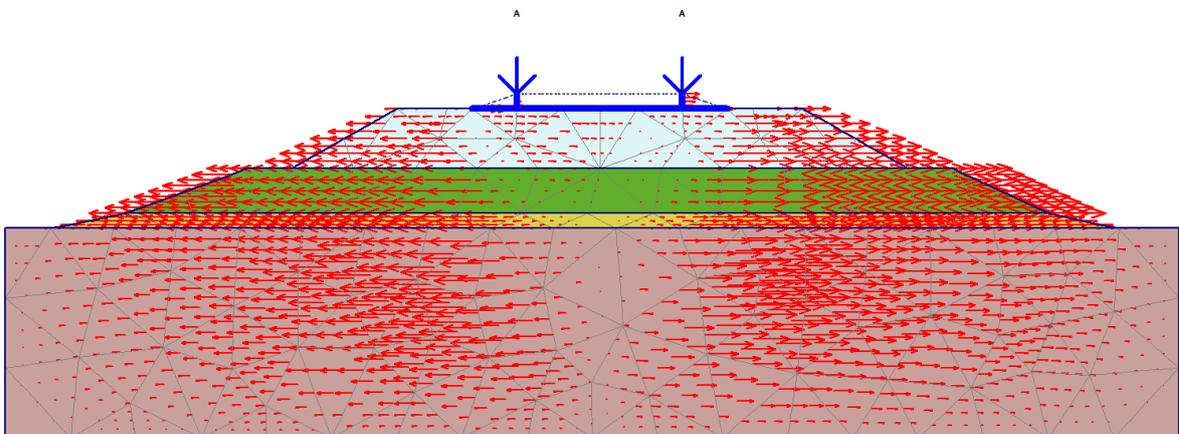


### Vertical displacement

Extrême UY déplacement total  $26.83 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.28:** Déplacement vertical après chargement

La figure suivante va représenter la déformation totale horizontale après le chargement comme ci-dessous :

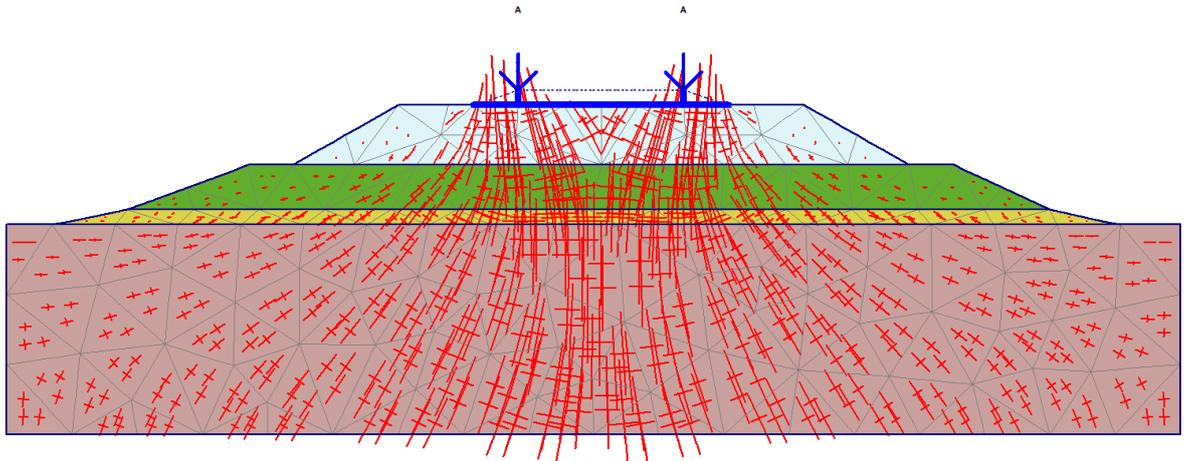


### Horizontal displacement

Extrême UX déplacement  $7.36 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.29** Déplacement horizontal après le chargement

La figure suivante va représenter les contraintes effectives après chargement comme ci-dessous :



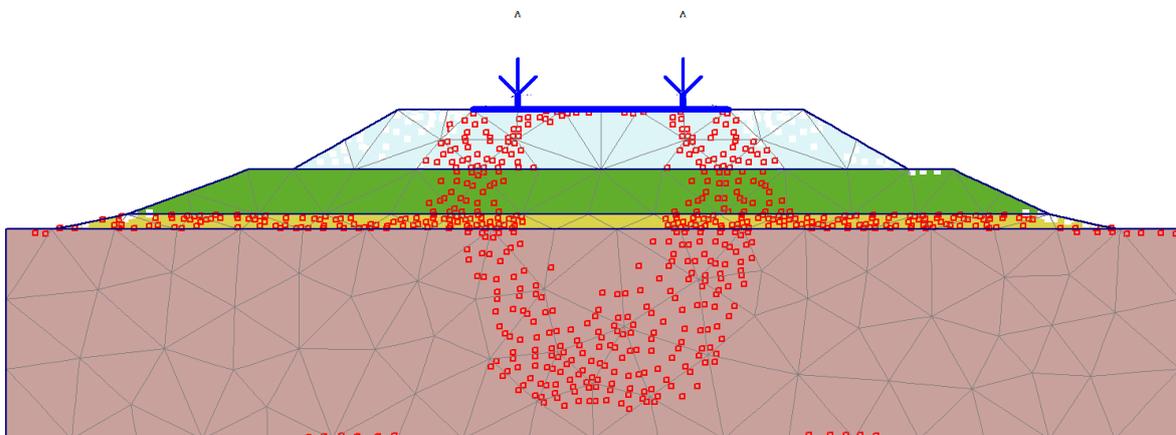
### Total contrainte effective

Effective mean stress  $-337.23 \text{ kn/m}^2$

**Figure 4.30** : Champ des contraintes effectives après chargement

La figure suivante représente les points plastique après le chargement comme ci-dessous

:



### Point plastic

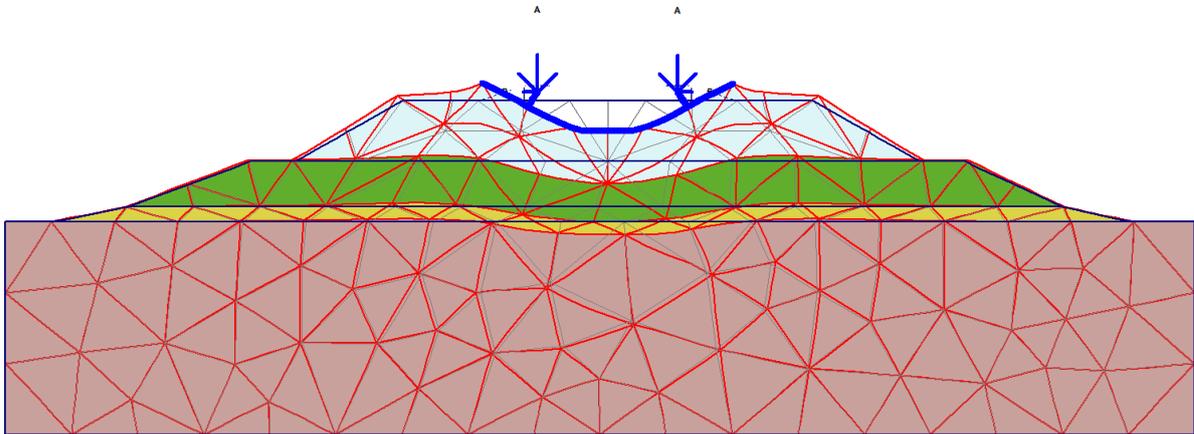
■ Mohr-coulomb point

□ Tension Cut-off point

**Figure 4.31** : Point plastiques après chargement.

#### 4.6.2 Combinaison avec l'effort de l'acet :

La figure suivante va représenter la déformation totale du maillage après la combinaison comme ci-dessous :

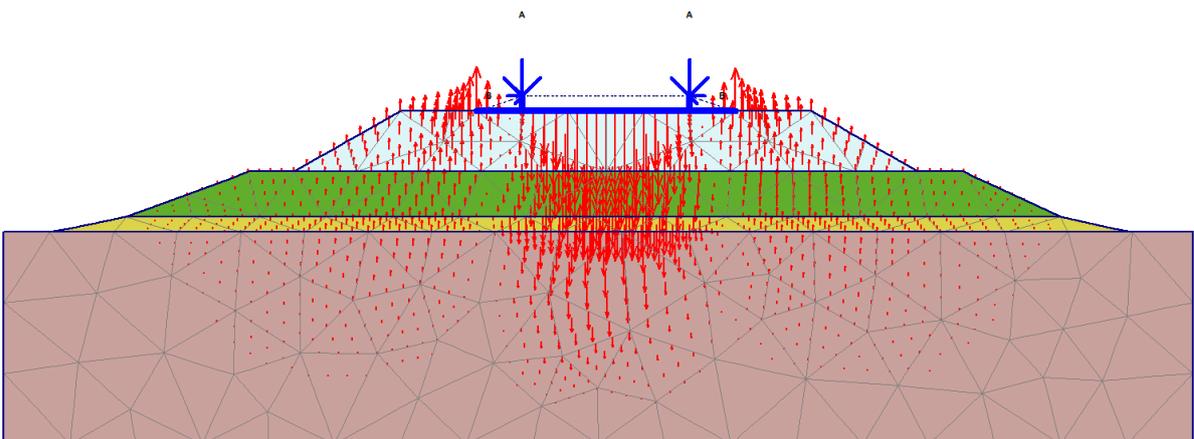


#### Deformed mesh

Extrême déplacement total  $1.48 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.32:** Déformation totale du maillage après combinaison

La figure suivante va représenter le déplacement vertical totale du maillage après la combinaison comme ci-dessous :

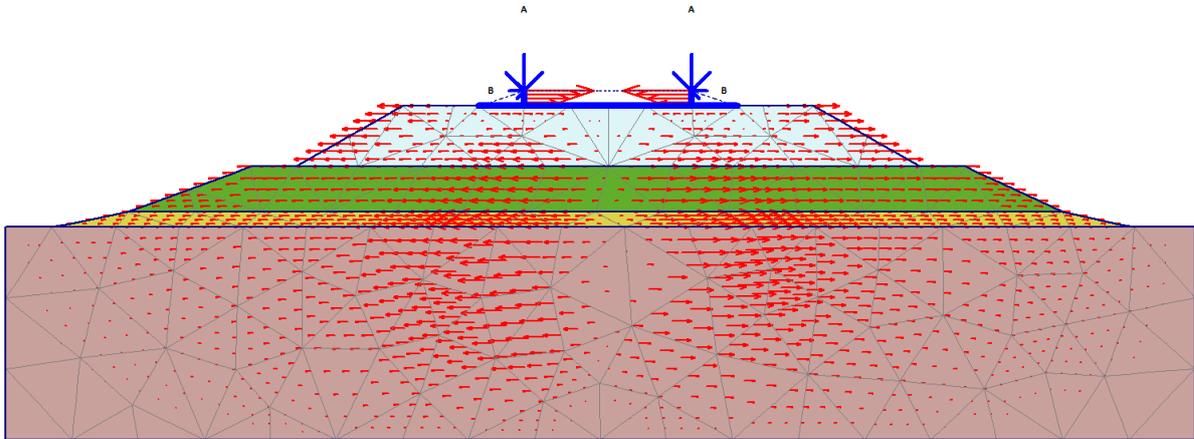


#### Vertical displacement

Extrême UY déplacement total  $1.48 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.33:** Déplacement vertical après combinaison

La figure suivante va représenter le déplacement horizontal totale du maillage après la combinaison comme ci-dessous :

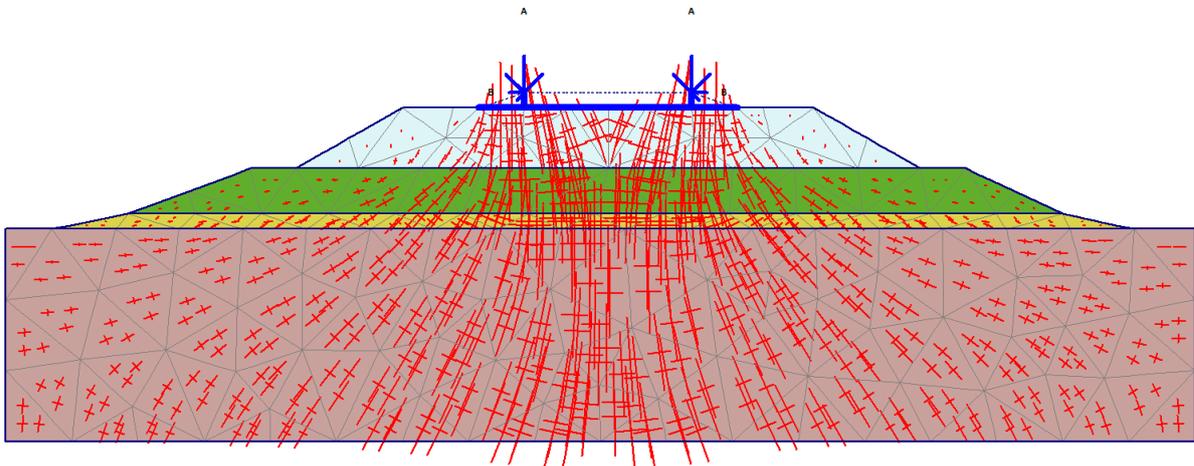


### Horizontal displacement

Extrême  $U_x$  déplacement total  $1.48 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.34:** Déplacement horizontal après la combinaison

La figure suivante va représenter les contraintes effectives après la combinaison comme ci-dessous :

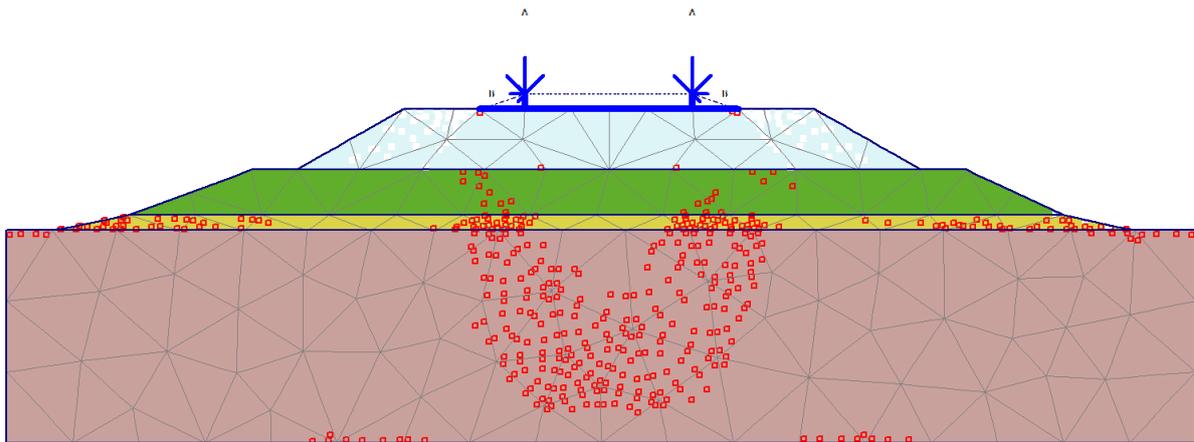


### Effective stress

Effective mean stress  $-287.36$  kn/m<sup>2</sup>

**Figure 4.35:** Champ des contraintes effectives après la combinaison

La figure suivante représente les points plastique après la combinaison comme ci-dessous:



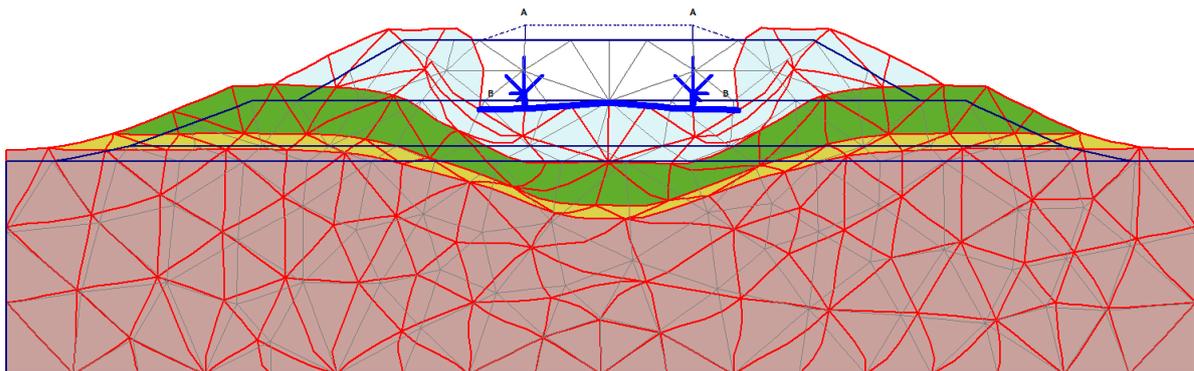
### Point plastic

- Mohr-coulomb point
- Tension Cut-off point

Figure 4.36 : Point plastiques après la combinaison

### 4.6.3 Calculs dynamiques :

La figure suivante représente la déformation totale du maillage après chargement dynamique comme ci-dessous :

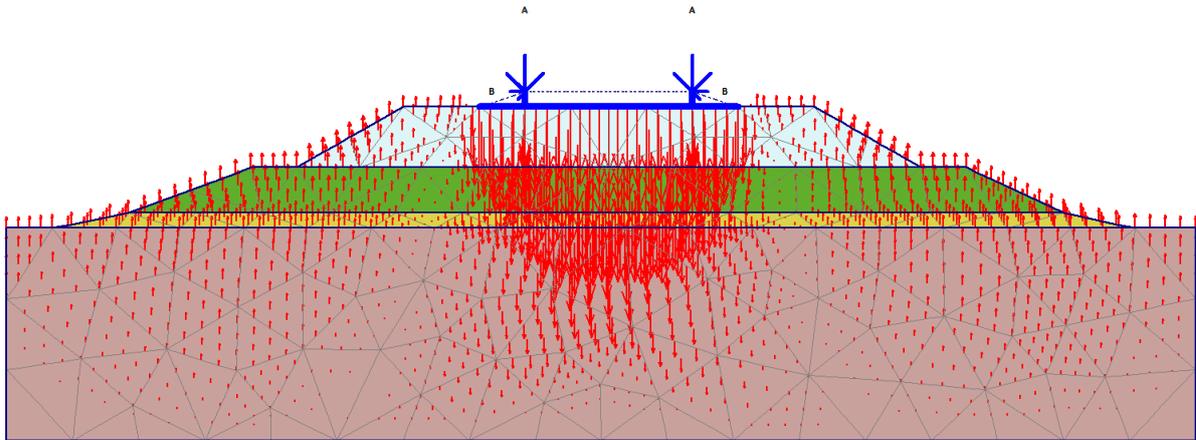


### Deformed mesh

Extrême déplacement total  $688.14 \cdot 10^{-3}$  m

Figure 4.37: Déformation totale du maillage après chargement dynamique

La figure suivante va représenter déplacement verticale après chargement dynamique comme ci-dessous :

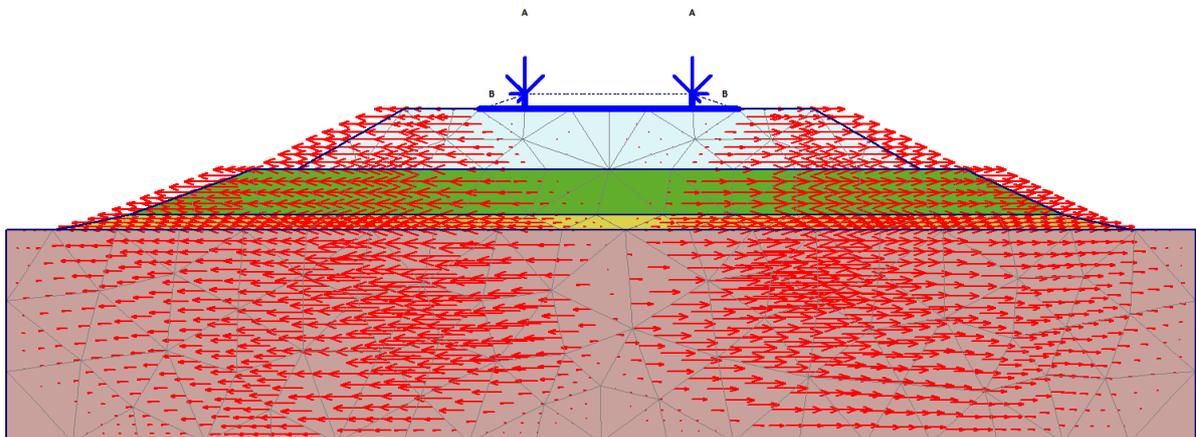


### Vertical displacement

Extrême UY displacement  $688.14 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.38** Déplacement vertical après chargement dynamique

La figure suivante va représenter déplacement horizontale après le chargement dynamique comme ci-dessous :

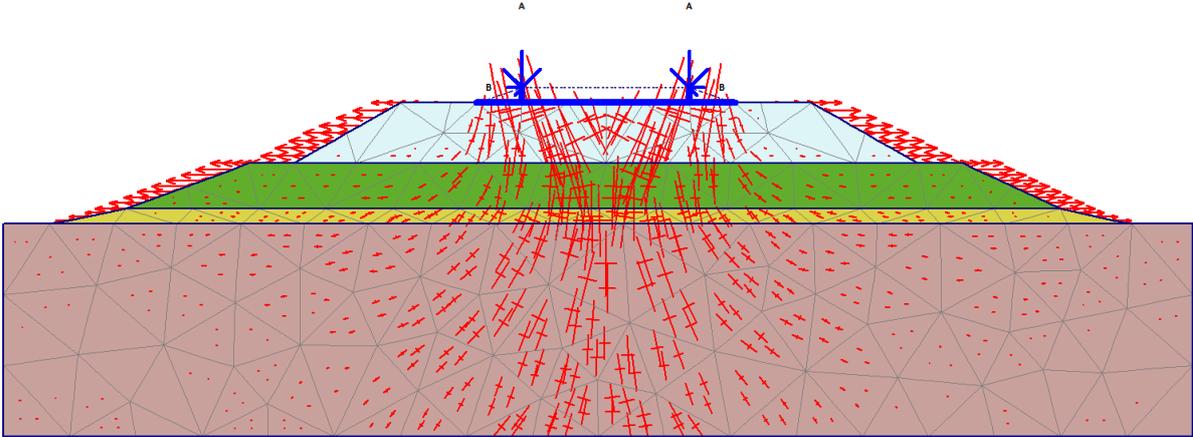


### Horizontal displacement

Extrême UX displacement  $327.10 \cdot 10^{-3}$  m

**Figure 4.39** Déplacement horizontal après le chargement dynamique

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

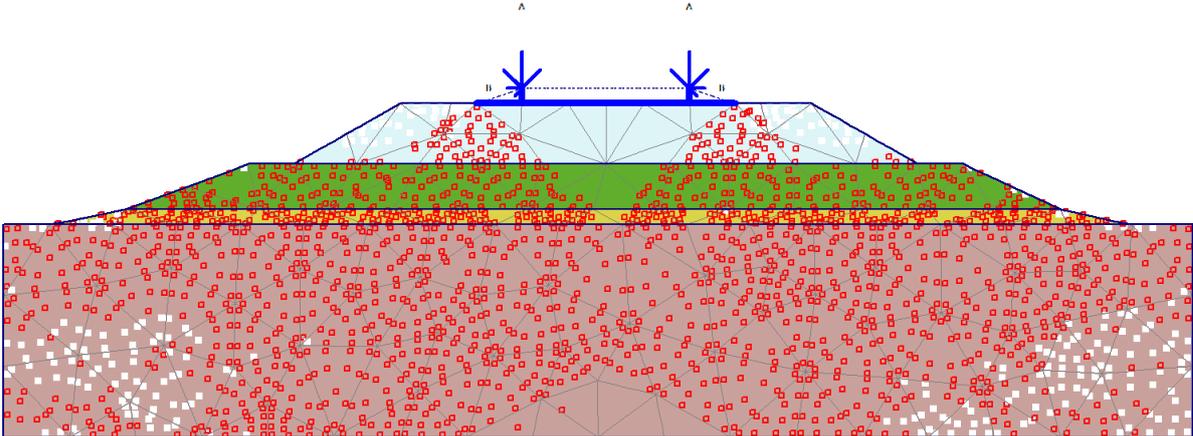


**Effective stresses**

Extrême effective principal stress  $-2.91 \cdot 10^3 \text{ KN/m}^2$

**Figure 4.40 :** Champ des contraintes effectives après chargement dynamique

La figure suivante représente les points plastique après le chargement dynamique comme ci-dessous :



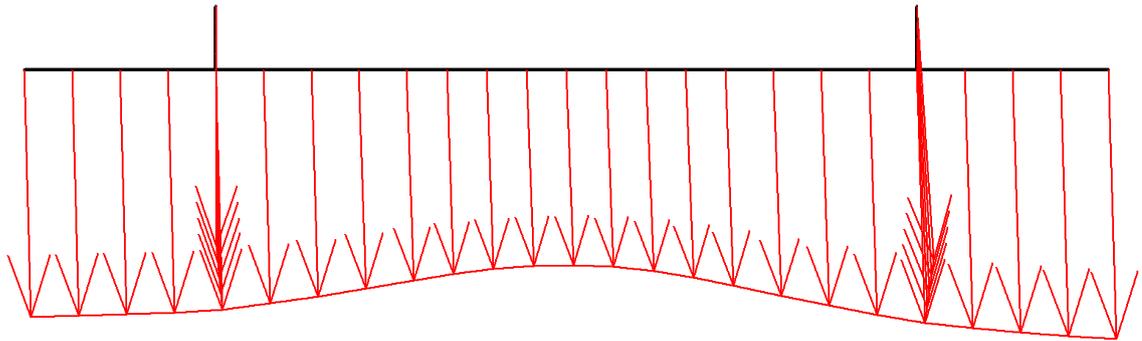
**Point plastic**

- Mohr-coulomb point
- Tension Cut-off point

**Figure 4.41 :** Point plastiques après le chargement dynamique

#### 4.6.4 Les coupes de calcul de déplacement total

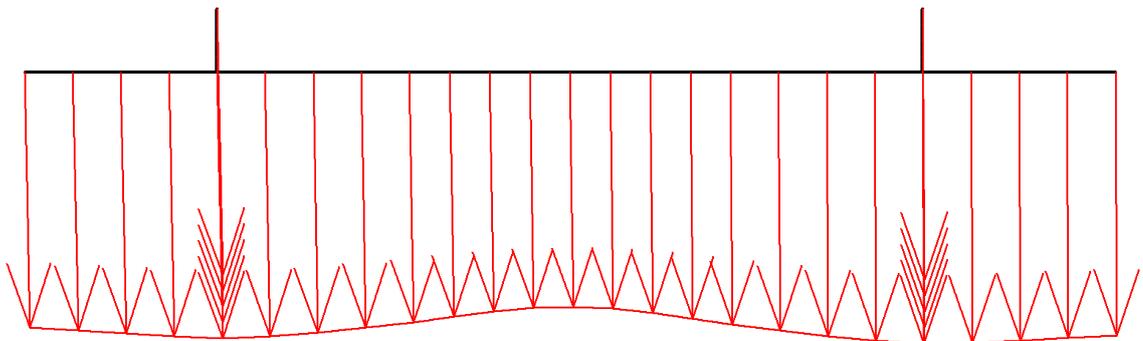
Les figures suivantes vont représenter une coupe de calcul de déplacement total des différents modèles de calcul pour la deuxième charge du modèle de charge 71 :



**Total displacement**

$$26.83 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

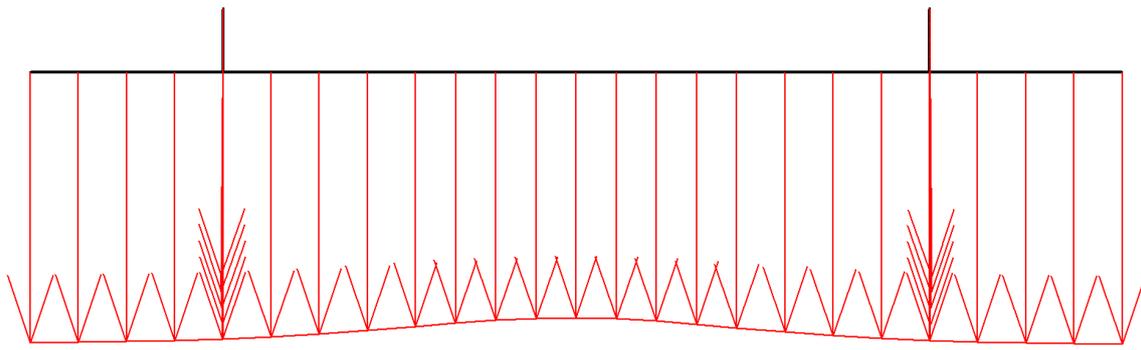
**Figure 4.42 :** Coupe de calcul de déplacement total après chargement statique



**Total displacement**

$$23.89 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

**Figure 4.43 :** Coupe de calcul de déplacement total après la combinaison des charges vertical avec l'effort transversale



Total displacement

$$687.05 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

**Figure 4.44** : Coupe de calcul de déplacement total après le chargement dynamique

**CHAPITRE V : RESULTATS ET  
INTERPRETATION**

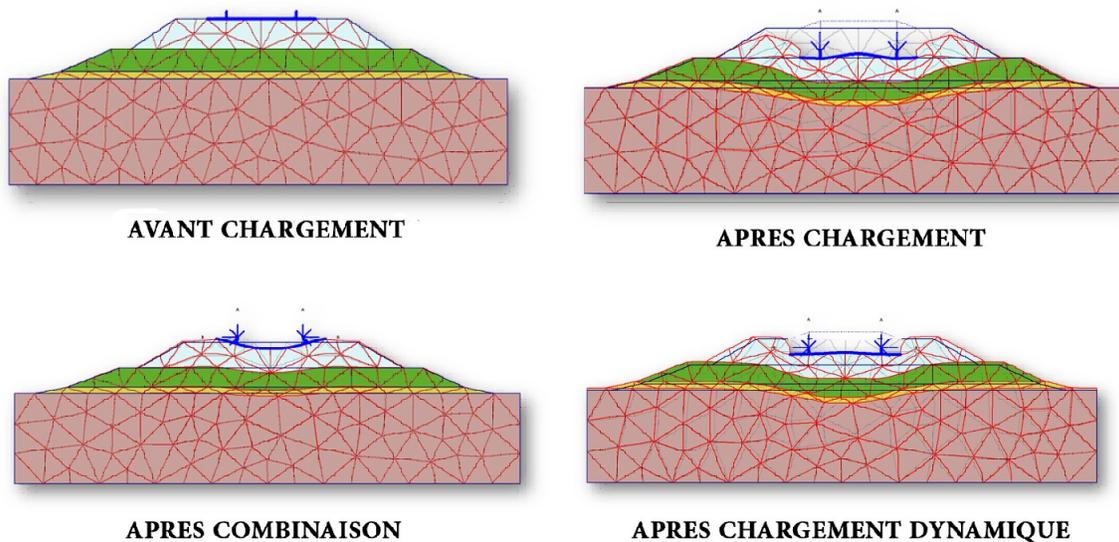
## CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATION

### 5.1 Introductions:

Dans ce chapitre le comportement de la voie (infrastructure et superstructure) en termes de contraintes et déformations et présenté. Pour vérifier le concept numérique proposé, les résultats numériques sont confrontés aux résultats obtenus à partir du modèle de référence utilisé.

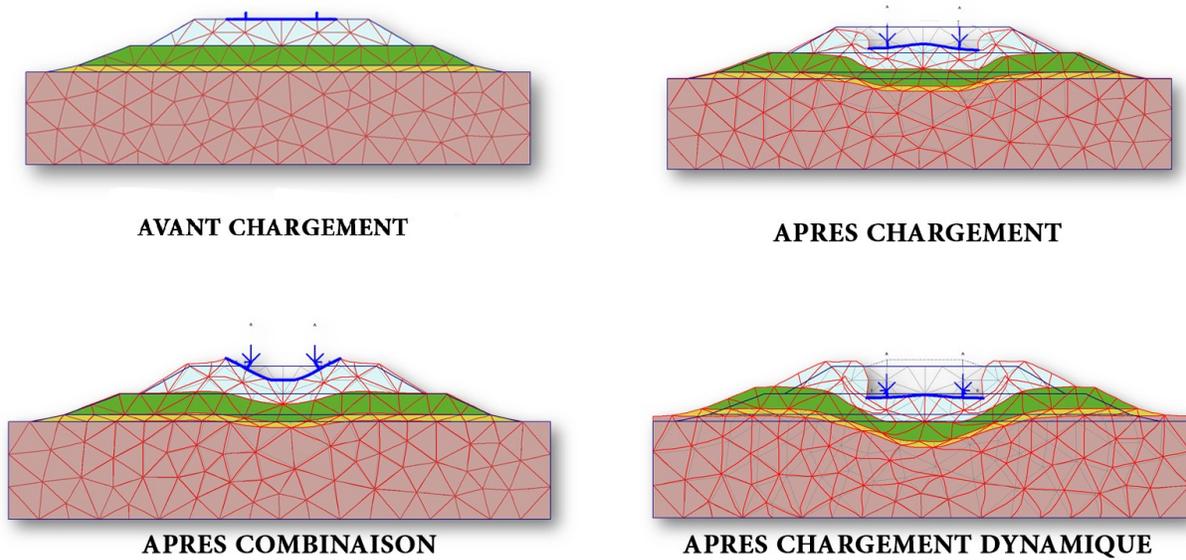
### 5.2 Comparaison et discussion des résultats :

La figure suivante va représenter une comparaison entre la déformation totale du maillage avant et après le chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) du première charge (80 KN) comme ci-dessous :



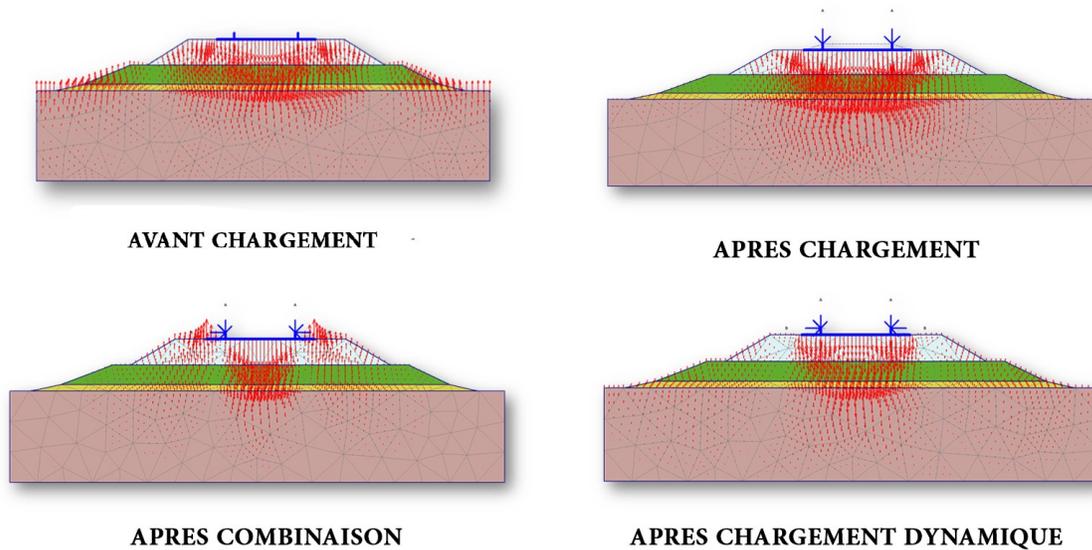
**FIGURE 5.1 :** Comparaison entre les déformations (80 KN)

La figure suivante va représenter une comparaison entre la déformation totale du maillage avant et après le chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) du deuxième charge (250 KN) comme ci-dessous :



**FIGURE 5.2 :** Comparaison entre les déformations (250 KN)

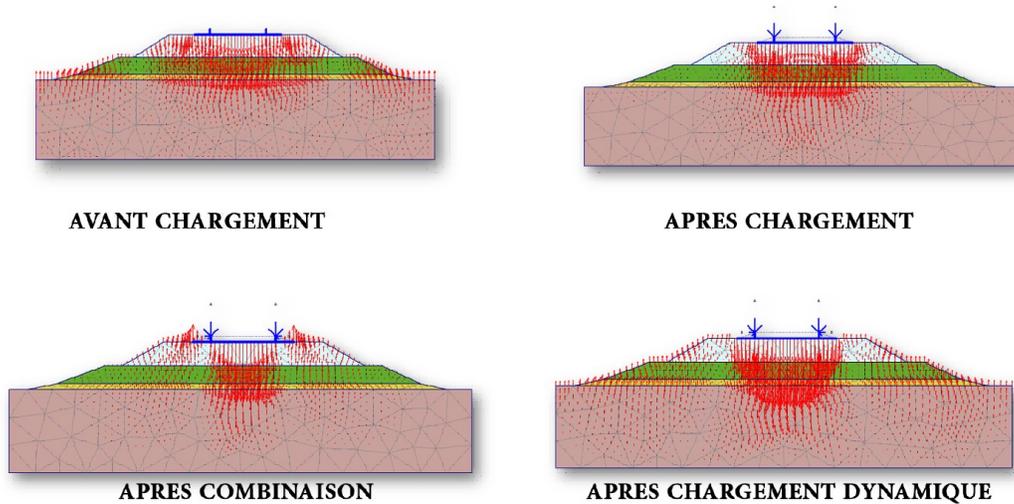
La figure suivante va représenter une comparaison entre déplacements verticaux avant et après le chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) du première charge (80 KN) comme ci-dessous :



**FIGURE 5.3 :** Comparaison entre les déplacements verticaux (80 KN)

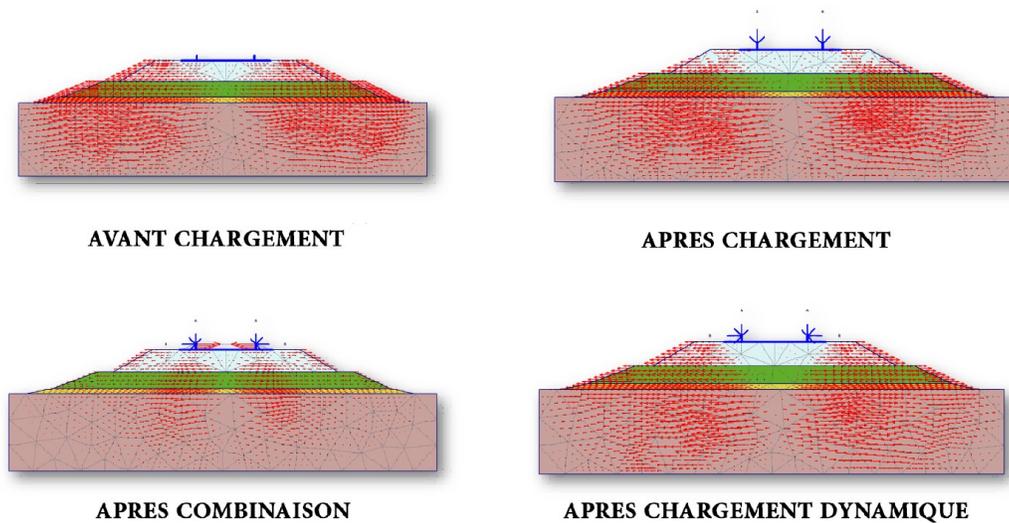
La figure suivante va représenter une comparaison entre déplacements verticaux avant et

après le chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) du deuxième charge (250 KN) comme ci-dessous :



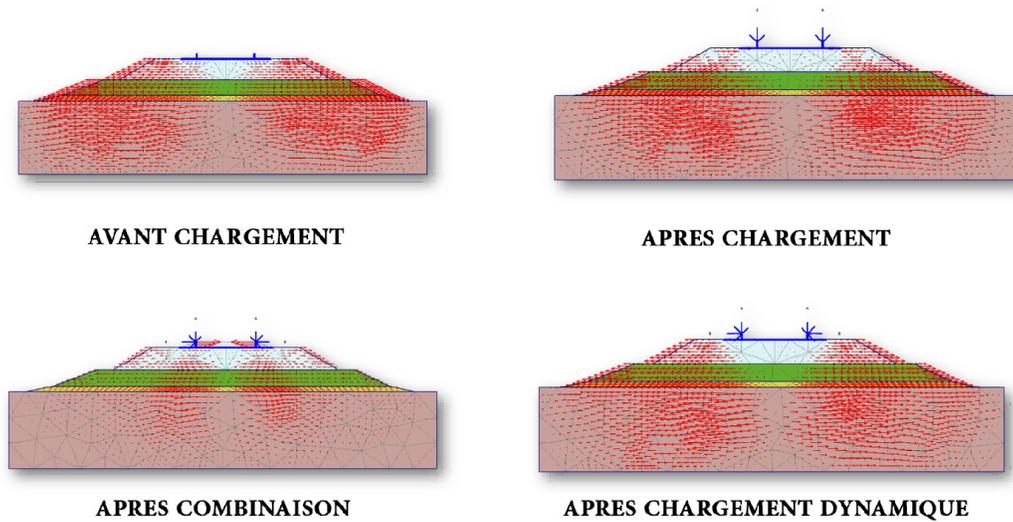
**FIGURE 5.4 :** Comparaison entre les déplacements verticaux (250 KN)

La figure suivante va représenter une comparaison entre déplacements horizontaux avant et après le chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) du première charge (80 KN) comme ci-dessous :



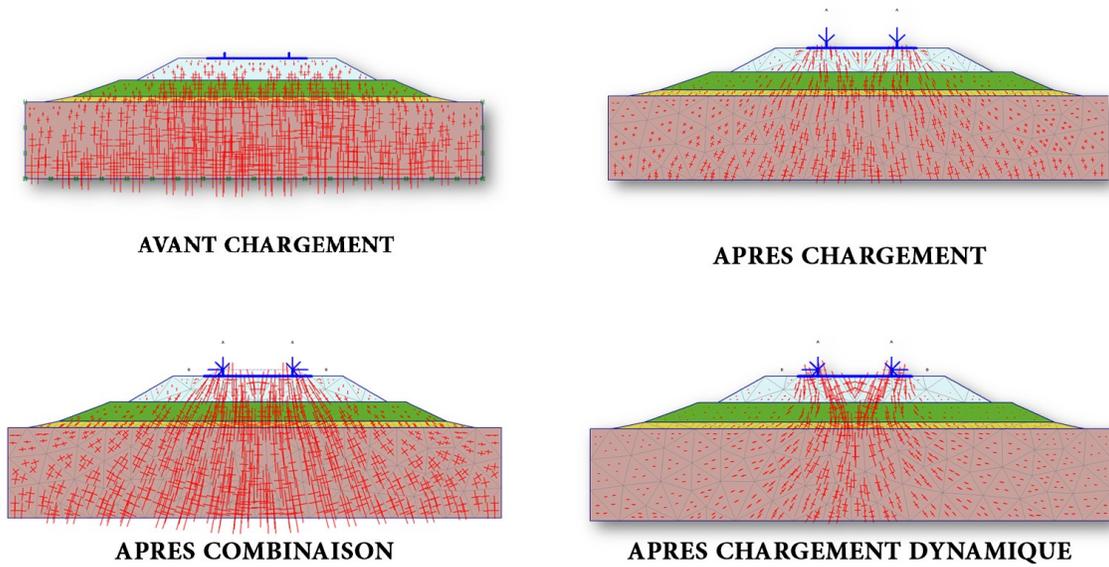
**FIGURE 5.5 :** Comparaison entre les déplacements horizontaux (80KN)

La figure suivante va représenter une comparaison entre déplacements horizontaux avant et après le chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) du deuxième charge (250 KN) comme ci-dessous :



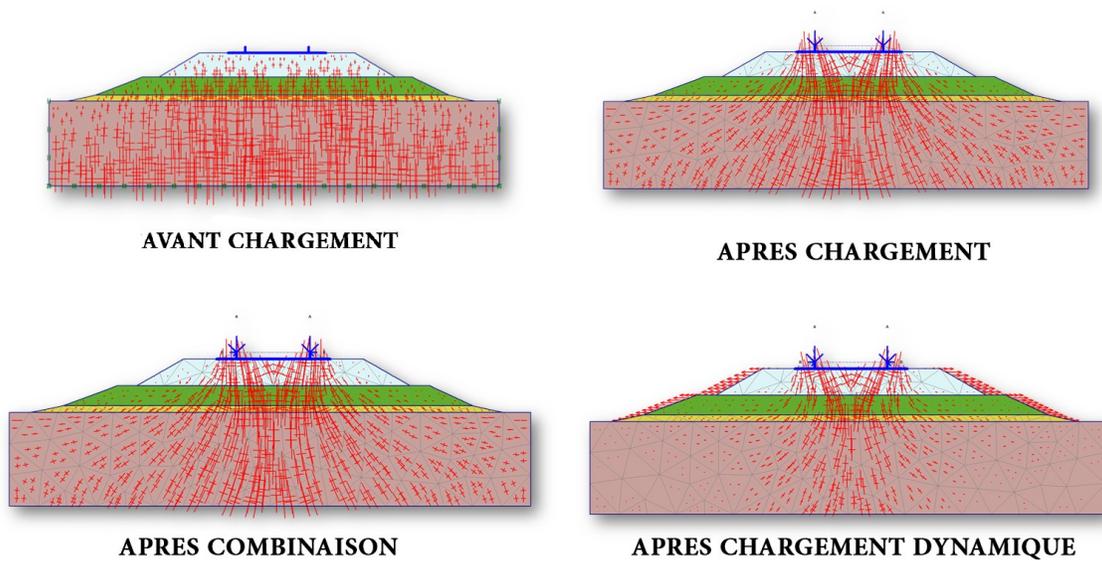
**FIGURE 5.6 :** Comparaison entre les déplacements horizontaux (250KN)

La figure suivante va représenter une comparaison entre les contraintes effective total avant et après le chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) du première charge (80 KN) comme ci-dessous :



**FIGURE 5.7 : Comparaison entre les contraintes (80 KN)**

La figure suivante va représenter une comparaison entre les contraintes effective total avant et après le chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) du deuxième charge (250 KN) comme ci-dessous :



**FIGURE 5.8 : Comparaison entre les contraintes (250 KN)**

Le tableau suivant va représenter une comparaison entre les déformations, déplacements et contraintes avant et après le chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) des différentes charges du model de charge 71 comme ci-dessous :

	80 KN				250 KN		
	Avant chargement	Après chargement	Après combinaison	Chargement dynamique	Après chargement	Après combinaison	Chargement dynamique
<b>Déformation (m)</b>	$535.88 \cdot 10^{-6}$	$6.03 \cdot 10^{-3} \text{m}$	$1.38 \cdot 10^{-3}$	$179.68 \cdot 10^{-3}$	$26.83 \cdot 10^{-3}$	$1.48 \cdot 10^{-3}$	$688.14 \cdot 10^{-3}$
<b>Déplacement vertical (m)</b>	$251.68 \cdot 10^{-6}$	$6.22 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-3}$	$179.68 \cdot 10^{-3}$	$26.83 \cdot 10^{-3}$	$1.48 \cdot 10^{-3}$	$688.14 \cdot 10^{-3}$
<b>Déplacement hozintal (m)</b>	$535.86 \cdot 10^{-6}$	$1.22 \cdot 10^{-3}$	$678.42 \cdot 10^{-6}$	$86.29 \cdot 10^{-3}$	$7.36 \cdot 10^{-3}$	$1.48 \cdot 10^{-3}$	$327.10 \cdot 10^{-3}$
<b>Contrainte effective (kn/m<sup>2</sup>)</b>	-60.11	-180.56	-94	-933.95	-337.23	-287.36	$-2.91 \cdot 10^3$

**Tableau 5.1** L'influence du chargement sur la structure d'assise ferroviaire

Lorsque la structure reste libre sans chargement les déplacements et les déformations ont des petites valeurs à cause du poids propre de la structure.

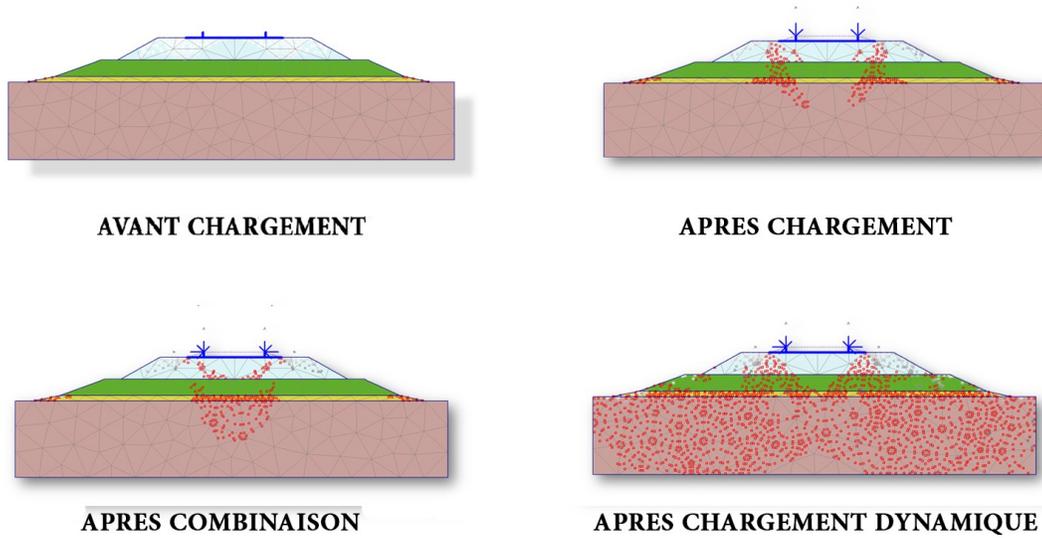
après le chargement statique une légère augmentation des valeurs une variation remarquable après le chargement dynamique qui développe la fatigue du système

A forcément les charge augmente les déplacements et les déformations augmente aussi

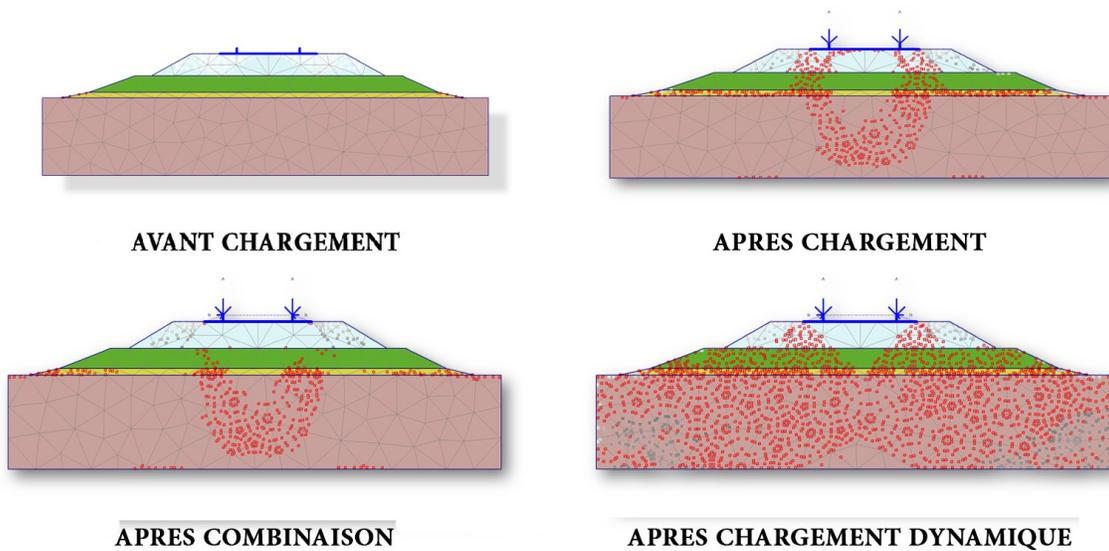
La même chose pour les contraintes nous remarquons que leurs valeurs se changent après l'application de la charge statique ou combiner avec l'effort de l'acet et après chargement dynamique

La figure suivante va représenter une comparaison entre le point plastic avant et après le

chargement (chargement vertical, combinaison avec l'effort de lacet et les surcharge dynamique) du 1<sup>er</sup> et 2<sup>em</sup> charge (80/250 KN) comme ci-dessous :



**FIGURE 5.9 :** Comparaison entre les points plastic (80 KN)



**FIGURE 5.10 :** Comparaison entre les points plastic (250 KN)

On remarque que les point plastic s'augmente parallèlement avec l'augmentation de la charge mobile du model de charge 71, la variation de cette charge développe les point plastic a

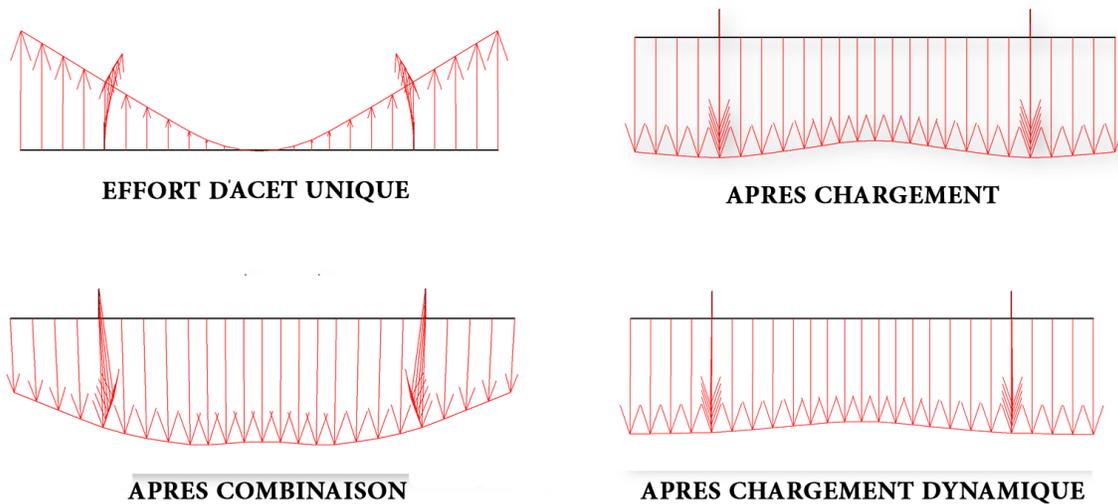
l'infrastructure.

Point- (tension out-off) point qui indique que les points de contrainte sont soumis à un effort de traction (tension).

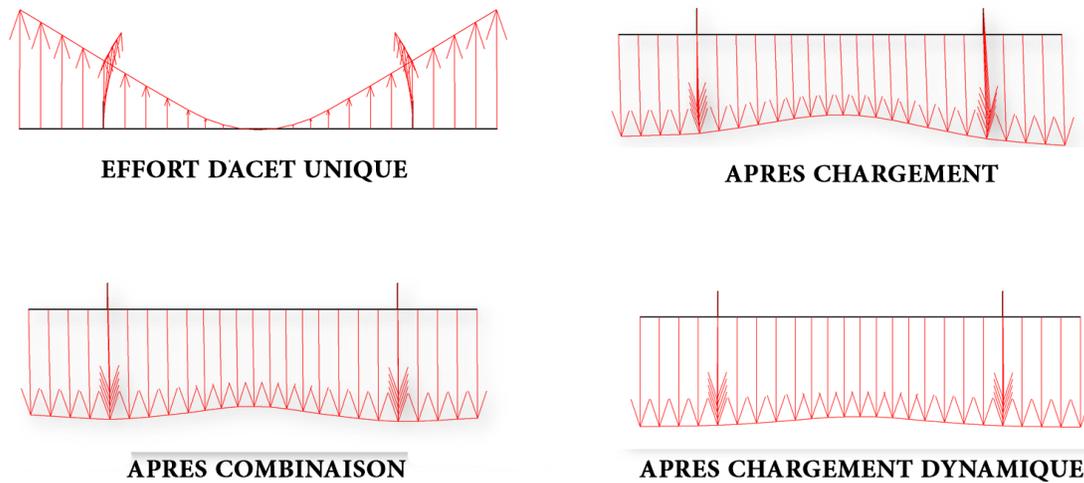
La répartition de la charge est uniforme presque sur toute les couches d'infrastructure -- plasticité (point de mohr-coulomb) est uniforme.

La combinaison du l'effet d'acet avec les charges verticales statique ou dynamique développe les point plastic, qui résulte la fatigue du système due à la traction engendrer par ce dernier.

Dans la suite Les figures suivantes vont représenter une comparaison entre les coupes de calcul du déplacement total des différent model de calcul pour la première charge et deuxième charge du model de charge 71 :



**FIGURE 5.11** : Comparaison entre les coupes de calcul du déplacement total (**80 KN**)



**FIGURE 5.12 :** Comparaison entre les coupes de calcul du déplacement total (**250 KN**)

Les déplacements totaux s'augmentent parallèlement avec l'augmentation de la charge mobile du model de charge 71

On remarque que l'effet de l'effort d'acet agir globalement sur la superstructure, néanmoins il engendrant un effort de traction sur le ballast.

Les déformations sont localisées à la section médiane de la traverse (l'entretoise), ce qui valide la vaste utilisation de ce type de traverse à l'échelle nationale ou international pour raison de la bonne élasticité.

## **CHAPITRES VI : CONCLUSION GENERALE**

---

## CHAPITRES VI : CONCLUSION GENERALE

De nos jours, la densité, la rapidité et la fiabilité des réseaux ferroviaires sont des indicateurs indiscutables du développement du transport public dans un Pays. La modernisation des trains (TGV), qui devient de plus en plus rapide et la fréquence du trafic ferroviaire, provoque inévitablement des dégradations importantes au niveau de la superstructure et de l'infrastructure de la voie, plus prononcées que pour les voies classiques. Ces dégradations sont généralement liées aux chargements importants de nature combinée (statiques et dynamiques) ce qui provoque la fatigue prématurée des matériaux constituant la voie et provoque parfois l'instabilité des infrastructures.

Il est donc nécessaire d'étudier l'effet des charges statiques et dynamiques sur l'instabilité des voies ferrées en raison des contraintes et des déformations causées par ces grandes charges des trains. Les chemins de fer jouent un rôle capital dans le domaine du transport aussi bien de transport des marchandises et le transport des personnes, et c'est grâce aux études en constante évolution, nous avons donc réalisé cette modeste étude pour comprendre le comportement de la structure d'assise ferroviaire.

La voie supporte des efforts verticaux, transversaux et longitudinaux. Ces deux derniers n'ont que peu d'influence sur la superstructure, par contre les efforts verticaux sont des actions déterminantes sur les éléments constitutifs.

Dans la présente analyse une structure ferroviaire type (de référence) a été modélisée numériquement en utilisant le logiciel en éléments finis le Plaxis, le développement du modèle numérique est basé sur un modèle expérimental de référence. La géométrie, les conditions aux limites, les matériaux ainsi que les conditions de chargement sont en adéquation avec le modèle de référence. La validation du modèle numérique proposé est réalisée par comparaison directe du comportement observé des résultats de la simulation numérique.

Le matériau (sol) a été modélisé par un modèle rhéologique basé sur le critère de Mohr-Coulomb, les rails, traverses ont été modélisés comme matériaux élastiques simples.

A partir des résultats obtenus il est évident que le système UIC 71 de chargement appliqué

combine assez rigoureusement les modes réels de chargement appliqués à la voie, relativement aux chargements classiques simplistes. Seul l'analyse numérique peut simuler l'application du chargement UIC 71, en tenant compte de la diversité des matériaux constituant la voie ferrée, leurs lois rhéologiques et fatigues.

## Reference bibliographique :

- (1) **Rikard Gustavson**. Static and dynamic finite element analyses of concrete sleepers. Thesis for the degree of licentiate of engineering, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, 2000.
- (2) EN 13230-1: 2002, Applications ferroviaires – voie – traverses et supports en béton – partie 1: prescriptions Générale.
- (3) U.I.C: Union International des chemins de fer.
- (4) **C. Esveld**. Modern railway track. Delft: MRT-Productions; 2001.
- (5) EN 13481-2, Applications ferroviaires – voie – Prescriptions de performance pour les systèmes de fixation – partie 2 : systèmes de fixation des traverses en béton. 2002.
- (6) EN 13230-3 : 2002, Applications ferroviaires – voie – traverses et supports en béton – partie 3 : traverses bi-blocs en béton armé
- (7) **J. Alias**. La voie ferrée - Techniques de construction et d'entretien. Eyrolles,deuxième édition, 1984.
- (8) **L. Fryba**, Vibration of Solids and Structures under Moving Loads, Thomas Telford, 3rd edition, 1999
- (9) **E.S. Eringen and A.C. Suhubi**. Elasto dynamics Vol. 2 - Linear theory. Academic Press, 1975.
- (10) **G. Sauvage**. Railway track vertical static behavior. INRETS / LTN, January 1993
- (11) **A. Alaoui and T. Naciri**. Les voies ballastées. Technical report,EUROBALT, CERAM, ENPC, 1995
- (12) **A. Al-Shaer**. Analyse des Déformations Permanentes des Voies Ferrées Ballastées : Approche Dynamique. Doctorate thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France. (2005).
- (13) **N. Guérin**, Approche expérimentale et numérique du comportement du ballast des voies ferrées, Doctorate thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées., Novembre 1996.
- (14) **V. Bodin, P. Tamagny, K. Sab, and P.-E. Gautier**. Fréquence critique de sollicitation lors du tassement a grand nombre de cycles d'un milieu granulaire. Colloque Physique et Mécanique des Matériaux Granulaires. Champs-sur-Marne, 5-7 Septembre, 2000. Actes des journées sciatiques du LCPC, tome 2, pages 291-296, 2000
- (15) **M. Balsan**, Pour un modèle mathématique de la voie ferrée moderne. Doctorate thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1980.
- (16) **G. Sauvage and R. Larible**. La modelisation par « elements finis » des couches d'assise de la voie ferrée. Revue Générale des Chemins de Fer. Septembre 1982.

- (17) **V. Prollidis**, La voie ferrée et sa fondation - modélisation mathématique, Doctocate thésis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1983
- (18) **V. Bodin**. Comportement du ballast des voies ferrées soumises à un chargement vertical et latéral. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, June 2001.
- (19) **D. Aubry**, D. Clouteau, and A. Modaressi. Interaction dynamique sol-structure. In Calcul tridimensionnel en géotechnique. Presse des Ponts et Chaussées, 1998.
- (20) **V.H. Nguyen**, Comportement dynamique de structures non-linéaires soumises à des charges mobiles. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Mars 2002.
- (21) Manuel de référence du Logiciel Plaxis 8.2 version 1.2 / General informations.PDF

### **Ancienne mémoire fine d'étude**

- Mesnadi Abdelouahad et Nouiouat Nibras « Comportement des structures d'assise ferroviaire sous l'effet des charges roulantes » Promotion 2019/2020
- Tahi mohamed « Etude par voie numérique du comportement de la Traverse bi- bloc utilisée dans les superstructures de voies ferrées » Promotion 2009/2010