

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : STRUCTURE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : BELDJOUDI Yasser

Interaction Sol-structure D'un pont situe sur la
voie ferré Ain TOUTA Msila

Soutenu devant le jury composé de :

.....

Université

Président

MINASRI ABDERAZZAK

Université

Rapporteur

.....

Université

Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

SOMMAIRE

TABLE DE FIGURE	6
LISTE DE TABLEAUX	8
REMERCIEMENTS	9
RESUME	10
ABSTRACT	11
ملخص	11
INTRODUCTION GENERALE	12
I.1. Introduction	15
I.2. Définition et origine d'un séisme	15
I.3. Définition d'une faille	16
I.4. Les ondes sismiques	19
I.4.1. Ondes de volume	20
I.4.2. Ondes de surface	21
I.5. Classification des séismes	22
I.6. La mesure d'une force d'un séisme	22
□ La magnitude	23
□ L'intensité	24
I.7. Evaluation de l'aléa et du risque sismique	24
I.7.1. Aléa régional	25
I.7.2. Aléa local	26
I.8. L'aléa et le risque sismique en Algérie	26
I.9. Zones sismiques (RPA99)	30
I.10. Conclusion	31
II.1. Introduction	33
II.2. Définition d'un pont	33
II.3. Les éléments constituant un pont	33
II.3.1. Le tablier	34
II.3.2. Les appuis	34
II.3.3. La fondation	34
II.4. Le rôle des ponts	34

II.5.	Les types de ponts courants.....	35
II.5.1.	Pont à poutre	35
II.5.2.	Pont Dalle	35
II.5.3.	Pont mixte	36
II.6.	Charges et surcharges	37
II.6.1.	La charge permanente (CP)	37
II.6.2.	Surcharge d'exploitation.....	37
II.6.2.1.	Système de surcharges A.....	37
II.6.2.2.	Système de surcharges B.....	39
II.6.2.3.	Le système MC.....	42
II.6.2.4.	Surcharge de trottoir.....	43
II.7.	Les combinaisons d'action	43
II.8.	Les différents éléments antisismiques d'un pont.....	44
II.9.	Présentation de l'ouvrage	46
II.10.	Caractéristiques de l'ouvrage.....	46
II.11.	Profil de l'ouvrage	47
II.12.	Conclusion	48
III.1.	Introduction	50
III.2.	Notion de l'Interaction Sol-Structure (ISS).....	50
III.2.1.	Interaction Cinématique.....	51
III.2.2.	Interaction inertielle.....	51
III.3.	Etude du problème d'interaction-sol structure	52
III.3.1.	Model analogique simplifie	52
III.4.	Les effets de l'ISS	53
III.5.	Comportement des sols sous sollicitations sismiques	54
III.5.1.	Elasticité linéaire des sols	54
III.5.2.	Modèle élasto-plastique	55
III.6.	Formulation d'un problème d'interaction sol-structure.....	55
III.7.	Les différentes méthodes pour prendre en compte l'ISS	57
III.7.1.	Méthodes globales (Méthodes directes)	57
III.7.2.	Méthode sous structure	58
III.7.2.1.	Méthode de frontière	59

III.7.2.2. Méthode de volume	60
III.8. CONCLUSION	61
IV.1. Introduction	63
IV.2. Description de l'interface graphique	63
IV.3. Le système d'options du code Plaxis.....	64
IV.3.1. Les conditions aux limites en déplacement	64
IV.3.2. Le Maillage	65
IV.3.3. Les contraintes initiales dues au poids des terres	66
IV.4. Les modèles de comportements intégrés dans PLAXIS.....	68
IV.4.1. Modèles élastique linéaire.....	68
IV.4.2. Lois de comportement élasto-plastique	70
IV.4.3. Modèle de Mohr-Coulomb	71
IV.5. Module dynamique du code PLAXIS	72
V.1. Introduction	76
V.2. Modèle de calcul retenu.....	76
V.3. Caractéristiques des matériaux	77
V.3.1. Le Sol de fondation.....	77
V.3.2. La semelle	78
V.4. Génération de maillage.....	79
V.5. Conditions initiales	79
V.6. Sollicitations sismiques	80
V.7. Procédure de calculs	82
VI.1. Introduction	86
VI.2. Résultats des calculs	86
VI.2.1. Déplacement horizontal imposé à la base.....	86
VI.3. Effet des ondes horizontal	97
VI.4. Conclusion	100
Conclusion générale :	101
Bibliographies.....	102

NOTATION ET ABREVIATIONS

Lettres Grecques :

ν : Le coefficient de poisson.
 Φ : Angle de frottement effectif.
 Ψ : Angle de dilatance.
E : Le module de Yong.
R : Force de réaction.
 Θ : Angle du plan de rupture.
 σ : Contrainte.
 τ : Contrainte de cisaillement (tangentielle).
C : Cohésion (effective).

Lettres Latines :

EA : Rigidité normale.
EI : Rigidité flexion
G : Le module de cisaillement.
K : Le module de compressibilité volumique.
KX : Perméabilité horizontale.
KY : Perméabilité verticale.
K : Coefficient de réaction.
K0 : Coefficient des terres au repos.
 γ_{dry} : Poids volumique sec.
 γ_{wet} : Poids volumique humide.
m : Puissance.
P : Pression
U : Déplacement.
W : Poids
{Qf } : Vecteur de charge.
L:Longueur.
VP:Vitesse des ondes P.
VS: Vitesse des ondes S.
M: Magnitude.
Abréviations :

MEF : Méthode des éléments finis.
ISS : Interaction sol-structure.

TABLE DE FIGURE

FIGURE I.2-1 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN SEISME	16
FIGURE I.3-1 : RUPTURE DE SURFACE INDUITE PAR LE SEISME DE NORCIA, ITALIE, LE 26 OCTOBRE 2016 (MAGNITUDE 6,5). (PHOTO S. BAIZ)	17
FIGURE I.3-2 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE FAILLE NORMALE	18
FIGURE I.3-3 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE FAILLE INVERSE	18
FIGURE I.3-4 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE FAILLE EN DECROCHEMENT .	19
FIGURE I.4.1-1 : ONDES P OU ONDES PRIMAIRES	20
FIGURE I.4.1-2 : ONDES S OU ONDES SECONDAIRES.....	21
FIGURE I.4.2-1 : L'ONDE DE LOVE.....	21
FIGURE I.4.2-2 : L'ONDE DE RAYLEIGH	22
FIGURE I.8-1 : CONTEXTE SISMO-TECTONIQUE DE LA COLLISION AFRIQUE-EURASIE.	27
FIGURE I.8-2 : HISTORIQUE DES SEISMES EN ALGERIE	28
FIGURE I.9-1 : CARTE DE ZONAGE SISMIQUE DU TERRITOIRE NATIONAL D'ALGERIE (RPA99V 2003)	30
FIGURE II.3-1 : SCHEMAS POUR LES ELEMENTS CONSTITUANTS UN PONT.....	33
FIGURE II.5.1-1 : PHOTO D'UN PONT A POUTRES	35
FIGURE II.5.2-1 : PHOTO D'UN PONT DALLE.....	36
FIGURE II.5.3-1 : PHOTO D'UN PONT MIXTE.....	37
FIGURE II.6.2.2-1 : SYSTEME DE CHARGE BC	40
FIGURE II.6.2.2-2 : SYSTEME DE CHARGE B.....	41
FIGURE II.6.2.2-3 : SYSTEME DE CHARGE BR.....	41
FIGURE II.6.2.3-1 : SYSTEME DE CHARGE MC	42
FIGURE II.6.2.3-2 : SYSTEME DE CHARGE ME	43
FIGURE II.8-1 : AMORTISSEURS HYSTERETIQUES.....	45
FIGURE II.9-1 : PONTS POUTRE FRANCHISSANT LA VOIE FERREE DE AIT TOUTA.....	46
FIGURE II.11-1 : PROFIL EN LONG	47
FIGURE II.11-2 : PROFIL EN TRAVERS.....	47
FIGURE III.2.2-2 : SCHEMATISATION DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE (PECKER, 2010)	52
FIGURE III.3.1-1 MODELE ANALOGIQUE SIMPLIFIE D'INTERACTION SOL-STRUCTURE..	53
FIGURE III.4-1 : LECTURE SPECTRALE MONTRANT LES EFFETS DE LA PRISE EN COMPTE DE L'ISS.....	54
FIGURE III.5.1-2 : LOI DE COMPORTEMENT ELASTIQUE LINEAIRE.....	54
FIGURE III.6-1 DECOMPOSITION DU PROBLEME D'INTERACTION SOL STRUCTURE.....	56
FIGURE III.7.1-2 : SCHEMATISATION D'UN PROBLEME D'INTERACTION SOL STRUCTURE EN ELEMENTS FINIS.....	58
FIGURE III.7.2-1 : LES DIFFERENTES METHODES POUR PRENDRE EN COMPTE L'ISS	59
FIGURE III.7.2.1-1 : METHODE DE SOUS-STRUCTURES: METHODE DE FRONTIERE	60
FIGURE III.7.2.2-2 : METHODE DE SOUS-STRUCTURES : METHODE DE VOLUME	61
FIGURE IV.2-2 : INTERFACE UTILISE POUR L'ENTREE DES DONNEES	64
FIGURE IV.3.1-2 CONDITION AUX LIMITES	65
FIGURE IV.3.2-1 EXEMPLE DE MAILLAGE	66
FIGURE IV.3.3-1 : CONTRAINTES INITIALES (CONDITION K0)	67
FIGURE IV.3.3-3 : INTERFACE UTILISATEUR POUR LE CHOIX DU MODELE DE COMPORTEMENT DU SOL RETENU POUR LES CALCULS.....	68

FIGURE IV.4.1-2 : DES PARAMETRES DU MODELE ELASTIQUE LINEAIRE	69
FIGURE IV.4.1- 3 : FENETRE DES PARAMETRES AVANCES DU MODELE ELASTIQUE LINEAIRE	70
FIGURE IV.4.3-1 : PARAMETRES DE MODELE MOHR-COULOMB	72
FIGURE IV.5-2 : FENETRE D'INSERTION D'UN FICHER ACCELEROGRAMME.....	73
FIGURE IV.5-3 : FENETRE DE COMMANDE D'UNE EXCITATION HARMONIQUE	74
FIGURE IV.2-2 : PROFIL GEOMETRIQUE RETENU	76
FIGURE IV.4-2 : MAILLAGE DU MODELE.....	79
FIGURE IV.5-1 : GENERATION DES CONTRAINT INITIALES	80
FIGURE IV.6-1 : CAS HORIZONTAL IMPOSEE A LA BASE DU MODELE DE CALCUL	81
FIGURE IV.6-2 : PHASES DE CALCUL.....	82
FIGURE IV.7-1 : ACTIVATION DE LA CHARGE DYNAMIQUE.....	83
FIGURE IV.7-2 : TRACE DES POINTS SUR LE PROFIL.....	84
FIGURE V.2.1-2 : MAILLAGE DEFORME DU PROFIL.....	87
FIGURE V.2.1-4 : VALEUR DES CONTRAINTES.....	88
FIGURE V.2.1-5 : LES DEPLACEMENTS TOTAUX	89
FIGURE V.2.1-6 : DEPLACEMENT-TEMPS SUIVANT L'AXE XX'	90
FIGURE V.2.1-8 : DEPLACEMENT-TEMPS L'AXE YY'	91
FIGURE V.2.1-9 : VITESSE-TEMPS SUIVANT L'AXE XX'	92
FIGURE V.2.1-11 VITESSE-TEMPS SUIVANT L'AXE YY'	93
FIGURE V.2.1-12 ACCELERATION-TEMPS SUIVANT L'AXE XX	94
FIGURE V.2.1-13 ACCELERATION-TEMPS SUIVANT L'AXEYY	95
FIGURE V.2.1-14 LA FORCE (FX) EN FONCTION DU TEMPS	96
FIGURE V.3-1 SCHEMATISATION DES POINTS DE L'AXE XX'	98
FIGURE V.3-2 : DEPLACEMENTS DES POINTS EN FONCTION DE TEMPS L'AXE XX'	99
FIGURE V.3-3 DEPLACEMENTS DES POINTS EN FONCTION DE TEMPS L'AXE YY'.....	99

LISTE DE TABLEAUX

TABLEAU I.6-1 : ECHELLE DE MAGNITUDE	24
TABLEAU I.9-1 ZONAGE SISMIQUE DU TERRITOIRE NATIONAL D'ALGERIE	31
TABLEAU II.6.2.1-2 : COEFFICIENT DE DEGRESSIVITE TRANSVERSALE A1 DE A(I)	38
TABLEAU II.6.2.1-3 : COEFFICIENT DE DEGRESSIVITE TRANSVERSALE A2 DE A(I)	39
TABLEAU II.6.2.2-1 : LES VALEURS DU COEFFICIENT BC ET BT	42
TABLEAU IV.3.1-1 : PROPRIETES DU SOL DE FONDATION	78
TABLEAU V.1-2 : DONNEES DES POINTS.....	86
TABLEAU V.2.1-2 VALEUR MAXIMALE AUX POINTS CONSIDERES.....	97
TABLEAU V.3-1 : RESULTATS DES PARAMETRES DE MOUVEMENT DANS LE CAS HORIZONTAL	98

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon parcours et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire M. MENASRI, professeur de Génie Civil à l'université de Mohamed Boudiaf, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je dédie également ce travail à ma famille, en l'occurrence mon père Khaled et ma défunte mère Zahia ainsi que mes frères et sœurs.

RESUME

Dans le domaine du génie parasismique, l'Interaction du Sol avec la Structure (ISS) est un phénomène important à considérer pour espérer rendre compte du comportement réel d'une structure et donc évaluer sa vulnérabilité. Dans le présent travail nous réalisons une étude permettant d'évaluer les risques et les conséquences de cette interaction sur un pont franchissant la voie ferrée de AIT TOUTA.

La modélisation est réalisée par le biais du code PLAXIS qui permet d'analyser la stabilité de cet ouvrage et de déterminer le déplacement et la contrainte en tenant compte de l'interaction sol fondation, la méthode utilisée est la méthode des éléments finis directe qui est la plus couramment utilisée et qui a prouvé son efficacité dans ce domaine

Mots-clés:

Séisme, mouvement sismique, champ libre, sollicitation sinusoïdale, onde sismique, accélération sismique, pont poutre, simulation numérique, PLAXIS2d

ABSTRACT

In the field of earthquake engineering, the interaction of the soil with the structure (ISS) is an important phenomenon to consider in order to hope to account for the real behavior of a structure and therefore assess its vulnerability. In the present work we are carrying out a study to assess the risks and consequences of this interaction on a bridge crossing the AIT TOUTA railway line.

The modeling is carried out by the PLAXIS code which makes possible the analyze of the stability of this structure and to determine the displacement and the stress taking into account the soil-foundation interaction, this amounts to examining the factors characterizing the seismic movements, the method used is the direct global method which is the most used and which has proven its effectiveness in this field

ملخص

في مجال هندسة الزلازل، تفاعل التربة مع هيكل هي ظاهرة مهمة يجب مراعاتها من اجل الامل في حساب السلوك الحقيقي للبنية وبالتالي تقييم مدى تعرضها للخطر في هذا العمل، نقوم بإجراء دراسة لتقييم مخاطر وعواقب هذا التفاعل على جسر يعبر خط سكة حديد عين توتة المسيلة

تنفيذ النمذجة باستخدام PLAXIS مما يجعل من الممكن تحليل استقرار هذا الهيكل وتحديد الإزاحة والضغط مراعاة تفاعل التربة والأساس

الطريقة المستخدمة هي طريقة العناصر المحدودة المباشرة وهي الأكثر استخدامًا والتي أثبتت فعاليتها في هذا المجال

الكلمات المفتاحية: الزلزال, الحركة الزلزالية, الحقول الحرة, شرط التماس, الموجات الزلزالية, التسارع الزلزالي, جسر شعاع, المحاكات العددية, بلاكسيس ثنائي الأبعاد

INTRODUCTION GENERALE

Les efforts de recherche en ingénierie parasismique de ces trente dernières années ont permis l'élaboration de règles de construction fiables appliquées aux structures neuves. En revanche, la vaste question de la classification des constructions des ponts et de l'estimation de leurs vulnérabilités ont été encore peu abordée. Pourtant, ces derniers constituent un enjeu majeur dans l'établissement des règles de construction car ils présentent des risques considérables en cas de séismes.

En effet, les séismes entraînent des risques non négligeables qui peuvent causer des effondrements et souvent des fatalités humaines, ce phénomène constitue un enjeu essentiel dans le domaine du génie civil, et il doit être pris en considération avec la plus grande précision afin de mettre en œuvre les moyens permettant de maîtriser les conséquences.

Notre travail consiste à étudier l'interaction du sol structure dans le cadres des ponts, nous avons pris l'exemple d'un pont situé sur la voie ferré Ain TOUTA dans la wilaya de Msila afin d'évaluer et d'estimer les risques encourus

Il est constitué de plusieurs chapitres permettant dans un premier abord, de définir les différents thèmes abordés, qui ont un impact sur la compréhension de notre travail, la seconde partie sera destinée aux travaux pratiques réalisés, le présent mémoire est divisé comme suit

Un premier chapitre, qui détaille les notions du séisme et les risques entraînés par ce dernier, nous allons également exposer les différents paramètres permettant de prévoir les séismes, nous concluons le chapitre par le risque sismique en Algérie

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des ponts, nous détaillerons tous les aspects constituant un pont, ainsi que les charges et les surcharges qui doivent être prises en compte lors de la conception des ponts

Le troisième chapitre sera destiné à l'étude de l'interaction sol structure, nous définirons l'interaction sol structure et tous les aspects liés à cette dernière, en effet, de nombreux aspects nécessitent une étude approfondie pour résoudre complètement un problème d'interaction sol-

structure, ce sont la définition de l'aléa sismique et du mouvement résultant, l'étude du comportement du sol sous chargement cyclique, évaluation de la réponse du sol en champ libre, et celle des structures sous chargement dynamique. Mis à part ce dernier aspect, les autres ont fait l'objet des chapitres précédents. L'analyse dynamique des structures ne sera pas abordée.

Dans ce chapitre nous allons également abordés les méthodes permettant d'aborder la problématique ISS, nous détaillerons la méthode choisie au sein de notre travail

Le quatrième chapitre présentera les principes du code de calcul PLAXIS V8.2 utilisé pour élaborer les simulations numériques ainsi que les modèles de comportement utilisé.

Le dernier chapitre sera focalisé sur les calculs mené dans le cadre de ce travail, une application numérique a pour but d'étudier l'interaction entre une fondation superficielle et le sol d'assise, constitué d'une couche de sol homogène. On s'est restreint au comportement du sol type élastique linéaire de type drainé vu que les sollicitations sismiques sont très brèves, dans cette simulation numérique, il est question de déterminer les contraintes, les déformations, et l'accélération au niveau du massif de sol-fondation, et des éléments de la structure (l'influence de la profondeur).

Une conclusion clôturera le présent mémoire avec tous les résultats que nous avons constaté pour cette étude

CHAPITRE I : NOTIONS DE BASE SUR LES SEISME

I.1. Introduction

Le séisme est considéré comme la catastrophe la plus meurtrière et la plus destructible dans le monde, il provient de la fracturation des roches en profondeur ; celle-ci est due à l'accumulation d'une grande énergie qui se libère, créant des failles, au moment où le seuil de rupture mécanique des roches est atteint.

Ce phénomène entraîne des risques non négligeables qui peuvent causer des effondrements et souvent des fatalités humaines, il constitue un enjeu essentiel dans le domaine du bâtiment et du génie civil et il doit être pris en considération avec la plus grande précision afin de mettre en œuvre les moyens permettant de maîtriser les conséquences.

Dans le présent chapitre, nous allons détailler l'origine et les effets des séismes, évaluer l'aléa et le risque sismique, et illustrer l'étude des différents effets induits par des séismes passés qui ont permis d'obtenir des informations utiles pour estimer l'aléa sismique.

I.2. Définition et origine d'un séisme

Un séisme correspond au glissement très brutal de deux parts de l'écorce terrestre appelés compartiments tectoniques, soit au sein de la couverture sédimentaire, soit dans la lithosphère elle-même (les 100 premiers kilomètres de la Terre). Ces compartiments, situés à plus ou moins grande profondeur, se trouvent séparés par une faille. Lorsque le jeu de la faille se produit, des ondes sismiques sont émises : elles se propagent jusqu'à la surface de la Terre où elles peuvent alors être détectées par des capteurs appelés sismomètres et enregistrées par des appareils appelés sismographes. [1]

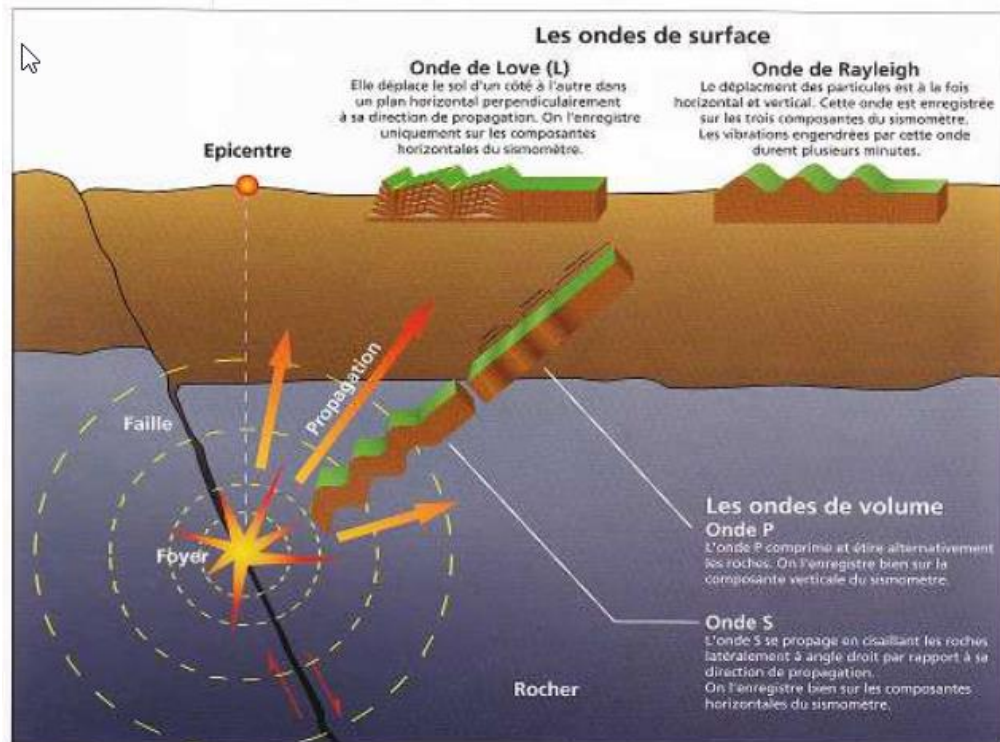


Figure I.2-1 : Représentation schématique d'un séisme

I.3. Définition d'une faille

Un séisme est dû à la rupture d'une faille dans les profondeurs de la Terre, et cette cassure peut parfois atteindre la surface terrestre ; on parle alors de rupture de surface. Ce déplacement relatif du sol, de part et d'autre de la faille est permanent et, avec l'accumulation dans le temps de séismes similaires, il contribue à la création des reliefs qui caractérisent les régions proches des failles. Ce déplacement permanent sur la faille est très fréquent pour les séismes de forte magnitude. Il existe en effet une relation entre la magnitude du séisme (son énergie) et la dimension de la faille rompue. L'émergence en surface de la faille est fréquemment observée lorsque la magnitude dépasse 6. Les modifications de paysage peuvent être particulièrement importantes lors des grands séismes avec un déplacement vertical (comme par exemple en Italie centrale en 2016).



Figure I.3-1 : Rupture de surface induite par le séisme de Norcia, Italie, le 26 octobre 2016 (Magnitude 6,5). (Photo S. Baiz)

Devant la contrainte imposée par le mouvement des plaques (mouvements de rapprochement ou d'écartement ou bien encore de coulissage des plaques rigides), les roches superficielles se déforment de façon élastique jusqu'à un certain point de rupture à partir duquel elles cassent brutalement le long d'une ou plusieurs failles.

Les parois de la faille mises en mouvement, frottent l'une contre l'autre de telle sorte qu'il y a dissipation de l'énergie d'une part sous forme de chaleur obtenue par frottement, et d'autre part sous forme de vibrations, les ondes sismiques, qui se propagent dans toutes les directions à partir du foyer et que l'on peut enregistrer sur un sismomètre. On peut illustrer facilement cette notion avec l'image de la pierre jetée à l'eau. Celle-ci donne naissance à des ondes qui s'éloignent du point d'impact. De la même manière, les ondes sismiques se propagent à partir du foyer d'un tremblement de terre.

Par conséquent, la très grande majorité des séismes est localisée le long des failles. On appelle mécanisme au foyer, le mécanisme permettant de définir quel type de faille intervient dans le tremblement de terre, ainsi que l'orientation de la faille et la direction de glissement des blocs sur cette faille. On peut ainsi définir la nature convergente ou divergente des mouvements à l'origine des séismes.

Chapitre I : NOTIONS DE BASE SUR LES SEISMES

Le mécanisme au foyer d'un séisme est généralement une combinaison de mécanismes simples. Il existe trois sortes de failles et trois sortes de mécanismes au foyer. On représente le type de mécanisme au foyer par une sphère centrée autour du foyer du séisme. Cette sphère est découpée en quatre cadrans en lien avec le sens du mouvement des ondes P. À chaque type de faille, correspond ainsi un diagramme de mécanisme au foyer.

- **Les failles normales** : elles résultent de mouvement d'écartement (divergence) qui entraîne un étirement des roches initiales

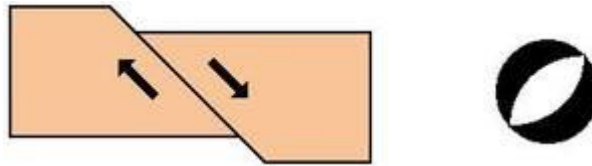


Figure I.3-2 : Représentation schématique d'une faille normale

- **Les failles inverses** : elles résultent de mouvement de rapprochement (convergence) qui entraîne un raccourcissement des terrains initiaux

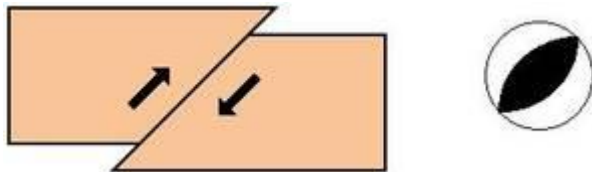


Figure I.3-3 : Représentation schématique d'une faille inverse

- **Les failles en décrochement** : elles provoquent un déplacement des blocs uniquement dans le sens horizontal (vue du dessus)

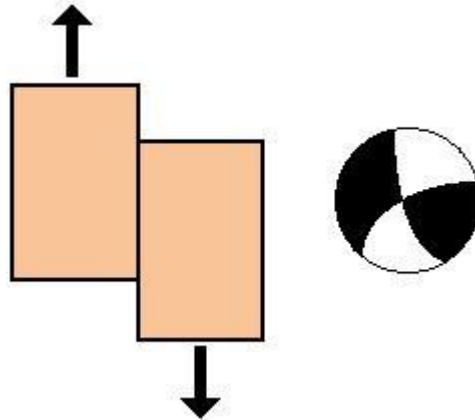


Figure I.3-4 : Représentation schématique d'une faille en décrochement

Les failles sont classées également comme suit :

- **Faille active** : C'est une faille qui a joué pendant le régime sismotectonique actuel et par conséquent jouera de nouveau dans le futur.

La majorité des séismes à l'échelle locale se produisent fort probablement le long des failles déjà existantes, car les forces tectoniques ne sont probablement pas assez importantes pour donner naissance à de nouvelles failles. Mais ces forces sont plutôt capables de réactiver des failles déjà existantes, soit le long des zones de faiblesse de la croûte terrestre.

- **Faille non active** : Cette définition est relative aux failles ayant joué durant une période mais présente un caractère d'inactivité dans le régime sismotectonique actuel.

I.4. Les ondes sismiques

Les vibrations engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. Ces ébranlements, qui se déplacent sous forme d'ondes, traversent le globe et donnent des indications irremplaçables sur sa constitution. Les ondes sismiques sont des ondes élastiques, c'est-à-dire que l'onde peut traverser un milieu sans modifier durablement ce milieu. L'impulsion de départ va « pousser » des particules élémentaires, qui vont « pousser » d'autres particules et reprendre leur place. Ces nouvelles particules vont « pousser » les particules suivantes et reprendre leur place, etc.

Chapitre I : NOTIONS DE BASE SUR LES SEISMES

On distingue les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface. Elles se succèdent et se superposent sur les enregistrements des sismomètres. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques traversées, c'est pourquoi, les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

I.4.1. Ondes de volume

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale augmente avec la profondeur. Il s'agit des :

- **Ondes P ou ondes primaires**, appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde. Ce sont les plus rapides (6km.s^{-1} près de la surface) et sont enregistrées en premier sur un sismogramme. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre et sont bien visibles sur la composante verticale du sismomètre.

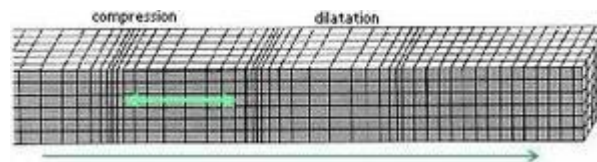


Figure I.4.1-1 : Ondes P ou ondes primaires

- **Ondes S ou ondes secondaires**, appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales. À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau de la Terre. Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P, elles apparaissent en deuxième sur les sismogrammes et sont bien visibles sur les composantes horizontales du sismomètre.

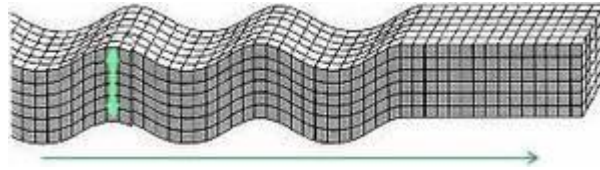


Figure I.4.1-2 : Ondes S ou ondes secondaires

I.4.2. Ondes de surface

Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte. On distingue :

- **L'onde de Love** : le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S sans mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices. On les enregistre essentiellement sur les composantes horizontales du sismomètre.

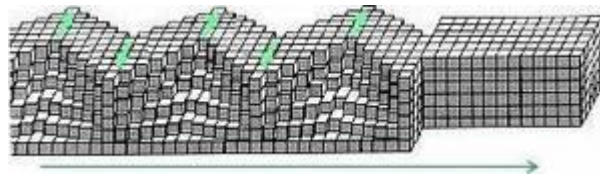


Figure I.4.2-1 : L'onde de Love

- **L'onde de Rayleigh** : le déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, un mouvement à la fois horizontal et vertical, elliptique en fait. Cette onde est enregistrée sur les trois composantes du sismomètre et les vibrations engendrées par cette onde durent plusieurs minutes.

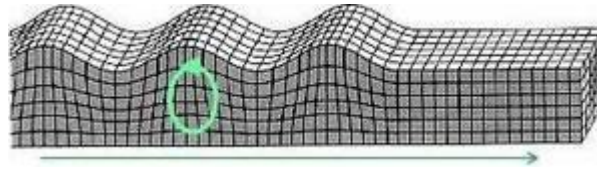


Figure I.4.2-2 : L'onde de Rayleigh

Les ondes de Love se propagent à environ $4\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, elles sont plus rapides que les ondes de Rayleigh.

I.5. Classification des séismes

On distingue trois types de séisme : tectonique, volcanique et artificiel.

- **Séisme tectonique** : contraintes engendrées par les mouvements d'une douzaine de plaques majeures et mineures qui constituent la croûte terrestre.
- **Séisme d'origine volcanique** : annonce des éruptions volcaniques. Ces tremblements de terre se manifestent lorsque le magma s'accumule dans la chambre magmatique d'un volcan.
- **Séisme artificiel** : constitution d'énormes réserves d'eau derrière des barrages, le pompage de fluides profonds, l'extraction minière ou les explosions souterraines de bombes atomiques.

I.6. La mesure d'une force d'un séisme

Deux paramètres sont utilisés pour mesurer la force des séismes : la magnitude et l'intensité. Un séisme est associé à une seule magnitude et à une gamme de valeurs d'intensité. En effet, la magnitude caractérise l'énergie libérée par la rupture de faille à l'origine des secousses, tandis que l'intensité est liée à l'effet des secousses à un endroit donné (par exemple : ressenti des habitants, chute d'objets, dégâts...). Le séisme n'ayant pas les mêmes effets partout, l'intensité sismique varie d'un site à un autre pour un même séisme.

Les séismes qui se sont produits avant la mise en place des réseaux d'enregistrements sismologiques (soit avant la fin du XIX^{ème} siècle) ne sont connus qu'au travers des témoignages préservés dans les archives historiques. Ces témoignages nous informent des effets des séismes du passé et permettent d'estimer leur intensité en différents lieux. L'intensité est donc la seule façon de mesurer la force d'un séisme historique.

Chapitre I : NOTIONS DE BASE SUR LES SEISMES

Les médias font eux souvent référence à « la magnitude du séisme sur l'échelle ouverte de Richter ». Elle a été définie en 1935 par Charles F. Richter qui a établi une échelle pour classer et comparer les séismes californiens selon un certain protocole et avec un certain type d'instrument. Cette mesure correspond à un type de magnitude appelée magnitude locale (MI) et qui n'est en fait valable que pour des séismes proches des instruments qui les mesurent et sous certaines conditions.

- **La magnitude**

La magnitude est une mesure associée à l'énergie sismique libérée lors de la rupture de la faille à l'origine du séisme. La magnitude d'un séisme est calculée à partir de l'amplitude du mouvement du sol enregistré par des instruments sismologiques. La magnitude est une quantité logarithmique : une augmentation d'un degré sur l'échelle de magnitude correspond à une énergie libérée trente fois supérieure.

Plusieurs échelles de magnitude sont utilisées par les sismologues : les magnitudes instrumentales (MI – magnitude locale ; Mb –magnitude des ondes de volume, Ms –magnitude des ondes de surface) et la magnitude de moment (Mw) qui estime l'énergie libérée par le séisme. Cette dernière tend à être de plus en plus utilisée par la communauté sismologique, notamment pour évaluer l'aléa sismique.

Il existe une relation entre la magnitude du séisme, les dimensions de la faille qui a rompu et le décalage entre les deux blocs séparés par la faille (appelé aussi la quantité de glissement produit sur la faille). Les ordres de grandeur sont les suivants pour une faille dans la croûte terrestre : [2]

Magnitude (Mw)	Surface de faille rompue (km ²)	Longueur de faille crustale rompue (km)	Glissement (m)
5	15s	≈ 4	0,05-0,1
6	100	10-12	0,3-0,5
7	750	40-50	1-2
8	5 000	200	10

Tableau I.6-1 : Echelle de magnitude

▪ L'intensité

Pour mesurer les effets d'un séisme en un lieu, les sismologues ont établi des échelles d'intensité dans lesquelles le degré d'intensité (établi sur un ensemble de critères) caractérise le niveau de sévérité locale des effets de la secousse sismique.

Il existe plusieurs échelles d'intensité. Par exemple en France, le catalogue de sismicité historique SisFrance qui couvre actuellement la période de temps 463-2008, utilise l'échelle mise au point en 1964 par Medvedev, Sponheuer et Karnik, dite échelle MSK (voir tableau ci-dessous). Pour les séismes récents, le Bureau Central Sismologique Français (BCSF), utilise l'échelle EMS-98 (*European Macroseismic Scale 1998*).

I.7. Evaluation de l'aléa et du risque sismique

L'aléa est une estimation de la probabilité qu'un événement naturel survienne dans une région donnée et dans un intervalle de temps donné. L'aléa sismique est donc la probabilité, pour un site, d'être exposé à une secousse tellurique de caractéristiques données. L'évaluation de l'aléa sismique intègre la magnitude, l'ampleur et la période de retour des séismes.

Evaluer l'aléa sismique, c'est estimer la nature, la localisation et l'ampleur de ces effets qui peuvent induire des désordres et dommages sur les installations.

L'étude des différents effets induits par des séismes passés permet donc d'obtenir des informations utiles pour estimer l'aléa sismique.

L'aléa est donc usuellement découpé en une composante régionale et une spécificité locale.

I.7.1. Aléa régional

L'aléa régional recouvre la caractérisation de l'agression sismique au rocher affleurant en surface, résultant de l'activation de sources sismiques et de la propagation des ondes de la source à la cible.

L'analyse de l'aléa régional nécessite deux étapes :

- L'identification des sources sismiques
- Le calcul du mouvement vibratoire en surface

L'identification des sources sismiques consiste à localiser les failles actives et à évaluer leur potentiel sismogénique en termes de magnitude ou d'intensité des séismes susceptibles d'être générés par ces failles, leur profondeur focale et leur récurrence. En se basant sur des données géologiques et sismiques, ce travail aboutit à la définition d'un zonage sismotectonique découpant la région considérée en zones homogènes dans lesquelles la probabilité d'occurrence d'un séisme de caractéristiques données est estimée équivalente en tout point ;

Concernant le calcul du mouvement vibratoire en surface par l'application d'une loi d'atténuation aux sources potentielles identifiées dans le zonage sismotectonique, on distingue principalement deux approches d'évaluation d'aléa régional :

- **L'approche déterministe** dans laquelle le mouvement du sol est estimé à partir d'un séisme de référence, de caractéristiques connues. Ce séisme de référence correspond à un séisme dont l'occurrence est avérée par les données historiques (témoignages) ou instrumentales (enregistrement des stations);
- **L'approche probabiliste** consiste à calculer en tout point du territoire le niveau d'accélération du sol susceptible d'être atteint ou dépassé pour une période de temps donnée, en tenant compte de l'ensemble des données disponibles, historiques ou instrumentales, en y associant des lois de récurrence.

I.7.2. Aléa local

L'évaluation de l'aléa local permet de prendre en compte les modifications de la vibration sismique par les conditions géologiques et topographiques locales, les effets de site.

Elle permet également de définir des zones dans lesquelles des effets induits (mouvements de terrain, liquéfaction des sols) sont susceptibles d'être provoqués par un séisme.

À l'échelle d'une commune, ce travail permet d'aboutir à un micro-zonage sismique, délimitant les zones dans lesquelles les amplifications du mouvement du sol sont identiques.

Un **risque** est la conséquence d'un événement d'une certaine ampleur ayant une certaine probabilité de se produire (**aléa**). Il peut être d'origine naturelle ou humaine. Les effets peuvent mettre en péril un grand nombre de personnes, occasionner des dégâts importants et dépasser les capacités de réaction des instances directement concernées. Le passage de l'aléa au risque suppose la prise en compte de la vulnérabilité **des enjeux** soumis à cet aléa.

I.8. L'aléa et le risque sismique en Algérie

L'Algérie se situe sur une frontière active de plaques au niveau de la convergence de l'Afrique et de l'Eurasie (figure 1). Ces plaques se rapprochent à une vitesse de l'ordre de 6 millimètres par an, ce qui génère une accumulation importante de contraintes. Lorsque ces contraintes deviennent trop fortes, certaines failles peuvent être mises en mouvement. Le déplacement rapide des bords de la faille génère alors des ondes sismiques qui se propagent jusqu'à la surface. Les principales failles actives sont localisées au niveau de la chaîne de montagne nord-africaine (Atlas). Le mouvement relatif des bords de la faille tel qu'il a été enregistré par les sismomètres montre un raccourcissement cohérent avec le mouvement global des plaques. Pour le moment, la faille qui est à l'origine du séisme du 21 mai 2003 n'est pas identifiée. Compte tenu des premières informations sismologiques, la prolongation orientale de la faille majeure connue localement (faille de Thenia) pourrait avoir été activée lors de ce séisme

Chapitre I : NOTIONS DE BASE SUR LES SEISMES

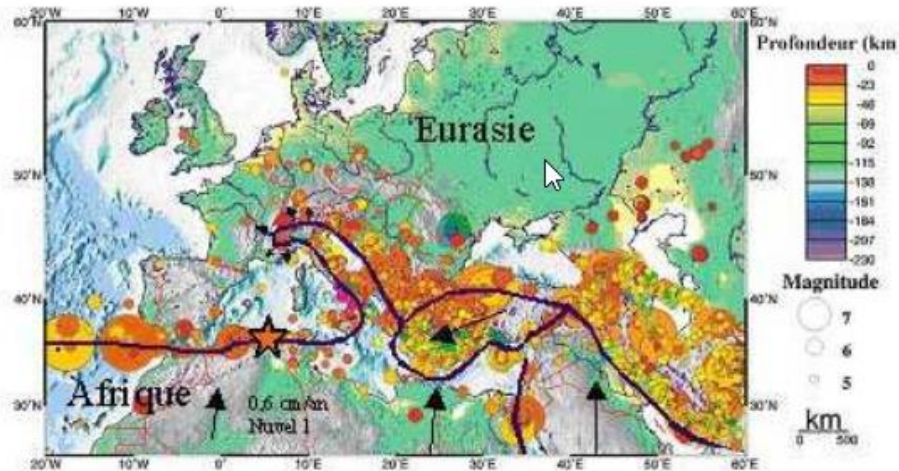


Figure 1 : Contexte sismotectonique de la collision Afrique-Eurasie.
Le séisme du 21 mai 2003 est représenté par une étoile (Source IRSN)

22 mai 2003

Figure I.8-1 : Contexte sismo-tectonique de la collision Afrique-Eurasie

En Algérie, la tectonique active est localisée dans la région nord du pays, essentiellement dans le Tell. Dans cette région, frontière entre les plaques Africaine et Eurasiatique, la déformation tectonique est l'expression de la convergence actuelle des ces deux plaques et se traduit par la fermeture progressive des bassins néogènes et par la poursuite de l'édification de la chaîne. Le long de la marge, la déformation s'exprime dans la partie de la plaine abyssale proche du continent, par le plissement de la couverture plio-quadernaire. Au niveau de la pente et sur le plateau continental, la sismicité est générée par des accidents qui se prolongent parfois à terre.

Chapitre I : NOTIONS DE BASE SUR LES SEISMES

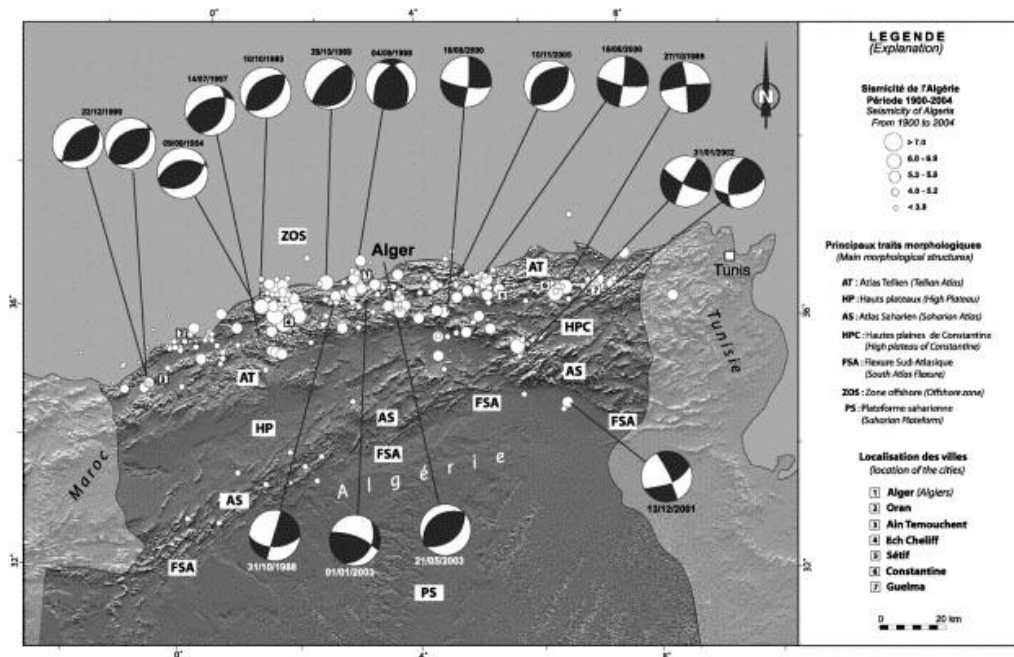


Figure I.8-2 : Historique des séismes en Algérie

Les études de sismicité historique ont permis d'élaborer différents catalogues de sismicité, la réalisation de cartes de sismicité (Fig. 1) et d'intensité maximale, ainsi que de contribuer à la réalisation de cartes sismotectonique et d'aléa sismique.

La cartographie des événements historiques permet de connaître la localisation des régions sismogènes (Fig. 1), mais aussi d'établir une zonation sismique du territoire.

Quatre zones majeures de sismicité sont ainsi mises en évidence.

- Le domaine maritime.** Il est important de souligner que, parmi les plus importants séismes qui ont frappé l'Algérie du Nord, plusieurs se sont produits en mer. À cet égard, les séismes d'Alger de 1716, d'Oran de 1790, de Djidjelli de 1856 et de Boumerdes de 2003 sont les plus représentatifs.
- Le Tell.** Dans cette région se manifeste la plus grande partie de l'activité sismique de l'Algérie du Nord. Avec le domaine maritime, elle constitue la région la plus exposée aux séismes violents et dévastateurs, puisque la majeure partie de la population algérienne y réside.

Chapitre I : NOTIONS DE BASE SUR LES SEISMES

- c) *Les Hauts Plateaux.* Actuellement, cette région se caractérise par une quasi-absence de sismicité. Les Hauts Plateaux semblent donc se comporter comme un bloc rigide, se déformant simplement au niveau de ses bordures.
- d) *L'Atlas saharien.* Dans cette région, les cartes de sismicité montrent un chapelet de petits séismes de faible magnitude ($M < 4$), qui s'étale en particulier le long du front Sud-Atlasique.

I.9. Zones sismiques (RPA99)

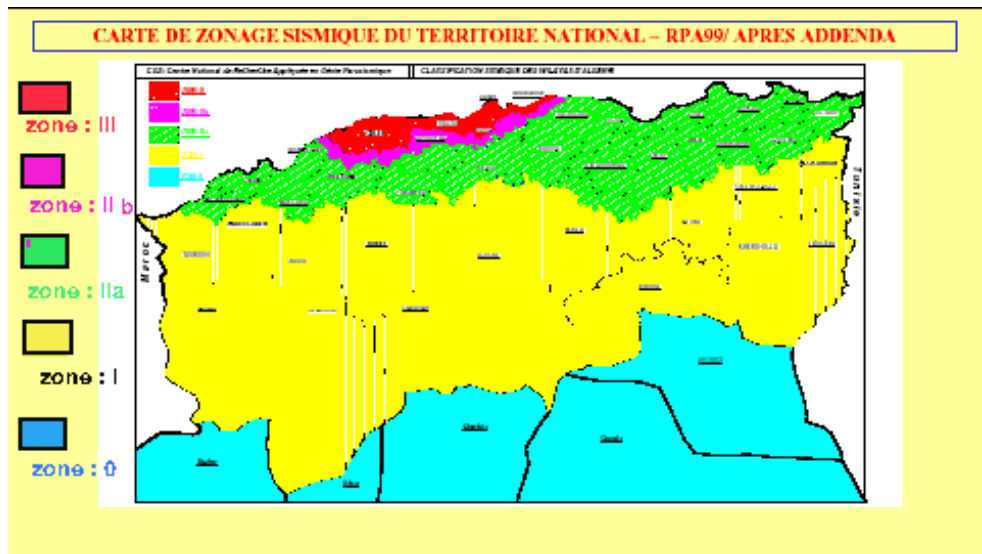


Figure I.9-1 : Carte de zonage sismique du territoire national d'Algérie (RPA99v 2003)

Il est défini 4 zones sismiques classées comme suit :

1. Zone 0 : Sismicité négligeable
2. Zone 1 : Sismicité faible
3. Zone 2 : Sismicité moyenne
4. Zone 3 : Sismicité élevée

Groupe	Zone I	Zone IIa	Zone IIb	Zone III	Classification des ouvrages selon leur importance
1A	0.15	0.25	0.30	0.40	Ouvrages d'importance vitale :Sécurité-Hopitaux
1B	0.12	0.20	0.25	0.30	Ouvrages de grande importance:Scolaire et Culte

Chapitre I : NOTIONS DE BASE SUR LES SEISMES

2	0.10	0.15	0.20	0.25	Ouvrages courants : Habitations- Bureaux
3	0.07	0.10	0.14	0.18	Ouvrages de faible importance:Hangars

Tableau I.9-1 Zonage sismique du territoire national d'Algérie

I.10. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons donné un aperçu théorique sur la notion du séisme, en parcourant tous les éléments liés à ce dernier afin de mieux comprendre son mécanisme pour palier au risques engendrés, nous avons aussi présenté l'aléa et le risque sismique en Algérie, qui permettent une construction parasismique.

CHAPITRE II : NOTIONS DE BASE SUR LES PONTS

II.1. Introduction

Depuis longtemps, l'homme a toujours cherché à traverser des obstacles naturels. Pour y arriver, il a dû, par exemple, avoir recours aux ponts. Dès l'Antiquité, de nombreux progrès ont été réalisés pour mener à bien la construction des ponts. Ainsi, le progrès est tel qu'ils permettent aujourd'hui de traverser de longues étendues.

Dans le présent chapitre, nous allons détailler quelques notions sur les ponts et les aspects de leurs constructions, nous allons également détailler les charges et surcharges qui doivent être pris en compte dans la construction des ponts

II.2. Définition d'un pont

S'il faut définir le pont, il s'agit de tout ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle, notamment un cours d'eau, un bras de mer ou une voie ferrée. Le pont n'a pas seulement une utilité matérielle, il est aussi un défi pour l'homme, celui d'aller toujours plus loin et repousser les limites que lui impose la nature. Les ponts sont construits pour résister aux aléas de la nature, comme les séismes

II.3. Les éléments constituant un pont

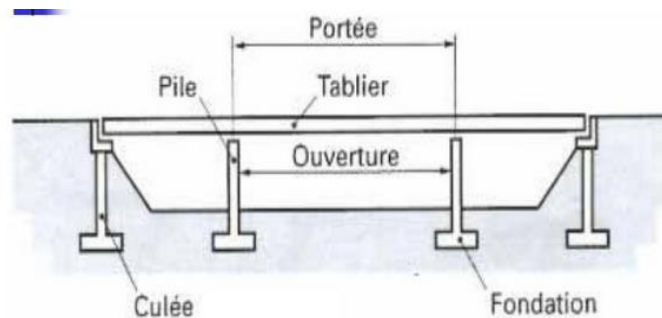


Figure II.3-1 : Schémas pour Les éléments constituant un pont

Un pont est constitué principalement d'éléments suivants

II.3.1. Le tablier

Il s'agit d'une plateforme horizontale supportant la voie portée

- ❖ Intrados : face inférieure du tablier
- ❖ Extrados : face supérieure de tablier

II.3.2. Les appuis

Les appuis constituent l'élément de liaison et de transmission des efforts des appuis vers le sol. Elles peuvent être superficielle Ou profondes

On distingue deux types d'appuis:

- Les culées qui sont les appuis extrêmes du tablier
- Les piles qui sont les appuis intermédiaires (ils portent le tablier)

II.3.3. La fondation

La fondation est un élément de liaison et de transmission des efforts des appuis vers le sol. Elles peuvent être superficielle Ou profondes

II.4. Le rôle des ponts

Le rôle principal de ponts est de franchir un obstacle naturel ou artificiel, Le franchissement supporte le passage d'humains et de véhicules dans le cas d'un pont routier, ou d'eau dans le cas d'un aqueduc.

Les critères de ce choix étaient la complexité de l'obstacle à franchir en ce lieu-là, la présence de pôles importants à portée de ce pont, l'emplacement situé sur une voie de passage très utilisée.

Mais au-delà de cet aspect usuel, ils ont aussi une fonction représentative auprès du public, notamment les riverains et les habitants de la ville, quand le pont est urbain. Ce rôle sémiotique véhicule des idées de liens et de connections, de prouesses techniques (dans certains cas), d'un édifice reflétant la puissance d'une cité ou autre entité commanditant ce pont, etc.

II.5. Les types de ponts courants

Il existe une multitude de critères de classification des ponts. En effet, on peut les classer en fonction de leur structure, de leur usage, des matériaux utilisés, de leur portée, de leur nature, ou encore de leur date de construction.

Nous retrouvons ici la classification selon la structure : nous distinguons alors cinq parties ;

II.5.1. Pont à poutre

La structure peut être assimilée à une poutre droite. C'est un pont dont la structure porteuse est constituée par des poutres travaillant à la flexion. Les poutres peuvent être en métal, en béton armé ou en béton précontraint ; elles peuvent être à âmes pleines ou triangulées. Elles peuvent être situées sous la chaussée ou au-dessus ; on dit alors que l'on a un pont à poutres latérales.

[3]



Figure II.5.1-1 : Photo d'un pont à poutres

II.5.2. Pont Dalle

Les ponts-dalles constituent le type d'ouvrage le plus répandu et le plus construit, puisqu'ils représentent près de la moitié de la surface totale des ponts construits ces dernières années.

Pont dont la structure porteuse est constituée par une plaque reposant sur deux ou plusieurs lignes d'appui parallèles entre elles. [4]

CHAPITRE II : NOTIONS DE BASE SUR LES PONTS

Cette population d'ouvrages comprend dans une large proportion des passages supérieurs ou inférieurs routiers ou autoroutiers et, dans une moindre mesure, des pont-rail, des tranchées couvertes et des passerelles pour piétons. Leur longueur varie d'une quinzaine à une soixantaine de mètres et, parfois, dépasse une centaine de mètres. Leurs travées déterminantes se situent entre une douzaine et une trentaine de mètres.

Ces ouvrages sont d'aspect élancé et restent cependant robustes, grâce à leur monolithisme. La simplicité de leur forme et leur grande réserve de sécurité constituent par ailleurs des atouts importants, ainsi que leur souplesse dans l'adaptation à toute difficulté d'implantation grâce à leur construction par coulage en place (dans le cas de tracé biais ou courbe en plan ou en élévation). Ces avantages s'avèrent d'autant plus intéressants que ce type d'ouvrage demeure parmi les solutions de franchissement les plus économiques, sur le double plan de l'investissement et de l'entretien.



Figure II.5.2-1 : Photo d'un pont dalle

II.5.3. Pont mixte

Un pont mixte acier/béton comporte des éléments structurels en acier et en béton armé ou précontraint,

Dont la particularité réside dans le fait de faire fonctionner ces matériaux selon leurs aptitudes optimales, notamment en compression pour le béton et en traction pour l'acier, Ses éléments

CHAPITRE II : NOTIONS DE BASE SUR LES PONTS

présentent une solidarisation entre eux, sous forme de liaisons mécaniques, de façon à créer un ensemble monolithique.

Leur dénomination est souvent ramenée à l'expression ponts mixtes bien que la mixité puisse concerner d'autres matériaux comme le bois et la pierre et de mêmes façons, on peut parler uniquement de ponts à tabliers mixtes acier/béton alors que des ponts avec des piles et des tabliers composés alternativement des deux matériaux sont considérés comme des ponts mixtes.

Les ouvrages composés uniquement de béton armé ou précontraint, malgré l'acier qu'ils possèdent, ne sont pas considérés comme des ponts mixtes.



Figure II.5.3-1 : Photo d'un pont mixte

II.6. Charges et surcharges

II.6.1. La charge permanente (CP)

Elle contient seulement le poids propre des poutres, des entretoises, des pièces de ponts et de la dalle (tablier).

II.6.2. Surcharge d'exploitation

Deux natures de surcharge sont pris en considération, en l'occurrence ; les surcharges routières A et B et les surcharges des trottoirs

II.6.2.1. Système de surcharges A

CHAPITRE II : NOTIONS DE BASE SUR LES PONTS

Le système A se compose d'une charge uniformément répartie dont la l'intensité dépend de la longueur L chargée est donne par la formule suivante:

$$A(l) = 230 + \frac{36000}{l+12} \text{ en DaN/m}^2$$

L = longueur surchargée en mètres

La surcharge A(l) doit être majorée par un coefficient de dégressivité transversale al dépendant de la classe du pont et du nombre de voies chargées et d'un coefficient d'uniformisation à calculer à l'aide du tableau II.6.2.1-1:

Nombre de voies chargées	1	2	3	4	≥ 5
Classement 1 ^{er}	1	1	0.9	0.75	0.7
	1	0.9			
	0.9	0.8			

Tableau II.6.2.1-2 : Coefficient de dégressivité transversale a1 de A(I)

On obtient par la suite la valeur A1(l) de la surcharge qui doit être inférieure à $400 - 0,2L$ soit

$$A1(L) = \max. [a1 * a2 * A(l); (400 - 0.2L)] \text{ en DaN/m}^2$$

l (m) = longueur chargée Quant au coefficient a2 il est calculé de la façon suivante à l'aide du tableau III

$$a2 = v0/v, \text{ avec } v0 = 3.50m, v = lc/2 \text{ avec:}$$

CHAPITRE II : NOTIONS DE BASE SUR LES PONTS

Classe pont	1 ^{er}	2 ^{ème}	3 ^{ème}
v ₀	3.50m	3.00m	2.75m

Tableau II.6.2.1-3 : Coefficient de dégressivité transversale a2 de A(I)

II.6.2.2. Système de surcharges B

Les charges B sont pondérées par un coefficient de majoration dynamique δ :

$$\delta = 1 + \alpha + \beta = 1 + \frac{4}{1 + 0.2l} + \frac{0.6}{1 + 4G/S}$$

L : Longueur de la travée.

G : La charge permanente de l'ouvrage.

S : La charge B maximale.

Dans ce système, Dans ce système on distingue les charges Bc, Bt et Br. Les schémas suivants montrent ces différents types de charges.

❖ Système Bc (camion type)

Ci-dessous les caractéristiques d'un system BC

- Une masse totale de 30 tonnes
- La masse portée par chacun des essieux arrière est de 12 tonnes
- La masse portée par l'essieu avant est de 6 tonnes
- La surface d'impact d'une roue arrière est de 0,25*0,25 m²
- La surface d'impact d'une roue avant est de 0,20*0,20 m²
- On peut disposer transversalement sur la chaussée autant de files de camions Bc que la chaussée comporte de voies de circulation et longitudinalement le nombre de camions par file est limité à 2.
- Les charges Bc sont pondérées par les coefficients δ et $b_c = 1,10$.
La figure 7 montre comment sont les camions de types Bc.

CHAPITRE II : NOTIONS DE BASE SUR LES PONTS

$$b_c = \begin{cases} 1,2 & \text{pour 1 file.} \\ 1,1 & \text{pour 2 files.} \end{cases}$$

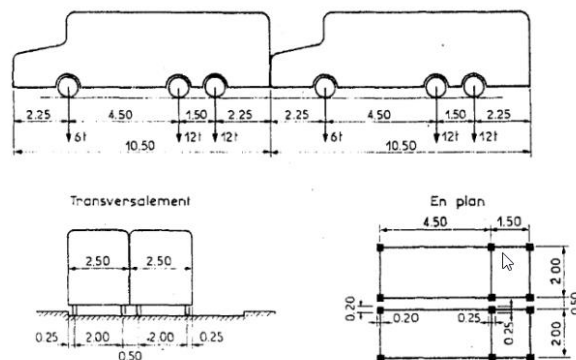


Figure II.6.2.2-1 : Système de charge Bc

❖ Système BT (Essieu tandem)

Ci-dessous les caractéristiques d'un system BT

- La masse par tandem est de 16 tonnes
- La surface d'impact de chaque roue est de :
- Transversalement : 0,60 m
- Longitudinalement : 0,25 m
- Soit $0,60 \times 0,25 \text{ m}^2$
- On peut disposer transversalement sur la chaussée au maximum deux tandems Bt et longitudinalement le nombre de tandem est limité à 1.
- La masse totale d'un camion Bt = 32t, coefficient bt = 1.

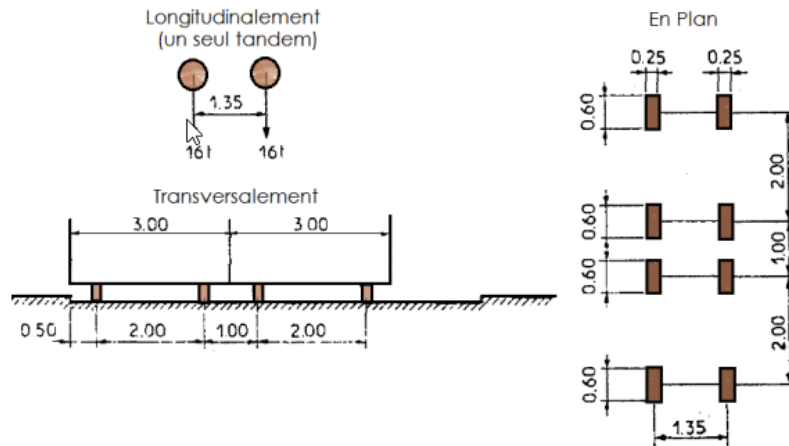


Figure II.6.2.2-2 : Système de charge B

❖ **Système Br**

Il s'agit d'une roue isolée de 10t pouvant être placée n'importe où sur la largeur rouable.

Pour la flexion transversale, le coefficient de majoration dynamique sera fonction de l'élément sollicité. Sa surface d'impact est un rectangle uniformément chargé de 0,60 m de côté transversal et de 0,30 m de côté longitudinal.

Ses caractéristiques sont données dans la figure.

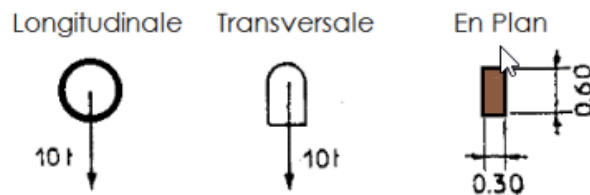


Figure II.6.2.2-3 : Système de charge Br

En fonction de la classe du pont les valeurs des charges des systèmes Bc et Bt prise en compte sont multipliées respectivement par les coefficients b_c et b_t . Ces coefficients sont présentés dans le tableau suivant :

CHAPITRE II : NOTIONS DE BASE SUR LES PONTS

Classe du pont	Première	Deuxième	Troisième
Coefficient bc			
Coefficient bt	1,0	0,9	--

Tableau II.6.2.2-1 : les valeurs du coefficient bc et bt

II.6.2.3. Le système MC

Ce système renferme les charges militaires, dont on distingue les charge Mc120 et Me120

❖ Mc 120

Un véhicule type Mc 120 comporte deux chenilles et répond aux caractéristiques suivantes :

- Masse totale : 110 t
- Longueur d'une chenille : 6,10 m
- Largeur d'une chenille : 1,00 m
- Distance d'axe en axe des deux chenilles : 3,30 m
- La figure 13 illustre ses caractéristiques.

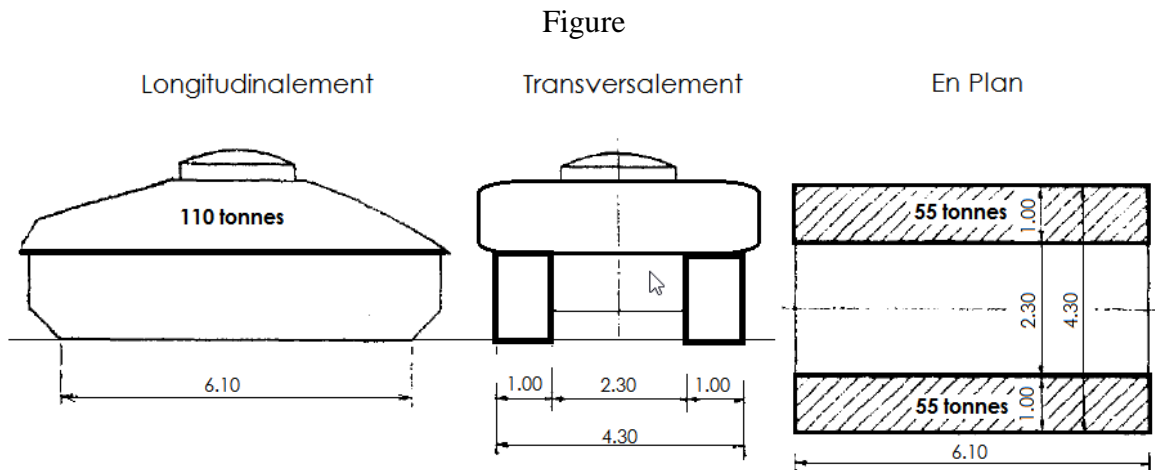


Figure II.6.2.3-1 Système de charge Mc

CHAPITRE II : NOTIONS DE BASE SUR LES PONTS

❖ Me 120

Il est constitué d'un groupe de deux essieux distants de 1,80 m d'axe en axe et sont assimilés chacun à un rouleau. Chaque essieu porte une masse de 33 tonnes, sa surface d'impact est un rectangle uniformément chargé dont le côté transversal mesure 4,00 et le côté longitudinal 0,15 m. ci-après la figure 11 décrit les dispositions

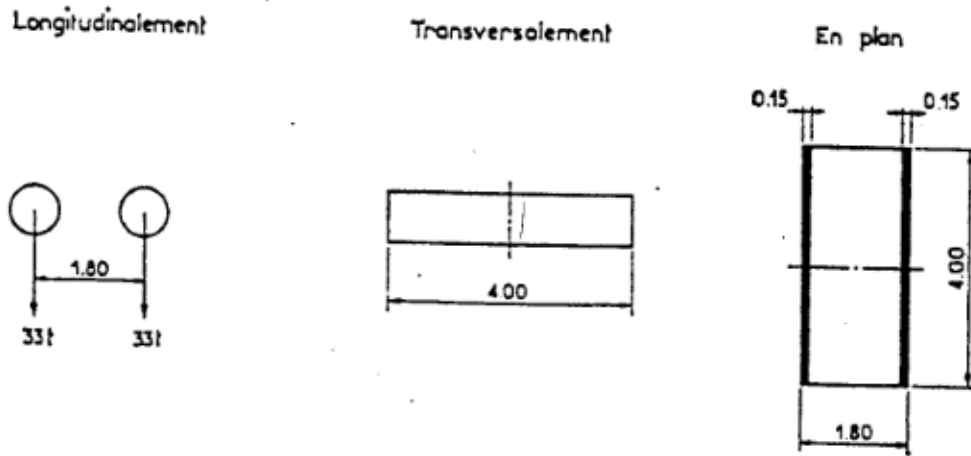


Figure II.6.2.3-2 Système de charge Me

II.6.2.4. Surcharge de trottoir

On prendra pour le calcul

Du tablier : 450 kg/m²

Des poutres principales : 150 Kg :M2

II.7. Les combinaisons d'action

Ce calcul se fera selon les règles du BAEL 91, L'effort tranchant est calculé à l'ELU

$$\text{ELU : } 1,35M_G + \max \left(1,6 * \max \left(\begin{matrix} A^{(l)} \\ B_c \\ B_t \\ B_r \end{matrix} \right); 1,35 * \max \left(\begin{matrix} M_c 120 \\ M_g 120 \\ E \end{matrix} \right) \right) + 1,60 * \text{trottoir}$$

$$\text{ELS : } M_G + \max \left(1,2 * \max \left(\begin{matrix} A^{(i)} \\ B_c \\ B_t \\ B_r \end{matrix} \right); \max \left(\begin{matrix} M_c 120 \\ M_g 120 \\ E \end{matrix} \right) \right) + \text{trottoir}$$

II.8. Les différents éléments antisismiques d'un pont

Pour protéger un pont contre les séismes soit par la combinaison ou l'adoption des deux approches suivantes :

- La première consiste sur la capacité de résister des éléments des structures, notamment des appuis et des fondations, en mesure de supporter, sous l'effet d'un séisme, des déformations inélastiques sans atteindre la rupture.
- La deuxième la deuxième consiste l'équipement de dispositifs spéciaux, tel que des amortisseurs ou des dissipateurs d'énergie, disposé entre la structure porter et la structure porteuse, cette méthode et plus cher.

On pourra donc utiliser des butées sismiques et différentes sortes d'amortisseurs :

- ❖ **Amortisseur à frottement** : Les amortisseurs à friction (frottement) Comprennent une série de plaques fixées les unes aux autres par des boulons en acier à haute résistance et spécialement traitées pour produire un degré de friction maximale. Le principe de ces amortisseurs repose sur le phénomène de dissipation de l'énergie par friction.
- ❖ **Amortisseurs Visqueux** : L'amortisseur visqueux est assimilable à un vérin hydraulique à double effet et à forte capacité de dissipation d'énergie il se constitue d'un cylindre creux rempli avec un fluide à base d'huile de silicone qui est forcé de s'écouler à travers de petits orifices.
- ❖ **Amortisseurs Hystérétiques (élastoplastique)** : Ils constituent un assemblage de pièces en acier doux ou bien en plomb soit des alliages malléables. Lorsque les fondations et la structure sont en mouvement, ces matériaux se déforment de manière à dissiper l'énergie sismique. Ces amortisseurs ne demandent pas d'entretien et sont faciles à remplacer. Ils se présentent, comme celle de fluide visqueux, sous forme de barreaux en acier, en plomb ou bien grâce à des poutres. [5]

CHAPITRE II : NOTIONS DE BASE SUR LES PONTS

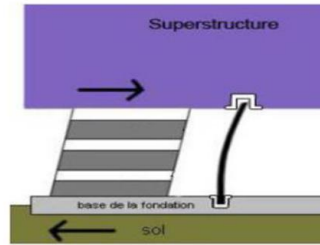


Figure II.8-1 Amortisseurs Hystérétiques

En outre, ces dispositifs spéciaux permettent :

- D'augmenter la période fondamentale de vibration (éventuellement l'amortissement) et de réduire, en conséquence, les efforts sismiques, en introduisant, entre la structure et ses appuis, des appuis élastiques flexibles, cette réduction, en termes de sollicitation est accompagnée par une augmentation en déplacement.
- De dissiper de grandes quantités d'énergie en les introduisant dans la structure ou à la base de structure.

II.9. Présentation de l'ouvrage

Dans le présent travail, nous avons fait l'étude d'un pont poutre franchissant la voie ferrée de Ain TOUTA Msila



Figure II.9-1 : Ponts poutre franchissant la voie ferrée de Ain TOUTA Msila

II.10. Caractéristiques de l'ouvrage

L'ouvrage se caractérise par les éléments suivants :

- Nombre de travée : 3 travées.
- Longueur d'une travée : 12 m.
- Hauteur de gabare : 12 m

II.11. Profil de l'ouvrage

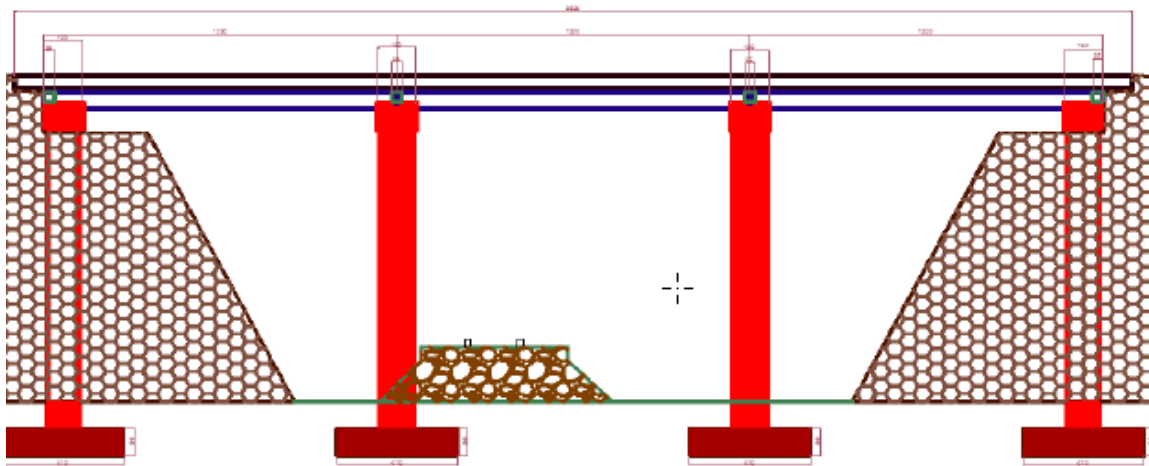


Figure II.11-1 : Profil en long

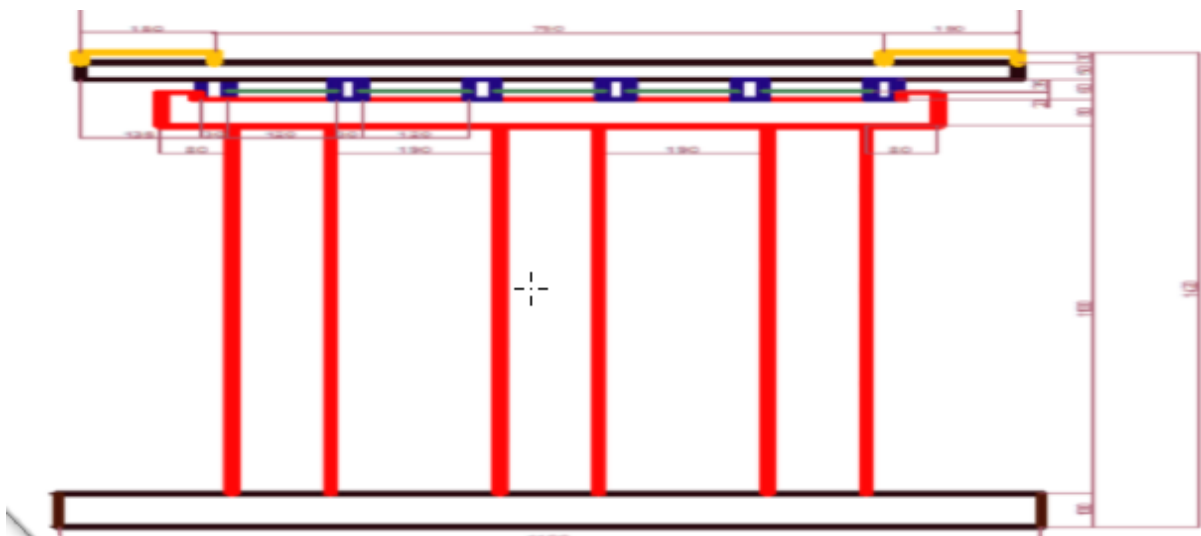


Figure II.11-2 : Profil en travers

Largeur roulable : 7.5 m.

Largeur de pont : 10.5 m.

Longueur de pont : 36 m.

Nombre de voie : 2.

II.12. Conclusion

Les nombreuses découvertes au cours du temps (les nouvelles énergies comme le pétrole ou l'électricité, les nouveaux matériaux comme le béton, ou encore la découverte de nouvelles techniques de constructions) ont permis de créer des ponts d'en plus en plus moderne, de plus en plus pratique et moins coûteux. Les nouvelles techniques de construction ont également permis aux ponts de se développer. Ces nouvelles techniques de construction ainsi que ces nouvelles découvertes font que l'homme a pu s'affranchir des contraintes naturelles liés au pont (ex : système de drainage de la pluie mis en place sur les ponts). Grâce aux avancées techniques et technologiques, les ponts sont également beaucoup plus résistants aux différentes forces qui s'appliquent sur eux.

Chapitre III : INTERACTION SOL STRUCTURE (ISS)

III.1. Introduction

On entend généralement, improprement, par interaction sol-structure l'étude du comportement d'une structure soumise à une sollicitation sismique. Littéralement, l'interaction sol-structure traduit la modification du sol (ou de la structure) lors d'un séisme du fait de la présence de l'autre composant (structure ou sol). Cette interaction est bien entendu plus ou moins importante suivant la nature du sol, les caractéristiques de l'ouvrage et son mode de fondation. Pour certains ouvrages, fondés superficiellement, elle peut être pratiquement négligeable. Par contre, la nécessité d'étudier la réponse sismique d'un ouvrage, en ne le considérant pas isolément mais comme partie intégrante d'un ensemble comprenant le sol et les structures avoisinantes, et les analyses d'interaction Sol-structure impérieuses pour une part grandissante d'ouvrages importants : barrages, centrales nucléaires, réservoirs de Gas naturel liquéfié (GNL)...

De nombreux aspects nécessitent une étude approfondie pour résoudre complètement un problème d'interaction sol-structure, ce sont la définition de l'aléa sismique et du mouvement résultant, l'étude du comportement du sol sous chargement cyclique, évaluation de la réponse du sol en champ libre, et celle des structures sous chargement dynamique. Mis à part ce dernier aspect, les autres ont fait l'objet des chapitres précédents. L'analyse dynamique des structures ne sera pas abordé ; on pourra se reporter utilement à Clough-penzien(1975).

L'abondance de la littérature concernant l'interaction sol-structure traduit à la fois la complexité du phénomène et l'intérêt qu'y ont porté nombre de chercheurs, deux synthèses générales ont entrepris une classification des méthodes d'étude de l'interaction sol-structure (Lysmer,1978 ;IDRISS-KENNEDY,1980).ces publications mettent en évidence le fait que l'étude des phénomènes d'interaction est essentiellement limitée au cas des problèmes linéaires, l'approche de problèmes purement non linéaires reste l'exception

III.2. Notion de l'Interaction Sol-Structure (ISS)

Le sol n'est pas parfaitement rigide. Sous l'effet d'un chargement dynamique, le sol et la superstructure vibrent simultanément et interagissent l'un avec l'autre. La vibration de la superstructure entraîne des forces sur la fondation qui sont transmises au sol modifiant sa

CHAPITRE III : INTERACTION SOL STRUCTURE (ISS)

réponse. Le phénomène de la modification de la réponse du sol (de la structure) par la présence de la structure (le sol) s'appelle interaction sol-structure. [6] et il couvre deux phénomènes physiques:

III.2.1. Interaction Cinématique

Elle résulte de différence de raideur pour la partie en terre, entre le sol et la structure important pour la structure raider enterrées dans un sol mou.

Négligeable pour les fondations superficielles avec des ondes à propagation verticale.

III.2.2. Interaction Inertielle

Elle résulte de la différence de la masse entre la structure et le sol, Toujours présente

Figure III.2.2-1 . Illustre l'aspect fondamental de l'interaction ; cet aspect est présenté ici dans le cas d'une fondation sur pieux, partiellement enterrée dans le sol, mais les conclusions restent applicables à tout type de fondation. Loin de la fondation, dans une région dénommée le champ libre, les couches de sol sont traversées par des ondes sismiques dont la nature peut être complexe : on y rencontre des ondes de volume, compression (P) et cisaillement (S), des ondes de surface (Rayleigh, Love). La nature des ondes est dictée par les caractéristiques de la source sismique mais également par la géométrie et les caractéristiques mécaniques des terrains traversés. Les définitions des ondes ont été traité dans le chapitre I.

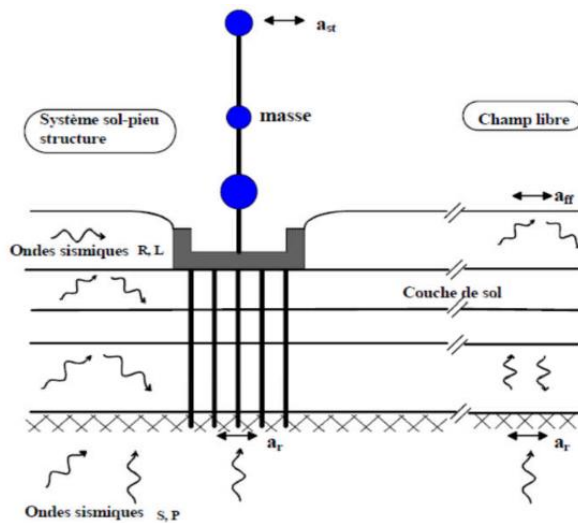


Figure III.2.2-2 : Schématisation de l'interaction sol-structure (PECKER, 2010)

III.3. Etude du problème d'interaction-sol structure

III.3.1. Model analogique simplifié

L'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse d'un ouvrage peut être illustrée à l'aide du modèle analogique de la Figure III.3.1-1. La structure est assimilée à une Masse et un ressort, placés à une hauteur h au-dessus de la fondation. La liaison entre la Structure et la fondation est réalisée par une barre rigide. La fondation repose sur le sol et son interaction avec celui-ci est modélisée par le biais des fonctions d'impédance. On admettra pour l'instant que les fonctions d'impédance, c'est à dire les réactions exercées par le sol sur la fondation, peuvent être représentées par un ensemble de ressorts et d'amortisseurs indépendants de la fréquence ; l'amortisseur rend théoriquement compte à la fois de l'amortissement radiatif, c'est à dire de la dissipation d'énergie par les ondes s'éloignant de la fondation, et de l'amortissement propre du matériau "sol", appelé amortissement matériel. Dans un souci de simplification de la présentation, on supposera que l'amortissement matériel est négligeable devant l'amortissement radiatif (comportement élastique du sol), ce qui est valide pour un milieu homogène et des sollicitations sismiques d'amplitudes faibles à moyennes [7].

Le système de la Figure III.3.1-2 possède 3 degrés de liberté :

- Le déplacement horizontal u de la masse m ,

CHAPITRE III : INTERACTION SOL STRUCTURE (ISS)

- Le déplacement horizontal u_0 de la fondation,
- La rotation θ de la fondation autour d'un axe horizontal. Il est soumis à un déplacement horizontal du sol support, harmonique de pulsation W et d'amplitude u_g .[7].

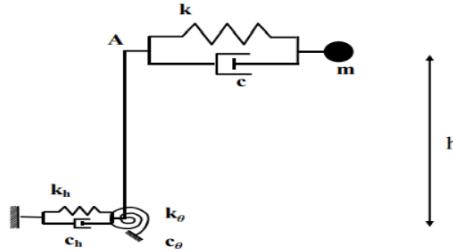


Figure III.3.1-3 Modèle analogique simplifié d'interaction sol-structure

III.4. Les effets de l'ISS

En général, l'ISS entraîne : [8]. [9].

- Un allongement de la période de vibration du 1er mode notamment, qui peut provoquer une variation en plus ou en moins de la valeur de l'accélération selon la zone où l'on se situe sur le spectre élastique.
- Un amortissement non négligeable (amortissement radiatif + amortissement propre au matériau-sol) puisque toujours supérieur à celui des matériaux de la structure. Ne pas le prendre en compte conduit à surestimer la réponse
- Une rotation de la fondation qui peut modifier sensiblement le calcul de la déformée modale et donc la répartition des accélérations sur la hauteur du bâtiment
- Un mouvement du sol à la base du bâtiment supposé identique à celui du champ libre ; dans les cas courants cette approximation est considérée comme acceptable. Pour la majorité des structures usuelles de bâtiments, les effets de l'ISS ont tendances à être bénéfiques puisqu'ils réduisent les moments fléchissant et les efforts tranchants dans les différents éléments de la structure. [10]

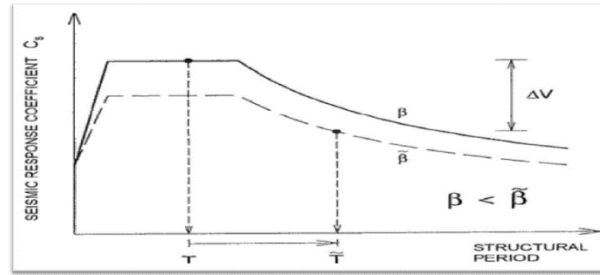


Figure III.4-1 : Lecture spectrale montrant les effets de la prise en compte de l'ISS

Les effets favorables correspondent en moyenne à une réduction de la réponse de 10 à 12% et à une aggravation de quelques pour cent lorsqu'ils agissent dans un sens défavorable.

III.5. Comportement des sols sous sollicitations sismiques

III.5.1. Elasticité linéaire des sols

Le comportement élastique est dit « linéaire » si le tenseur des déformations est proportionnel au tenseur des contraintes au cours des sollicitations. Le comportement élastique linéaire est caractérisé par deux paramètres : un module d'élasticité axial de Young E dans le cas d'un essai de compression ou traction simple, ou par le module de cisaillement G pour un essai de cisaillement simple et le coefficient de Poisson.

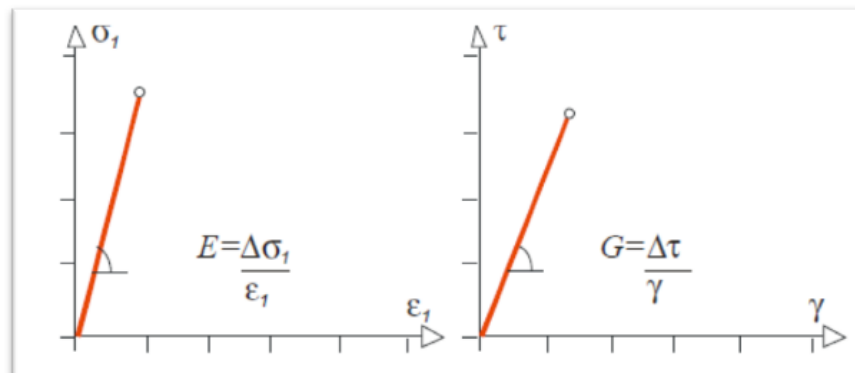


Figure III.5.1-1 : Loi de comportement élastique linéaire

III.5.2. Modèle élasto-plastique

Un corps est dit avoir un comportement élasto-plastique quand au-delà d'un certain niveau de chargement, il présente des déformations réversibles (élastiques) mais aussi des déformations irréversibles (plastiques) et que ces déformations et ces contraintes obéissent à des lois bien précises. Notons que la considération d'un corps élasto-plastique se fait en excluant l'influence du paramètre temps. Il est caractérisé par cinq paramètres :

- ❖ Le module de Young E
- ❖ Le Coefficient de poisson ν
- ❖ La cohésion c
- ❖ L'angle de frottement φ
- ❖ L'angle de dilatance Ψ

III.6. Formulation d'un problème d'interaction sol-structure

Avant d'examiner les différentes méthodes de prise en compte de l'interaction sol-structure, il est utile de formuler de façon générale le problème. Cette formulation est orientée vers un traitement par éléments finis du phénomène d'interaction. En effet, la complexité du problème est telle que le recours aux méthodes numériques est pratiquement inévitable. Les équations du mouvement qui schématisent un ensemble sol-structure. Désignant par, M , C , K les matrices de masse, amortissement et raideur du système, l'équation du mouvement s'écrit :

$$M \ddot{U} + C \dot{U} + K U = Q_f \quad (3-3)$$

Comme la source du mouvement (foyer du séisme) n'est généralement pas incluse dans le modèle, le vecteur de charge Q_i n'a de valeurs non nulles que sur la frontière extérieure du modèle

En l'absence de structure, l'équation du mouvement du champ libre est analogue de par sa forme à l'équation (3.4); les indices f désignant les matrices masse, amortissement et raideur relative au seul champ libre, cette équation s'écrit :

CHAPITRE III : INTERACTION SOL STRUCTURE (ISS)

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{U}}_f + \mathbf{C}_f \dot{\mathbf{U}}_f + \mathbf{K}_f \mathbf{U}_f = \mathbf{Q}_f \quad (3-4)$$

Posent :

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_i + \mathbf{U}_f \quad (3-5)$$

L'équation (3.5) définit le déplacement d'interaction U_i qui satisfait l'équation :

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}_i + \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}}_i + \mathbf{K} \mathbf{U}_i = -\mathbf{Q}_i \quad (3-6)$$

Avec :

$$-\mathbf{Q}_i = [\mathbf{M} \quad -\mathbf{M}_f] \ddot{\mathbf{U}}_f + [\mathbf{C} \quad -\mathbf{C}_f] \dot{\mathbf{U}}_f + [\mathbf{K} - \mathbf{K}_f] \mathbf{U}_f \quad (3-7)$$

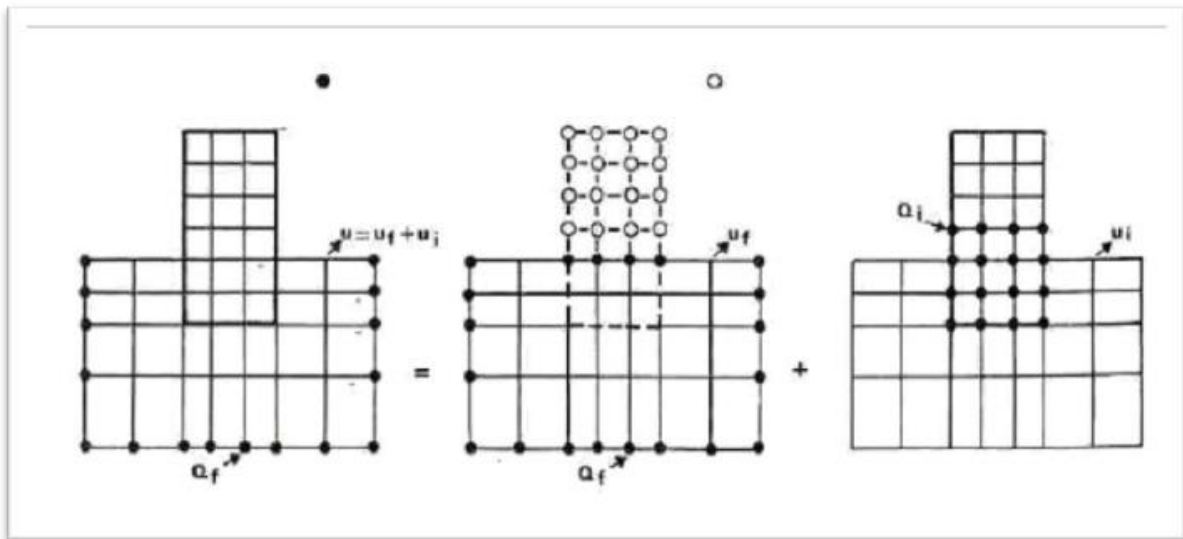


Figure III.6-1 Décomposition du problème d'interaction sol structure

Le vecteur de charge Q_i est déterminé à partir des déplacements en champ libre. Pour les systèmes linéaires on a alors le théorème de superposition illustré sur la figure III.6-1 Le problème d'interaction est décomposé en la somme d'un problème de réponse du sol en Champ libre et d'un problème source où les forces appliquées Q_i n'ont des composantes non nulles qu'aux nœuds communs à la structure et sol.

III.7. Les différentes méthodes pour prendre en compte l'ISS

Différentes méthodes existent pour prendre en compte l'interaction sol-structure. Parmi lesquelles, nous distinguons les méthodes globales, qui résolvent, comme leur nom l'indique, le problème global et celles qui s'appuient sur une décomposition du système en sous-systèmes. Ces méthodes sont désignées sous le nom méthodes de sous structure. Nous allons les présenter par la suite.

III.7.1. Méthodes globales (Méthodes directes)

Les méthodes directes, appelées aussi méthodes globales, traitent le problème de l'interaction sol-structure dans sa globalité de façon à obtenir les réponses du sol et de la structure simultanément. Elles consistent à résoudre directement l'équation du mouvement dans l'ensemble Du système sol-structure [11] :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\{\ddot{u}_g\}$$

Où M, C et K désignent respectivement les matrices de masse, d'amortissement et de raideur du système, u représente le vecteur de déplacement du système, u' sa dérivée par rapport au temps dynamique, et F est le vecteur de charge appliquée à la frontière extérieure du système. La résolution directe de ce système d'équation est tellement complexe que l'on a recours aux La problématique de la résolution par une méthode globale est illustrée sur la figure III.7.1-2

- ❖ Le mouvement sismique de dimensionnement est connu (spécifié) à la surface du sol, en champ libre
- ❖ Le mouvement est calculé à la base inférieure du modèle, choisie à une profondeur suffisante pour que la présence d'une structure en surface n'affecte pas ce mouvement ; cette étape est connue sous le nom de déconvolution du mouvement sismique ;
- ❖ Le mouvement déconvolué est imposé uniformément à la base du système sol structure et la réponse est calculée par résolution de l'équation (3-8)

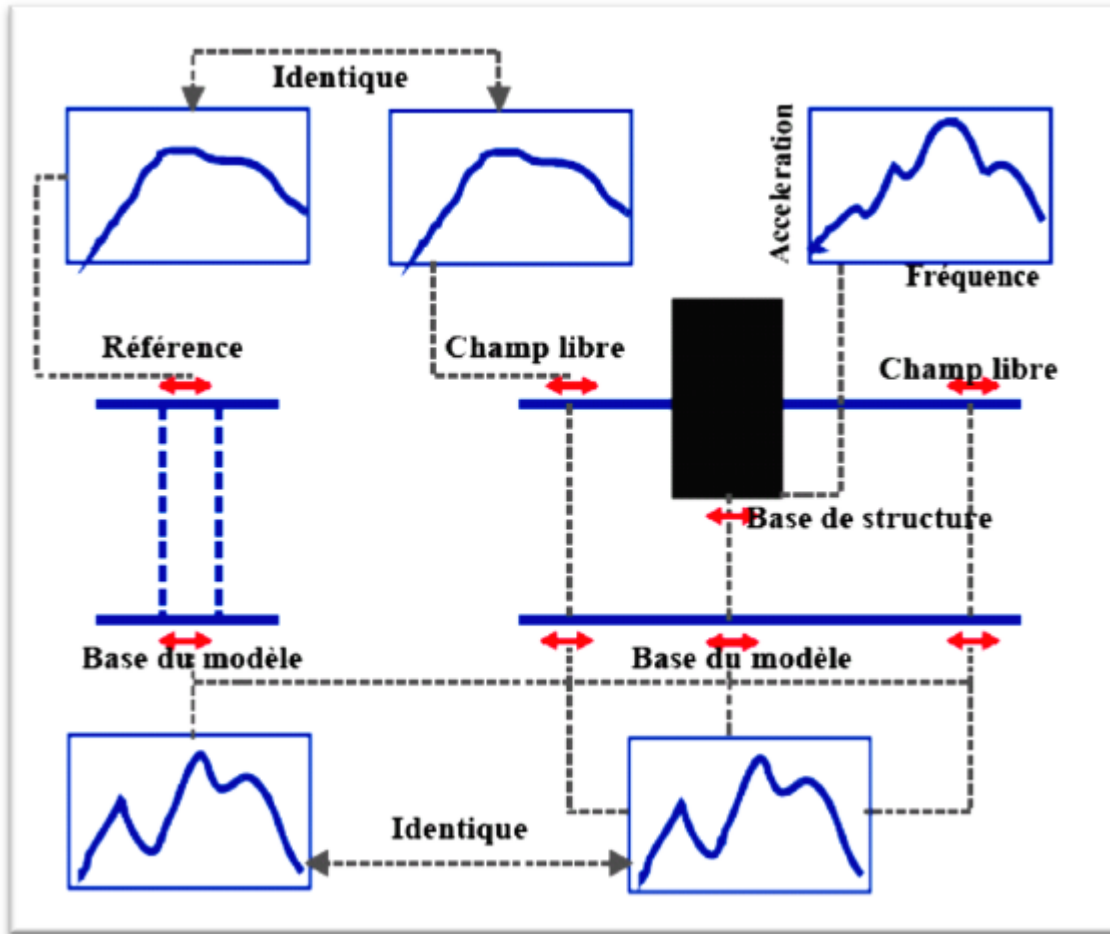


Figure III.7.1-1 : Schématisation d'un problème d'interaction Sol structure en éléments finis

III.7.2. Méthode sous structure

Elle vise à décomposer le problème en la somme de sous 58 problèmes plus simples à résoudre. Dans le cas de fondations rigides cette méthode consiste à utiliser le principe de superposition De [Kausel et al. 1978]. Cette démarche est illustrée par la figure (III.7.2-1). [11]

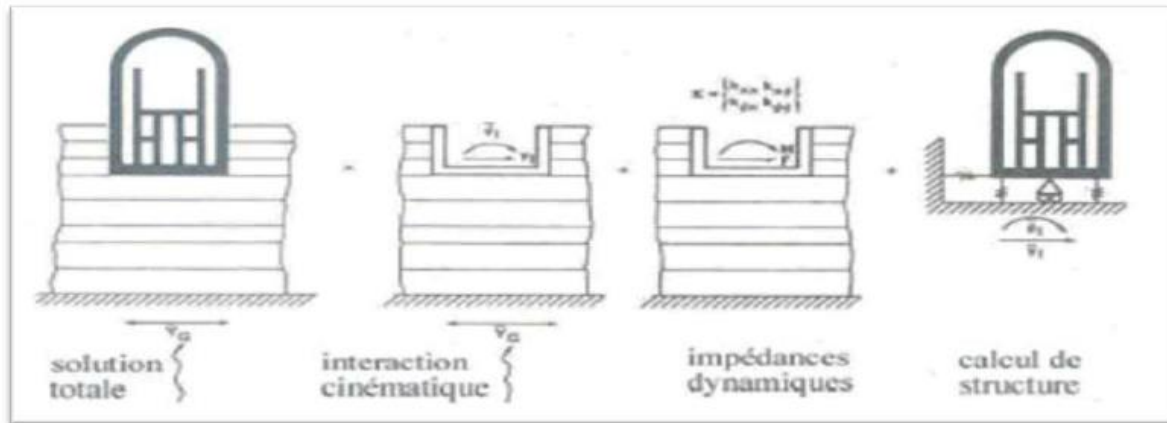


Figure III.7.2-1 : Les différentes méthodes pour prendre en compte l'ISS

D'un point de vue pratique, cette méthode consiste à décomposer la résolution du problème en trois étapes successives :

- Nous considérons le milieu {sol + fondation rigide sans masse}. En appliquant la sollicitation sismique à la base de ce milieu nous déterminons l'accélération à laquelle sera soumise la fondation. C'est le calcul de l'interaction cinématique.
- Nous calculons la matrice d'impédance dynamique de la fondation permettant d'obtenir les raideurs ainsi que les termes d'amortissement dans les différentes directions.
- Nous calculons la réponse dynamique de la structure supportée par les ressorts d'impédances trouvés en (ii) et soumise à la sollicitation calculée en (i)

Les différentes méthodes de sous-structures se différencient par la décomposition en sous modèles du modèle global : on distingue la méthode dite de frontière et la méthode de volume

III.7.2.1. Méthode de frontière

Cette méthode a été développée par Chopra-Gutierrez, Gutierrez, Kausel. Le modèle global sol-structure est divisée en deux sous-modèles représentant la structure et le sol Figure III.7.2.1-1 tel que la compatibilité des efforts et des déplacements est écrite le long de la frontière séparant les deux sous-structures. Avec les notations de la, les différentes équations d'équilibre s'écrivent :

structure:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_s \\ U_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \quad (1.11)$$

SOL :

$$\begin{bmatrix} M_f & 0 \\ 0 & M_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_f \\ \ddot{U}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fa} \\ K_{af} & K_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f \\ U_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -P_b \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1.12)$$

Dans les équations précédentes [M], [K] ont les significations usuelles des matrices de masse et de raideur et {U} représente le vecteur des déplacements absolus. Pour alléger la présentation, les termes d'amortissement ont été négligés. Les solutions numériques sont obtenues, pour la méthode de sous-structures, par intégration dans le domaine des fréquences

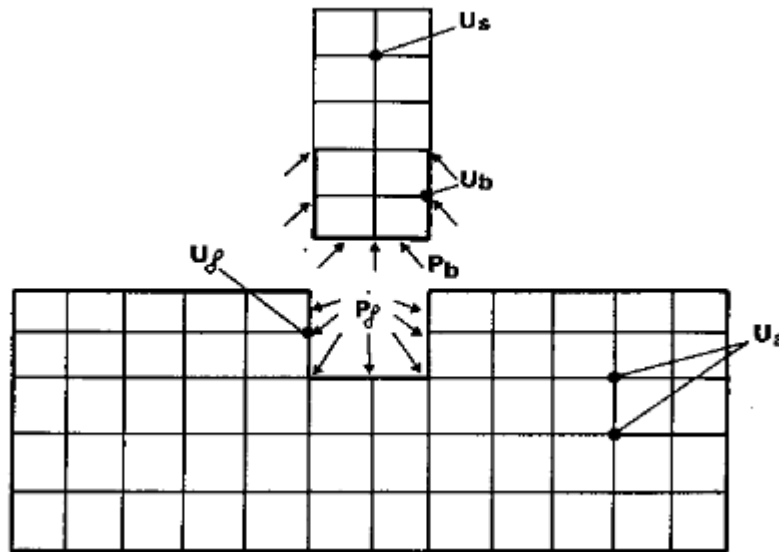


Figure III.7.2.1-2 : Méthode de sous-structures : méthode de frontière

III.7.2.2. Méthode de volume

L'interaction entre le sol et la structure est prise en compte, non seulement à l'interface sol-structure, mais à tous les nœuds de la structure sous la surface du sol, comme cela apparaît par la division en sous-structures définie sur la figure III.7.2.2-2

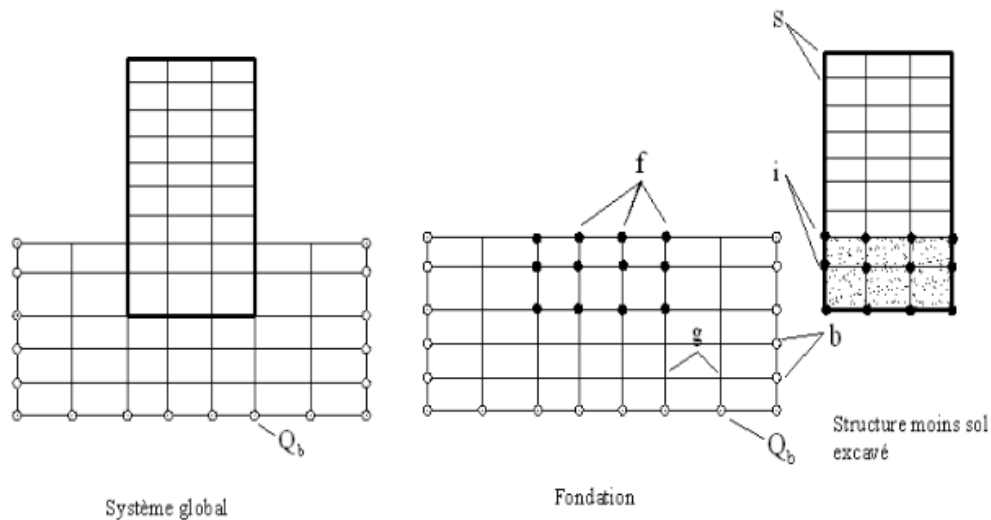


Figure III.7.2.2-1 : Méthode de sous-structures : méthode de volume

Les équations du problème peuvent alors être formulées comme pour la méthode de sous-structures envisagées précédemment. Tenant compte du fait que cette méthode n'est pratiquement utilisable que pour une intégration dans le domaine fréquence et pour alléger les notations.

III.8. Conclusion

Ce chapitre expose de façon sommaire le problème d'interactions sol-structure ainsi que la modélisation de cette interaction compte tenu de la nature du mouvement et des propriétés dynamiques de l'ouvrage et du sol. L'interaction sol-structure permet une approche réaliste du comportement des ouvrages.

Chapitre IV : MODELISATION NUMERIQUE PAR <<LE CODE PLAXIS>>

IV.1. Introduction

Dans sa version originale, le code de calcul par éléments finis PLAXIS représenté certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en analyse dynamique.

Dans sa version actuelle, il permet de traiter différents types de problèmes géotechniques (fondations, tunnels, ouvrages de soutènement, etc.) ; les calculs s'effectuant en déformations planes (analyses bidimensionnelle ou analyses 2D) ou en déformations axisymétriques (analyse tridimensionnelles ou analyse 3D).

L'algorithme général de résolution des équations non linéaires du code PLAXIS s'effectue selon un processus itératif permettant de déterminer à chaque pas de temps de calcul les champs de déplacement de vitesses et d'accélération correspondantes aux chargements appliqués ; l'équilibre résultant rapidement.

Il regroupe dans ses différentes versions plusieurs modèles élasto-plastique (Mohr Coulomb, Hard soil model, soft soil model...) qui permettent de simuler le comportement des sols. Il reste toutefois à l'ingénieur de choisir le modèle le mieux adapté au problème étudié

Dans ce chapitre on va présenter les principes du code de calcul PLAXIS V8.2 utilisé pour élaborer les simulations numériques ainsi que les modèles de comportement utilisés.

IV.2. Description de l'interface graphique

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassants, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel.

Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent (*Figure IV.2-1*).

Chaque branche réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

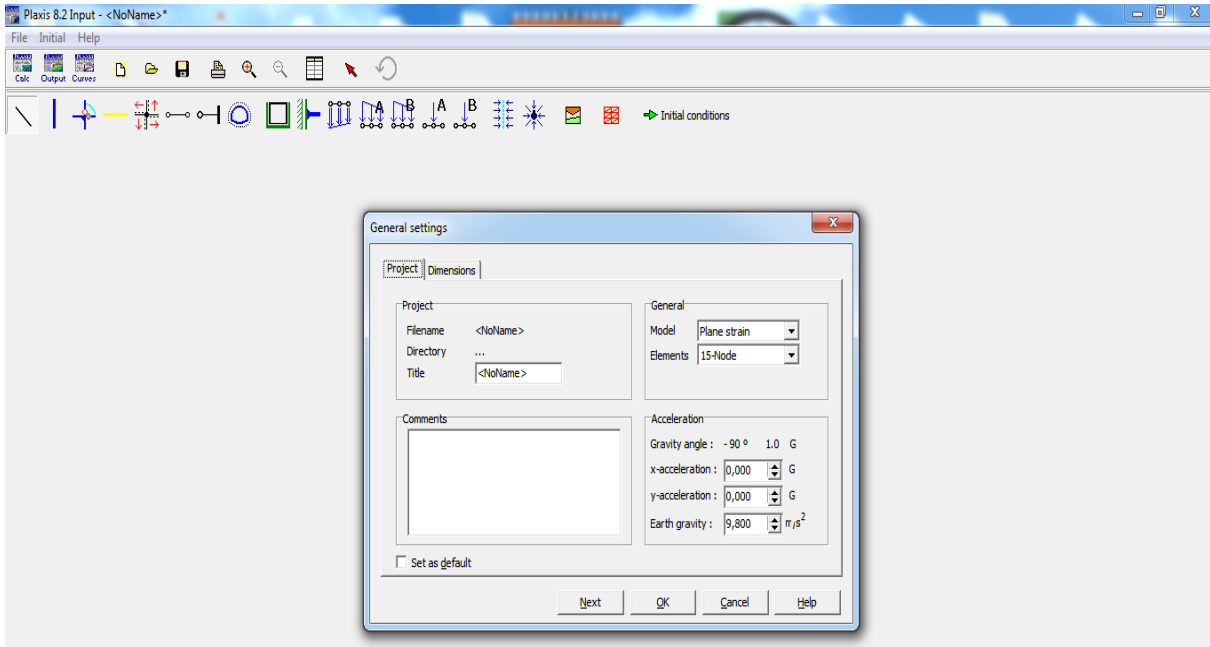


Figure IV.2-2 : interface utilisée pour l'entrée des données

IV.3. Le système d'options du code Plaxis

IV.3.1. Les conditions aux limites en déplacement

En ce qui concerne les conditions aux limites en déplacement :si celles-ci sont complexes l'ingénieur devra en spécifier les subtilités d'une manière précise. Par contre, si elles ont un caractère standard (vecteur déplacements nul à la base du dam étudié et vecteur déplacements horizontal nul sur ses face latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran.

(Figure IV.3.1-1).

CHAPITRE IV :MODELISATION NUMERIQUE PAR <<LE CODE PLAXIS>>

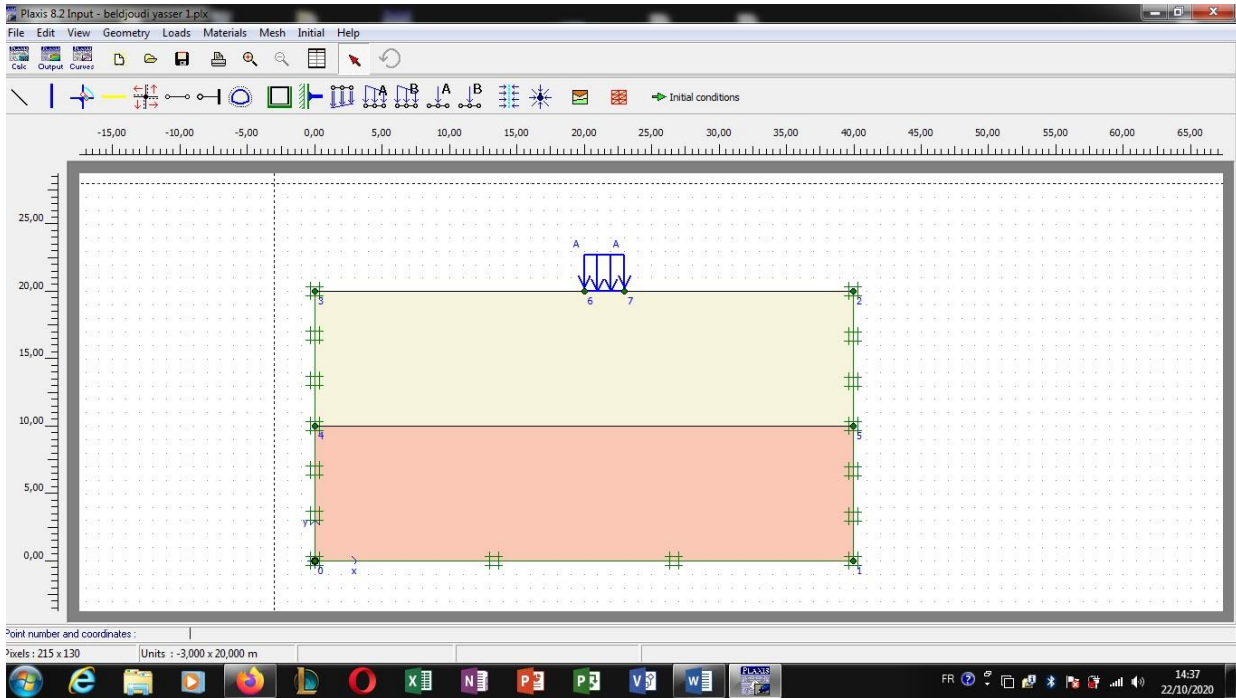


Figure IV.3.1-2 Condition aux limites

IV.3.2. Le Maillage

L'opérateur peut bien entendu de spécifier un maillage très détaillé *Figure IV.3.2-1* mais si seules les grandes lignes de celui-ci importent de détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds, avec un contrôle permanent à l'écran, mash coarseness élément distribution Very fine.

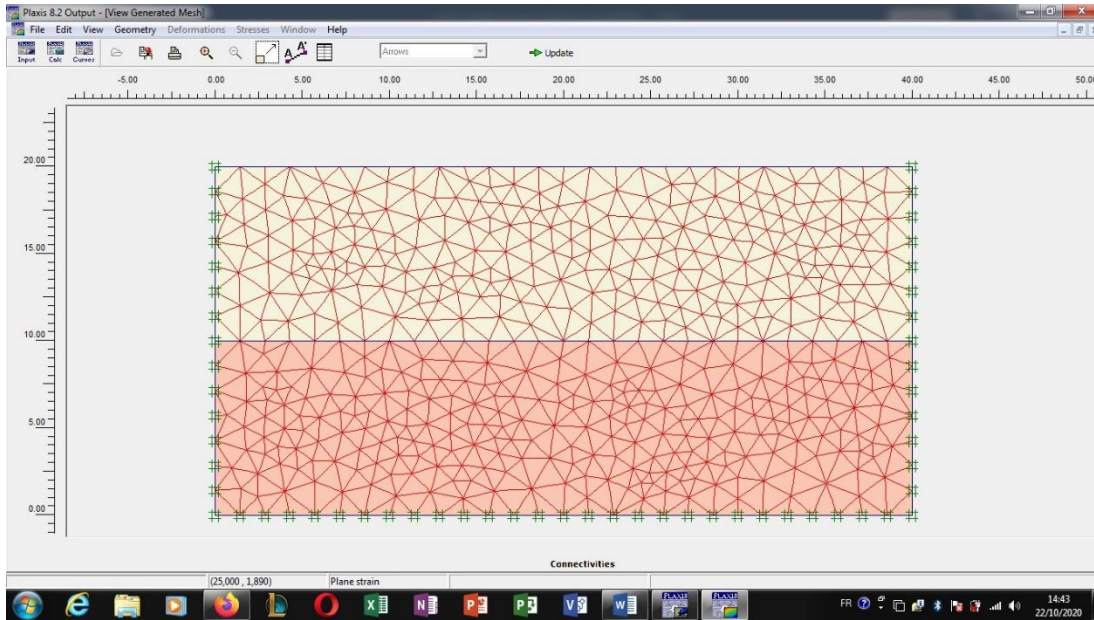


Figure IV.3.2-2 Exemple de maillage

IV.3.3. Les contraintes initiales dues au poids des terres

Peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre.

Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état K_0 donné, celui-ci

Peut-être spécifié directement. Dans ce cas ,le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre K_0 et les autres caractéristiques mécaniques),le menus permet alors, par un chargement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacements de manière a prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application de la gravité, l'option K_0 est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontal (paroi moulée dans un sol mou par exemple)

Figure IV.3.3-1

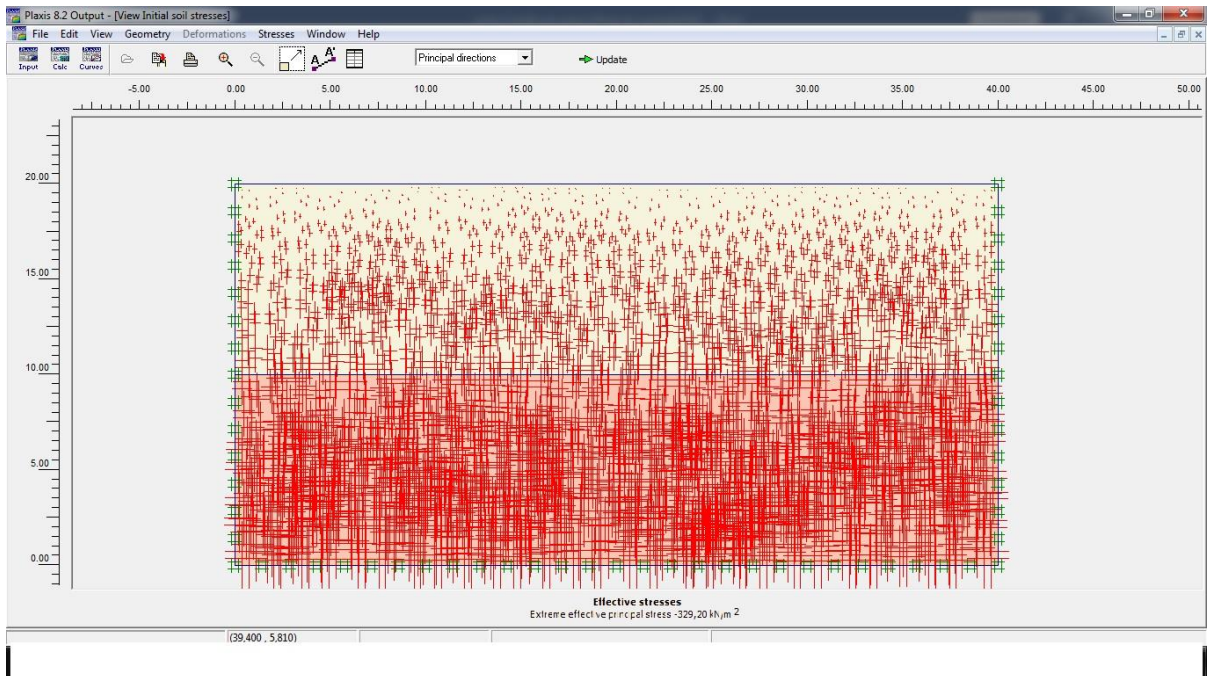


Figure IV.3.3-2 : Contraintes initiales (condition K0)

La conduite des calculs non linéaires constitue un autre exemple de la souplesse d'utilisation que procure ce logiciel : l'opérateur peut évidemment faire lui-même ses choix de taille d'étape de chargement de nombre d'étapes, de rigidité d'interface, de méthode de résolution. Etc.

Figure IV.3.3-3. S'il ne désire pas assumer ces choix, le logiciel peut les décider à sa place, compte tenu de l'expérience des numériciens en la matière.

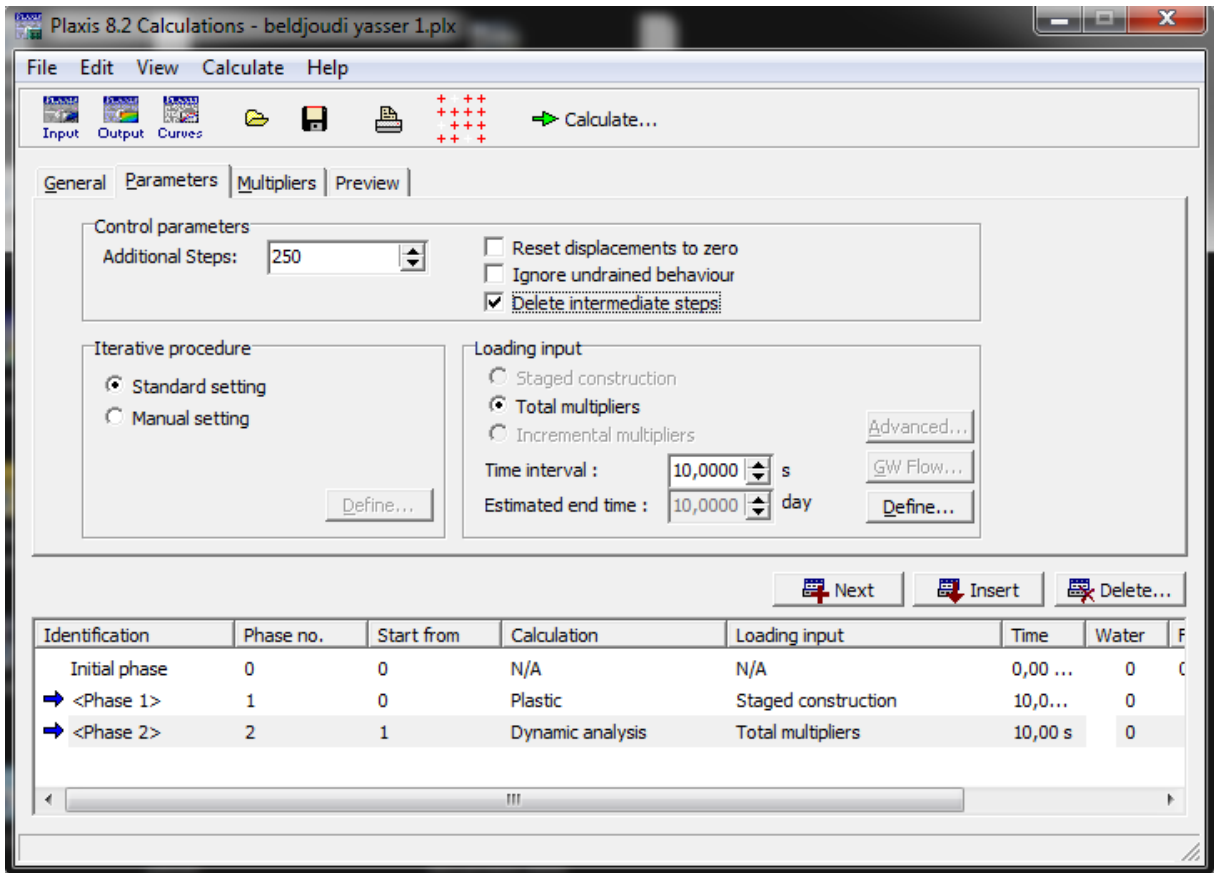


Figure IV.3.3-4 : interface utilisateur pour le choix du modèle de comportement du sol retenu pour les calculs

IV.4. Les modèles de comportements intégrés dans PLAXIS

On se restreint ici à ne décrire que les comportements élastiques linéaire et élasto-plastique.

IV.4.1. Modèles élastique linéaire

Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope. Le modèle comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young, et le coefficient de Poisson ν . Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol. si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. Les paramètres sont reliés par les trois expressions suivantes:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$K = \frac{E}{3(1+\nu)} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \dots\dots (4-3)$$

Les paramètres de ce modèle représentés sur la *Figure IV.4.1-1*.

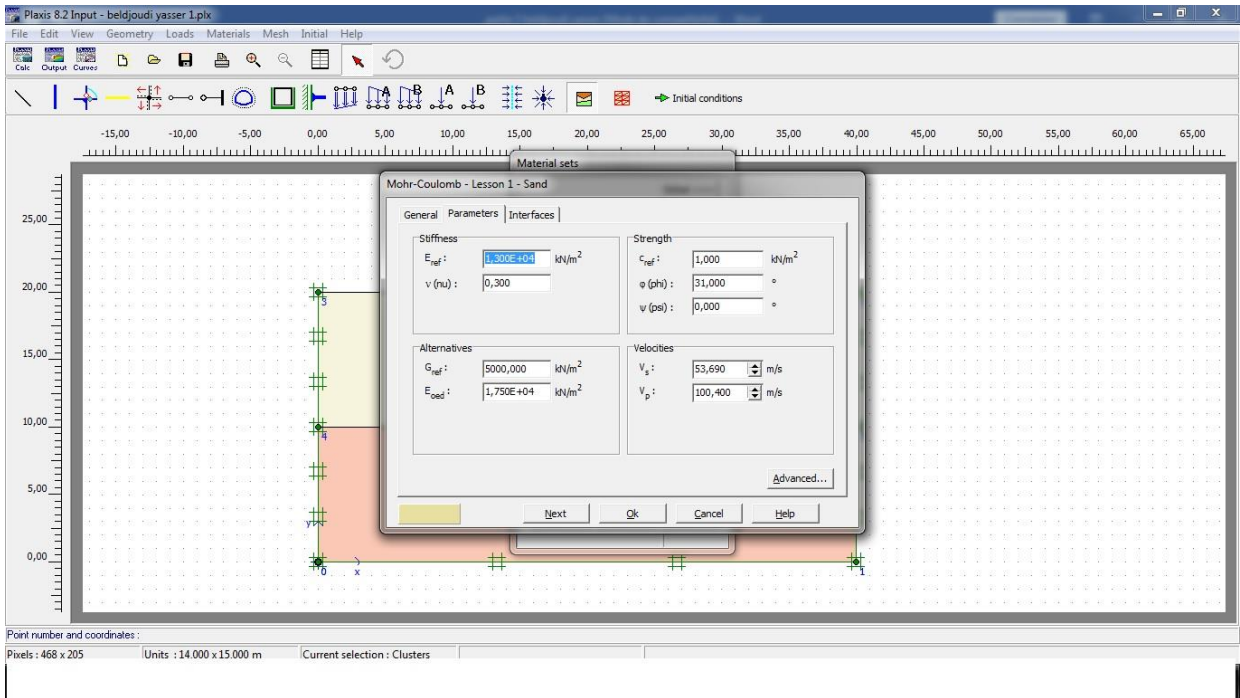


Figure IV.4.1-2 : Des paramètres du modèle élastique linéaire

Et les paramètres avancés sur la *Figure IV.4.1- 3*.

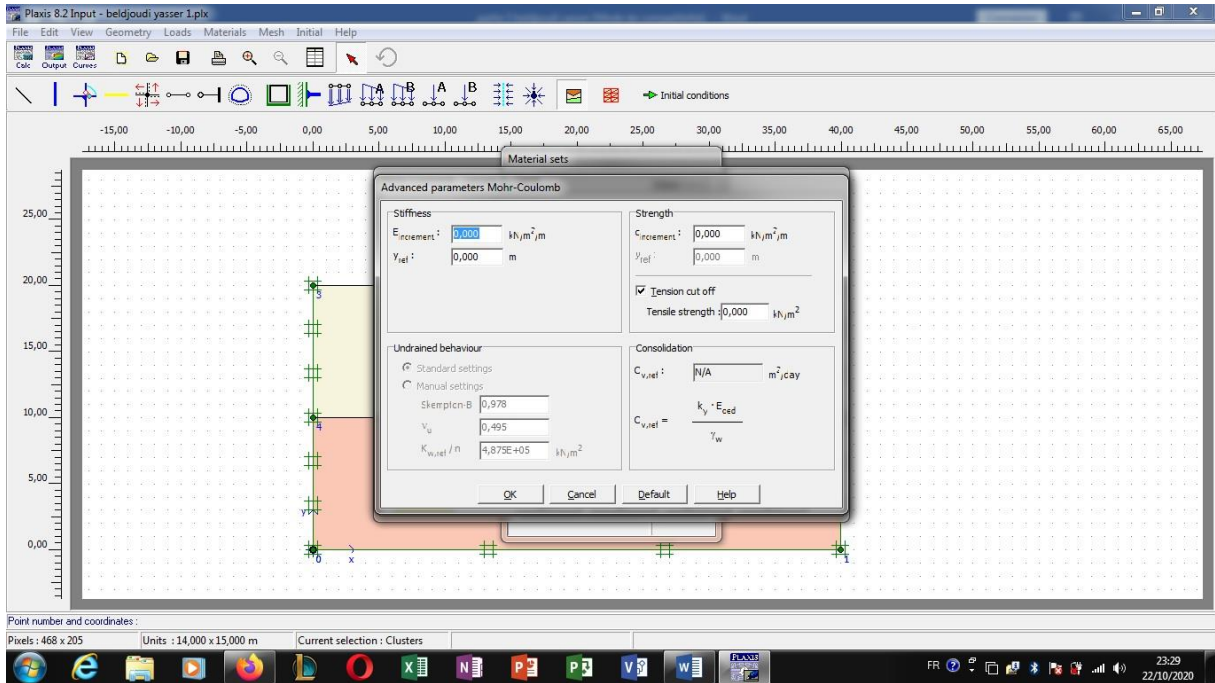


Figure IV.4.1- 4 : Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire

IV.4.2. Lois de comportement élasto-plastique

La plupart des matériaux ont un comportement élasto-plastique, qui n'est pas caractérisé par l'apparition de déformations réversibles élastiques et de déformations irréversibles plastiques. Sur la surface de charge, deux cas de comportement sont possibles : la surface de charge n'évolue pas, on parle de loi élastique parfaitement plastique, c'est le cas du modèle de Mohr-Coulomb ; la surface de charge évolue au cours du chargement, on parle de modèle élasto-plastique avec écrouissage (Figure IV.4.2-1) dont le modèle Hardening Soil de PLAXIS fait partie.

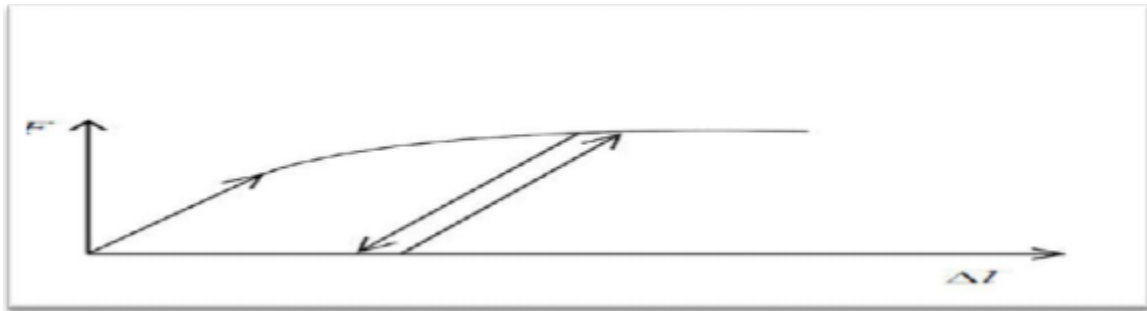


Figure IV.4.2-2 .Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage

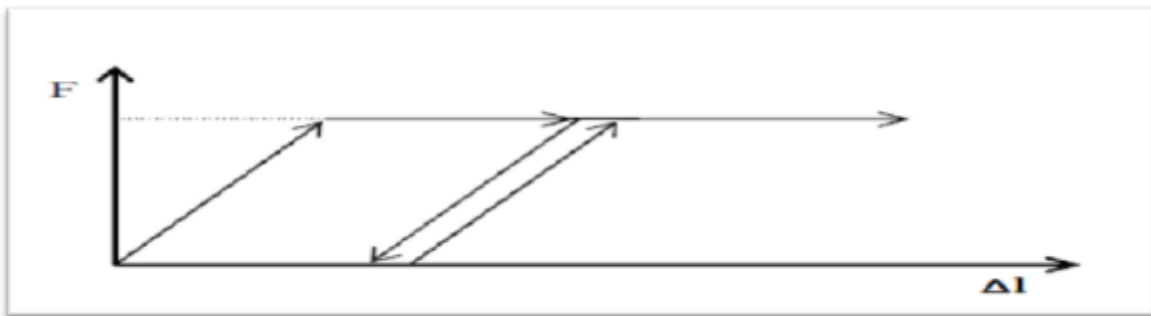


Figure IV.4.2-3 Représentation du comportement élastique- parfaitement plastique sans écrouissage

IV.4.3. Modèle de Mohr-Coulomb

Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. *Figure IV.4.3-1* Ce modèle comporte cinq paramètres dont 2 paramètres élastiques : E et ν et 3 paramètres de Rupture (c , ϕ , ψ) . Tels que : le module d'Young « E », le coefficient de Poisson « ν », la cohésion « c », l'angle de frottement « ϕ », et l'angle de dilatance « ψ ».

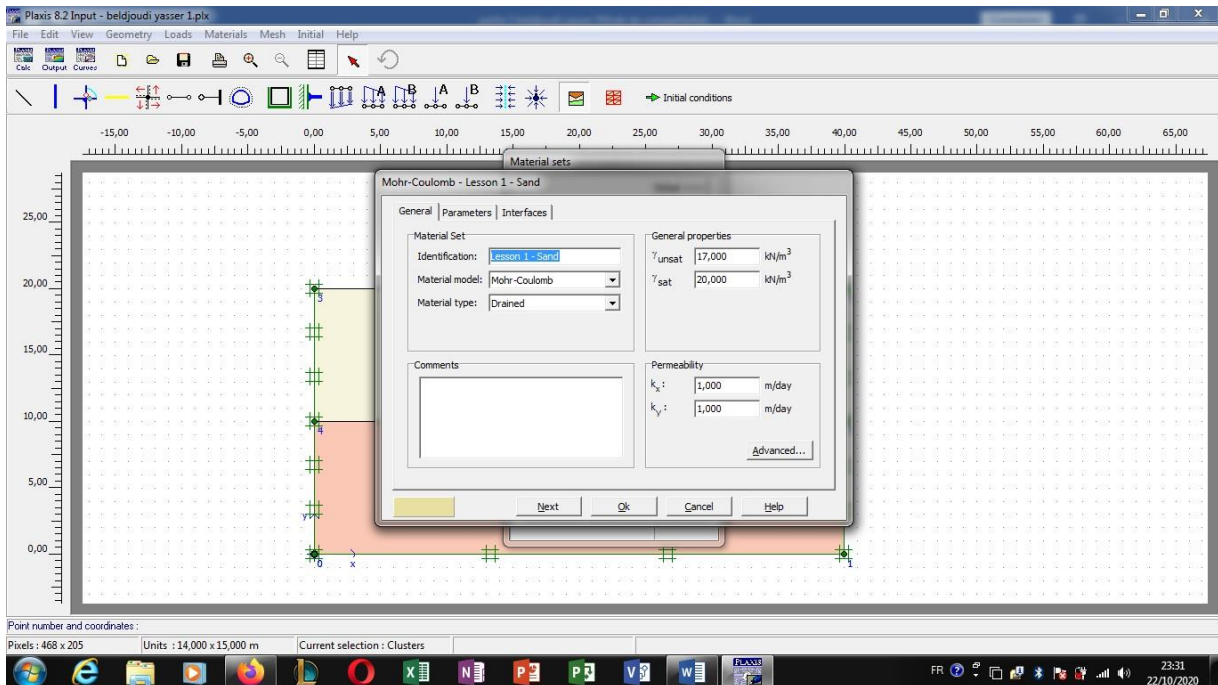


Figure IV.4.3-2 Paramètres de modèle Mohr-coulomb

IV.5. Module dynamique du code PLAXIS

Version 8.2 du code PLAXIS.

Le PLAXIS V8.2 nous permet d'étudier un problème dynamique. La charge dynamique est généralement appliquée le long du substratum de la structure. Cette action peut être représentée par une force, vitesse, ou une accélération variable en fonction du temps, Dans le programme Input ; il faut spécifier quel est le système de chargement qu'on va choisir pour représenter L'action dynamique par l'option de (set dynamique load system). Dans le programme de calcul, ou peut considérer soit une sollicitation harmonique (*Figure IV.5-1*), soit une sollicitation sismique (*Figure IV.5-2*).

CHAPITRE IV :MODELISATION NUMERIQUE PAR <<LE CODE PLAXIS>>

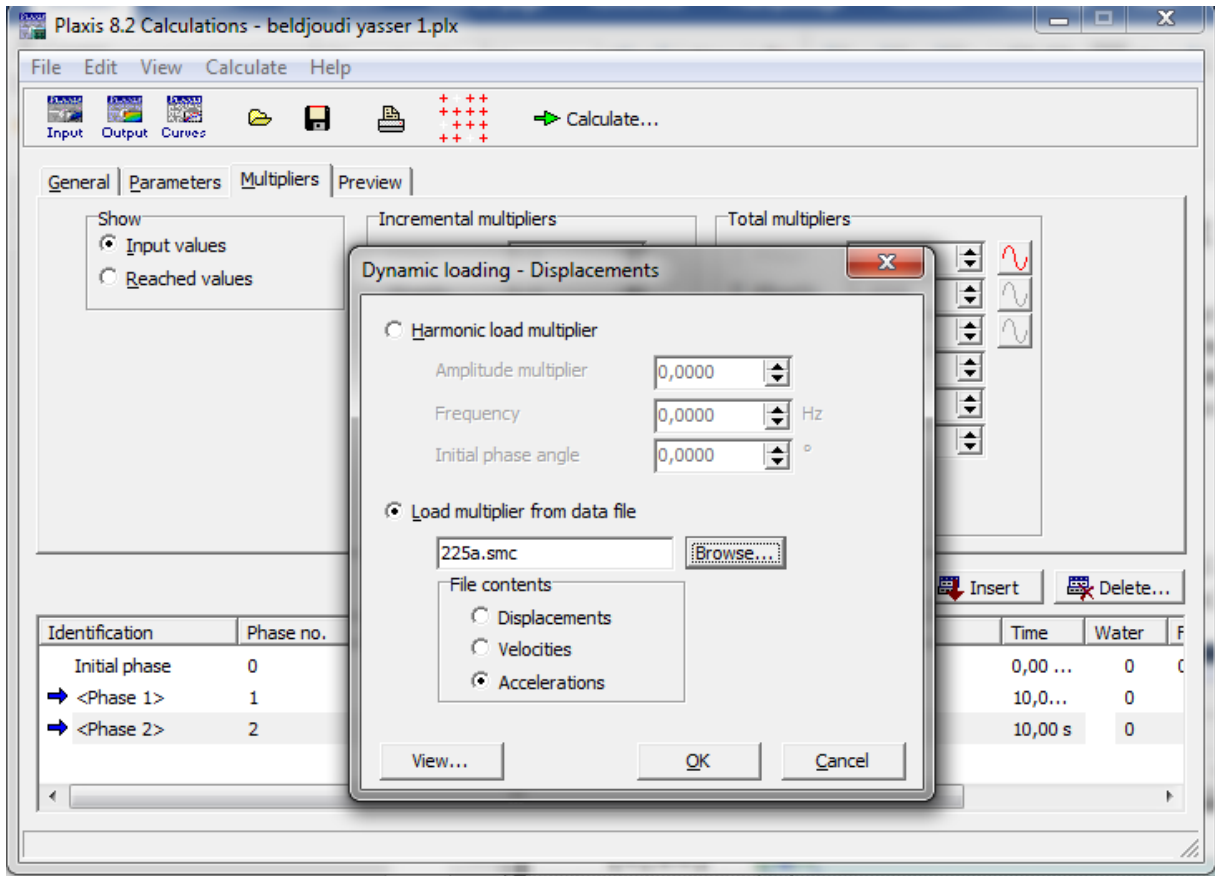


Figure IV.5-3 fenêtre d'insertion d'un fichier accélérogramme

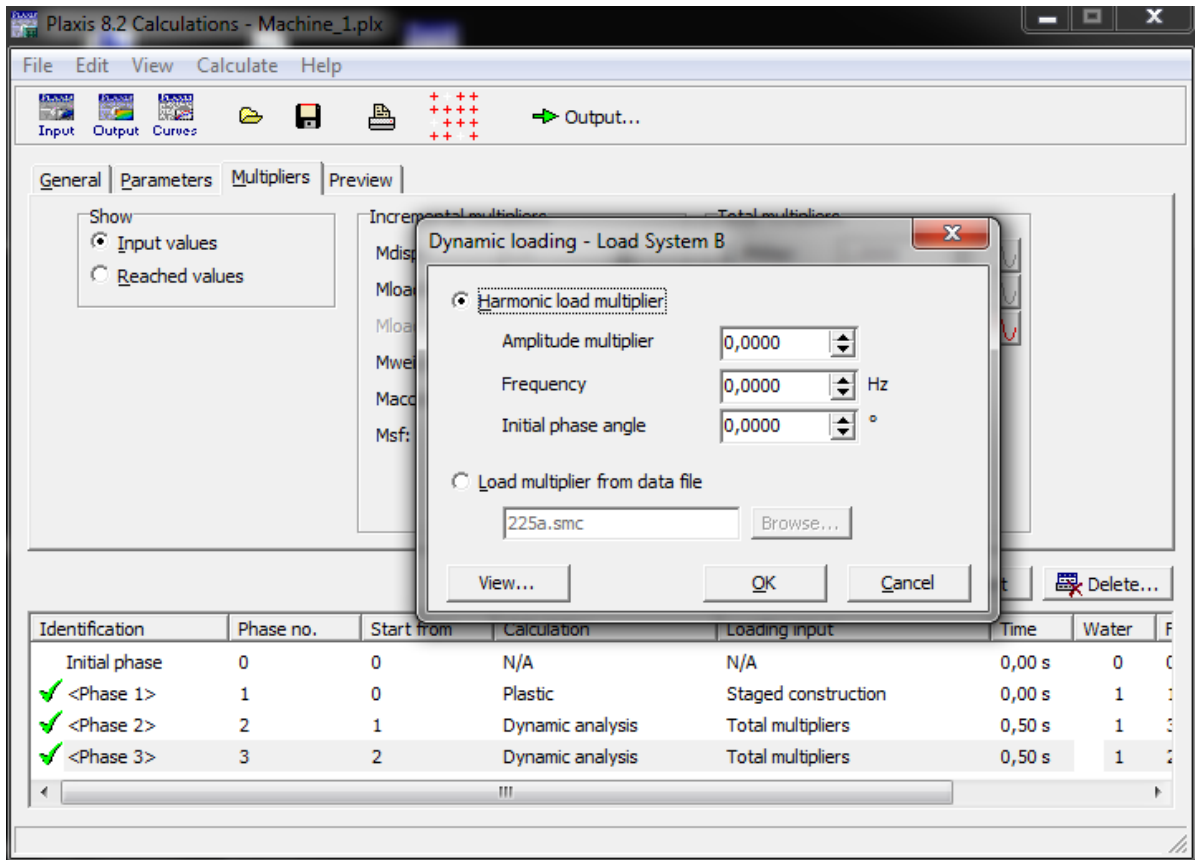


Figure IV.5-4 Fenêtre de commande d'une excitation harmonique

CHAPITRE V : MISE EN OEUVRE DES CALCUL

V.1. Introduction

Cette application numérique a pour but d'étudier l'interaction entre une fondation superficielle et le sol d'assise, constitué d'une couche de sol homogène. On s'est restreint au comportement du sol type élastique linéaire de type drainé vu que les sollicitations sismiques sont très brèves, dans cette simulation numérique, il est question de déterminer les contraintes, les déformations, et l'accélération au niveau du massif de sol-fondation, et des éléments de la structure (l'influence de la profondeur).

V.2. Modèle de calcul retenu

Le profil géométrique retenu pour le calcul est présenté sur la (Figure V.2-1).il est constitué d'une semelle de 3 m, reposant sur un massif de sol homogène sans eau, de 20m de hauteur et 40m de longueur, pour des raisons de système, seule les moitiés du modèle est représenté ici.

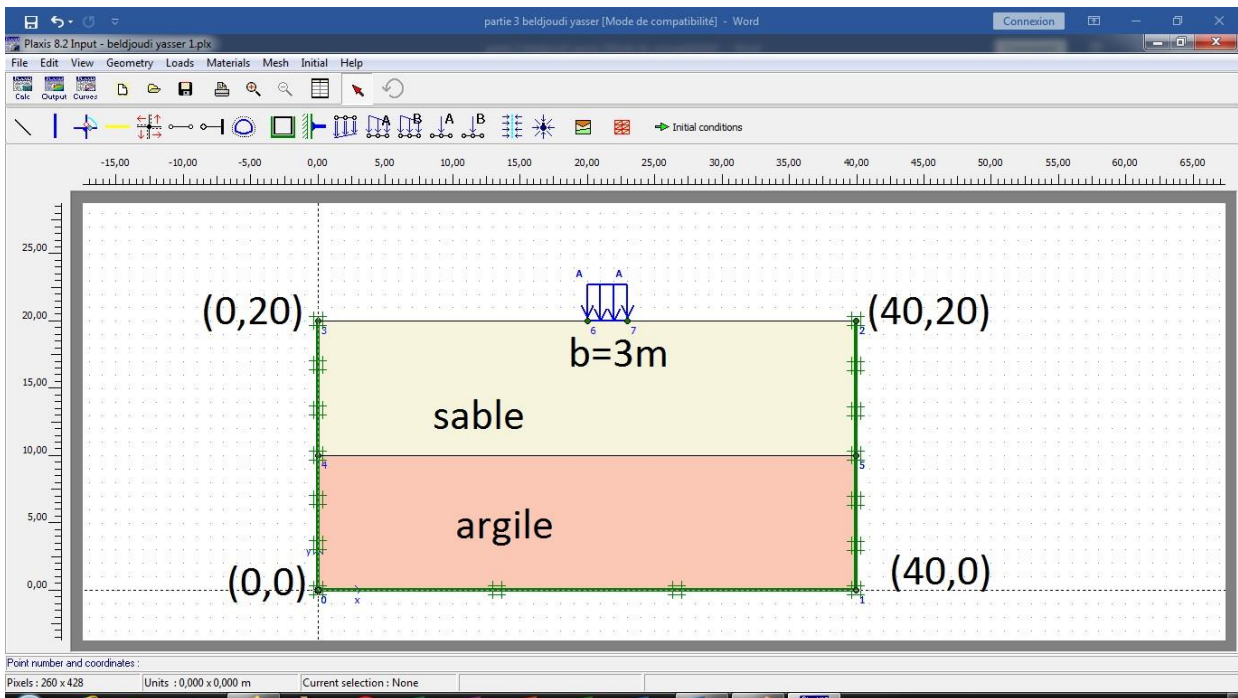


Figure V.2-2 profil géométrique retenu

Les conditions aux limites choisies correspondent aux limites par défaut

Déplacement horizontale nulle sur les deux faces verticales et sur la base du modèle et déplacement verticaux nuls à la base du modèle.

V.3. Caractéristiques des matériaux

V.3.1. Le Sol de fondation

Le tableau V.3.1-1 donne les caractéristiques géotechniques du sol constituant le massif de fondation.

Paramètre	Symb	Unité	Sable	Argile
Profondeur H		M	10	10
Poids volumique Sec		Kn/m ³	17	16
Poids volumique humide		Kn /m ³	20	18
Perméabilité Horizontale	Plaxis	M/s	Plaxis	Plaxis
Perméabilité Verticale	Plaxis	M/s	Plaxis	Plaxis
Module d'Young	E _{ref}	Mpa	13000	10000
Module G	G _{ref}	Mpa	5000,000	3703,704
Coefficient de poisson			0,300	0,350

CHAPITRE V : MISE EN ŒUVRE DES CALCULS

Facteur de rigidité			1	1
Angle de dilatation			0	0
Angle de frottement			31,000	25,000
Cohésion	C _{ref}	K _{pas}	1,000	5,000

Tableau V.3.1-1 : propriétés du sol de fondation

V.3.2. La semelle

Elle est constituée en béton armée dont les propriétés sont de l'élément structural

-les propriétés de l'éléments structuraux sont résumées dans le tableau V.3.2-2;

Paramètre	Nom	Valeur	Unité
Type de comportement	Martial type	Élastique	-
Rigidité normale	EA	500000	Kn /M
Rigidité de flexion	EI	8500	Knm ² /m
Epaisseur équivalent	D	0.143	M
Poids	W	0	KN/m/M
Coefficient de poisson	V	0	-
Rayleigh damping		0.01	-

Tableaau V.3.2-1 ; propriétés de l'éléments structural (plate)

La valeur de charge répartie uniformément :

Chargeur statique appliqué sur l'éléments $A=300kn$

V.4. Génération de maillage

Le modèle de référence choisi est constitué par des éléments triangulaires a 15 nœuds .la

Figure V.4-1 présenté le maillage effectué du modèle.

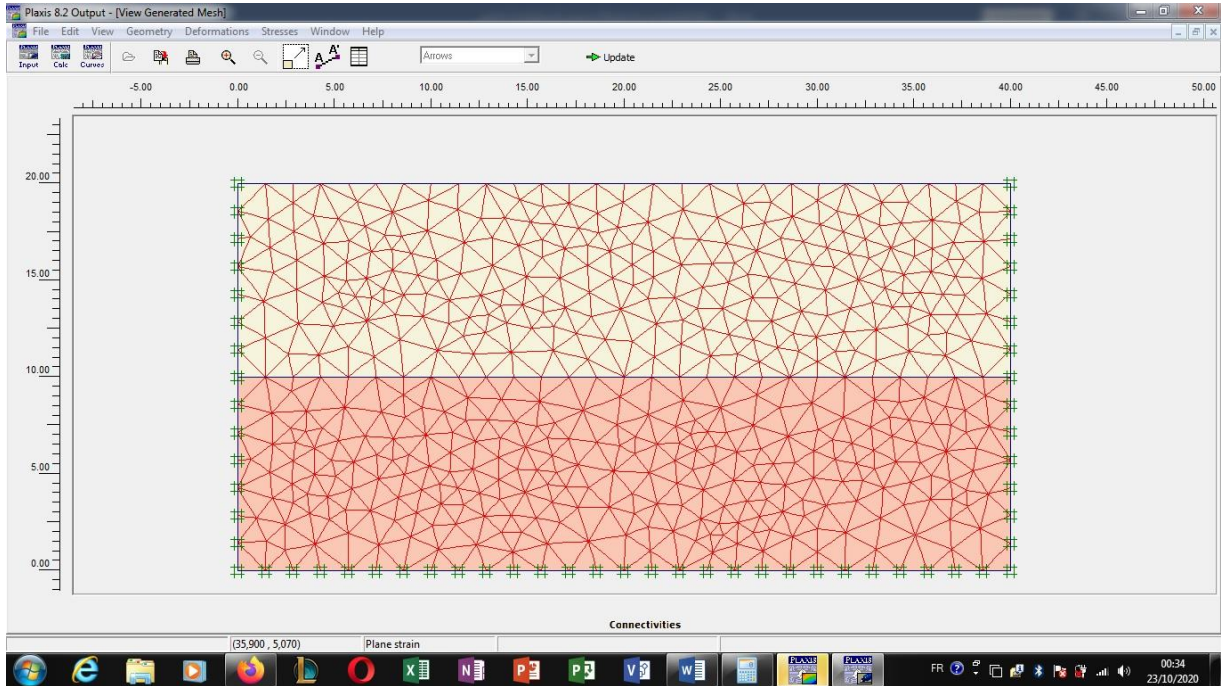


Figure V.4-2 : maillage du modèle

V.5. Conditions initiales

Elles correspondent à un état de type $K0=1$ (contraint de type géotechnique) *Figure V.5-1*

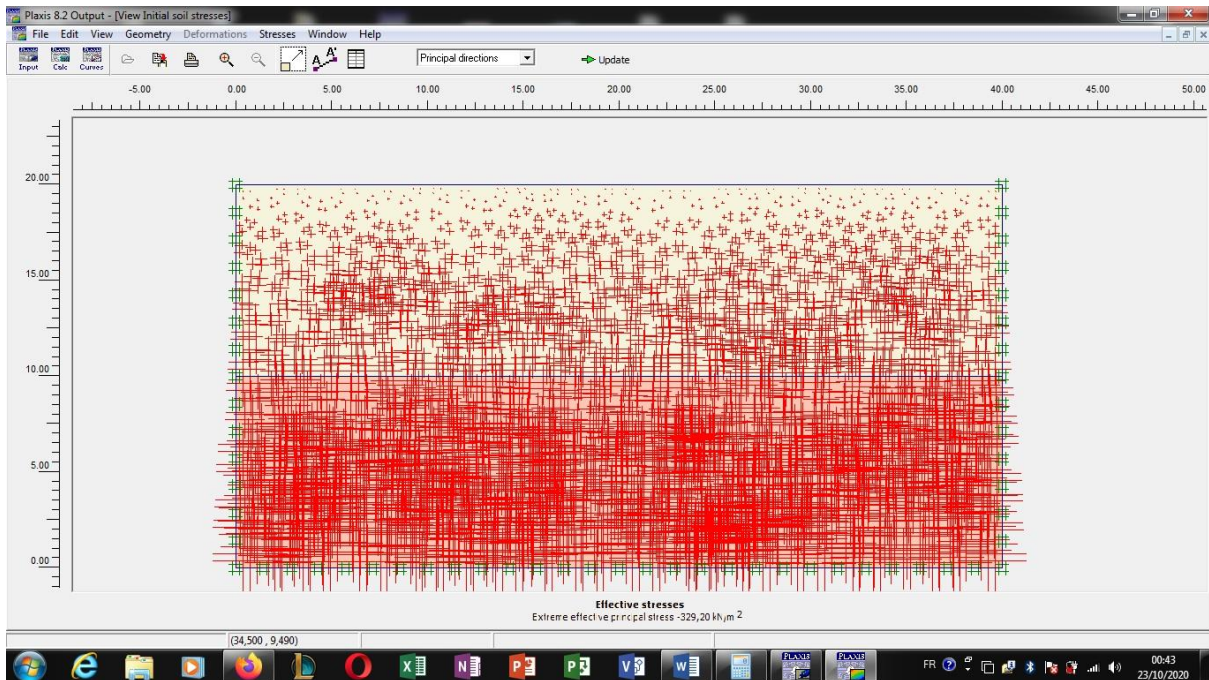


Figure V.5-2 : génération des contraintes initiales

V.6. Sollicitations sismiques

Dans cette application numérique, trois types de sollicitations sismique sous forme de déplacement imposés à la base du modèle de calcul ont été considérées :

- Une accélération horizontale simulant le mouvement horizontal.
- Une accélération verticale simulant le mouvement vertical.
- Une accélération inclinée simulant la combinaison des deux mouvements précédents.

CHAPITRE V : MISE EN ŒUVRE DES CALCULS

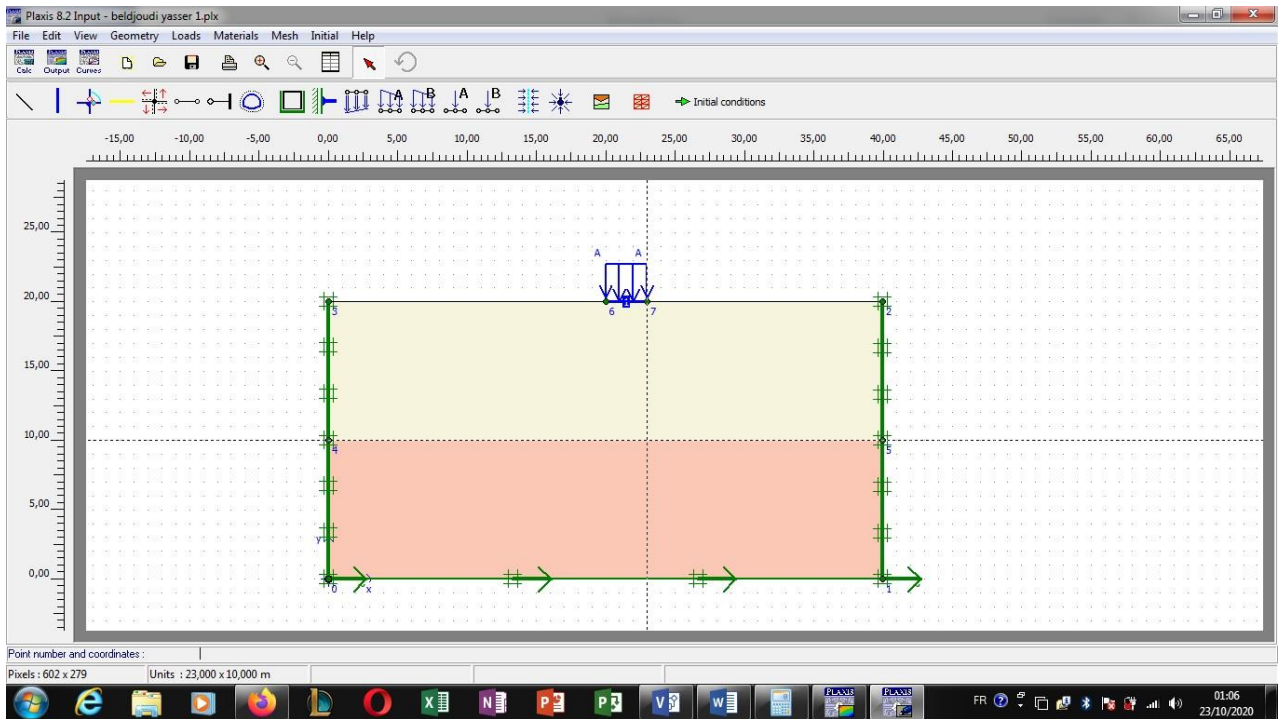


Figure V.6-1 : cas Horizontal imposée à la base du modèle de calcul

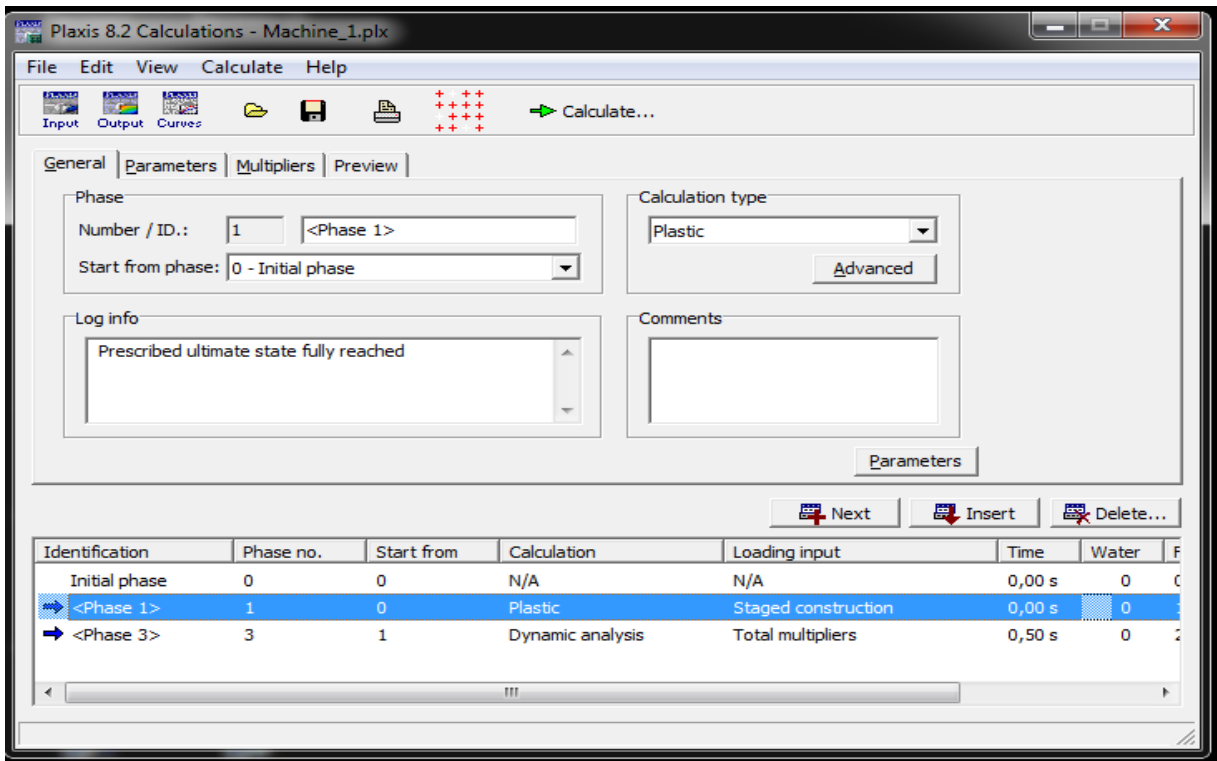


Figure V.6-2 : phases de calcul

V.7. Procédure de calculs

En trois phases dans l'ordre, d'excavations comme suit :

- (Phase 0) : initiation des contraintes géostatiques (procédure K0), une phase initiale suivie de deux phases (01) et (02)
- Phase (01) : calcul plastique avec la procédure «<stage construction>», en conditions drainées avec activation des éléments «<plates of the building>», et de la charge statique «<static load system A=300kn>»
- Phase (02) : chargement dynamique «<Dynamic analysis>» et «<rest displacement to zero>»

CHAPITRE V : MISE EN ŒUVRE DES CALCULS

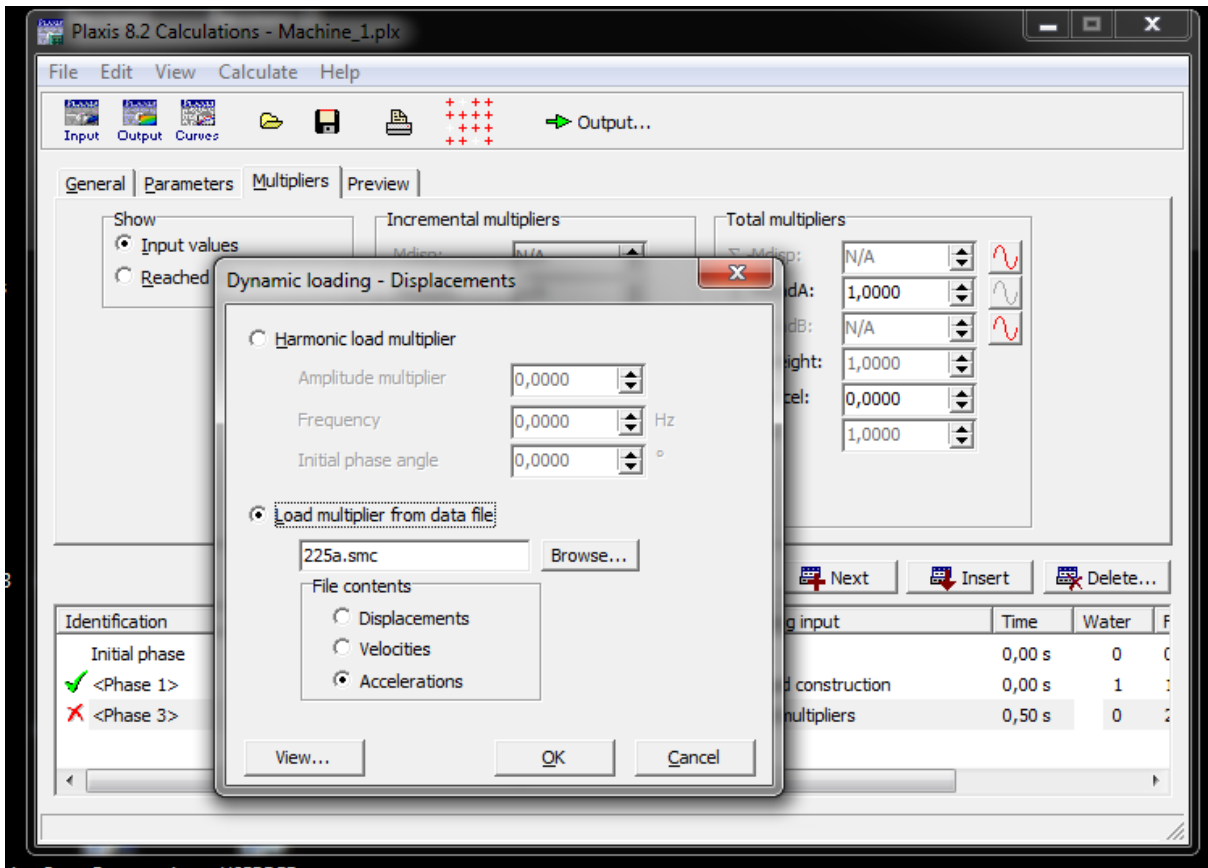


Figure V.7-1 : Activation de la charge dynamique

Figure V.7-2 présenté de calcul lancé après avoir choisi les point au voisinage de la structure (point A,B ,C,D,E) sur la modèle pour tracer les courbes de déplacement ,vitesse et l'accélération Figure V.7-3.

CHAPITRE V : MISE EN ŒUVRE DES CALCULS

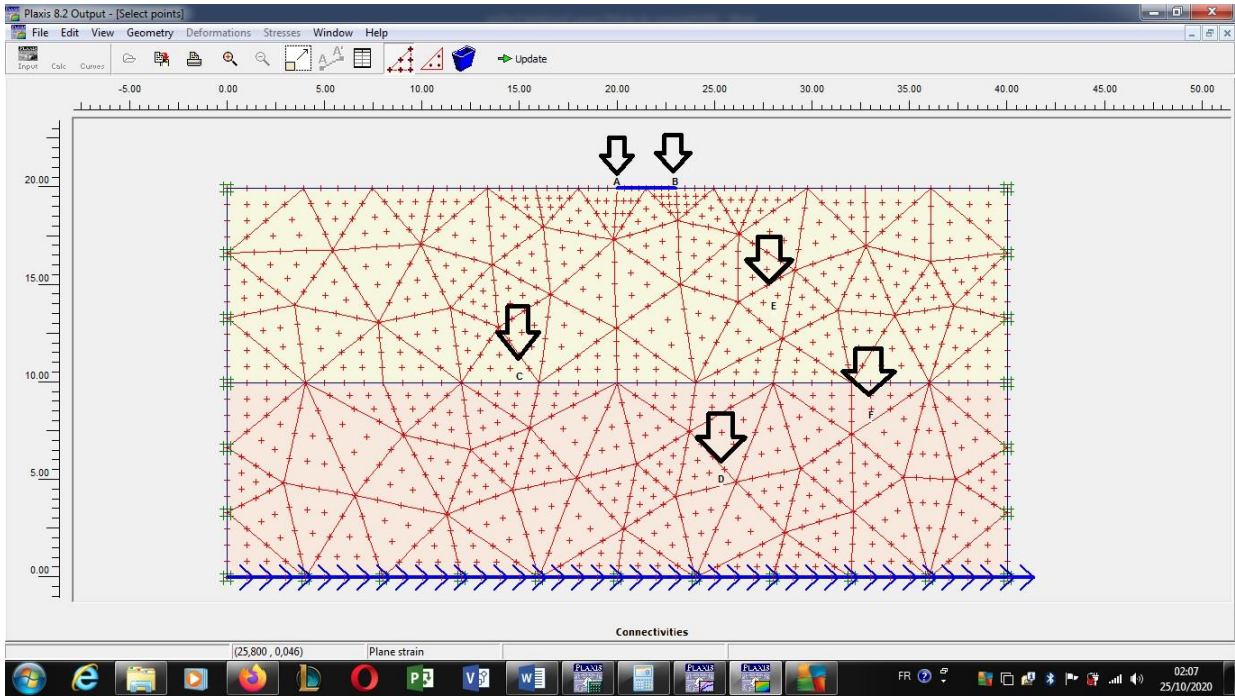


Figure V.7-4 : trace des points sur le profil

CHAPITRE VI : RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION

VI.1. Introduction

Dans la nature, les séismes peuvent être d'orientation horizontale,

Notre simulation se divise en trois parties :

❖ Simulation horizontale.

L'objectif de ces simulations est la vérification des interactions sol-structure dans les sismique suivant : Déplacement(m) ; vitesse(m/s) et accélérations(m/s²) suivant le temps.

- Ces paramètres sont mesurés selon 2 axes :
- Un axe horizontal
- Un axe vertical

Dans cette étude, la comparaison sera faite sur les trois paramètres :

- Les déplacements en fonction du temps
- La vitesse en fonction du temps
- L'accélérations en fonction du temps

Coordonné des points : voir le tableau VI.1-2

N de point	Point A	Point B	Point C	Point D	Point E	Point F
X(m)	20	23	14	23.3	28.5	34.5
Y(m)	20	20	10	5.8	13.2	10.9

Tableau VI.1-1 : données des points

On présente après les résultats détaillés pour chacun des trois types de calculs effectués, puis les interprétations,

VI.2. Résultats des calculs

VI.2.1. Déplacement horizontal imposé à la base

L'onde sismique horizontale imposée à la base du modèle de calcul produit les effets ci-après.

- Maillage déformé

CHAPITRE VI : RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION

- Contraintes
- Déplacements
- Synthèse

❖ Maillage déformation

Le maillage déformé du modèle de calcul représenté sur la *Figure VI.2.1-1*

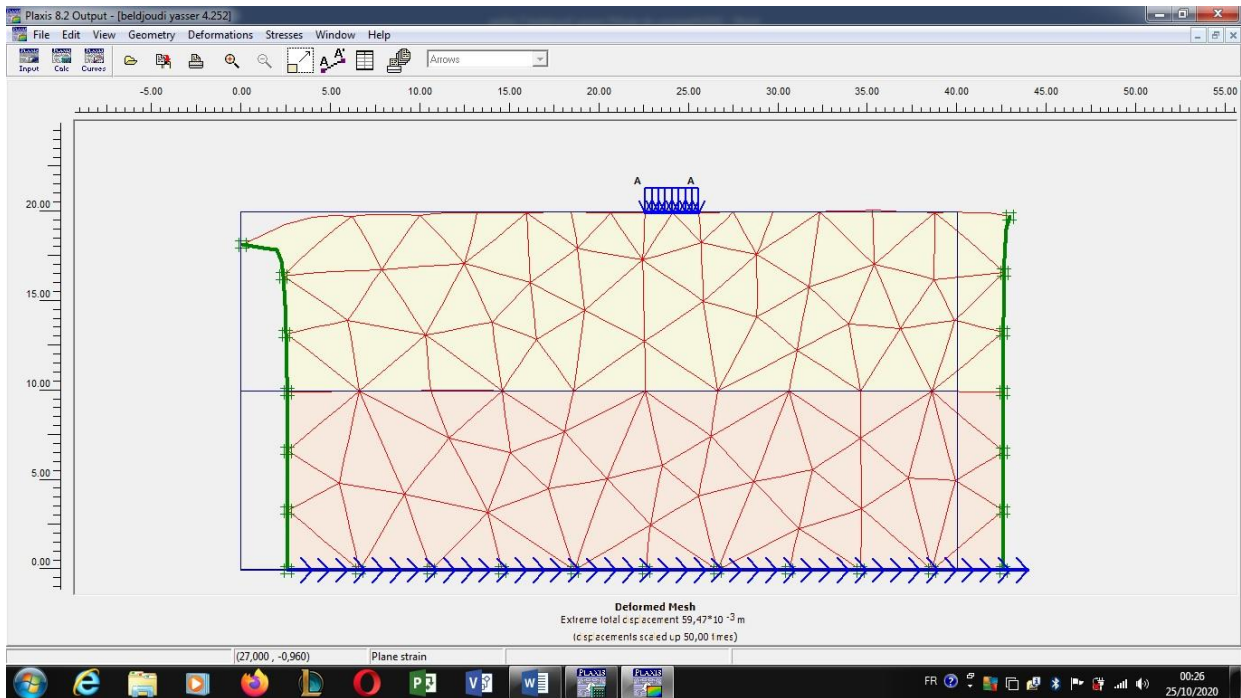


Figure VI.2.1-2 : maillage déformé du profil

CHAPITRE VI : RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION

❖ Contraintes

Les iso valeurs des contraintes des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la *Figure VI.2.1-3*.

La valeur de contrainte est : $A= 328.32\text{KN/m}^2$.

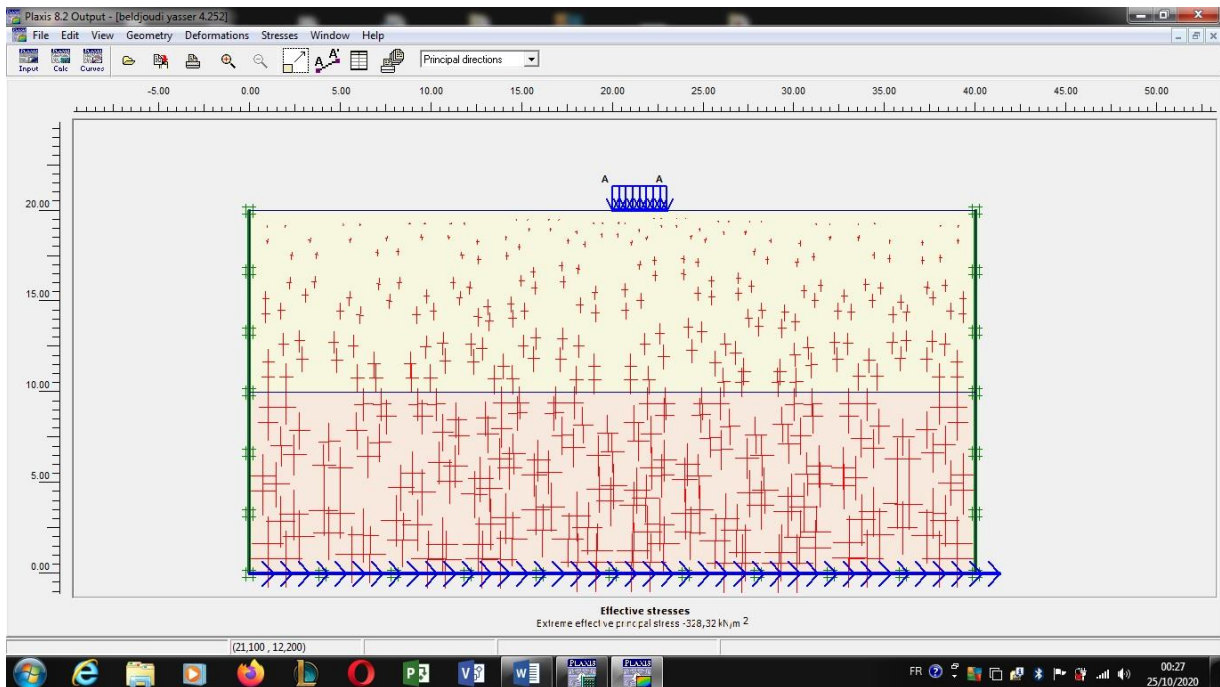


Figure VI.2.1-4 : valeur des contraintes

CHAPITRE VI : RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION

❖ Déplacements

Les vecteurs déplacements sont représentés sur la *Figure VI.2.1-5*

On note un déplacement maximal égal à : $59.47 * 10^{-3}$ m.

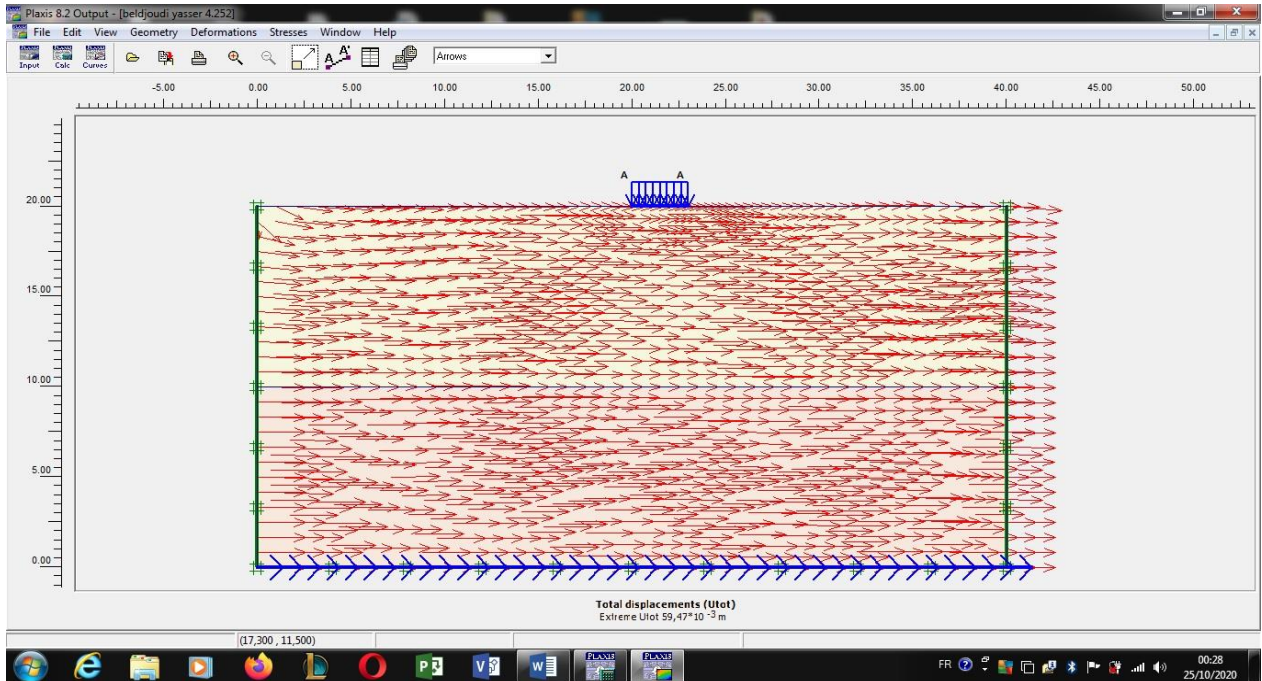


Figure VI.2.1-6 : les déplacements Totaux

1. Courbe déplacement-temps

Axe XX'

Le champ de ces vecteurs est très intéressé au voisinage de la fondation et uniforme dans la majorité du modèle

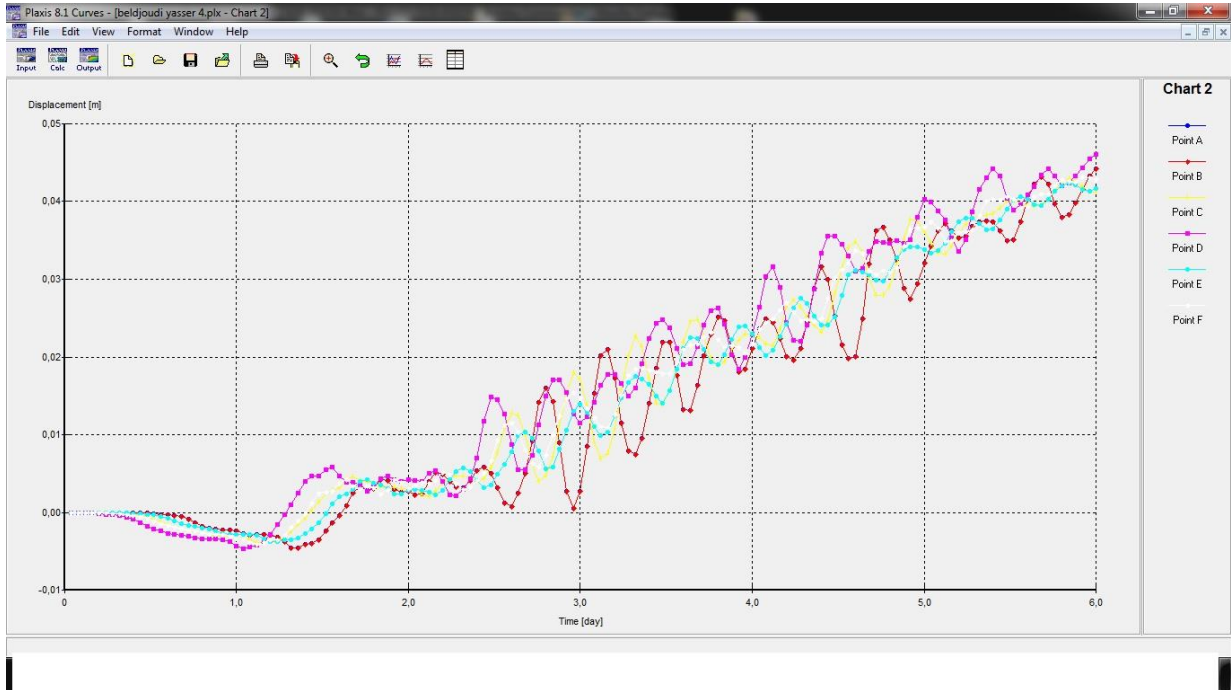


Figure VI.2.1-7 : Déplacement-temps suivant l'axe XX'

La *Figure VI.2.1-8* .montre le déplacement pour les différents points du modèle la valeur du déplacement croit en fonction du temps

Axe YY'

CHAPITRE VI : RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION

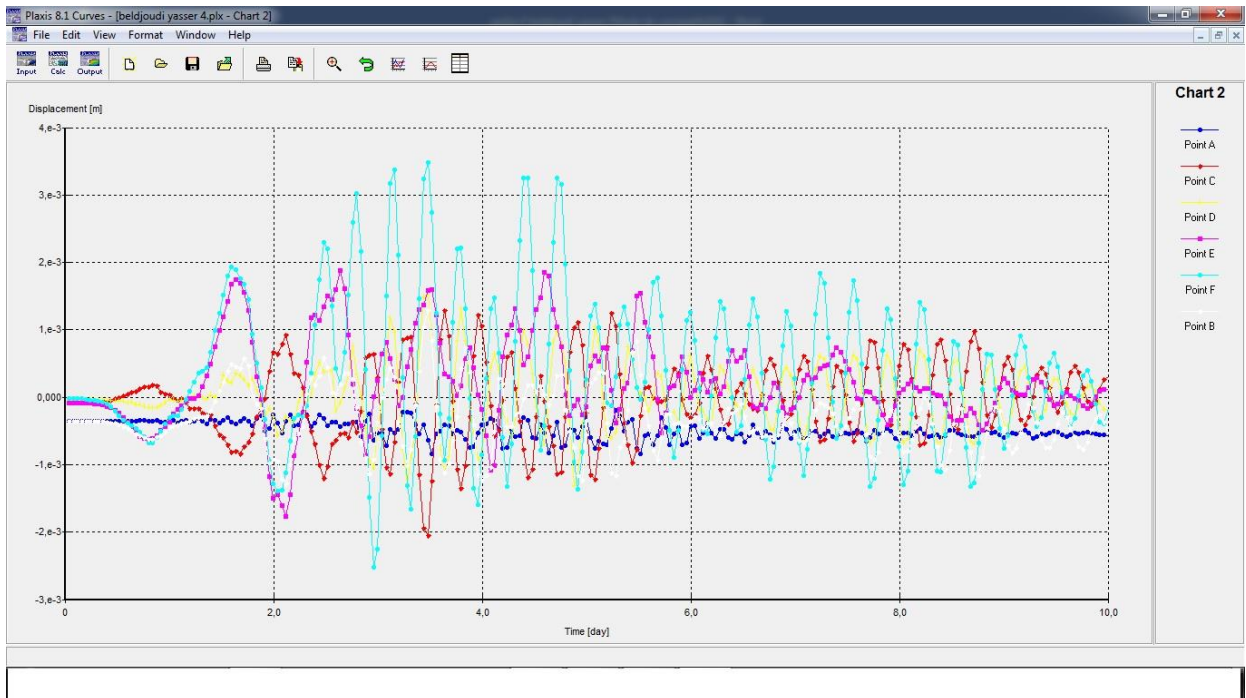


Figure VI.2.1-9 : Déplacement-temps l'axe YY'

2. Courbe vitesse-temps

— Axe XX'

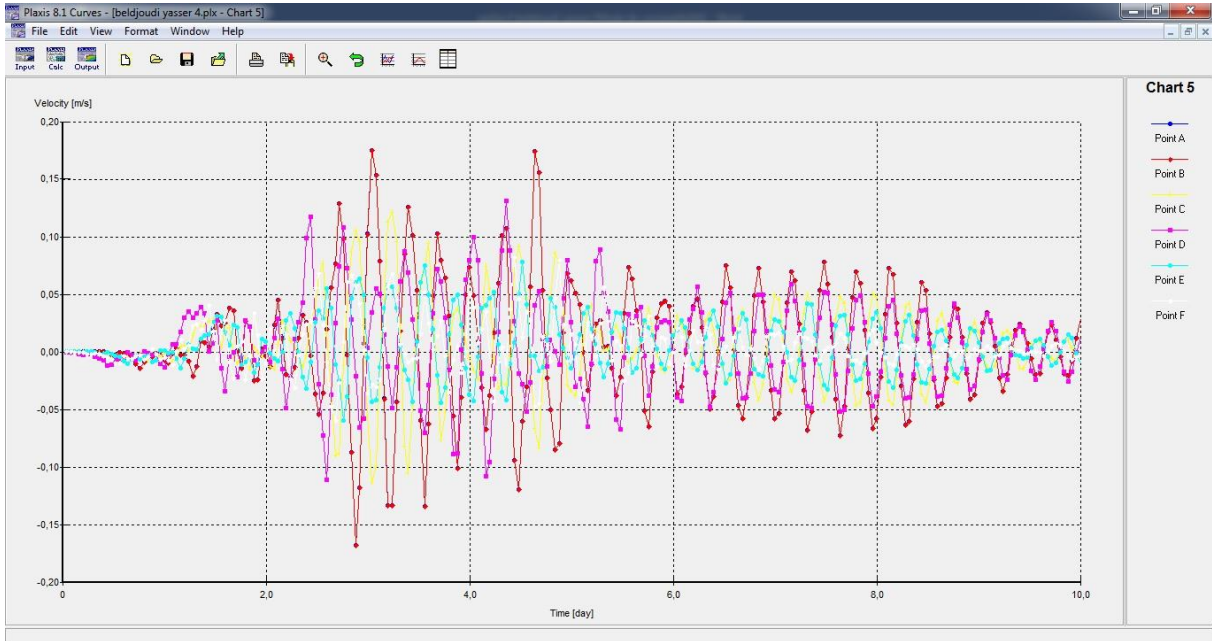


Figure VI.2.1-10 : Vitesse-temps suivant l'axe XX'

La Figure VI.2.1-11 illustre de la vitesse en fonction l'axe XX', l'histoire de vitesse du system Sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans le domaine (2-6) s.

— Axe YY'

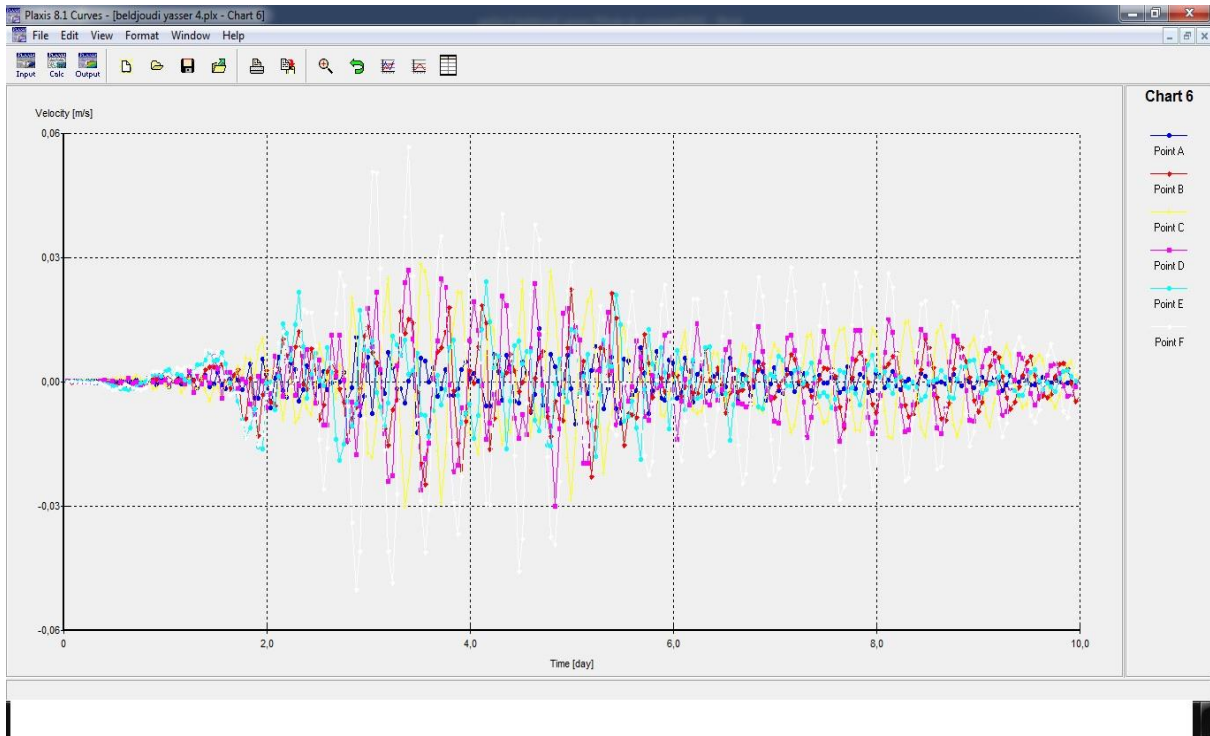


Figure VI.2.1-12 vitesse-temps suivant l'axe YY'

La Figure (VI.2.1-11) illustre de la vitesse en fonction l'axe YY', L'histoire de vitesse du system sol-Fondation il atteint de pic dans le domaine (2-4) s.

3. Courbe accélération-temps

– Axe XX'

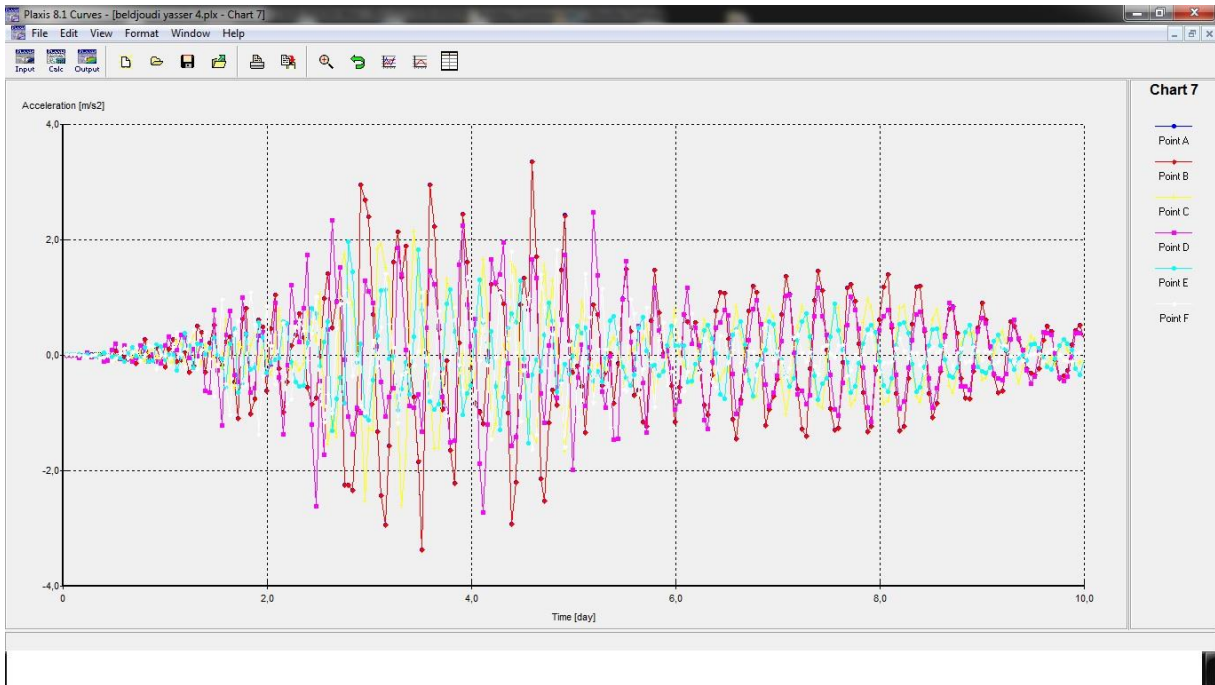


Figure VI.2.1-13 Accélération-temps suivant l'axe XX

La figure (VI.2.1-12) illustre de l'accélération en fonction l'axe XX', l'histoire d'accélération du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans le domaine (2-6) s.

– Axe YY'

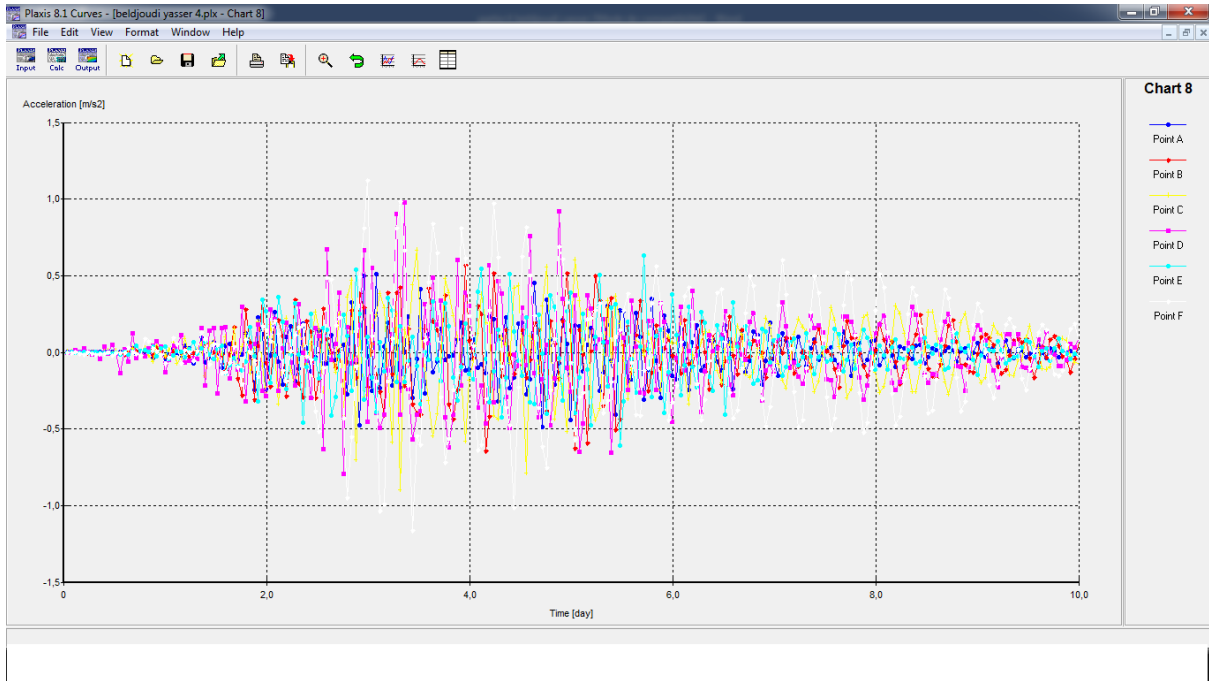


Figure VI.2.1-14 Accélération-temps suivant l'axeYY

La figure (VI.2.1-13) illustre de l'accélération en fonction l'axe XX', l'histoire d'accélération du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans le domaine (2-6) s.

4. Courbe force-temps

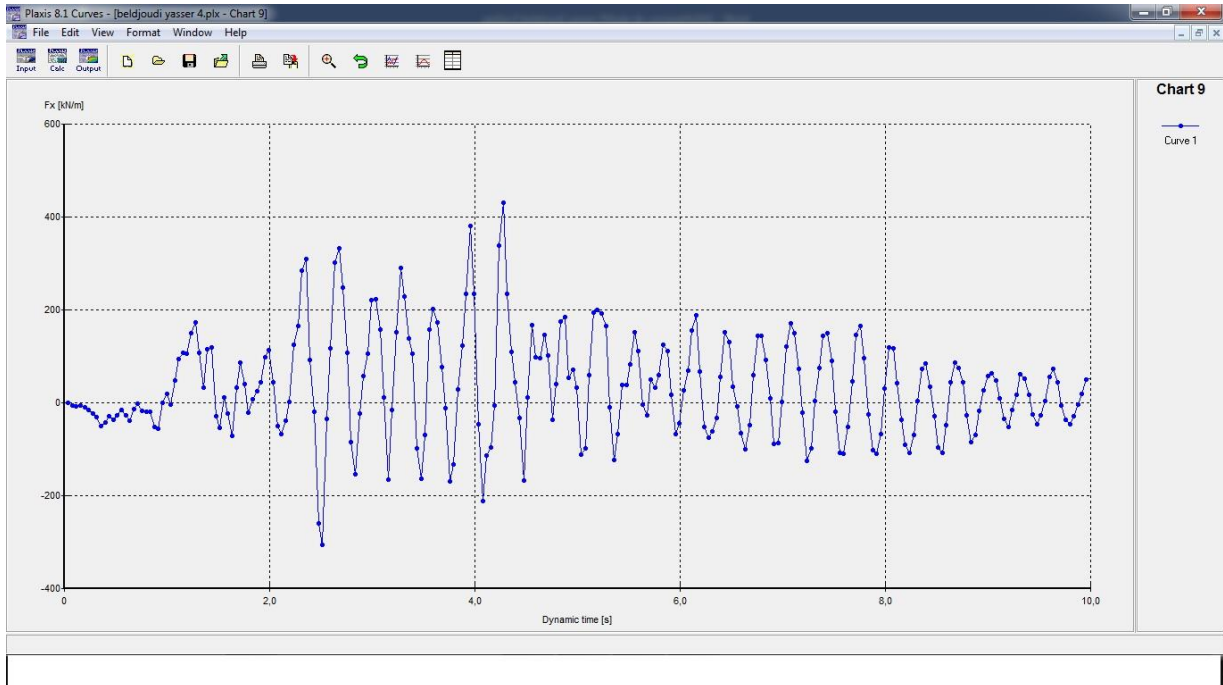


Figure VI.2.1-15 la force (FX) en fonction du temps

La figure (VI.2.1-14) illustre de l'accélération en fonction l'axe XX', l'histoire d'accélération du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans le domaine (2-5) s.

CHAPITRE VI : RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION

❖ Synthèse

Les valeurs maximales calculées aux points considères sont donnée dans le *Tableau VI.2.1-1*

-	Nome De point	Point A	Point B	Point C	Point D	Point E	Point F
Déplacement t(m)	XX	0.052	0.052	0.052	0.051	0.053	0.052
Déplacement t(m)	YY	5.736 * 10-4	5.498 * 10-4	3.011* 10- 4	1.869* 10- 4	1.13* 10- 4	1.675* 10-4
Vitesse (m)	XX	0.029	0.029	8.972* 10- 3	0.012	0.011	8.595* 10-3
Vitesse (m)	YY	1.512* 10- 4	3.546* 10- 3	3.787* 10- 4	1.077* 10- 3	4.101* 10-4	8.063* 10-3
Accélération (m)	XX	0.268	0.268	0.080	0.284	0.103	0.101
Accélération (m)	YY	0.020	0.062	0.072	0.087	0.034	0.067

Tableau VI.2.1-2 valeur maximale aux points considères

VI.3. Effet des ondes horizontal

Influence de distance sur les paramètres des points (déplacement, vitesse et l'accélération), à lors des ondes sismiques de sens horizontal.

CHAPITRE VI : RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION

Influence de distance sur les déplacements des points selon les deux axes (XX', YY'). On a déterminé les déplacements aux points de coordonnées fixées dans le tableau suivant :

—	N° de point	A	B	C	D
—	X(m)	1.34	5.36	14.10	27.60
Déplacement (m)	XX	0.047	0.049	0.052	0.052
Déplacement (m)	YY	$2.76 \cdot 10^{-3}$	$2.27 \cdot 10^{-4}$	$1.79 \cdot 10^{-4}$	$2.71 \cdot 10^{-4}$

Tableau VI.3-1 : Résultats des paramètres de mouvement dans le cas horizontal

Le calcul dans notre simulation est modélisé selon la Figure VI.3-1.

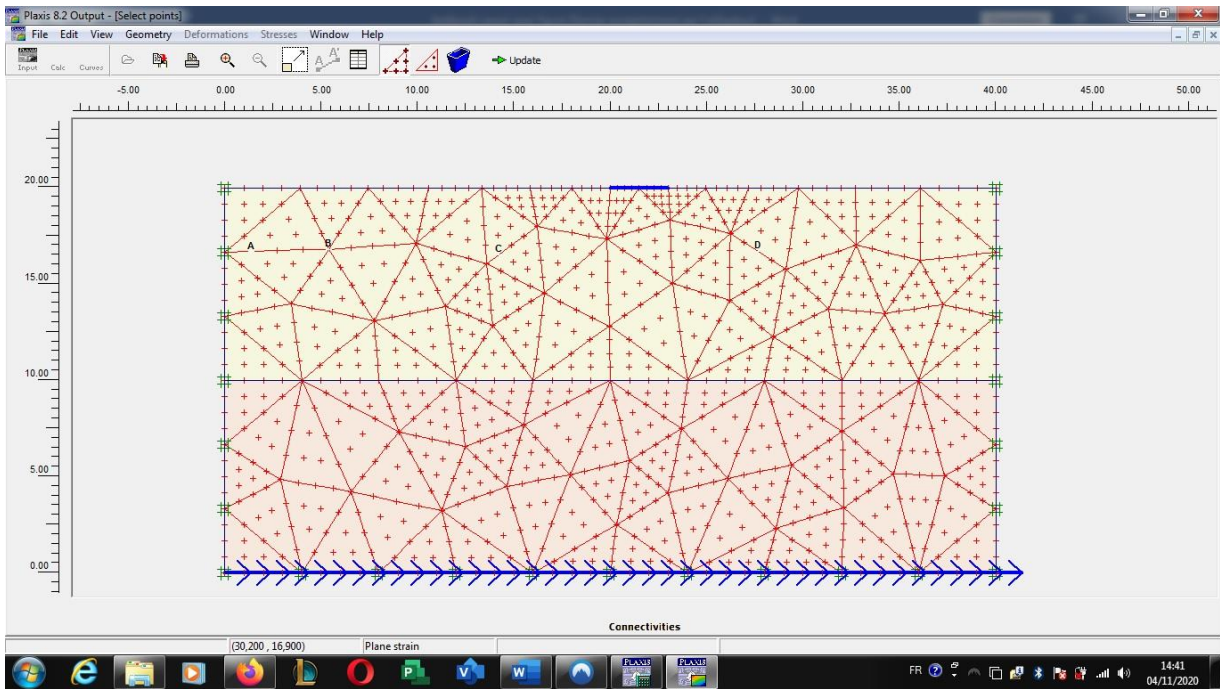


Figure VI.3-2 Schématisation des points de l'axe XX'

CHAPITRE VI : RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION

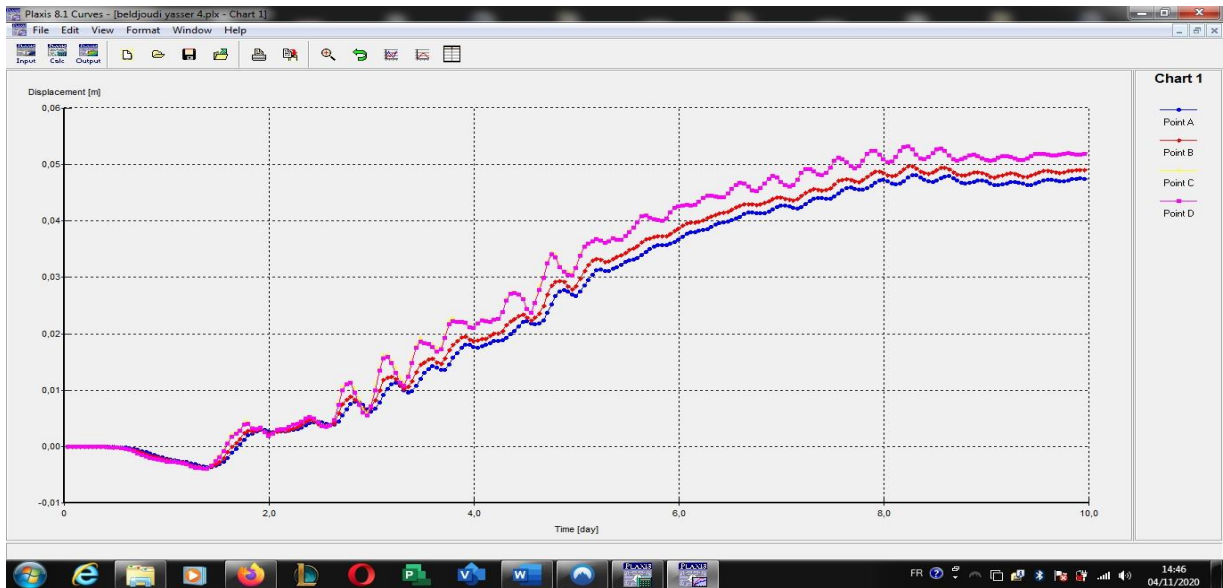


Figure VI.3-3 : Déplacements des points en fonction de temps L'axe XX'

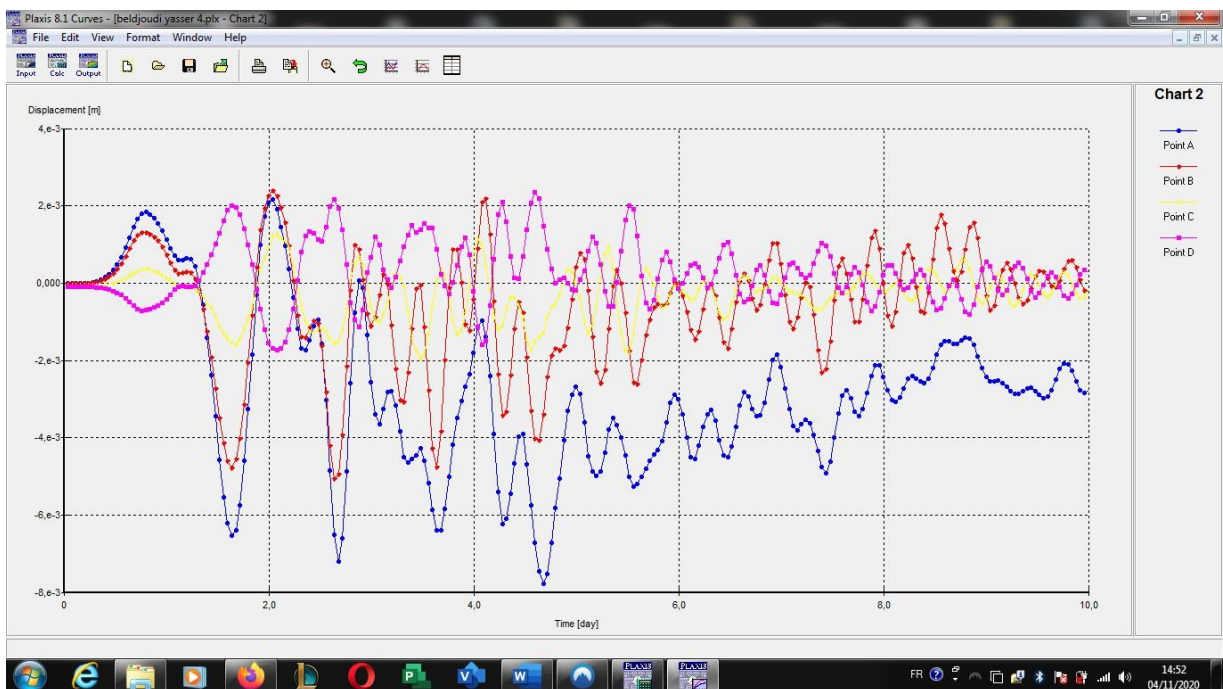


Figure VI.3-4 Déplacements des points en fonction de temps L'axe YY'

VI.4. Conclusion

La modélisation numérique du creusement d'un pont en tenant compte de tous les facteurs impactant la conception des ponts, cette étude est effectuée à l'aide du code de calcul Plaxis avec un programme de calcul basé sur la méthode des éléments finis nécessite une modélisation nécessairement approchée d'une réalité complexe, il permet le calcul des contraintes et des déplacements du massif du sol et des éléments structuraux, cela conduit à faire un certain nombre de choix qui concernent pour simuler le comportement des massifs des sols et de l'ouvrage (pont), une modélisation numérique bidimensionnelle a été effectuée avec le logiciel Plaxis en utilisant le modèle de comportement de Mohr-Coulomb. nous avons simulé des problèmes fortement non linéaires (modules de sol, interfaces) et de géométrie complexe

Avec une bonne stabilité numérique aussi bien les paramètres de l'outil numérique que le modèle de comportement utilisé.

Conclusion générale

Dans nos jours, le développement des outils de simulation des effets de séismes a permis un grand exploit dans le domaine de génie civile, cela revient à développer des méthodes sophistiquées pour l'analyse et l'examen des effets impactant la conception des constructions de tous type.

Cependant l'interaction sol structure reste un domaine très compliqué qui demande beaucoup de recherche

Dans notre travail, les simulations réalisées nous ont permis d'étudier et de constater le comportement des ponts aux effets sismiques, nous avons pris pour exemple, un pont à poutre franchissant la voie ferrée de AIT TOUTA, cette modélisation a été réalisée avec le code Plaxis en utilisant la méthode des éléments finis en tenant compte les facteurs, en l'occurrence : le déplacement, la vitesse, accélération, etc.

Ci-dessous les vérifications réalisées et le constat observé :

- La vérification de la stabilité de système sol-pile de pont par le calcul de module dynamique qui utilise le fichier SMC en utilisant le code plaxis.
- Le chargement sismique appliqué a un impact sur le sol-structure à travers plusieurs facteurs des déplacements, vitesses et accélérations.
- L'amplitude du séisme n'est pas le seul paramètre qui impacte la réponse de la structure. La fréquence peut aussi impacter très largement sur cette réponse.
- L'examen de l'applicabilité d'un modèle simple permettant de capter l'effet prépondérant du phénomène de l'interaction sol-structure.

Bibliographies

- [1] : <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/3488/3488-document-general.pdf>
- [2] : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/risque_sismique_installations_nucleaires/Pages/2-Comment_mesure-ton_la_force_des_seismes.aspx#.X5A31Xs6-Uk
- [3] : http://pages.techno.free.fr/5eme/02/Pont_a_poutre.html
- [4] : http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0000/Dtrf-0000430/DT430.pdf?openerPage=resultats&qid=sd_x_q0
- [5] : <https://dspace.univ-drar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/1502/1/systeme%20de%20protection%20sismique%20des%20ponts.pdf>
- [6] : <https://core.ac.uk/download/pdf/51339651.pdf>
- [7] : A. Pecket, dynamique des sols, presse de l'école des nationales des ponts et Chaussées
- [8] : V. Davidovici, La construction en zone sismique, Editions Le Moniteur, Paris, 1999.
- [9] : V. Davidovici, Eurocode 8, Pratique du calcul sismique, Guide d'application, afnor éditions-Eyrolles, 2013.
- [10] : Guide technique AFPS et CMFS, Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques, Presse des Ponts, 2012.
- [11] : <https://core.ac.uk/download/pdf/51339651.pdf>