

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat
Département : Génie Civil
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Civil
Spécialité : Géotechnique.

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Etude d'une conduite sous voûte

Présenté par : Abderrahmane BEKHOUCHE – Mohamed Ilyes BOUBIR

Encadrant : Abdelmadjid HACENE CHAOUCHE Pr UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président
Ghania BOUKHATEM	MA	BADJI MOKHTAR ANNABA	President
Abdelmadjid HACENE CHAOUCHE	Pr	BADJI MOKHTAR ANNABA	Encadreur
Nadia OTMANI	MA	BADJI MOKHTAR ANNABA	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

*Au terme de ce travail, On tient à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail. Nous avons l'honneur et le plaisir de présenter notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à **N**otre encadreur **Pr** Hacem Chaouch, pour sa précieuse aide, ses orientations et le temps qu'il nous a accordé pour notre encadrement. **N**ous remercions par ailleurs vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister à la soutenance. **N**ous adressons nos sincères remerciements à nos familles de nous avoir soutenu ainsi que pour la confiance et l'aide qu'elles nous ont accordé.*

***F**inalement, nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire*

Résumé

Les conduites sous voûte en béton sous un remblai indéfini sont des types de pose mis en œuvre dans les projets dans lesquels une canalisation en béton de série courante ne convient pas. De ce fait, une étude paramétrique est proposée pour mettre en évidence l'influence de la voute sur les pressions des remblais et les moments d'ovalisation maximum ainsi que l'effet de l'introduction d'une épaisseur variable d'un matériau souple qui est le caoutchouc de décompression sur le moment d'ovalisation dans les cas de poses proposés (cas sur génératrice inférieure et sous voute. Pour concrétiser ce travail deux approches sont préconisées, une approche analytique fondée sur la théorie, exposée dans le fascicule 70 et une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis.

المواسير، الفوهات و الأنابيب، الموجودة تحت مقبب خراساني، تحت ردم غير محدد هي أنواع من التركيبات المنفذة في المشاريع، التي تكون فيها سلسلة الأنابيب الخراسانية المتسلسلة غير مناسبة. لذلك، تم اقتراح دراسة حسابية لتسليط الضوء على تأثير المقبب على ضغوط الردم، وأقصى العزوم، بالإضافة إلى تأثير إدخال سمك متغير لمادة المطاط. التوضيح قد في حالة الوضعيات المقترحة (حالة وضع على مولد سفلي عام وتحت المقبب) لتكوين هذا العمل ، يوصى بطريقتين ، نهج تحليلي يعتمد على نظرية المكشوف في الكتيب 70 ونهج رقمي يعتمد على طريقة العناصر المنتهية.

abstract

The pipe under concrete vault under an undefined backfill is types of installation implemented in projects in which a standard series concrete pipe is not suitable.

Therefore, a parametric study is proposed to highlight the influence of the arch on the pressures of the embankments and the maximum oval moments as well as the effect of the introduction of a variable thickness of a material. Flexible the rubber of decompression on the moment of ovalization in the cases of poses proposed (case on lower generatrix and under vault. To concretize this work two approaches are recommended, an analytical approach based on the theory of exposed in the booklet 70 and a numerical approach based on the finite element method.

Table des matières

Remerciements	I
Résumé.....	II
ملخص	III
Abstract.....	IV
Table des matières	V
Table des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE.....	1

Chapitre I : généralités et bibliographie

Historique.....	3
Définition des conduites	5
Définition des tuyaux.....	8
Définition de l'assainissement	9
Facteurs influents sur la conception d'un projet de conduite.....	10
A. Données naturelles	10
B. Caractéristiques de l'agglomération	10
C. Contraintes liées à la conduite	10
D. Le choix d'une conduite.....	10
E. Une enquête au préalable	11
F. Informations sur les équipements existants.....	11
G. Informations sur le milieu naturel.....	11
ETUDES PREALABLES.....	12
But de l'étude.....	12
Classification des conduites	13
A. Classification selon l'utilisation.....	13
B. Classification selon la forme.....	13
C. Classification selon la qualité des matériaux	14
D. Classification selon le mode de construction.....	14
E. Les différents cas de pose de la conduite.....	14
Historique et évolution chronologique des conduites	15
II.6.Conclusion.....	21

Table des matières

Chapitre II : méthodes de résolution

INTRODUCTION.....	23
Différentes théories	23
• II.2.1.Théorie de Marston-Spangler.....	24
• II.2.2.Installation en tranchée	25
• II.2.3.Hypothèse de la théorie de Marston	27
• II.2.4.Méthode synthétique.....	28
• II.2.5.Principales hypothèses	31
• II.2.6.Types de chargements.....	31
La Méthode des éléments finis (MEF)	37
• II.3.1.Introduction	37
• II.3.2.Concept général de la méthode des éléments finis	38

Chapitre III : la méthode des éléments finis

III. La méthode des éléments finis	41
Introduction au Plaxis	41
Présentation du code Plaxis.....	41
Caractéristiques du Plaxis	41
Originalité du logiciel Plaxis	42
Solutions approchées, options par défaut.....	42
Les modèles utilisés dans le code Plaxis	44
Modèle élastique linéaire.....	44
Modèle de sol avec écrouissage	46
Les paramètres du HMS	46
III.6.2. Les modules du HMS.....	47
III.3.6.3: Les paramètres avancés du HSM.....	49
Modèle pour les roches fracturées.....	49
Modèle défini par l'utilisateur.....	49
Comportement drainé	50
Comportement non drainé.....	50
Le comportement non poreux	50
Modèle de Mohr Coulomb.....	50
Introduction.....	50

Table des matières

Le module d'Young.....	52
le coefficient de Poisson.....	53
L'angle de frottement	53
La cohésion.....	53
Les matériaux souples.....	54
matériau flexible : caoutchouc	54
Définition	55
Le caoutchouc, un matériau fascinant	55
Le modèle de Mohr-Coulomb	55
Conditions aux limites	55
Définition des paramètres des matériaux.....	55
Maillage	55
Les conditions initiales	55
Phases de calculs	56
Visualisation des Résultats.....	56
Conclusions	56
<u>Chapitre IV : étude paramétrique et numérique</u>	
IV. Méthode analytique	58
• Les caractéristiques de lavoute	58
• Les caractéristiques des matériaux souples	59
Calcul de Pr pression du remblai sans matériau souple	60
Calcul des moments d'ovalisation.....	60
La Modélisation.....	66
IV.4.Comparaison « des charges », « des PET et de « Moment d'ovalisation » par les différentes méthodes de calcul MEF(PLAXIS) et F70	85
IV 5.Comparaison des moments d'ovalisation88	
CONCLUSIONS GENERALES	89
Recommandations.....	89

Liste des figures

Chapitre I : généralités et bibliographie

Figure I.1 : Adduction d'eau potable.....	5
Figure I.2 : Collecte et transport des eaux usées	5
Figure I.3 : Transport des eaux pluviales à partir de l'avaloir	6
Figure I.4 : Tuyaux à section circulaire.....	6
Figure I.5 : tuyaux ovoïdes préfabriqués	7
Figure I. 6 : Tuyaux en fibrociment	7
Figure I.7 : Tuyaux en grès	7
Figure I.8 : Tuyaux en PVC.....	8
Figure I.9 : Tuyaux en fonte	8
Figure I.10 : Pipelines (gaz et pétrole)	9
Figure I.11 : assainissement pseudo séparatif.....	9
Figure I.12 : assainissement unitaire	10

Chapitre II : méthodes de résolution

Figure II.1 : Nomenclature du solide sol structure d'après la théorie de Marston-Spangler	24
Figure II.2 : Conduite rigide.....	25
Figure II.3 : conduite flexible	25
Figure II.4 : Plan critique en hauteur pD.....	25
Figure II.5 : courbe démonstrative de γ'	29
Figure II. 6 : pose sous voûte.....	30
Figure II.7 : cas d'une pose sur berceau	30
Figure II.8 : Conduite en baquette	31
Figure II.9 : Dimensions du berceau à 180 et de la voûte.....	31
Figure II.10 : Cas de pose à 120°	32
Figure II.11 : Cas de pose à 180°	32
Figure II.12 : Cas de pose sous voûte	33
Figure II.13 : Pose en remblai indéfini	34
Figure II.14 : pose en remblai indéfini sans matériau souple.....	35

Liste des figures

Figure II.15: Pose en remblai avec interposition de matériau souple	35
Figure II.16 : pose avec interposition de matériaux souple (contraintes)	36
Figure II.17: Organigramme des programmes généraux	40

Chapitre III : la méthode des éléments finis

Figure III.1: Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.....	44
Figure III.2: Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire.....	45
Figure III.3: Modèle des paramètres et des paramètres avancés SSCM.....	46
Figure III.4: Les paramètres du HMS	47
Figure III.5: Représentation du HSM dans le repère contrainte déformation.....	48
Figure III.6: Définition du module oedométrique tangent	48
Figure III.7: Fenêtre des paramètres avancés du HSM.....	49
Figure III.8: Fenêtre des Paramètres du modèle de Mohr Coulomb	52
Figure III.9: Définition d'E0 et d'E50	52
Figure III.10: Courbe intrinsèque du modèle de Mohr Coulomb.....	53
Figure III.11: Fenêtre des paramètres avancés de Mohr Coulomb.....	54
Figure III.12 : Le caoutchouc broyé	54

Chapitre IV : étude paramétrique et numérique

Pas de figures

Chapitre I : généralités et bibliographie

Pas de tableaux

Chapitre II : méthodes de résolution

Pas de tableaux

Chapitre III : la méthode des éléments finis

Pas de tableaux

Chapitre IV

Tableau IV.1: Les caractéristiques du remblai 57

Tableau IV.2: Les caractéristiques du voute. 58

Tableau IV.3: Les caractéristiques du matériau souple 59

Tableau IV.4 : des charges Q et des moments d'ovalisation calculés par la MEF 85

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

On a remarqué ces dernières années une augmentation importante de l'utilisation des structures creuses (elliptiques ou circulaires) en tant que conduites enterrées, passages sous terrains, tunnels... de façon internationale mais particulièrement chez nous en ALGERIE.

Dans le cadre du développement du pays à long terme nous assistons désormais à des projets qui non seulement sont énormes mais surtout stratégiques en insistant sur la réalisation, la rénovation ainsi que l'entretien des voies de communications comme les autoroutes, les conduites pour l'adduction des fluides (eau potable, assainissement, hydrocarbures, drainages...)

La conception des conduites est toujours choisie selon l'importance de l'ouvrage celles-ci peuvent être en béton ou en béton armé.

Afin d'assurer un bon assainissement, une bonne adduction d'eau potable, ainsi qu'un bon drainage les conduites sont favorisées ou préférables aux dalots selon l'économie et surtout la résistance.

Sinon d'un point de vue général nous utilisons fréquemment les buses industrielles normalisées plutôt que celles exécutées en place à l'exception des tuyaux de grandes envergures, et c'est ce qui nous pousse à les favoriser revient à leurs: bonne capacité portante, rapidité d'installation, simplicité de construction et enfin des exigences moins strictes pour les fondations.

Les progrès en géotechnique ont démontré que toutes les structures enterrées sont intimement liées avec leur milieu environnant, de ce fait nous noterons plusieurs facteurs déterminants desquels dépend cette interaction comme :

En premier lieu la géométrie de l'ensemble (sol- structure) ainsi que les propriétés du milieu environnant.

En second lieu les caractéristiques du matériau de remblayage ainsi que de la structure de soutènement.

Et en fin selon la méthode de construction adaptée au type de charge ainsi qu'aux conditions d'appuis en tenant compte des effets permanent et ceux à court termes.

Dans notre moi nous nous intéresserons à l'étude d'une conduite sous voûte en béton sous un remblai indéfini, ce type de conduite est mis en œuvre lors des projets dans lesquels une canalisation en béton de série courante ne convient pas. Pour ce fait une étude paramétrique est proposée pour mettre en évidence l'influence de la voûte sur les pressions des remblais et les moments d'ovalisation maximum ainsi que l'effet de l'introduction d'une épaisseur variable d'un matériau souple qui sera le caoutchouc de décompression sur le moment d'ovalisation dans les cas de poses proposés (cas sur génératrice inférieure et sous voûte) pour concrétiser ce travail deux approches sont préconisées, une approche analytique fondée sur la théorie d'exposée dans le fascicule 70 et une approche numérique basée sur la MEF

INTRODUCTION GENERALE

Notre mémoire sera divisé 5 en chapitres :

- Chapitre 1 : introduction générale.
- Chapitre 2 : étude bibliographique et historique.
- Chapitre 3 : méthodologie de résolution.
- Chapitre 4 : étude paramétrique et numérique.
- Conclusion

CHAPITRE I

Etude bibliographique (généralités sur les conduites)

Historique

Dans le but d'avoir une vie agréable et épanouie l'homme dans sa quête, a toujours été poussé à l'exploration et la découverte des secrets de l'environnement dans lequel il évolue, pour résoudre tous les problèmes et désagréments qu'il rencontre quotidiennement, et ce, par la recherche théorique et expérimentale .Ce besoin vital l'a poussé à l'invention et l'innovation dans tous les domaines de la science. Parmi ces premiers besoins, l'eau s'est avérée indispensable à sa survie .Il a donc décidé de mener sa vie à proximité des étendues et des cours d'eau .Avec l'augmentation de l'espèce humaine et la diminution de l'espace, il est contraint de s'adapter à une vie plus loin de ces étendues, il décida alors d'amener l'eau jusqu'à lui.

L'histoire du tuyau se résume comme ce ci, A l'époque romaine, les premiers tuyaux étaient en argile, parfois en grès et en plomb. Au Moyen Age a eu lieu l'apparition de quelques conduites en bois. Il n'est pas exclu qu'à une certaine époque préhistorique on utilisa des troncs d'arbres creux pour véhiculer l'eau, cette méthode a perduré jusqu'en 1788 pour amener La saumure de Salins-les Bains jusqu'à la Saline royal d'Arc-et- Senans via un Saumoduc (double canalisation en sapin de 21 km).

Dans l'Égypte antique on utilisait des tuyaux de cuivre pour transporter l'eau potable : un exemplaire, a été retiré du temple du roi Sa-Hu-Re ad Abusir et remontant à 2750 av. J.-C. environ, et est conservé au Musée national de Berlin. Un tuyau a été obtenu en agrafant une fine feuille de cuivre, afin d'obtenir un diamètre de 75 mm; l'implantation (environ 100 m de longueur) était constituée d'une série de ces tubes.

Au temps des romains, les tuyaux de plomb étaient couramment utilisés pour amener l'eau dans les cités et à l'intérieur même des maisons. Les fistules sont fabriquées à partir d'une plaque de plomb rectangulaire roulée en forme ovoïde et refermée par un cordon de soudure longitudinale. Les Romains utilisaient également des tubes en terre cuite emboîtés les uns dans les autres et scellés au mortier, pour certaines conduites d'eau chaude ou de vapeur. On a retrouvé sur plusieurs sites archéologiques, des amphores dont le fond a été troué, emboîtées les unes dans les autres, détournées à des fins de canalisation. Une des premières grandes conduites d'eau est celle attenante à la machine de Marly, construite entre 1681 et 1682, un gigantesque dispositif de pompage des eaux de la Seine, construit sous le règne de Louis XIV à Bougival.

Epoque contemporaines :

Conduite contemporaine Fin XVIIIe siècle :

Un tuyau est une conduite en fer fondu, en cuivre, en plomb, en terre cuite, en bois, en Béton Armé et en acier, dont on se sert pour faire passer l'eau d'un lieu à un autre.

- Les tuyaux en fonte : sont de différents diamètres et ont environ trois pieds de longueur, avec trois ou quatre oreilles percées à chaque extrémité par lesquelles on joint ces tuyaux au moyen d'autant de vis et leurs écrous, en mettant du cuir entre chaque jointure.

- Les tuyaux en terre : sont aussi de différents diamètres et de la même longueur que ceux de fonte; ils s'emboîtent à l'extrémité les uns dans les autres, et on garnit leur jonction de mastic fait avec de la poix, de la filasse et de l'étope, et quelquefois on les enveloppe d'une chape de mortier de chaux et ciment.
- Les tuyaux en bois : sont d'aulne ou d'orme aussi de différents diamètres, que l'on perce avec des arrières - on les emboîte les uns dans les autres comme ceux de terre.
- Les tuyaux de plomb : sont de deux sortes; les uns soudés, et les autres moulés. Un « tuyau physique » est un tuyau formé d'une bande de plomb qu'on rabote et dresse à la varlope sur les deux côtés de son épaisseur, dont on abat les deux arêtes en chanfrein, ce qui forme, la bande étant roulée, une rainure que l'on remplit d'étain ou soudure - le nom de ce tuyau lui vient de la précision qu'il faut mettre à sa fabrication. Un tuyau qui est fait avec du plomb en table, roulé, et dont la soudure, étendue sur le joint, forme un cote.
- Les tuyaux en acier : On distingue trois grands types ; cylindrique (rond), rectangulaire et carré. C'est différents tuyaux sont majoritairement utilisés dans des actions de travaux de maçonnerie notamment grâce à leurs caractéristiques physiques (entretien, flexion, résistance aux pressions et torsion).
- Les tuyaux en béton : de section circulaire, ovoïde ou rectangulaire, sont destinés à véhiculer des effluents en écoulement libre (eaux usées et eaux pluviales). Les tuyaux assurent une fonction mécanique importante puisqu'ils sont soumis en service aux charges dues au remblai et le cas échéant aux effets des charges roulantes. Pour les produits en béton, les tuyaux sont constitués de béton non armé, de béton armé, de béton fibré acier.
- Les tuyaux en béton précontraint : Ce type tuyau est constitué d'un noyau en béton à haute résistance revêtu d'une tôle d'acier qui lui apporte étanchéité, et d'une armature active constituée d'un fil métallique de précontrainte enroulé de manière hélicoïdale autour du noyau en le frettant. Cet ensemble, appelé primaire (élément résistant), est finalement revêtu d'une couche extérieure en béton ayant pour objet de protéger l'armature de précontrainte.

Définition des conduites

La conduite est un réseau de tuyaux assemblé et qui est destiné à transporter un fluide souvent des liquides. Tels que ; eaux pluviale.- eaux usées- hydrocarbures etc ... (1)



Figure I.1 : Adduction d'eau potable



Figure I.2 : Collecte et transport des eaux usées

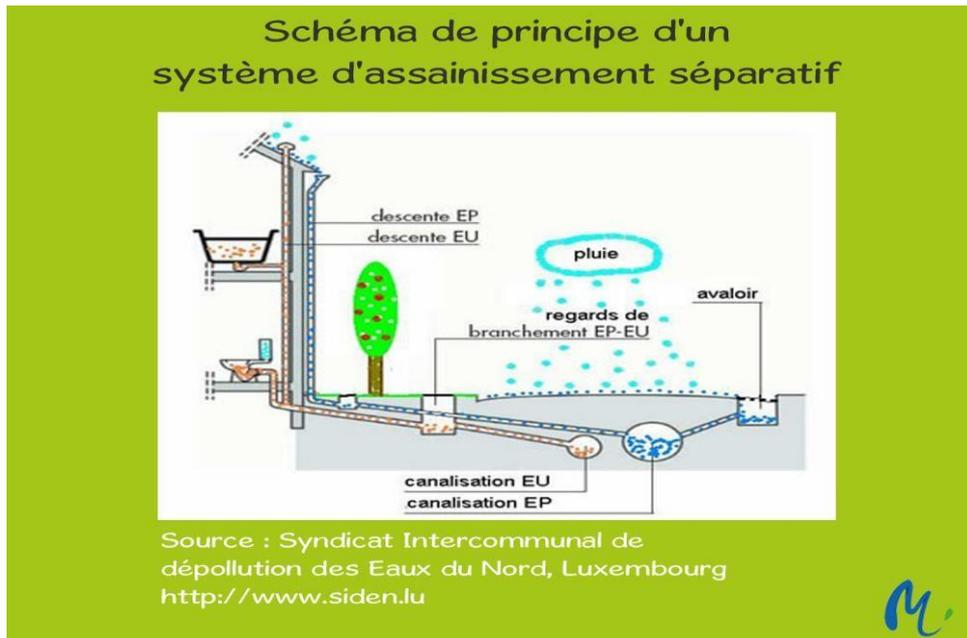


Figure I.3: Transport des eaux pluviales à partir de l'avaloir

En plus simple les conduites sont une suite de tuyaux qui mèneront les fluides (gaz, liquides...) d'un lieu à un autre

Les conduites sont presque la base de l'assainissement, ce qui fait partie de la viabilisation des zones en contribuant au confort ou aux commodités.

Ces dernières diffèrent selon leurs matières ainsi que selon leur destination d'utilisation elles peuvent être:

a) **Tuyaux** à section circulaire.



Figure I.4: Tuyaux à section circulaire

b) **Tuyaux** ovoïdes préfabriqués.



Figure I.5: tuyaux ovoïdes préfabriqués

c) **Tuyaux** en fibrociment sans pression.



Figure I. 6: tuyaux en fibrociment

d) **Tuyaux** en grès.



Figure I.7 : Tuyaux en grès

e) **Tuyaux** en polychlorure de vinyle (PVC) non plastifié



Figure I.8 : Tuyaux en PVC

f) **Tuyaux** en fonte.



Figure I.9: Tuyaux en fonte

Définition des tuyaux

Dans notre cas où nous sommes sensés conduire des eaux, nous parlerons de canal, à partir duquel se fera l'écoulement. (1)

Nous rencontrons aussi des aqueducs (dans le but d'avoir une adduction d'eau pour la consommation de la ville.)

De conduite hydraulique (comme on a pu définir au dessus),

Ou d'émissaires (qui est un cours d'eau sortant d'une grande étendue d'eau ex : lac, étang, mer) constitué de tuyaux.

Par contre Pour la conduite des eaux usées (eaux polluées) on parle d'égout ou de drainage.

Éléments essentiels, les tuyaux sont organisés en genre de systèmes et en réseau afin de constituer une canalisation (rassemblement des eaux ensuite les transporter).

Concernant les gaz nous appelons ça des gazoducs tels que:

- oxygénoducs pour l'oxygène.
- hydrogénoducs pour le transport d'hydrogène.

- oléoducs pour le pétrole.

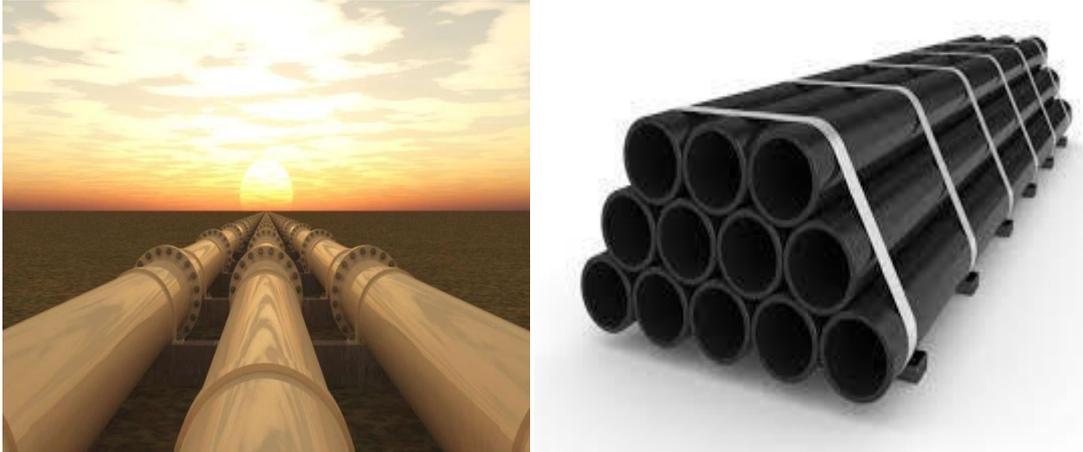


Figure I.10 : Pipelines (gaz et pétrole)

- saumoduc pour la saumure (NaCl de forte concentration ou saturée...)

Ces réseaux de conduites pipeline en anglais sont constitués de tubes ou tuyaux mis bout à bout pour le transport des gaz et liquides à très grande échelle. Ces réseaux se développent essentiellement début 19^e siècle pour l'eau et le gaz d'éclairage; ils sont à l'échelle d'une ville, progressivement à l'échelle d'un pays, seconde moitié du 20^e siècle pour le gaz naturel, de nos jours les réseaux couvrent tous les pays.

En plomberie nous appelons les petites conduites une tuyauterie. Et on a pour accessoires une robinetterie contrairement à certaines circonstances le tuyau prend le nom de tube ou de buse, etc.(1)

Parmi les causes pour lesquelles les conduites sont utilisées on a l'assainissement.

Définition de l'assainissement

Visant l'amélioration de la situation sanitaire de façon globale de l'environnement ainsi que ses différents composants l'assainissement est la première démarche.(1)

Il peut être séparatif ou unitaire. Exemple :

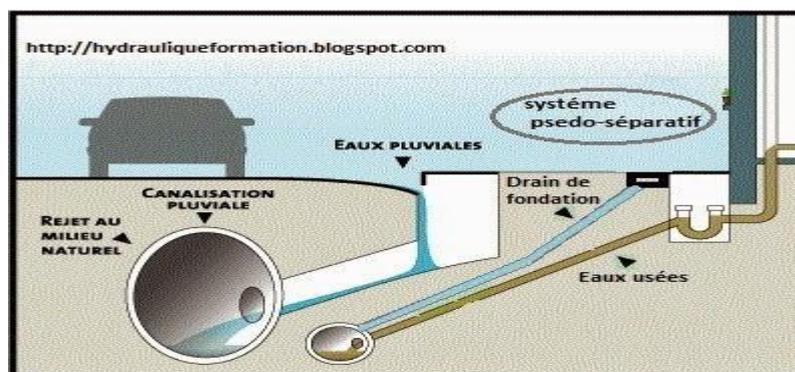


Figure I.11 : assainissement pseudo séparatif



Figure I.12 : assainissement unitaire

Ce dernier comprend la collecte, le traitement (dépolluer l'eau avant son retour au milieu naturel, ou à sa réutilisation) ainsi que l'évacuation des déchets liquides et encore des déchets solides (excrément : déchets métabolique)

En plus de l'amélioration sanitaire on vise aussi la prévention du contact humain avec des substances dangereuses en particulier des matières fécales en mettant en place une évacuation adéquate dans le cas contraire ou de dysfonctionnement des évacuations sont multifactoriels pouvant être simultanément physique, microbiologique, biologique ou pire encore chimique.

En bref les excréta (organisme vivant rejetés par l'humain) ainsi que les déchets résiduels causent des ennuis de santé majeures.

De ce fait nous constatons la relativité entre problèmes engendrés, obligation quotidienne, hygiène de vie et l'importance d'une bonne conduite.

Facteurs influents sur la conception d'un projet de conduite

A. Données naturelles :

- Pluviométrie
- Topographie
- Hydrographie
- Géologie

B. Caractéristiques de l'agglomération :

- Importance et nature.
- Mode d'occupation du sol
- Réseaux déjà existants
- Développement futur de l'agglomération

C. Contraintes liées à la conduite :

- Conditions de transport des eaux usées.
- Facilité d'exploitation.
- Réduction des nuisances.

D. Le choix d'une conduite

Pour choisir un type de conduite convenable, cela dépendra de plusieurs paramètres qui sont comme ceci :

- Un exutoire naturel à proximité.
- Sensibilité du milieu récepteur
- Existence d'un réseau ancien
- Pente du terrain

E. Une enquête au préalable

Pratiquement L'enquête au préalable se caractérise par :

Une phase de reconnaissances avec des visites des lieux ainsi que la collecte des données, elle a pour objet de fournir les informations suivantes :

- informations concernant l'urbanisation
- connaître à peu près l'évolution de l'urbanisation,
- existence des projets d'urbanisations futures devant transiter à travers la zone étudiée,
 - répartition des zones en fonctions des exutoires et de leur capacité d'évacuation,
 - aménagements particuliers à la charge des propriétaires pour leur raccordement.

F. Informations sur les équipements existants

Spécificité, particularités, Caractéristiques du réseau existant :

- d'abord sa nature (unitaire ou séparatif),
- ensuite les conditions de rejets dans ce réseau (faisant l'objet d'une autorisation),
 - les débits admissibles au droit du rejet de l'opération,
 - la cote de mise en charge du réseau afin de connaître les répercussions éventuelles,
 - la profondeur du collecteur,
 - Et enfin les raccordements futurs provenant d'autres opérations.

G. Informations sur le milieu naturel

Pour pouvoir procéder à La création d'une conduite cela nous oblige à rechercher l'existence d'exutoires naturels ainsi que la charge de pollution qu'elles peuvent admettre.

Pour cela, il serait parfait d'entrer en contact avec l'agence nationale des ressources hydrauliques ainsi que l'agence du bassin hydrographique (ABH) afin de connaître :

- les caractéristiques des réseaux hydrographiques,
- les activités qui y sont attachées ainsi que les objectifs de qualité fixés.

Il importera également de connaître la vulnérabilité des nappes souterraines. (2)

ETUDES PREALABLES

Une étude précédant l'exécution est fortement conseillée et s'avère nécessaire pour un sans fautes et un sans imprévus, pour cela nous devons nous poser les bonnes questions :

- 1- Quel est le devenir des eaux des fluides ou de l'eau recueillies ?
- 2- Comment limiter tout risque de dommage?
- 3- Est-il possible de choisir une solution alternative mieux adaptée, plus économique que la mise en place de la conduite ?

Dans ce cas L'étude portera donc sur :

- La reconnaissance du terrain et des pratiques du voisinage,
- La connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin (pluviométrie, localisation des écoulements des débits attendus, topographie, taux - d'imperméabilisation),
- l'existence et la capacité de l'exutoire (débit maximum de rejet),
- la recherche des zones où il est possible d'infiltrer ou de prévoir des équipements de rétention (perméabilité des sols et sous-sols, propriétés mécaniques du sol sous l'influence de l'eau, fluctuation de la nappe, risque de pollution de la nappe), - - la qualité des eaux de ruissellement (si rejet dans un milieu naturel de bonne qualité).

But de l'étude

Le but de cette étude est d'analyser l'influence de l'interaction entre une conduite enterrée et une tranchée de décompression introduite en dessous de celle-ci.

Une excavation sera réalisée à une certaine profondeur en dessous de la voute d'une buse afin d'introduire un sol lâche.

Nous nous baserons dans ce travail sur une approche numérique qui tient en compte la construction séquentielle du triangle sol-tranchée-solide.

Afin de concrétiser les buts de cette étude nous procéderons par une étude paramétrique en faisant varier les paramètres prépondérants qui sont :

- K rapport des modules d'élasticité du sol lâche ainsi que du remblai.
- K' rapport du remblai sol de fondation.
- L'évaluation de la charge Q

Cela sera fait selon 3 approches :

- La méthode synthétique.
- La théorie de marston-spangler.

- La méthode des éléments finis MEF

Classification des conduites

Les conduites enterrées peuvent être classifiées selon de plusieurs types :

A) classification selon l'utilisation :

- 1- **Les conduites forcées** : sont destinées au transport des fluides sous pression, généralement de l'eau, soit l'eau potable, soit l'eau courante (installation hydroélectrique).
- 2- **Les conduites d'écoulement libre** : elles servent à l'écoulement de l'eau par gravité (tuyaux d'assainissement). Les conduites d'assainissement sont couramment de forme circulaire, quelque fois ovoïde, très rarement elliptique et jamais linéaire.
- 3- **Les galeries de service ou abris** : ce sont des ouvrages de défense ou de stockage plus ou moins stratégiques. (1,3)
- 4- **Les conduites d'assainissement** sont couramment de forme circulaire, quelque fois ovoïdes, très rarement elliptiques et jamais linéaire. Le béton est comprimé, centrifugé ou vibré mais jamais à âme en tôle. elles sont fabriquées en usines ou préfabriquées sur un chantier mobile. La fabrication sur place ne se fait plus actuellement que pour les tuyaux ovoïdes, de moyennes ou de grandes dimensions. Ils sont toujours enterrés, soit en fouille remblayée ou en remblai indéfini. Les conduites ovoïdes ne sont utilisées que pour l'assainissement mais jamais à pression (forme irrationnelle). Les tuyaux en linéaire ne sont adaptables qu'à une conduite forcée de gros débit sous charge réduite. Les tuyaux en âme en tôle ne se conçoivent que pour les conduites à pression, en tuyaux d'assainissement ils sont inutilement coûteux. Les tuyaux coulés sur place sont à éviter autant que possible, car la qualité est moins bonne qu'en usine et ils généralement plus coûteux. Ce genre de tuyaux n'est envisagé que pour les grandes dimensions, avec un contrôle strict de la mise en œuvre.

B) Classification selon la forme :

Les conduites peuvent avoir diverses formes mais les plus usitées sont les suivantes :

- 1- Conduites circulaires : c'est la forme la plus courante et la plus utilisée.
- 2- Conduites ovoïdes : cette forme est moins, elle offre toutefois des avantages pour les écoulements rationnels des débits variables.
- 3- Conduites à embase ; on rencontre ce genre de forme en assainissement (meilleure résistance à l'ovalisation).
- 4- Conduites elliptiques : elles sont utilisées uniquement pour les pièces de raccord dans le cas où il faut réduire l'encombrement en hauteur d'un tuyau circulaire.
- 5- Conduites linéaires : elles peuvent constituer une solution économique pour les conduites forcées à gros débit et faible charge.

- 6- Conduites spéciales : elles sont généralement utilisées pour les raccords et les jonctions.
- 7- Conduites de formes rectangulaires ou carré : elles sont utilisées parfois pour des raisons d'encombrement du sous-sol, soit parce que leur destination

C) Classification selon la qualité des matériaux :

On en distingue cinq types de conduites :

- 1- Conduites comprimées : les plus anciennes, autrefois de qualité médiocre, mais dont la qualité a été améliorée par les procédés modernes de fabrication.
- 2- Conduites centrifugées ; la mise en œuvre du béton utilise la force centrifuge développée dans le béton frais en rotation.
- 3- Conduites vibrées : utilisation pour le serrage du béton des forces naissant de la vibration provoquée dans le béton frais. (3)
- 4- Conduites des à amé en tôle : l'âme en prévue dans l'épaisseur de la paroi de béton donne à la conduite des qualités spéciales d'étanchéité.
- 5- Conduites vibrées comprimées : utilise les deux modes simples simultanément (vibration-compression) pour la mise en place du béton. (3)
- 6- Conduites en béton précontraint : ce sont des tuyaux en béton 'pré comprimé', de façon en service- à ne pas présenter que des contraintes de compression, domaine dans lequel le béton n'a pas de concurrent, rapport qualité /prix.

D) Classification selon le mode de construction :

- 1- Les conduites coulées sur place : pour les gros diamètres pour lesquels les frais de transport et manutention sont prohibitifs.
- 2- Les conduites fabriquées en usine : c'est la règle générale adoptée actuellement même pour les gros diamètres (1.50 m) et de grandes longueurs (5 m) couramment et quelquefois 6 à 8m.
- 3- Les conduites mi- fabriquées en usine et complétées sur place : c'est le cas certains tuyaux à âme en tôle, celle -ci étant préparé en usine avec son revêtement intérieur, l'enrobement se faisant sur place.
- 4- Les conduites préfabriquées sur chantier : dans ce cas, la conduite est préfabriquée dans une usine mobile, voisine du chantier. (3)

E) Les différents cas de pose de la conduite:

- **Cas de la pose en remblai indéfini** : C'est le cas des conduites traversant les remblais des voies de communication. (3)
- **Cas de la pose en tranchée** : La pose en tranchée est conseillée pour les travaux structurants des réseaux et les diamètres importants, pour des raisons économiques mais également pour assurer la protection mécanique des réseaux par le contrôle de l'enrobage des canalisations. Elle nécessite un dimensionnement des canalisations tenant compte des contraintes mécaniques et chimiques des sols et des charges mécaniques (charge roulantes éventuelles).La réalisation des fouilles

pour les tranchées d'assainissement est basée sur certains éléments techniques simplifiés issus des normes européennes mais le recours aux normes californiennes également possible et cité dans ce fascicule. (3)

- **Cas de la pose en dépression naturelle** : La pose en dépression correspond typiquement au creusement d'une tranchée dans le terrain naturel afin d'y déposer la canalisation. Le remblaiement est ensuite effectué jusqu'à un niveau supérieur au niveau du terrain naturel initial (cas de la réalisation de décharges par exemple). (3)
- **Cas de la pose en tranchée asymétrique** : Ce type de pose est courant de la réalisation de réseaux séparatifs. Généralement, le tuyau posé en partie inférieure est plutôt destiné à recueillir les eaux usées, alors que le tuyau posé en partie supérieure est destiné à recueillir les eaux pluviales et est donc de diamètre plus important. (3)

Historique et évolution chronologique des conduites

Afin d'améliorer son confort et ses conditions de vie privées et communautaires l'humain est en évolution permanente ce qui engendre le besoin de progresser rapidement dans tous les domaines pour les raisons citées précédemment mais en particulier afin de résoudre différents problèmes vitaux l'empêchant d'atteindre ses objectifs et d'exécuter ses projets de meilleure vie.

En améliorant son hygiène de vie, l'humain a accordé beaucoup d'importance aux évacuations ainsi qu'aux transports des fluides toujours dans le cadre de l'amélioration de vie, du côté de la propreté, de la productivité, échanges internationaux...

La réalisation des réseaux d'adduction d'eaux potables, assainissement, transport de fluide indispensable à l'industrie ainsi qu'aux champs agricoles ou à l'agriculture en générales classée plus que majeure à l'échelle internationale en allant du plus petit patelin aux plus grandes villes.

Pour cela, avant de passer à l'exécution il est plus que nécessaire de passer par des études de comportement concernant les conduites en agissant avec l'avancée technologique de chaque époque, en particulier de ces derniers temps en se basant sur le développement de ce type de d'infrastructure vital et stratégique.

Puis avant d'arriver à L'évolution ou le progrès actuel, la science est passée par plusieurs approches :

- Des approches théoriques expérimentales.
- Des approches analytiques.
- Des approches empiriques.
- Des approches numériques.

Avancées chronologiques :

- De 1922 à 1929 sous la direction du Pr Marston relaté par M.LAZARD, ces essais ont intéressé les conduites flexibles, semi-rigides, rigides, et très rigides, et ils ont porté sur 2 types de conduites :

- Les conduites posées en tranchées
- Les conduites posées dans un remblai indéfini dans tous les sens.

- 1930 par Pr Marston, l'élaboration d'une estimation de charges exerçant sur les conduites enterrées, la fondation de cette théorie est faite sur les principes de calcul des silos via l'hypothèse de 2 plans de glissement verticaux et d'un remblai pulvérulent encadrant la conduite, de l'existence d'un plan de tassement, il en résulte que pour les hauteurs remblai supérieures à H_e .

De ce fait, il a constaté que les forces de frottement agissent uniquement sur la hauteur H_e par contre les terres au-dessus de H_e ne sont qu'une surcharge uniformément répartie.

Un développement des expressions de charges verticales totales imposées sur la structure enterrée a été fait par Pr Marston, en négligeant les contraintes d'interfaces.

Une amélioration de cette théorie a été faite par Spangler en établissant l'expression de la pression horizontale dépendant du module de résistance passive du remblai, ce qui donne le nom à cette théorie, la théorie de Marston-Spangler.

- 1936 Pr Kogler dont les essais ont mis en évidence les énormes efforts pouvant être mis en jeu par les efforts de damage pendant la pose des conduites en tranchées.
- 1937 M. Woellmy lors de sa thèse a édifié une série de théories, fiables pour de différents cas, d'après des hypothèses variables, en prenant en considération l'influence de beaucoup de facteurs dans un phénomène aussi complexe.
- 1960 White et Layer en se basant sur la théorie de la compression annulaire, ils ont développé une procédure de calcul simple, cette théorie stipule que par la compression annulaire uniquement la buse peut supporter le poids du remblai au dessus de la clé de voûte. Mais cela ne peut pas empêcher le développement de moments en poussant l'apparition de rotules plastiques sur la paroi de la conduite.

Tant que la conduite est enterrée dans un bon remblai Les déformations demeurent petites ce qui implique une bonne capacité portante vis-à-vis de la compression annulaire uniquement.

- 1961 la méthode tchèque de PRUSKA, l'utilisation de cette méthode est un peu limitée par rapport à d'autres, donc celle-ci est utilisée uniquement lors des remblais indéfinis pouvant être exploités dans le cas où le sol de la conduite est compressible.
- 1968 C.B Brown avec la collaboration de D.R Green et S Pawsey ont fait l'étude du comportement d'une structure circulaire flexible en mettant en évidence l'intérêt de la construction par phasage ou séquentielle, ainsi que les états de champs de contrainte et la manière avec lesquels le corps a atteint son état final.

L'ensemble sol-conduite en question a nécessité une étude incrémentale qui tient compte de l'événement relatif aux étapes de construction.

Sauf qu le problème majeur réside dans la déformation de la structure flexible en fonction de la charge appliquée en associant cette réponse au comportement du remblai et des fondations.

- 1973 Abel, s'est plutôt consacré à l'étude de l'effet de la rigidité des conduites, la hauteur de couverture et l'effet du glissement à l'interface pour une conduite elliptique, soumise à une surcharge. La structure était sensée être mise dans un sol supposé élastique.

Et d'après :

- Kaare et Hoeg, dans un sol homogène ils détaillé l'intensité ainsi que la distribution des contraintes normales qui agissent sur un cylindre creux, les résultats expérimentaux obtenus depuis l'élaboration de nouvelles techniques de mesures des contraintes de contacts. Ces derniers ont démontré :
 - L'influence de la flexibilité.
 - L'influence de la compressibilité de la structure.
 - L'effet de la variation de la hauteur de couverture.
- Anand, s'intéressant aux conduites rigides superficielles a présenté des résultats relatifs aux surcharges superposées, mettant aussi en évidence l'effet de la surcharge uniformément répartie en fonction de sa longueur de répartition au dessus de la conduite.
- Darwin, montrant à son tour suite à ses expérimentations que la pression sur une conduite rigide dépend du placement des couches de sol environnant, parce que les conditions internes des milieux pulvérulents dépendent des :
 - Limites de la forme de l'ensemble sol-structure.
 - La manière avec laquelle celle-ci elle a été obtenue.
- Lawrence, a étudié les conduites enterrées selon 2 aspects essentiels, dont l'un expérimental et puis l'autre théorique.

Les constantes matérielles ont été démontrées par les essais triaxiaux conventionnels, ce qui a mené Brown à conclure que la méthode basée sur la MEF représentait de façon adéquate le comportement sol-structure, si le coefficient de poisson ν et le module de Young E sont bien évalués afin de mieux représenter le comportement non linéaire du remblai.

- Brown, déclare qu'en plaçant un matériau organique compliquera l'aspect évoqué par Darwin après avoir réalisé une excavation en tranché, ce qui mène au résultat de l'effet de voûte avec altération radicale de la distribution des pressions sur cette dernière, puis avec le temps le pourrissement de la matière organique entrainera avec le temps une rigidité effective qui tendra à changer la distribution des pressions.

Il a aussi constaté que le remblai se comporte selon :

- La variation du niveau local de la déformation.
- La variation des propriétés mécaniques du matériau d'un point à un autre.

Même chose pour la multitude de problèmes qui s'attaquent au sol. Ce qui pourrait aussi atteindre la distribution des pressions entourant les conduites rigides est le mouvement local de la surface libre du sol dû à une importante surcharge.

La répartition des surcharges dépend des conditions aux limites du système (remblai-structure-TN).

Un arrangement des couches de sol de façon à minimiser les effets du cisaillement ainsi que de la flexion est fortement suggéré.

- Duncan, par la suite à la théorie de Lawrence a essayé d'apporter des améliorations au niveau de cette dernière, en y introduisant des coefficients correcteurs adéquats. Il a aussi prouvé que l'interaction sol-structure introduit deux modes de comportements qui sont :
 - La compression annulaire.
 - La flexion.

Par la même occasion, à partir des éléments finis à facteurs égaux, Duncan a pu mettre en évidence l'augmentation de la rigidité du matériau de remplissage entraîne une réduction des moments dans la structure, aussi les moments calculés par cette méthode sont en rapport avec la flexibilité relative du remblai et de la structure en ayant pour intermédiaire un coefficient mis par (Neilson et Selig) qui date de 1972.

$$Nf \frac{E_s (Sp)^3}{Ec l}$$

- Simmond et Playdon après avoir montré la nécessité de la construction séquentielle et aussi tous les problèmes qui s'y rapportent ils ont proposé une série de solutions rationnelles afin de palier à ces difficultés, ils aboutissent enfin aux conclusions suivantes :
 - Les contraintes et les déformations dépendent du mode de construction adopté pour le système pour l'ensemble sol structure.
 - Il est obligatoire de modéliser les étapes de construction afin d'avoir un résultat le maximum réaliste.
 - Des modèles constitutifs avec une limite par rapport aux contraintes de traction doivent être impérativement introduits, pour le sol et le matériau organique, utilisé pour la réalisation de la tranchée en décompression.
 - Parer à certains problèmes d'analyses la considération d'une pré-charge avant de donner naissance aux éléments avoisinant le rein de la structure, en coordination avec la modélisation des étapes de construction. La technique préconisée sera décrite ultérieurement.

Pour déterminer la charge du remblai sur les conduites enterrées, une édification de plusieurs théories a été faite comme :

- La théorie d'Otto Stolzenburg.
 - La théorie de woellmy.
 - La théorie de marston-spangler « Bella ».
 - La théorie basée sur le calcul des silos.
- Abel et Kay, se sont surtout basés sur la synthétisation de la MEF. L'objectif de leur recherche était d'atteindre une méthode adéquate et fiable de dimensionnement des conduites de moyenne importance. Ce qui suit aussi l'objectif était de rendre service aux bureaux d'études qui faisaient face à une demande accrue d'études de ce type d'ouvrages, cette méthode est non seulement pas couteuse mais encore elle est très

pratique comparée à la MEF car elle constitue une intéressante alternative concernant les ouvrages d'importances mineurs et moyennes.

- Dans cette méthode, un abaque préétabli est utilisée par les auteurs afin de leur permettre de dimensionner les buses circulaires, sous une seule condition que les couches du remblai soient appliquées par incrémentation, ce qui revient à une application horizontale de ces couches.

Cette méthode permet à l'ingénieur une approche approximative pour l'effet de la non linéarité du remblai. Les paramètres prépondérants qui constituent les abaques proposés sont comme suit :

$$\frac{wc Ms}{p/R}, \frac{Ta}{p/R}, \frac{M'}{p/R^2}$$

Les paramètres indépendants sont :

$$EsR^3/EI, EsR/EA \text{ et } \nu, \theta$$

Les auteurs ont aussi introduis des coefficients correcteurs afin que ces résultats soient le plus proches possible de ceux donnés par la MEF :

$$Fw\left(\frac{EsR^3}{EI}\right) = \frac{W'Es}{pR}$$

Le coefficient correcteur J_m a été déterminé par la MEF, il a aussi été synthétisé sur les abaques selon les paramètres prépondérants cités au dessus. Expriment dans quelles proportions le module du sol compacté doit être modifié pour avoir un module E équivalent de sorte que :

$$Es = Ef + Jw(Ei - Ef)$$

Tous les abaques servent à approcher w comme :

$$W = CwFwW'$$

- Karinski, Dancygier et Léviathan , dans le but d'avoir une réponse aux structures enterrées sous les actions de charges statiques de surface et de charges de gravitation sous des conditions d'états de service ils ont étudié un model discret et continu.

Ce dernier a 2 degrés de liberté il représente la structure au dessus de laquelle est appliquée une colonne verticale continue de sol. Il simule l'affectation de l'interaction sol-structure par le déplacement de la couverture ainsi que le déplacement libre du corps rigide qui constitue toute la structure, il représente aussi les effets positifs et négatifs de voûte.

Une meilleure compréhension des effets est fournie par ce model, ces effets ont différentes variables sur le type d'effet de voûte (vertical ou horizontale) et la réponse des conduites enterrées.

Dans le model proposé, d'autres paramètres relatifs à l'interaction sont introduits, tels que :

- La pression extérieure.
- La profondeur d'enterrement.
- La hauteur de la structure.
- L'envergure du remblai de couverture.
- L'épaisseur du remblai de couverture.

- Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux composants le sol et la structure.
- Aussi par ce model proposé une simulation d'une conduite rectangulaire enterrée a été exécutée via une analyse en éléments finis conduite aux mêmes charges d'interface et la même influence des paramètres sur les résultats, ceci montrera :
- la rigidité de la conduite.
- La hauteur.
- L'effet de voûte.

Ce model en question pourrait être utilisé à un stade primaire du processus de dimensionnement afin d'évaluer aisément les effets des variables comme les propriétés de a structure ainsi que du sol sur l'ensemble sol-structure.

- A. hacene chaouche, ayant étudié l'interaction sol-structure dans le cas des conduites métalliques enterrée dans un remblai dont le comportement est supposé non linéaire élastoplastique d'un coté puis linéaire élastique d'un autre, en passant par 3 méthodes d'approches bien distinctes:
 - Empirique.
 - Analytique.
 - La méthode des éléments finis.

Les résultats obtenus depuis ces recherches ont démontré que la MEF comparée aux méthodes empiriques et analytique se rapprochent le plus du comportement réel de ce type de structure, et ceci par rapport à :

- la distribution des pressions de contact pour les divers types de conduites.
 - La construction séquentielle.
 - La prise en compte du comportement linéaire et non linéaire du remblai.
- Hyun Jong Lee et Han Sung Roh, ayant effectué des essais sur les remblais latéraux des ouvrages enterrés sis chaussée qui sont susceptibles de tassements différentiels à cause de la faible compaction des sols. La compaction des remblais latéraux ne pourrait être assurée convenablement à proximités des grands ouvrages à cause de la l'immense pression des terres engendrée par les charges dynamiques qui mènent souvent à des fissurations sur les parois de a conduite.

2 types de matériaux ont été appliqués sur les parois des ouvrages :

- Des pneus
- Le polystyrène expansé

Afin de réduire les pressions dynamiques latérales des terres introduites par les charges dynamiques. Simultanément les caractéristiques physiques et mécaniques sont améliorées par les compacteurs. Une analyse numérique a été faite dans le but d'étudier :

- les effets des matériaux organiques.

- La variation des contraintes en fonction de la profondeur des sols latéraux. Cette analyse numérique a aussi montré que les pressions dynamiques des terres peuvent être diminuées de manière effective avec les matériaux organiques à faible module d'élasticité et grand rapport d'amortissement.

Une multitude d'essais ont été effectués afin d'étudier les performances des matériaux organiques et en conclusion ces derniers réduisent la pression dynamique des terres sur les parois des ouvrages, donc les pneus recyclés se sont avérés le matériau le plus efficace en matière de réduction des pressions dynamiques par rapport à leur faible rigidité comparée au polystyrène expansé mais aussi à leur coefficient d'amortissement.

- N. Challamel et P. de Buhanb, avec une approche simplifiée et ayant étudié les mouvements de glissement des conduites en géotechnique. La description mécanique d'un solide complexe comme les différentes composantes sol-structure est faite dans un cadre appelé «approche de modélisation mixte», utilisée souvent dans le renforcement des solides sol-structure. L'évaluation de la limite supérieure du paramètre non dimensionnel de chargement dû au poids est obtenue en se servant de la conception des capacités de méthodes cinématiques. La rupture par rotation de la pente du système sol-structure est décrite par un mouvement à 3 dimensions.
- Donc l'application de cette approche est présentée et discutée en mettant l'accent sur l'identification et l'optimisation de quelques facteurs importants qui contrôlent l'intégrité de la conduite.

Plusieurs conclusions ont été faites sur les problèmes de la stabilité de la conduite enterrée, mettant en évidence ses dimensions.

- Kang, Parker et Hoo, ont plutôt étudié la résistance des conduites métalliques enterrées, ondulées de sections, et à partir des équations qui décrivent:
 - les facteurs des effets de voute.
 - les déformations et les contraintes maximales qui agissent sur les parois de la structure enterrée.

Ils ont pu formuler des données générées numériquement. Pour décrire les paramètres cités plus haut, ces équations sont alors comparées aux équations habituelles, et ce dans l'objectif de savoir leur validité et leurs applications.

Ils ont aussi démontré que les facteurs d'effet de voute ne sont pas très affectés par le rapport (Diamètre D / et rayon de giration de la section i) ainsi que le rapport H/D .

A la lumière de tous ces travaux de recherche dans le domaine des conduites enterrées, nous concluons que l'étude et l'analyse sont à la fois importante et intéressante afin d'analyser le comportement de ces dernières tout en tenant compte des paramètres dans les objectifs. (4)

Conclusion :

L'étude bibliographique montre les progrès importants réalisés dans les années 90. À travers de cette étude, on peut conclure que la méthode de base pour la détermination du

comportement des conduites enterrées est celle de Marston, car ses travaux ont été soutenus par des expérimentations au laboratoire et in situ, d'autant plus que ses résultats ont servis à plusieurs auteurs comme un point de départ pour leurs essais. Pour cela, on réalise l'objectif de ce travail à l'aide de cette méthode pratique, puis à la méthode des éléments finis qui est très utile pour les analyses des structures enterrées d'une manière réaliste.

CHAPITRE II
Méthodes de résolution

INTRODUCTION

Les remblais qui entourent les conduites appliquent des charges sur cette dernière, ces charges sont estimées selon :

- La flexibilité de la conduite.
- Le type de la conduite.
- La nature des terrains latéraux.
- La compressibilité du sol de fondation.
- Si la conduite est installée en tranchée ou en remblai.
- Caractéristiques du remblai et sa résistance au cisaillement.
- Densité et compressibilité du remblai.
- Hauteur de couverture.

En suite l'interaction entre la conduite et le sol dépend surtout de la zone d'enrobage de la conduite et de la qualité de l'interface sol conduite.

L'évolution de ces charges qui sont dues aux terres engendrées par les facteurs cités ci-dessus créent un problème complexe, à partir de là, la vie des ouvrages met l'accent sur des attentions particulières.

Jusqu'à ce jour et malgré toutes les études effectuées à cet égard, ce problème n'a pas été résolu de manière globale. Pour cela la théorie de Marston a été adoptée pour sa précision du côté des résultats obtenus que ce soit en matière d'ouvrages sous remblais ou en tranchées.

Cette méthode est fiable surtout pour ces informations qualitatives et quantitatives concernant la réaction sol-structure.

Pour réaliser les objectifs de ce travail on a eu recours à des méthodes différentes à savoir :

- Méthode analytique prônée par le fascicule 70 qui est basée sur la méthode de Marston.
- Méthode numérique MEF (Plaxis).
- Méthode synthétique.

Différentes théories

Afin de déterminer les différentes charges dues aux terres sur les conduites enterrées, plusieurs théories ont été édifiées telle que :

- La théorie de Marston-Spangler.
- La méthode synthétique de Guerrin.
- La théorie de M Wollmy.
- La théorie d'Otto Stolzenburg.
- La théorie basée sur le calcul des silos.
- La méthode tchèque.
- La méthode russe.

CHAPITRE II : METHODES DE RESOLUTION

De toutes ces études nous nous intéresserons en particulier à la méthode de marston ainsi qu'à celle des éléments finis.

Théorie de Marston-Spangler

L'élaboration de cette théorie a vu le jour en 1930, basée sur la théorie de calculs des silos, elle permet l'estimation des charges appliquées sur les conduites enterrées avec l'hypothèse d'un remblai ayant 2 plans de glissements verticaux encadrant la conduite.

De l'existence d'un plan d'égal tassement {une hauteur H_t , il en résulte que pour des hauteurs de remblai supérieures à H_t , les forces de frottement n'agissent que sur la hauteur H_t . Les terres au dessus de H_t ne jouent que le rôle d'une surcharge uniformément répartie. Nous donnons ci-dessous les formules théoriques auxquelles nous conduit la théorie pour les deux types d'installation, en l'occurrence en tranchée et en remblai.

Les figures qui suivent montreront la nomenclature des conduites enterrées :

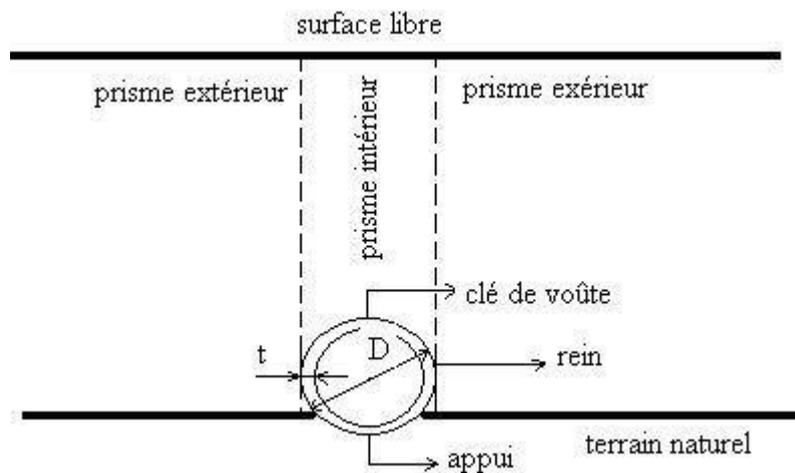


Figure II. 1: Nomenclature du solide sol structure d'après la théorie de Marston-Spangler

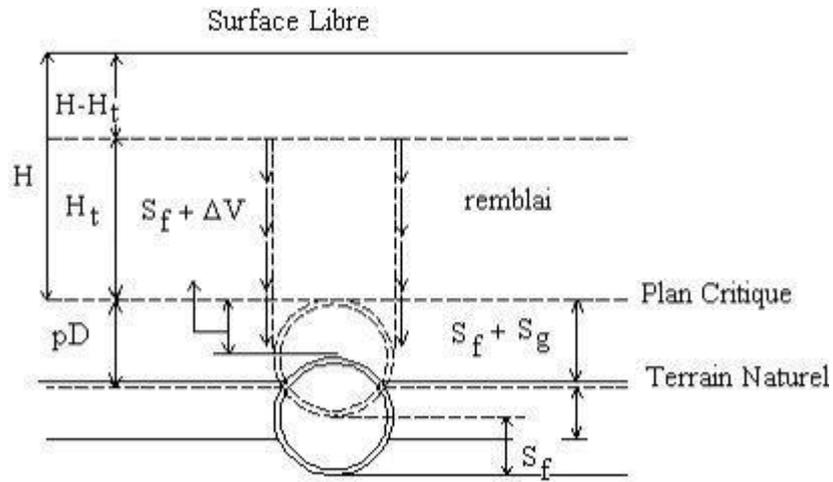


Figure II. 2 : Conduite rigide

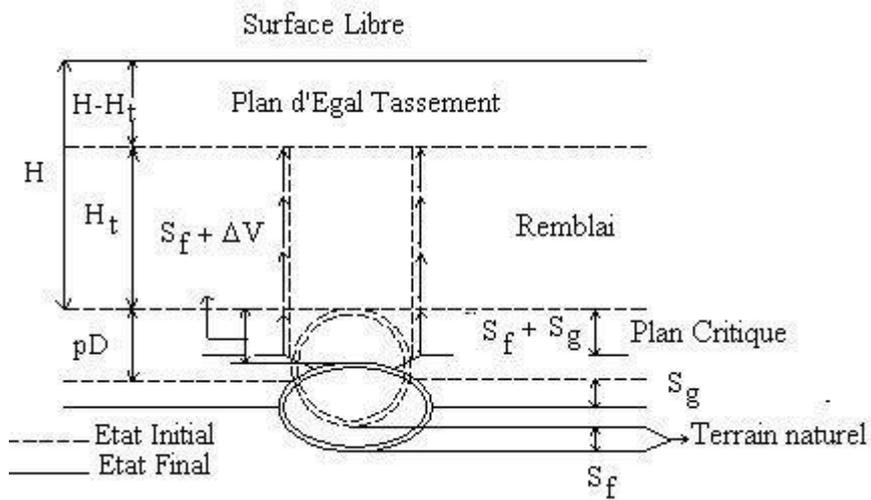


Figure II.3: conduite flexible

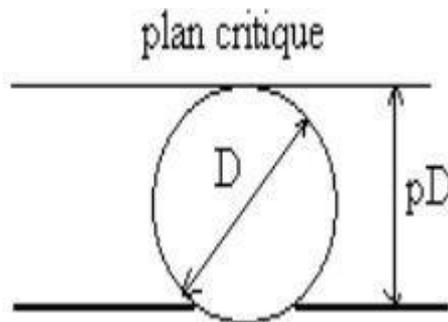
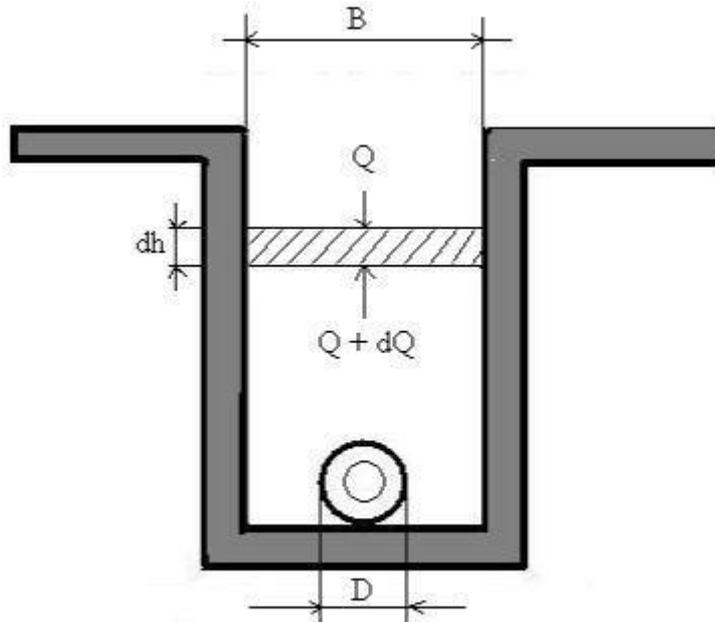


Figure II.4: Plan critique en hauteur pD

Installation en tranchée



D'où :

- B : est la génératrice supérieure de la tranchée au niveau de la génératrice supérieure de la buse.
- B : largeur de la tranchée.
- D : diamètre de la conduite.
- u' : coefficient de frottement des matières ensilées.
- Q : La charge verticale due au remblai de hauteur H par mètre linéaire de conduite.
- k : rapport entre les pressions horizontales et vertical dans un remblai indéfini.
- γ : Densité du remblai.
- Ht: distance mesurée entre la génératrice supérieure de la conduite et le plan d'égal tassement(P.E.T)
- H : hauteur totale de remblai sur la conduite, mesurée entre la génératrice supérieure de la conduite et le plan supérieur de la chaussée ou la surface libre.

$$D = \frac{2\sigma h}{\Delta H} \dots (5)$$

Donne la charge totale sur le plan horizontal passant par la génératrice supérieure de la conduite.

Si la conduite est rigide, elle prendra la totalité de la charge.

Mais si la conduite est flexible et le remblai bien compacté, le remblai encaissera une partie de la charge et l'équation devient :

$$Q + \gamma B dh = Q + dQ + 2k u' Q B dh \dots (1)$$

$$dQ = \gamma B dh - 2ku' Q B dh \dots (2)$$

Conduite rigide

Comme dans notre cas :

$$Q = C\gamma B^2 \dots (3)$$

En ayant pour :

$$\frac{1 - e^{-\frac{2ku'H}{B}}}{\frac{2ku'H}{B}}$$

Conduite flexible

$$Q = C\gamma DB \dots (4)$$

Marston auteur de l'évaluation H_t , évidemment en égalisant les tassements dans le prisme intérieur et extérieur au niveau d'un plan d'égal tassement dus au poids des terres au dessus de ce plan.

En suite, Plus tard Spangler a modifié cette approche quasi-élastique en égalisant les tassements au niveau du P.E.T, dus au poids du sol sur toute la hauteur de couverture H au-dessus de la conduite.

Ceci dit que, les charges calculées par les deux méthodes sont satisfaisantes. D'autre part, Spangler a aussi donné les pressions horizontales dépendantes du module de la résistance passive du sol constituant le remblai donné par l'expression :

$$D = \frac{h\sigma_D}{D\Delta H} \dots (5)$$

σ_h : Pression au niveau du rein de la structure.

ΔH : La variation du déplacement au niveau du diamètre horizontal.

D : Diamètre de la conduite.

Hypothèse de la théorie de Marston

- une mobilisation totale de la résistance au cisaillement du sol au cisaillement.
- Proportionnalité de La mobilisation du cisaillement au ku' , qui est supposé constant.
- Egalité de la largeur fictive du prisme au diamètre de la conduite.
- Egalité de La charge totale sur le plan critique de largeur $3D$ aux poids des trois prismes.
- Le module d'élasticité du remblai dans la détermination de H_t , reste constant le long de la largeur et la hauteur du prisme.
- Distribution uniforme de La charge totale verticale agissant sur le sommet de la conduite sur toute la largeur D de la conduite.

CHAPITRE II : METHODES DE RESOLUTION

- La pression latérale horizontale sur la conduite est distribuée paraboliquement. La pression maximum se produit au niveau du diamètre horizontal. Elle est égale au produit du module de résistance passive du remblai par 0.5 fois sa déflexion horizontale.
- La réaction verticale uniformément distribuée sur la largeur d'appui dont la résultante est égale à la charge Q. (5)

Méthode synthétique

Une méthode synthétique et pratique a été proposée par A.Guerrin et G.Daniel d'après le traité de béton armé N°8 qui tient compte des expériences et des avantages des théories citées plus haut. Nous permettant la détermination de la charge verticale à laquelle est soumise une conduite enterrée par la relation suivante :

$$Q = K \cdot \gamma' \cdot K_f \cdot K_D \cdot \gamma \cdot D \cdot H \dots (6)$$

Et on constate 3 types de tuyaux :

- Les tuyaux flexibles, ou $e/D_i \leq 1/12$
- Les tuyaux normaux, ou : $1/12 \leq e/D_i \leq 1/10$
- Les tuyaux rigides, ou : $e/D_i > 1/10$

Par contre pour les conduites en fouilles remblayées :

K : $K = f\left(\frac{H}{B}\right)$ tel que :

Pour les sables :

$$K = 1 - 0.49\left(\frac{H}{B}\right) + 0.12\left(\frac{H}{B}\right)^2 - 0.01\left(\frac{H}{B}\right)^3 \dots (7)$$

- $\left(\frac{H}{B}\right) = 0$, $K = 1$
- $\left(\frac{H}{B}\right) = 1$; $K = 0.6$
- $\left(\frac{H}{B}\right) = 4$; $K = 0.325$

Pour les argiles :

$$K = 1 - 0.153\left(\frac{H}{B}\right) + 0.0011\left(\frac{H}{B}\right)^2 + 0.0019\left(\frac{H}{B}\right)^3 \dots (8)$$

- $\left(\frac{H}{B}\right) = 1$; $K = 0.850$
- $\left(\frac{H}{B}\right) = 3$; $K = 0.715$
- $\left(\frac{H}{B}\right) = 5$; $K = 0.500$

γ' : est donnée par la courbe suivante en fonction de la nature du remblai, du rapport $\left(\frac{H}{B}\right)$ et de β l'inclinaison des s de la fouille.

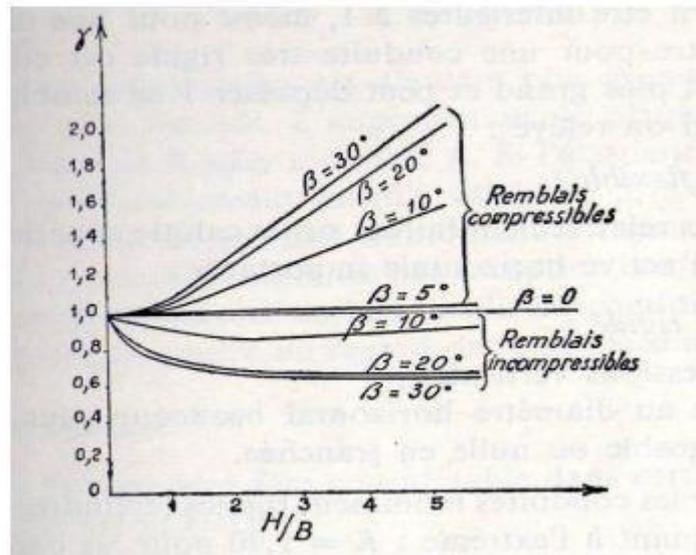


Figure II.5 : courbe démonstrative de γ'

Kf : coefficient de flexibilité.

Les valeurs de Kf varient selon la type du tuyau alors on trouve pour les :

- Tuyaux flexibles 0.90
- Tuyaux normaux 1.00
- Tuyaux rigides 1.10

KD : coefficient de damage du remblai

Pour le coefficient de damage les valeurs varient autant que pour le coefficient de flexibilité et on trouve :

- Tuyaux flexibles 1.30
- Tuyaux normaux 1.15
- Tuyaux rigides 1.00

cas de conduite en tranchée:

La charge Q uniformément répartie est calculée avec une majoration de 5 à 10 %.

1- Méthode fascicule 70 : (6)

En se basant sur le fascicule 70, de 2003 on trouve solution à notre problème de pose de conduite sous voûte, alors ces types de poses sont mis en œuvre dans les projets pour lesquels une canalisation en béton de série courante, une solution consiste à s'orienter vers des techniques de poses particulières telles que la pose sous voûte.

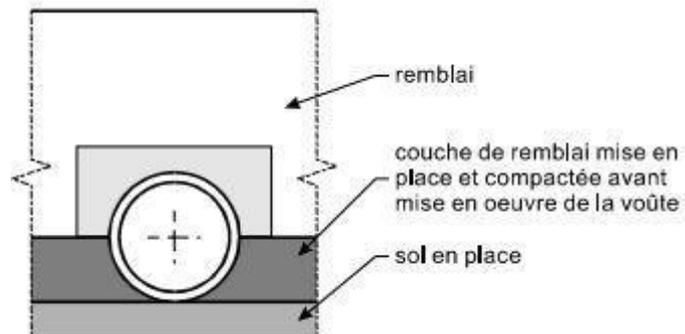


Figure II. 6: pose sous voûte

Cas d'une pose sur berceau :

Et c'est aussi une pose particulière.

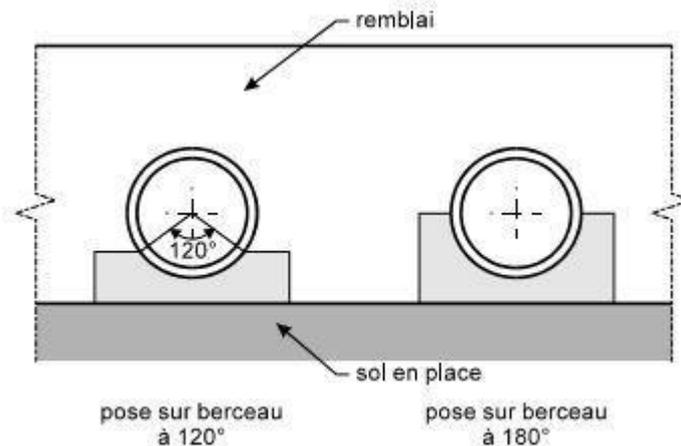


Figure II.7: cas d'une pose sur berceau

Cas d'une pose en baquette

En assainissement, ce terme désigne la partie latérale du fond de certaines conduites unitaires visitables, située normalement au-dessus du niveau de l'écoulement des eaux de temps sec.

Les banquettes sont surélevées par rapport à la partie centrale de la conduite qui reçoit les eaux usées (cunette); elles peuvent servir d'accès au personnel d'entretien pour la visite du réseau ; elles permettent un passage à sec en l'absence d'eaux pluviales et favorisent l'auto-curage pour les petits débits. Il peut y en avoir sur un seul côté ou sur les deux côtés du collecteur.

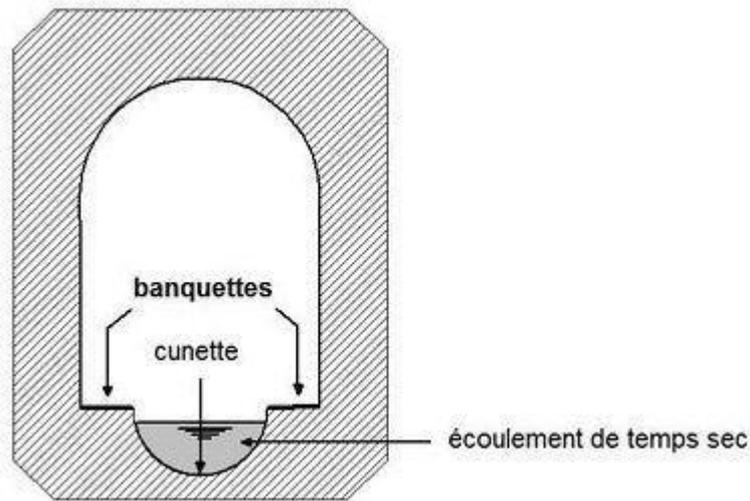


Figure II.8: Conduite en baquette

Principales hypothèses

- Le poids propre de la canalisation et de l'affluent est négligé.
- Le contact béton de la voûte-tuyau se fait sans frottement, les actions d'appuis sont donc radiales.
- Les dimensions de la voûte sont prédéfinies comme suit :

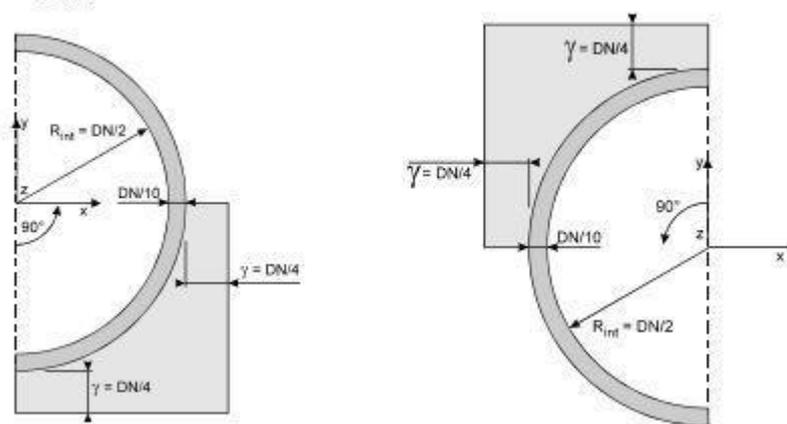


Figure II.9 : Dimensions du berceau à 180 et de la voûte

Types de chargements

Une étude par éléments finis permet de déterminer un chargement équivalent sur le tuyau seul, dans les différents cas de pose concernés (berceau à 120°, 180° et voûte)

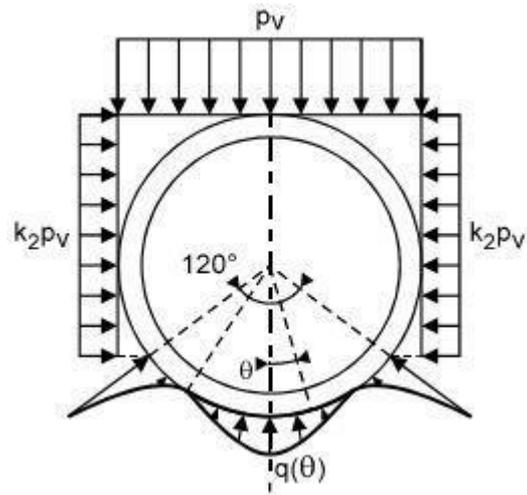


Figure II.10: Cas de pose à 120°

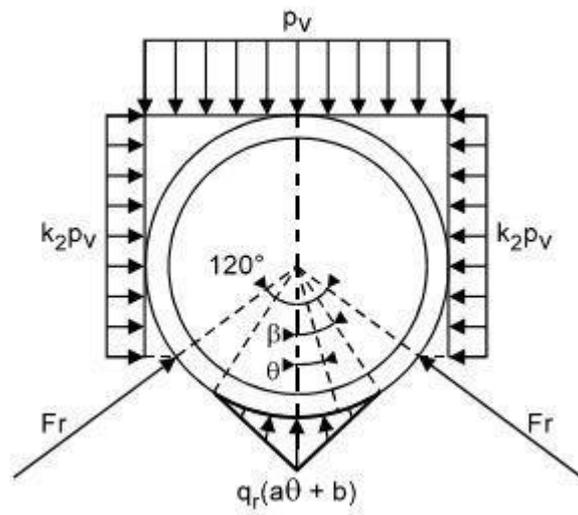


Figure II.11: Cas de pose à 180°

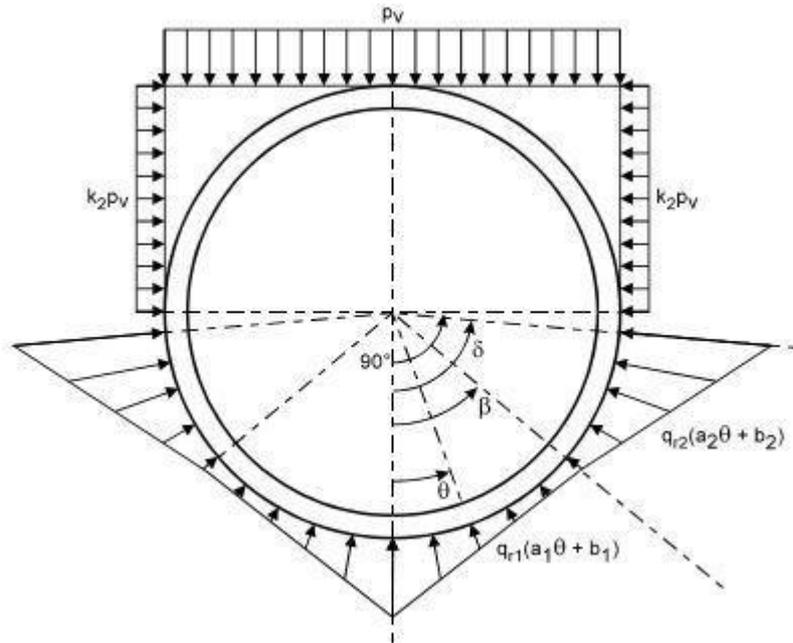


Figure II.12: Cas de pose sous voûte

Les calculs du moment d'ovalisation généré par ces cas de chargements est basé sur les équations de BRESSE, après avoir décomposé le chargement en cas de charges élémentaires.

Et puis dans le cas d'une pose sous voûte, le moment maximal se situe à la clé de la canalisation et a pour expression :

$$M_{s \text{ canavoûte}} = p_v R_m^2 \left(\frac{17}{6\sqrt{3}} \right) \left(\frac{9\sqrt{3} + 8\pi}{48\pi} \right) + k_2 p_v R_m^2 \left(\frac{9\pi - 16}{24\pi} \right) \\ + \frac{1}{2\pi} q_{r1} R_m^2 (-2a_1 - a_1 \beta^2 - 2b_1 \beta + (2a_1 - 2a_1 \beta^2 - 2b_1 \beta) \cos \beta + 2a_1 \beta \sin \beta) \\ + \frac{1}{2\pi} q_{r2} R_m^2 (a_2 \beta^2 + 2b_2 \beta - a_2 \delta^2 - 2b_2 \delta - (2a_2 - 2a_2 \beta^2 - 2b_2 \beta) \cos \beta) \\ + (2a_2 - 2a_2 \delta^2 - 2b_2 \delta) \cos \delta - 2a_2 \beta \sin \beta + 2a_2 \delta \sin \delta$$

Avec :

- $a_1 = k_2 - 1,1$
- $b_1 = 1,2 - 0,34.k_2$
- $a_2 = 3,6 - 3,4.k_2$
- $b_2 = 3,3.k_2 - 2,8$
- $\beta = \frac{5\pi}{8}$
- $\delta = \frac{\pi}{18} \cdot (8 + k_2)$

Les expressions finales des moments dans les voûtes sont les suivantes :

$$M_{s \text{ voûte}} = P_v \cdot R_e^2 \cdot (0.703 - 0.586 \cdot K_2).$$

Avec :

R_e : Rayon extérieur de la canalisation

P_v : Pression verticale s'exerçant sur la génératrice supérieure de la canalisation (Kn/m^2)

K_2 : Coefficient de pression horizontale.

7- Cas de la pose en dépression avec interposition de matériau souple :

Dans notre cas le matériau souple sera le caoutchouc, il permettra de réduire la charge due au remblai sur les canalisations posées sous une hauteur de couverture importante, en interposant un matériau souple comme le polystyrène, entre la canalisation et le remblai.

Dans la plupart des cas les canalisations posées sous de grandes hauteurs de remblai sont posées en remblai indéfini, pour ce type de pose la théorie de Marston admet que les plans de cisaillement sont situés conformément à la figure suivante :

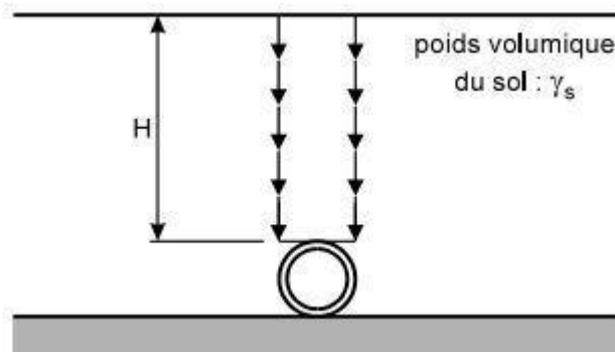


Figure II.13: Pose en remblai indéfini

Le principe de la pose avec interposition d'un matériau souple est de réduire la pression P_r due au remblai sur la canalisation en inversant le sens des forces de frottement le long des plans de cisaillement.

A cette fin la méthode proposée consiste à augmenter artificiellement les tassements dans le prisme de sol situé au dessus de la génératrice supérieure de la canalisation.

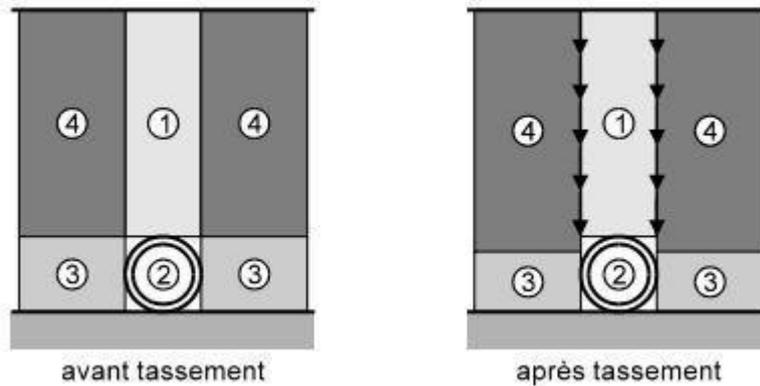


Figure II.14 : pose en remblai indéfini sans matériau souple

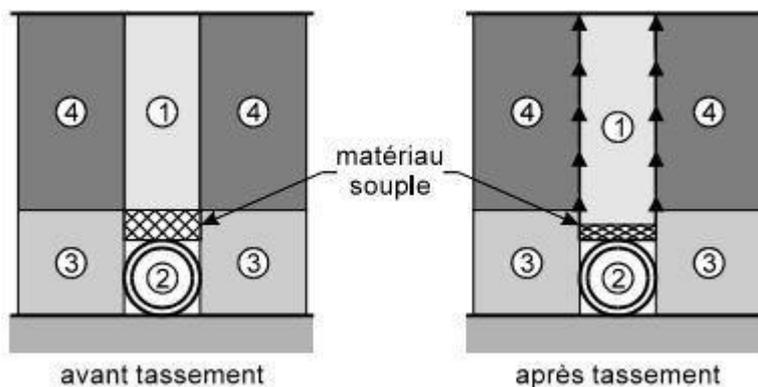


Figure II.15: Pose en remblai avec interposition de matériau souple

En effet, pour la pose en remblai figure 12 la canalisation (zone 2) est plus rigide que les prismes de terre adjacents (zone 3), les tassements dans la zone 3 sont alors plus importants que l'ovalisation de la canalisation.

Donc les prismes de sol 4 sont ainsi entraînés vers le bas, ce qui va créer sur le prisme 1 des forces de frottement dirigées vers le bas et ces dernières augmentent la pression due au remblai sur la canalisation.

Si l'on place au dessus de la canalisation une épaisseur suffisante plus souple, que ve le remblai figure 2.13de manière à ce que les tassements dans la zone 2 (canalisation+ matériau souple) soient supérieurs aux tassements dans les prismes adjacents (zone 3), donc le sens des efforts de frottements est inversé et la charge due au remblai sur la canalisation est diminué.

D'où son expression :

$$P_r = C_l \cdot \gamma_s \cdot H$$

C_l : Le coefficient de Marston pour la pose avec interposition d'un matériau souple et :

$$C_l < C$$

C: étant le coefficient de concentration dans le cas d'une pose classique.

CHAPITRE II : METHODES DE RESOLUTION

Le calcul de C_l est développé comme suit :

L'expression de C_l est déterminé en écrivant l'équilibre d'une tranche de sol du prisme intérieur sous l'effet des charges auxquelles elle est soumise

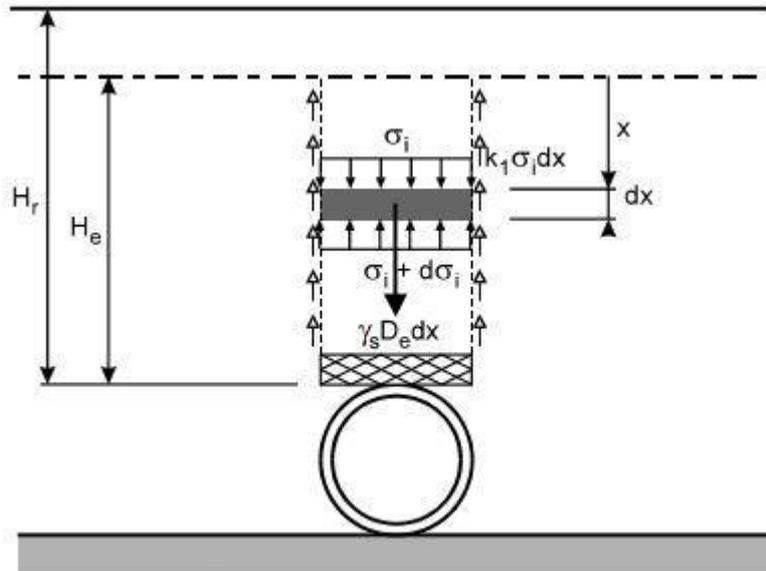


Figure II.16 : pose avec interposition de matériaux souple (contraintes)

- σ_i : pression au niveau x ;
- $\sigma_i + d\sigma_i$: pression au niveau $x + dx$;
- $\gamma_s D_e dx$: poids de la tranche de sol concernée ;
- $k_1 \sigma_i dx$: effort de frottement de l'élément sur le plan de cisaillement.

L'équilibre s'écrit :

$$\sigma_i D_e + \gamma_s D_e dx = (\sigma_i + d\sigma_i) D_e + 2k_1 \sigma_i dx$$

Soit :

$$\frac{d\sigma_i}{dx} + \frac{2k_1}{D_e} \sigma_i = \gamma_s$$

Il vient alors :

$$\sigma_i(x) = \frac{\gamma_s D_e}{2k_1} + A.e^{-\frac{2k_1 x}{D_e}} \text{ et } \sigma_i(0) = \gamma_s (H_r - H_e)$$

Soit :

$$\sigma_i(x) = \gamma_s \left[\left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-\frac{2k_1 x}{D_e}} + \frac{D_e}{2k_1} \right]$$

La pression supportée par la canalisation est alors :

$$p_r = \sigma_i (H_e - e_p) + \gamma_m \cdot e_p$$

$\gamma_m \cdot e_p$ représentant le poids du matelas souple.

Soit :

$$p_r = \gamma_s \cdot \left[\left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-\frac{2k_1(H_e - e_p)}{D_e}} + \frac{D_e}{2k_1} \right] + \gamma_m \cdot e_p$$

Ou :

$$p_r = \left\{ \frac{1}{H_r} \left[\frac{\gamma_m \cdot e_p}{\gamma_s} + \left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-\frac{2k_1(H_e - e_p)}{D_e}} + \frac{D_e}{2k_1} \right] \right\} \gamma_s \cdot H_r$$

Soit :

$$p_r = C_i \cdot \gamma_s \cdot H_r$$

Avec :

$$C_i = \left\{ \frac{1}{H_r} \left[\frac{\gamma_m \cdot e_p}{\gamma_s} + \left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-\frac{2k_1(H_e - e_p)}{D_e}} + \frac{D_e}{2k_1} \right] \right\}$$

Dans le cas d'un plan d'égal tassement virtuel, l'expression de C_i devient :

$$C_i = \left\{ \frac{1}{H_r} \left[\frac{\gamma_m \cdot e_p}{\gamma_s} + \left(1 - e^{-\frac{2k_1(H_e - e_p)}{D_e}} \right) \frac{D_e}{2k_1} \right] \right\}$$

Toutes fois il est important de noter que ce type de pose ne fonctionne que lorsqu'un certain nombre de conditions sont réunies. Parmi ces conditions, on peut noter: bonne compacité du remblai, bonne compressibilité du matériau souple (module de Young faible)

Les sollicitations sont calculées à partir des pressions précédemment déterminées.

La Méthode des éléments finis (MEF)

II.3.1.Introduction

La Méthode des éléments finis (MEF) est une méthode de résolution numérique approchée des équations différentielle décrivant les phénomènes qui intéressent les ingénieurs. (8) Elle est née d'une manière intuitive pour résoudre les problèmes de structures RDM ou plus généralement de l'élasticité. L'idée vient en fait {ce que au départ, un grand nombre de structures utilisées par les ingénieurs dans la construction sont composées d'éléments semblables reliés entre eux en des points pour former la structures générales que sont les structures en treillis ou les structures en portiques. L'idée étant de considérer le comportement de chacun des « éléments » tout seul et ensuite de relier ces éléments pour reconstituer la structures réelles et ceci de façon à satisfaire au niveau de leurs jonction à l'équilibre générale des forces en place et la compatibilité des déplacements. Cette manière de faire réduit le nombre d'inconnue et transforme en fait les problèmes continue en un problème discret ou les inconnues (contraintes, efforts déplacements) se se situent au niveau des nœuds. Leurs

résolution ensuite se réduit une résolution d'équation algébrique facilite grandement par les méthodes de calcul matriciel qui se situent au niveau des nœuds. Leurs résolution ensuite se réduit une résolution d'équation algébrique facilite grandement par les méthodes de calcul matriciel.

Cependant, ceci marche quand le nombre d'éléments n'est pas très importants, dans le cas contraire leurs calcul devient fastidieux est souvent impossible à mener en calcul manuel. La solution consiste se rendre compte en fait que l'idée de départ de considérer des éléments semblables voudra dire que leurs calculs individuellement deviennent assez répétitifs, puisque ils subiront tous le même calcul avant leurs assemblages pour reconstituer la structure à calculer. Ce dernier aspect convient parfaitement au calcul automatique. En effet l'automatisation du calcul peut se faire en utilisant les méthodes du calcul matriciel, les techniques de l'analyse numérique, et L'ensemble peut facilement être mis sous formes de programme informatique. Ainsi la seule limite du calcul sera la capacité de la machine qui est utilisée pour mener le calcul. Par la suite ont eu besoin de calculer des structures continues : voiles, plancher, dalles, réservoir, etc...

A la différence des structures formées de barres qui sont naturellement décomposées en éléments, les structures continues doivent, pour être manipulées avec l'approche appliquée comme pour les poutres précédemment, subir un découpage virtuel (appelé par la suite « discrétisation ») ou plus généralement « maillage ») qui consiste à découper la structure en élément assez simple de façon à ce que leur réunion (assemblage) en des points choisis reconstitue la structure initiale. De plus on se rendra compte par la suite que cette façon de faire va permettre une souplesse de traitement d'analyse de ces structures surtout lorsque il s'agit de structure ayant des conditions aux limites particulière ou des chargements complexes. Qu'ils s'agissent de structures de type ossatures ou de structure continues, l'idée du découpage est la même. Ainsi les parties ainsi découpe (ou domaines) sont appelés en MEF des « éléments » et les points par lesquels ils sont connecte sont appelé «nœuds».

L'élément ainsi constitue (généralement de forme simple) sera analyse pour écrire de manière simple sa relation de rigidité par rapport des dll en ses nœuds. La relation de rigidité de la structure sera par la suite obtenue par assemblage des rigidités de ses éléments par l'intermédiaire des nœuds. Le relation ainsi constitue, est une relation algébrique qui sera résolu par les méthodes de calculs matriciels. Il est évident que la taille de ce genre de problème sera vite importante, d'où la nécessité de disposer d'un moyen automatique de calcul. Le calcul matriciel s'adaptant facilement la programmation, on voit bien que l'écriture de programme informatique sera la solution pour résoudre le problème vu la taille du calcul éventuel. Par conséquent la puissance de cette méthode des éléments finis actuellement n'a pas pu prendre son essor actuel que grâce la puissance des ordinateurs lors de son développement et actuellement sa large utilisation grâce à la puissance des micro-ordinateurs.

II.3.2. Concept général de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis permet l'analyse de structures continues qui sont décomposées en parties virtuelles de forme géométrique simple appelée « éléments ». Ces éléments sont raccordes les uns aux autres, pour former la structure complète, par l'intermédiaire d'un

certain nombre de points appelés « nœuds » ou point nodaux situés adéquatement sur l'élément (aux coins de l'élément, au milieu de ses cotés, ou au milieu de l'élément lui-même). Dans la pratique le comportement structurel de l'élément se traduit par une relation dite « relation de rigidité » ou relation de raideur. Cette relation de rigidité lie les déplacements des nœuds (ou degré de liberté des nœuds : ddl) de l'élément aux forces agissantes en ces mêmes nœuds. Comme chaque élément peut avoir plusieurs nœuds, chacun pouvant avoir plusieurs composantes de déplacements (ddl) ou de forces conjuguées ces déplacements, la relation de rigidité sera en fait un ensemble de relations qui formeront un système d'équation algébrique.

Si nous prenons le cas en élasticité des petites déformations et un matériau dont la loi de comportement est la loi de Hooke, le système d'équation obtenu est un système d'équation linéaire s'écrivant sous forme matricielle (pour un élément) :

$$[K_e] \cdot \{q_e\} = \{F_e\}$$

[Ke] : Matrice de rigidité dont les composantes sont constantes et ne dépendent que du matériau (constantes élastiques) et de la géométrie de l'élément (forme, type, orientation).
{qe} : Vecteur dont les composantes sont les déplacements (ddl) généralisés (translations ou rotations) au niveau des nœuds de l'élément.

{Fe} : Vecteur dont les composantes sont les forces généralisées (forces ou moment) agissantes au niveau des nœuds de l'élément. (3)

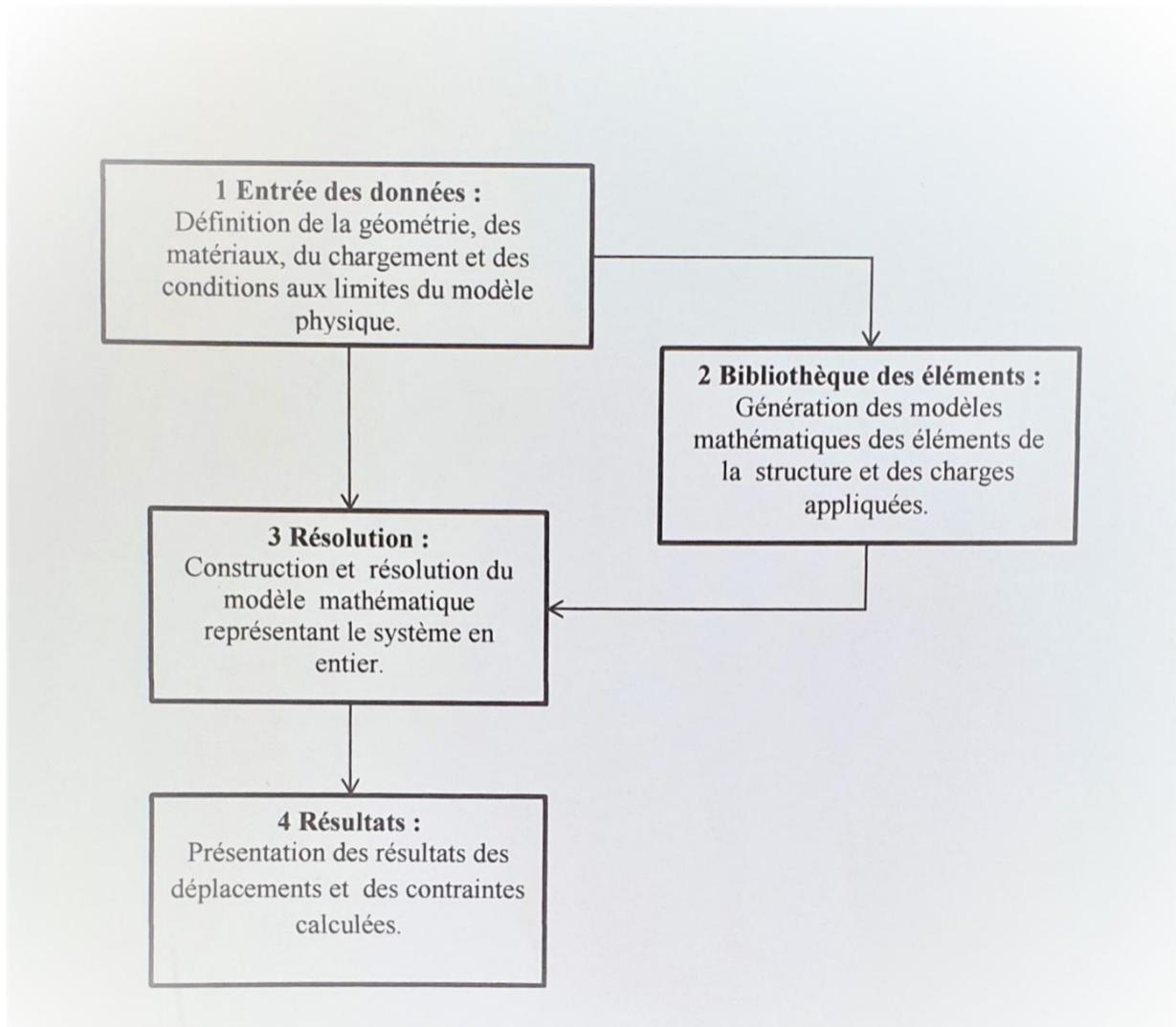


Figure II.17: Organigramme des programmes généraux

CHAPITRE III

Méthode des éléments finis

III. La méthode des éléments finis

III.1. Introduction au Plaxis

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des problèmes géotechniques de plus en plus complexes soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour l'exécution de ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes.

Parmi ces méthodes, celle aux éléments finis. Elle se considère la plus performante vu son grand champ d'application. Afin de pouvoir manipuler avec le code Plaxis qui se base sur la méthode aux éléments fins, nous allons commencer ce chapitre par une description des modèles rencontrés. Ensuite, on passe à la dynamique sur laquelle repose une simulation sous ce logiciel. (7)

Présentation du code Plaxis

Plaxis V8, est un logiciel géotechnique aux éléments finis spécialement destiné à l'analyse en 2D des déformations et de la stabilité des sols et structures. Ces applications géotechniques nécessitent des lois de comportement pour la simulation du comportement des sols et des roches, non linéaire, dépendant du temps et anisotropique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. La génération du modèle d'éléments finis commence par la création du modèle géométrique, qui est la représentation du problème réel à étudier. Un modèle géométrique consiste en des points, des lignes et des couches. En plus de ces composants de base, des éléments de structure et des conditions spéciales peuvent être ajoutés au modèle géométrique pour simuler les plaques, l'interaction sol structure ou les chargements. Le modèle géométrique doit non seulement comporter la situation initiale, mais aussi les éventuelles étapes de construction ou dégradation considérer dans les phases ultérieures. Après la définition de la géométrie, l'utilisateur devra saisir les paramètres relatifs aux matériaux puis, assigner ces jeux de données aux éléments géométriques. Lorsque le modèle géométrique est entièrement défini, et lorsque les propriétés de tous les éléments géométriques ont été affectées, le modèle géométrique est terminé et le maillage peut être généré.

Caractéristiques du Plaxis

PLAXIS est un progiciel d'éléments finis spécialement destiné l'analyse en 2D des déformations et de la stabilité des ouvrages géotechniques. Les applications géotechniques nécessitent des lois de comportement avancées pour la simulation du comportement des sols et/ou des roches, non linéaire et dépendant du temps et anisotropie. De même, le sol étant un matériau poly phasique, des procédures spéciales sont nécessaires pour prendre en compte les pressions interstitielles, que celles-ci soient ou non hydrostatiques. Bien que la modélisation du sol lui-même soit un problème important, beaucoup de projets géotechniques impliquent également la modélisation des structures et de leur interaction avec le sol. PLAXIS est doté de

fonctionnalités tout à fait remarquables pour traiter tous les aspects des structures géotechniques complexes. (7)

Originalité du logiciel Plaxis :

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettant le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant- il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer d'un ordinateur sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers. Conçu par des géotechniciens numériciens, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudostatique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (5 paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc).

Du point de vue pratique, le système de menus arborescents l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volume réduit, faciles à consulter. L'ensemble des options par défaut (conditions aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initialisation des contraintes, pressions Interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné. (Boulon et al, 2004). (7)

Solutions approchées, options par défaut :

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques, qui sont un des fers de lance de l'outil de projet pour la géotechnique, 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. Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple. Les options par défaut commencent dès le maillage : l'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importent, le 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-clé, avec contrôle permanent à l'écran. Le logiciel est d'ailleurs en cours de refonte en vue d'accroître son efficacité. De même en ce qui concerne les conditions aux limites en déplacements : si celles-ci sont complexes, l'ingénieur devra en spécifier les subtilités d'une manière précise, face de bloc par face de bloc. Par contre, si elles ont un caractère standard (vecteur déplacement nul à la base du domaine étudié et vecteur

déplacement horizontal nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran.

L'application des 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 menu permet alors, par un chargement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à 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 horizontale (paroi moulée dans un sol mou par exemple).

Les pressions interstitielles ont été l'objet d'un soin particulier dans PLAXIS (Pays Bas obligent !) : Pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles en régimes permanent ou transitoire, c'est possible grâce au module d'écoulements en milieu poreux. Mais bien sûr, cette opération demande du temps (d'opérateur et de machine). Si la nappe phréatique n'est pas trop éloignée de l'horizontale, dans ses états initial et final, on sait que la pression diffère peu de la pression hydrostatique ; si l'on adopte ce champ de pression approchée, les calculs deviennent très simples puisqu'il s'agit seulement de manier les variations de la poussée d'Archimède ; PLAXIS offre cette possibilité qui est souvent très appréciable.

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 détaillés d'étape de chargement, de nombre d'étapes, de rigidité d'interface, de méthode de résolution, ... ; 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. Pour les calculs de consolidation, réalisés en différences finies explicites sur le temps, le choix du pas de temps peut également être décidé par l'utilisateur, ou bien calculé dans l'option par défaut, selon les critères numériques connus.

Le coefficient de sécurité est une notion un peu magique en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une quantité considérable de données. L'approche classique évalue généralement ce nombre selon la théorie de l'équilibre limite, supposant une réduction proportionnelle généralisée de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne reconstitue manifestement pas un scénario réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élasto-plastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans PLAXIS. Le critère de "rupture" est ici qualitatif, et laissé à l'appréciation de l'observateur ; en tout état de cause, il est fondé sur le niveau de déplacement d'un point de contrôle lié à l'ouvrage étudié. Le champ de déplacement obtenu est évidemment tout à fait fictif.

Un calcul par éléments finis fournit une masse imposante de résultats : des résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit. L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on

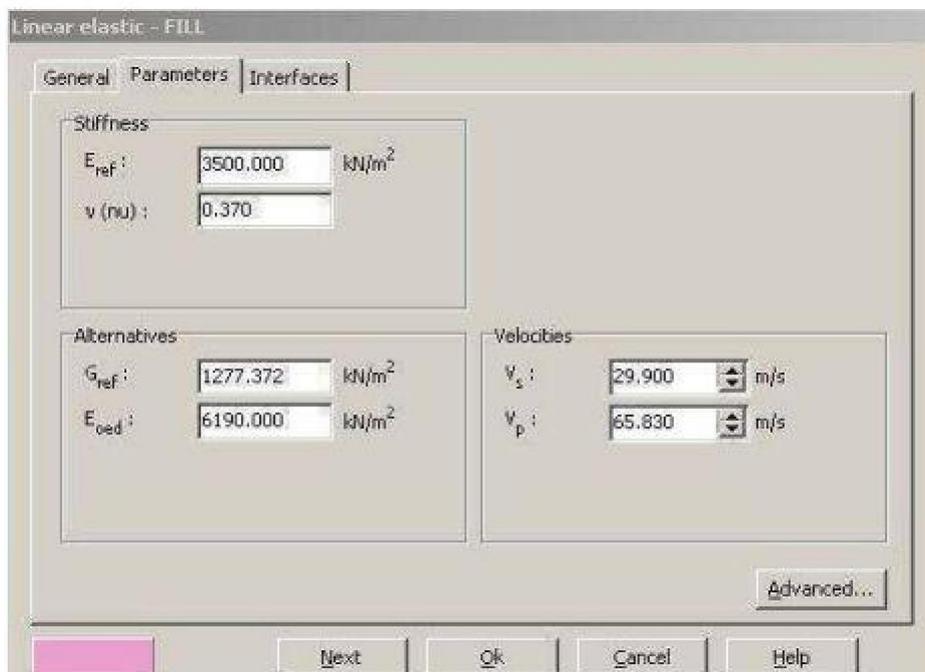
est intéressé par l'un ou l'autre aspect ; C'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées. (7)

Les modèles utilisés dans le code Plaxis

On distingue :

Modèle élastique linéaire

Il comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young, E, et le coefficient de Poisson, ν . Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope, son utilisation est très limitée pour simuler le comportement d'un sol. Les paramètres de ce modèle sont donnés sur la figure suivante :



q

Figure III.1 : Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire

La relation entre le module d'Young et les autres modules est donnée par les équations suivantes :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)}$$

Les paramètres avancés sont reliés par l'équation :

$$E_{actual} = E_{reference} + (y_{reference} - y) y_{increment} \text{ avec } y_{reference} > y$$

$y_{increment}$ = Augmentation de rigidité donnée en $\text{Kn} / \text{m}^2 / \text{m}$

$y_{reference}$ = Unité de profondeur donnée en m

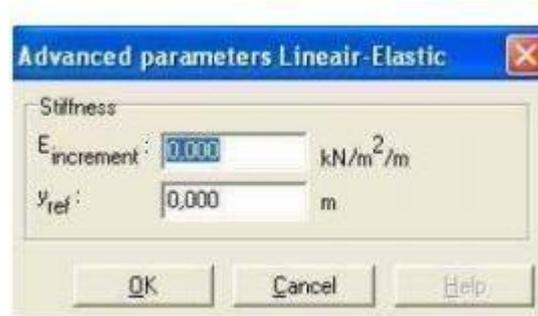


Figure III.2 : Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire

Tel que :

φ_{cv} : Angle de frottement à volume constant au palier

M : Coefficient relié à φ_{cv}

p^{eq} : La pression équivalente dans le sens principal

$$M = \frac{6 \sin \varphi_{cv}}{3 - \sin \varphi_{cv}}$$

$$p^{eq} = \sigma' \left[\frac{1 + 2K_0^{NC}}{3} + \frac{3(1 - K_0^{NC})^2}{M^2(1 + 2K_0^{NC})} \right]$$

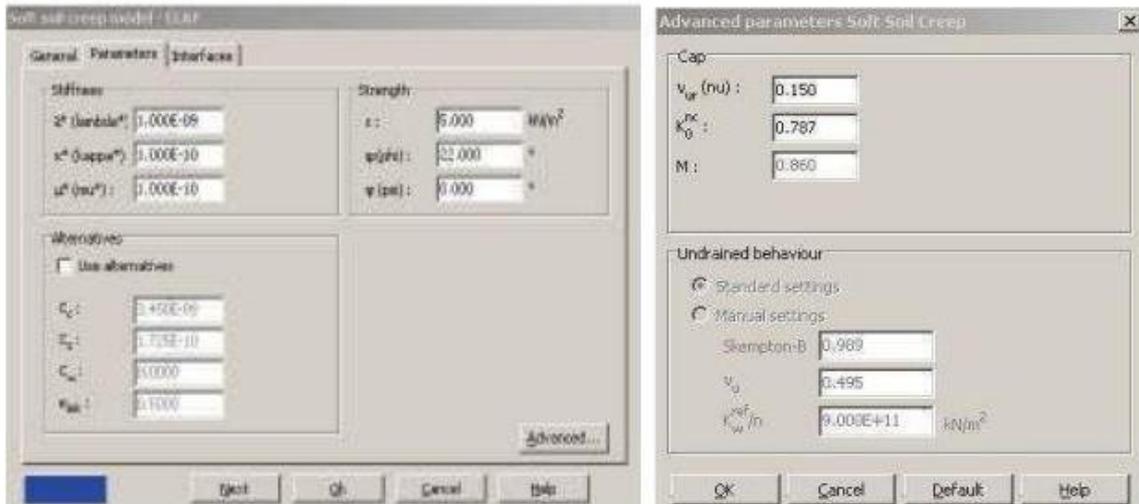


Figure III.3: Modèle des paramètres et des paramètres avancés SSCM

Modèle de sol avec écouvissage

Ce modèle nous permet de prendre en considération de l'évolution de module de déformation en fonction de la contrainte, et de la non linéarité en fonction de module de cisaillement. De plus, ce modèle prend en compte de l'écouvissage en compression pour simuler le compactage irréversible d'un sol sous son premier chargement en compression, de type élasto-plastique. Il s'applique dans des sables, des graves, mais aussi de sols plus mous comme les argiles et les limons.

Les paramètres du HMS

Les paramètres du HSM sont représentés par la figure suivante :

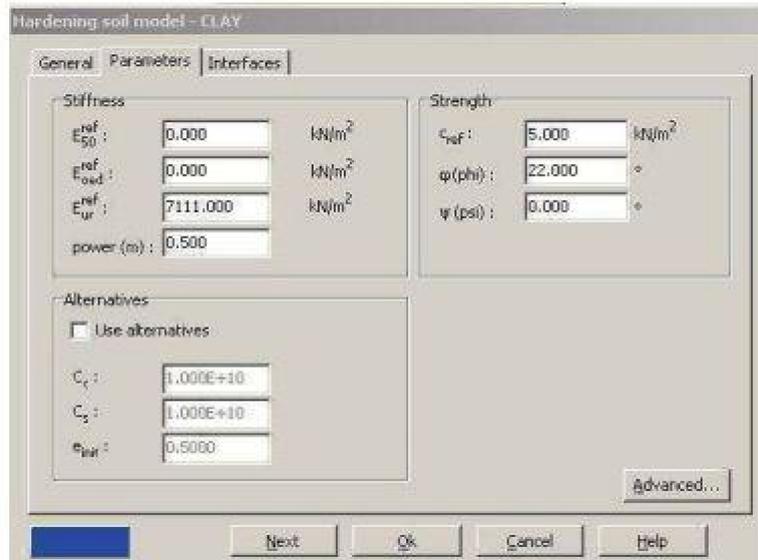


Figure III.4: Les paramètres du HMS

III.6.2. Les modules du HMS

Module sécant :

Le module sécant dans un essai triaxial est déterminé par la formule :

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3'}{p^{ref}} \right)^m$$

Pour la décharge on prend :

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{\sigma_3'}{p^{ref}} \right)^m$$

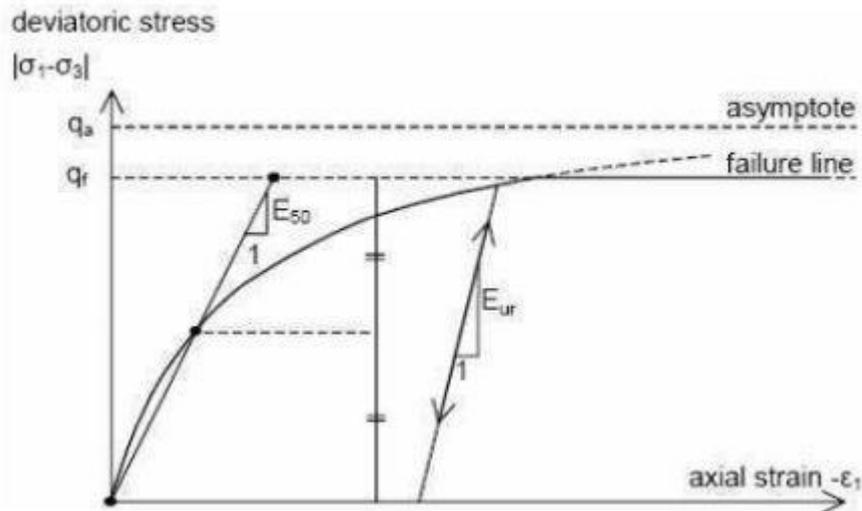


Figure III.5: Représentation du HSM dans le repère contrainte déformation

Module tangent :

Module tangent dans un essai oedométrique se calcule par la relation suivante :

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma_1'}{p^{ref}} \right)^m$$

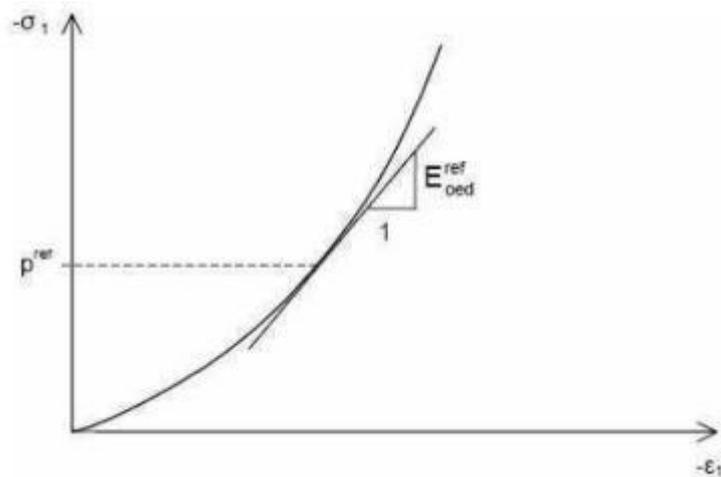


Figure III.6 : Définition du module oedométrique tangent

m : Puissance environs 0.58 pour les sables.

Janbu (1963) rapporte des valeurs de m autour de 0.5 pour les sables et les silts.

Von Soos (1980) rapporte de diverses valeurs de m entre 0.5 et 1.

III.3.6.3: Les paramètres avancés du HSM

On a : ν_{ur} : Coefficient de poisson en charge décharge (par défaut $\nu_{ur}=0.2$).

P^{ref} : Contraintes de référence (par défaut $P^{ref} = 100$).

K_0^{NC} : Coefficient de consolidation (par défaut $K_0^{NC}=1-\sin\phi$).

$C_{increment}$: Coefficient du modèle Mohr Coulomb (par défaut $C_{incrément} = 0$).

y_{ref} : Unité de profondeur.

R_f : Coefficient à la rupture (par défaut $R_f = 0.9$).

$\sigma_{tension}$: Résistance à la traction (par défaut $\sigma_{tension} = 0$)

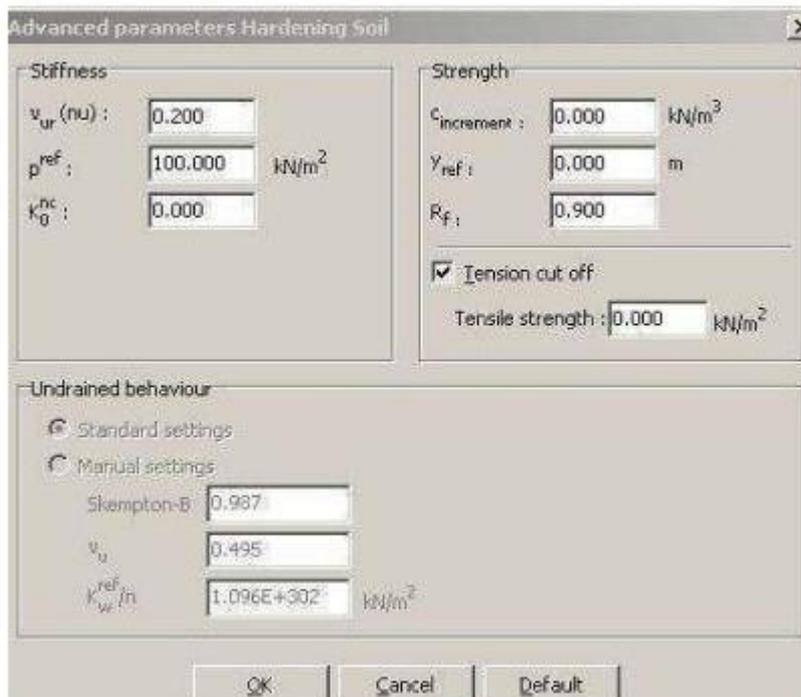


Figure III.7: Fenêtre des paramètres avancés du HSM

Modèle pour les roches fracturées

Il peut être utilisé pour simuler le comportement des roches stratifiées ou fracturées. C'est un modèle élasto-plastique anisotrope, pour lequel le cisaillement plastique peut se produire seulement

Dans un nombre limité de directions de cisaillement. (7)

Modèle défini par l'utilisateur

L'utilisateur peut définir des lois de comportement autres que les modèles standard de Plaxis. On distingue les comportements suivants :

Comportement drainé

Avec cette option, aucune surpression interstitielle n'est générée. C'est évidemment le cas pour des sols secs et pour des sols totalement drainés du fait de leur forte perméabilité comme les sables ou à cause d'un faible accroissement du chargement. Cette option peut aussi être utilisée pour simuler le comportement du sol à long terme.

Comportement non drainé

Cette option est utilisée pour permettre la génération complète des surpressions interstitielles. L'écoulement de l'eau interstitielle peut parfois être négligé du fait des faibles perméabilités pour les argiles ou à cause d'une vitesse de chargement élevée. Toutes les couches considérées comme non drainées se comporteront ainsi, même si la couche ou une partie de celle-ci se trouve au dessus de la nappe phréatique. Remarquons que les paramètres de modélisation à entrer sont les paramètres effectifs.

Le comportement non poreux

Cela peut s'appliquer à la modélisation du béton et des roches ou au comportement des structures. Le comportement non poreux est souvent utilisé en combinaison avec le modèle élastique linéaire. Pour empêcher tout écoulement à travers un écran de palplanches ou d'autres structures imperméables, on peut affecter aux interfaces placées autour un jeu de données spécifique où le type de matériau est choisi comme non poreux.

Modèle de Mohr Coulomb

Introduction

Le logiciel PLAXIS, comme tout autre, n'est qu'un outil. Cet outil, pour rendre les services que l'on attend de lui, nécessite d'une part un "mode d'emploi" mais aussi d'être alimenté par des paramètres décrivant le comportement du sol. Si la partie "mode d'emploi" a fait l'objet des applications de la première journée, reste à aborder le choix des paramètres de comportement nécessaires pour alimenter le code PLAXIS. Pour le modèle de comportement le plus simple utilisé dans PLAXIS, à savoir le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb, on discute ici comment choisir les valeurs des paramètres à rentrer dans les calculs. On est alors loin de la rigueur mathématique de la simulation numérique et l'on se place résolument dans la situation d'un géotechnicien disposant de trois ingrédients : d'un côté un outil de calcul, de l'autre un rapport de sol (jamais aussi complet qu'il le souhaiterait) et enfin un ouvrage à modéliser : l'objectif est de produire une note de calcul ou une justification de l'ouvrage. Modélisation rime toujours avec simplification. Comme dans toute méthode classique de calcul, la première simplification est l'établissement d'une coupe du sous-sol : cette simplification des différents sols rencontrés lors des reconnaissances permet à l'ingénieur de disposer d'un schéma conceptuel de calcul comportant les principales couches de sol influentes. C'est pour ces couches que se pose la question de la détermination des paramètres

de calcul. Le rapport de sol, base du travail précédent, comporte des reconnaissances par sondage (carotté ou pelle mécanique), des pressiomètres, des pénétrètres statique ou dynamique et -trop rarement sans doute- des essais de laboratoire sur des échantillons remaniés ou intacts. Les conditions économiques passées et présentes font que ce rapport a souvent été obtenu pour un coût minimum, avec le nombre d'essais minimum permettant de faire une étude adaptée aux besoins du maître d'ouvrage ou du maître d'œuvre. Un autre cas de figure peut être celui de chantier ou d'ouvrages importants pour lesquels les sondages et essais de laboratoire ou essais in situ sont très nombreux : dans ce cas le géotechnicien doit extraire de ces piles de dossiers des paramètres de calcul : l'abondance dans ce cas n'est pas plus facile à gérer que la -relative- pénurie précédente. La géostatistique peut alors être une aide.

Dans ces conditions, le but de cet exposé est de donner quelques règles, quelques explications, quelques tuyaux dans un domaine flou où s'exerce l'art du géotechnicien. On abordera les différents paramètres à entrer dans PLAXIS dans l'ordre où ils sont demandés dans les menus Data soils and interfaces à savoir :

- les poids volumiques non saturé γ_{unsat} et saturé γ_{sat}
- les perméabilités K_x et K_y
- les paramètres du Mohr-Coulomb proprement dit:

Coefficient de Poisson ν , module de Young E ou module de cisaillement G , Cohésion c , angle de frottement ϕ , angle de dilatance ψ ,

- les paramètres de réduction d'interfaces R

De plus, un autre "paramètre" a déjà été rentré : il s'agit du coefficient de terres au repos K_0 qui intervient quand on peut initialiser les contraintes par la procédure K_0 .

Voilà donc situés les différents paramètres que le géotechnicien aura à extraire pour chaque couche de sol du rapport d'étude dont il dispose. A ce niveau, le problème est exactement le même que pour une étude par des méthodes classiques basées sur l'élasticité et la plasticité.

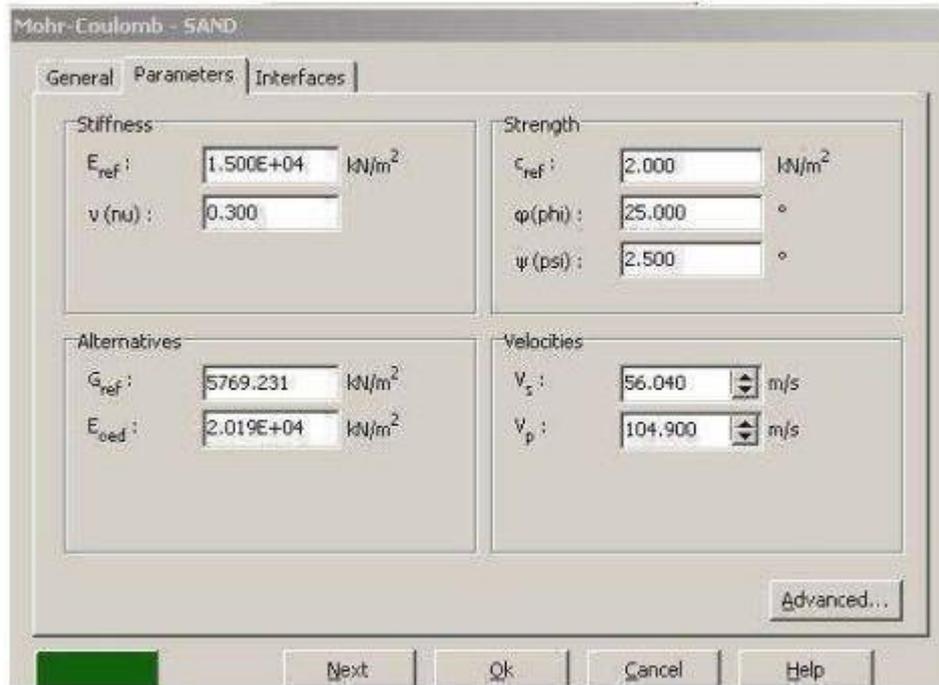


Figure III.8 : Fenêtre des Paramètres du modèle de Mohr Coulomb

Le module d'Young

Dans le modèle élastique et le modèle de Mohr Coulomb, Plaxis utilise le module d'Young comme module de déformation de référence. Le choix de ce dernier nécessite soin considérable, d'ailleurs il est conseillé d'utiliser E_0 pour des argiles très sur-consolidées et quelques roches avec un large domaine élastique, alors que pour les sables et les argiles normalement consolidées, il est préférable de prendre E_{50} .

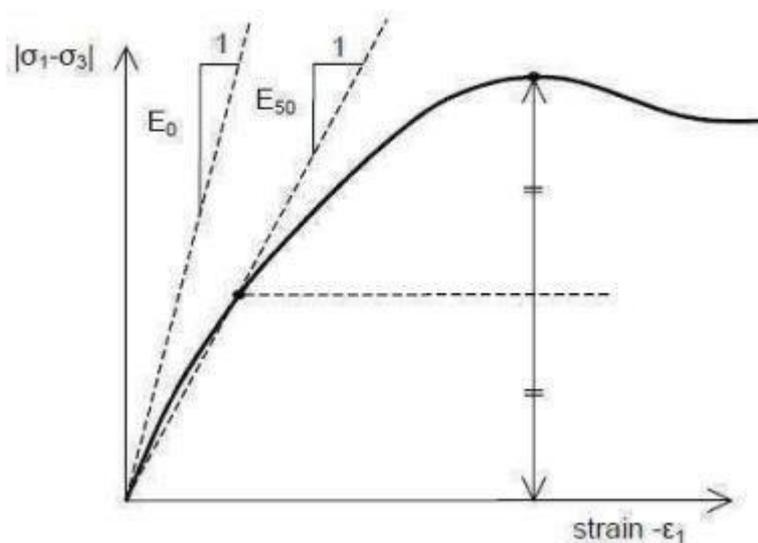


Figure III.9: Définition d' E_0 et d' E_{50}

le coefficient de Poisson

Le choix d'une valeur pour le coefficient de poisson est particulièrement simple dans le cas du modèle élastique ou du modèle de Mohr Coulomb avec un chargement gravitaire. Dans la plupart des cas, les valeurs de ν seront comprises entre 0,3 et 0,4. Pour le cas du comportement non drainé, le coefficient de Poisson effectif devra être inférieur à 0,35.

L'angle de frottement

L'angle de frottement peut s'obtenir à partir de la courbe intrinsèque du modèle Mohr Coulomb. Dans le code Plaxis, on doit éviter de travailler avec des angles de frottements supérieur à 35° dans des calculs préliminaires pour un projet, car le temps de calcul varie exponentiellement avec de l'angle de frottement.

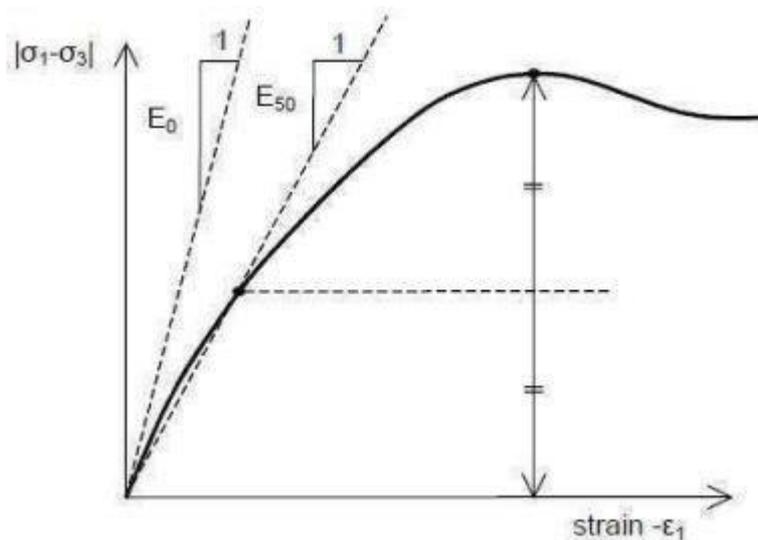


Figure III.10: Courbe intrinsèque du modèle de Mohr Coulomb

La cohésion

Il est conseillé aux utilisateurs peu expérimentés d'entrer au moins une valeur faible de la cohésion (prendre $c > 0.2$ kPa) dans le cas des sols purement frottant à fin d'éviter les complications dans des calculs. Pour les couches dans lesquelles la cohésion croît avec la profondeur Plaxis propose une option spéciale dans des paramètres avancés.

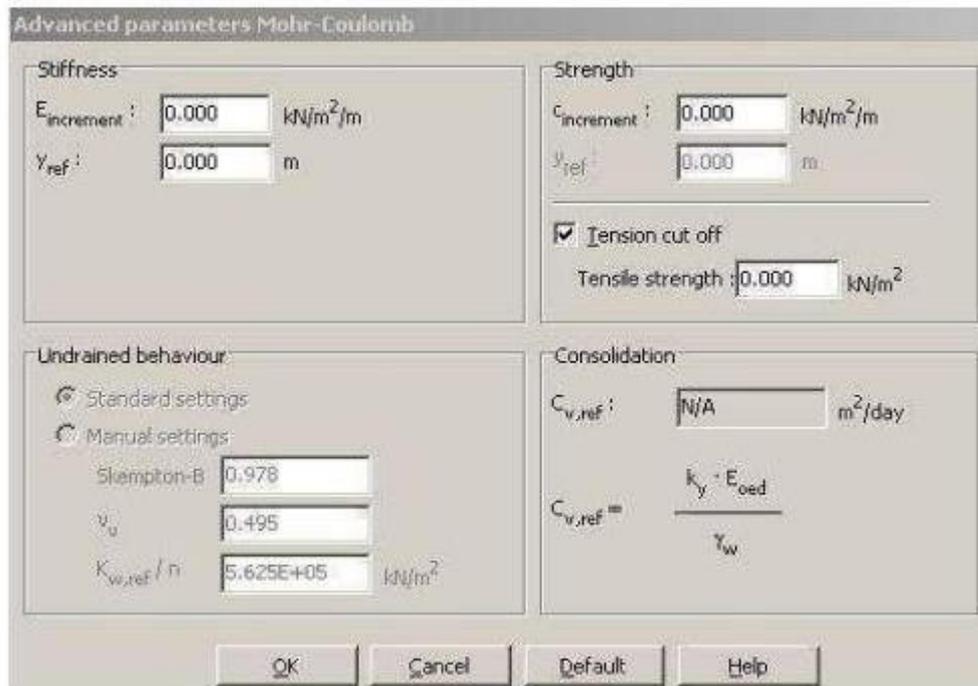


Figure III.11: Fenêtre des paramètres avancés de Mohr Coulomb

Les matériaux souples

matériau flexible : caoutchouc



Figure III.12 : Le caoutchouc broyé.

Définition :

L'histoire du caoutchouc débute bien avant la fin du XVème siècle lorsqu' à la suite des grandes découvertes , les Européens commencent à observer , en Amérique centrale et en Amérique du Sud , l'usage séculaire que font les population autochtones d'une matière alors inconnue en Europe .Provenant du latex issu de différentes plantes dont l'hévéa et le guayule , les Amérindiens confectionnent des objets courants , fabriqués par moulage sur argile : balles , toiles enduites , torches , qu'ils rendent étanches en les passant à la fumée. Le caoutchouc est

un matériau qui peut être obtenu soit par la transformation du latex sécrété par certains végétaux (par exemple, l'hévéa), soit de façon synthétique {partir de monomères issus de combustibles fossiles. Il fait partie de la famille des élastomères.

Le caoutchouc, un matériau fascinant :

Le caoutchouc est doté de propriétés exceptionnelles, notamment de la capacité à résister avec souplesse {de fortes sollicitations. C'est la raison pour laquelle il est employé dans des produits devant répondre à des exigences de qualité maximales comme les pneus automobiles, les tétines de bébé ou des matériaux d'étanchéité spéciaux dans l'industrie. Le caoutchouc améliore ses caractéristiques élastiques au cours de sa transformation ; en effet, c'est grâce {la vulcanisation qu'il devient durablement élastique et reprend sa forme d'origine après avoir subi une déformation.

Le modèle de Mohr-Coulomb

Conditions aux limites

Une fois la géométrie définie, il faut entrer les conditions limites, c'est à dire les déplacements et les contraintes imposées aux limites extérieurs de la géométrie. Si aucune condition limite n'est fixée sur un tronçon, par défaut le logiciel considère que l'élément n'est soumis à aucune force extérieure et est libre de se déplacer dans toutes les directions. Les conditions limites pouvant être imposées sont celles qui imposent un déplacement dans une direction donnée ou celle qui impose une force dans une direction donnée. Plusieurs outils permettent de créer une large gamme de conditions limites (force répartie, force ponctuelle, encastrement, glissement, etc). (7)

Définition des paramètres des matériaux

Ensuite, il convient de définir les différentes propriétés des différents matériaux selon son type (sol et interface, plaque, ancrage, géo-grille, etc.), le modèle de comportement et les différents paramètres permettant de le définir. Pour les sols, en plus de la définition des caractéristiques mécaniques, leurs interfaces avec les autres types d'éléments, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainé, non drainé ou non poreux). Une fois les propriétés des différents matériaux définies on peut générer le maillage.

Maillage

Le maillage se génère automatiquement, ce qui est un point fort de Plaxis. L'opérateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différents options (très grossier, grossier, moyen, fin, très fin), l'utilisateur peut également décider de mailler plus finement une certaine région du sol et le voisinage d'un élément grâce aux options refine dans le mesh menu. Une fois le maillage effectué, il convient de paramétrer les conditions initiales du sol, cette procédure passe généralement par la définition d'un coefficient des terres au repos.(7)

Les conditions initiales

La définition des conditions initiales se fait en deux étapes distinctes. Tout d'abord, lorsque la fenêtre des conditions initiales s'ouvre, seul le sol est activé. L'opérateur active les éléments constructifs (déplacements, contraintes imposées, ancrage, plaque) qui correspondent à l'instant initial. Il désactive les éléments de sol qui ne correspondent pas à cet instant initial. Un switch bouton permet d'accéder à deux fenêtres différentes, chacune représentant la géométrie de la modélisation: La première qui s'appelle initiale pore pressure permet de définir un niveau de nappe phréatique initial, et de générer les pressions interstitielles correspondantes. La deuxième fenêtre permet de générer les contraintes initiales à l'intérieur du massif.

Phases de calculs

Après avoir effectué l'ensemble de ces paramétrages on peut accéder aux calculs par le bouton poussoir calculation. L'interface input de Plaxis se ferme et laisse la place à une nouvelle interface calculation. Une phase 0 est déjà calculée, cette phase correspond à l'état initial de la structure. Cette interface permet de définir le phasage de la modélisation de la construction. De nouvelles phases de calcul peuvent être créées basées sur une phase existante. Pour chaque phase on peut modifier la géométrie par l'intermédiaire de la même interface qui a servie à définir les conditions initiales. On peut donc effectuer des changements uniquement en activant ou désactivant des éléments. Le niveau de la nappe phréatique peut être modifié, ainsi que certaines propriétés des matériaux, des éléments autres que le sol. Le niveau d'intensité et la position des conditions limites des chargements en déplacement et en contrainte peuvent également être modifiés. Une fois le phasage de l'étude terminée, des points caractéristiques peuvent être placés. Les courbes de résultats de Plaxis seront calculées en ces points. Après avoir appuyé sur calculate les calculs se lancent. Une fois terminée, les résultats sont visionnables grâce à la touche output. Plaxis permet d'effectuer deux types de calculs en consolidation : Les calculs effectués à l'aide de l'outil staged construction qui permet de visualiser le sol après l'avoir laissé se consolider pendant un intervalle de temps donné fixé par l'utilisateur. Les calculs effectués à l'aide de l'outil minimum pores pressure qui consiste à déterminer le temps et l'état du sol après l'avoir laissé se consolider pendant un intervalle de temps suffisamment long pour que la pression interstitielle soit partout inférieure à la valeur fixée par l'utilisateur.

Visualisation des Résultats

Les résultats du code Plaxis sont : La déformée du maillage Les déplacements (verticaux, horizontaux, totaux) et les déformations. Les vitesses et les accélérations (quand on effectue un travail en dynamique) Les contraintes totales et les contraintes effectives. Le coefficient de sur-consolidation, de réduction et les points de déformation plastique. Le degré de saturation, le champ d'écoulement et le niveau de l'eau. L'incrément des déformations et des contraintes dues aux différentes phases par rapport à la situation d'origine

Conclusions

- ✓ Les paramètres à déterminer pour faire un calcul avec le modèle de Mohr-Coulomb ne sont pas différents de ceux que l'on aurait à déterminer dans tout calcul classique de Mécanique des sols, où l'on effectuerait un calcul de résistance limite et un calcul de déformation sous une charge de service. Ces paramètres ont tous une signification physique déduite des essais de laboratoire. Les essais in situ, pressiomètre ou pénétromètre, sont aussi utilisables avec les mêmes précautions que dans des calculs classiques.
- ✓ La détermination des "bons" paramètres à rentrer dans un logiciel est capitale, que ce soit un logiciel de calcul en déformation, d'un logiciel de stabilité de pente ou tout autre. Les essais de laboratoire sont toujours trop peu nombreux, on doute de leur représentativité, on doute aussi des essais in situ, etc...Peut être alors qu'une bonne approche est de faire non pas un calcul type PLAXIS mais plusieurs pour vérifier le rôle des paramètres influents dans un calcul d'ouvrage. Cette "solution" n'est quand même pas satisfaisante car elle consiste à pallier ce qui est en fait défaut et manque de reconnaissance et d'étude de sol par des calculs hypothétiques. Il faudra un jour revenir à une situation meilleure.
- ✓ Dans ce travail on utilise la MEF et la méthode analytique, pour calculer les sollicitations sur notre conduite qui est rigide et est placée en remblai indéfini et aussi sous voûte.

CHAPITRE IV

Étude paramétrique et numérique

IV. Méthode analytique

Cette méthode est basée sur la méthode Marston et adoptée par le fascicule 70.

On a les données suivantes :

$$D_e = 1 \text{ (m)}$$

$$H_r = 3.5 \text{ (m)}$$

$$D_m = 0.9 \text{ (m)}$$

$$e = 0.1 \text{ (m)}$$

Tableau. IV.1. Les caractéristiques du remblai.

Le sol	Argile
Les caractéristiques	
Le modèle	M-C
La masse volumique insaturée $\gamma_{unsat}(KN/m^3)$	15
La masse volumique saturée $\gamma_{sat}(KN/m^3)$	18
Le module d'élasticité $E(KN/m^2)$	10000
L'angle de frottement ϕ (°)	24
Le coefficient de poisson ν	0.33
La cohésion $C(KN/m^2)$	5,5
La perméabilité $K_x=K_y$ (m/jour)	10^{-3}
La dilatance Ψ	0
La rigidité	1

Les caractéristiques de la voûte:

Tableau. IV.2. Les caractéristiques du voûte.

Le sol	Voûte
Les caractéristiques	
La masse volumique insaturée $\gamma_{unsat}(KN/m^3)$	25
La masse volumique saturée $\gamma_{sat}(KN/m^3)$	25
Le module d'élasticité $E(KN/m^2)$	30000000
L'angle de frottement ϕ (°)	62.87
Le coefficient de poisson ν	0.15
La cohésion $C(KN/m^2)$	3000
La perméabilité $K_x=K_y$ (m/jour)	10 ⁻⁴
La dilatance Ψ	32.87
La rigidité	1

Les caractéristiques des matériaux souples:

Tableau. IV.3. Les caractéristiques du matériau souple :

Le sol	Caoutchouc
Les caractéristiques	
La masse volumique insaturée $\gamma_{unsat}(KN/m^3)$	9,5
La masse volumique saturée $\gamma_{sat}(KN/m^3)$	10
Le module d'élasticité $E(KN/m^2)$	10000
L'angle de frottement ϕ (°)	30
Le coefficient de poisson ν	0.5
La cohésion $C(KN/m^2)$	1
La perméabilité $K_x=K_y$ (m/jour)	1
La dilatance Ψ	1
La rigidité	0.8

Calcul de P_r pression du remblai sans matériau souple

La pression verticale s'exerçant sur la génératrice supérieure P_r

$$P_v = C_{remb} \text{reel} \gamma H$$

Le calcul de C_{remb} dépend de 2 paramètres le niveau du Plan d'Egal tassement (P.E.T) H_e
L'angle de pose 2α .

- Si le PET est réel $H > H_e$

$$P_v = C_{remb} \text{reel} \gamma H = P_r$$

(Pas de charges mobiles $P_e = 0$ car $P_v = P_r$)

$$C_{remb} \text{reel} = \frac{D_e}{2k_1 H} \left[e^{\frac{2K_1 \cdot H_e}{D_e}} - 1 \right] + \left[1 - \frac{H_e}{H} \right] e^{\frac{2K_1 \cdot H_e}{D_e}}$$

- Si le PET est virtuel $H < H_e$

$P_v = C_{remb} \text{virtuel} \gamma H = P_r$ (pas de charges mobiles)

$$C_{remb} \text{reel} = \frac{D_e}{2k_1 H} \left[e^{\frac{2K_1 \cdot H_e}{D_e}} - 1 \right]$$

- Calcul du PET

Chapitre .IV. Etude paramétrique et numérique

Le calcul du PET peu se faire d'une manière empirique et approximative par la relation proposéepar (D.Guerrin Tome 8)

$$He = De \sqrt{\frac{Pr}{k1}}$$

Le rapport tassement flèche r pour une conduite rigide $\Rightarrow r = 0.7$

k1 = 0.15: Rapport entre la contrainte de cisaillement sur le plan vertical et la pression verticalqui l'induit.

De : Diamètre extérieur de la conduite

- **Calcul de p qui dépend de l'angle de pose**

$$p = \frac{D'}{De}$$

Avec D' la hauteur du plan critique

- **Si $2a$ est l'angle de pose c**

$$D' = R + R \cos a = (1 + \cos a)$$

Donc :

$$p = \frac{D'}{De} = R(1 + \cos a) \quad 2R = (1 + \cos a) \cdot 2$$

Dans notre cas :

$a = 0 \Rightarrow p = 1$ (sur génératrice inférieure)

$$He = De \sqrt{\frac{Pr}{k1}} = De \sqrt{\frac{1 \cdot 0.7}{0.15}} = 2.160m$$

Calcul des moments d'ovalisation

Le moment max dans le cas de pose sous voute se trouve au niveau de la clé de la conduite

Les expressions finales des moments d'ovalisation d'après fascicule 70 dans la voute sont les

Suivantes :

Pour la voute :

- $M_{S \text{ voute}} = P_v \cdot R_e^2 \cdot (0.703 - 0.586 \cdot K_2)$
- $P_r = P_{v \text{ car}}$ dans notre cas on ne considère pas les charges mobiles des véhicules
- Le moment d'ovalisation sur génératrice inférieure du au remblai est donné par la relation suivante :

$$M_{ov \text{ gen-inf}} = 0,294 Q R m$$

On a utilisé l'Excel pour les calculs

Calculs dans le cas où le remblai est indéfini, et la conduite est rigide sur génératrice inférieure sans et avec voute.

Calcul de crembreel:

$$C_{\text{remb reel}} = \frac{D_e}{2k_1 H} \left[e^{\frac{2k_1 H_e}{D_e}} - 1 \right] + \left[1 - \frac{H_e}{H} \right] e^{\frac{2k_1 H_e}{D_e}}$$

Crembreel =1,6

✓ **Calcul de la pression Pr :**

$$\begin{aligned}
 p_r &= -\frac{\gamma_s \cdot D_e}{2k_1} + \gamma_s \cdot \left(H - H_e + \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-\frac{2k_1 H_e}{D_e}} \\
 &= \gamma_s \cdot H \cdot \left[-\frac{D_e}{2k_1 H} + \left(1 - \frac{H_e}{H} + \frac{D_e}{2k_1 H} \right) e^{-2k_1 \frac{H_e}{D_e}} \right] \\
 &= C_{rembreel} \cdot \gamma_s \cdot H.
 \end{aligned}$$

Pr=100,817 m²

✓ **Calcul de la charge Q :**

Q=Pr*De=100,817KN/m

-Calcul de la charge Q du voute :

Q_{voute}= C_{rembreel} *γ_s*H+γ_{beton} * e_{voute} = 100,817 + 25 * 0,5 = 113,317 KN/m

✓ **Calcul du Moment d'ovalisation :**

Mov-gen-inf=0,294QRm=13,338KNm/m

✓ **Calcul du Moment dans la voute**

M_{svoute} = p_v · R_e² · (0,703 - 0,586 · k₂).

Msvoute=17,425KNm/m

Calcul dans le cas de remblai indéfini, conduit rigide sur génératrice inférieure avec matériau souple.

A. 1er cas Ep=0,2

✓ **Calcul du Tassement du prisme intérieur :**

$$u_1 = \frac{\gamma_s}{E_s} \left\{ -\frac{D_e}{2k_1} \left[\left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-\frac{2k_1(H_e - e_p)}{D_e}} - (H_r - e_p) + \frac{D_e}{2k_1} \right] \right\}$$

U1=0,00521 m

✓ **Tassement du matériau souple :**

$$u_2 = \frac{\gamma_m \cdot e_p}{E_m} \left\{ \frac{e_p}{2} + \frac{\gamma_s}{\gamma_m} \left[\left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-2k_1 \frac{(H_e - e_p)}{D_e}} + \frac{D_e}{2k_1} \right] \right\}$$

U2=0,000895 m

✓ **Tassement du prisme extérieur :**

$$u_4 = \frac{\gamma_s}{E_s} \left[\frac{D_e}{4k_1} \left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) \left(e^{-2k_1 \frac{(H_e - e_p)}{D_e}} - 1 \right) + (H_e - e_p) \left(\frac{3}{2} H_r - \frac{3}{4} H_e - \frac{3}{4} e_p - \frac{D_e}{4k_1} \right) \right]$$

U4=-0,00351 m

✓ **Tassement du prisme adjacent a la canalisation :**

$$u_5 = \frac{\gamma_s}{E_s} \left\{ \frac{\left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) D_e + e_p}{2} \left[3H_r + \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) D_e - 2e_p - \frac{D_e}{2k_1} \left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-\frac{2k_1(H_e - e_p)}{D_e}} \right] \right\}$$

U5=0,00936 m

✓ **Calcul l'ovalisation de la canalisation :**

$$u_3 = p_r D_e \frac{k_\alpha}{8,ras_i}$$

Soit :

$$u_3 = D_e \frac{k_\alpha}{8,ras_i} \left\{ \gamma_m \cdot e_p + \gamma_s \cdot \left[\left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-2k_1 \frac{(H_e - e_p)}{D_e}} + \frac{D_e}{2k_1} \right] \right\}$$

$$K_{\alpha} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\alpha}{2} \sin \alpha + \frac{3}{4} \cos \alpha + \frac{\alpha}{4 \sin \alpha} + \frac{3\pi}{8} - \frac{\cos^2 \alpha}{3} - \frac{\pi}{2} \sin \alpha \right)$$

$$K_{\alpha} = 0,195313$$

On définit alors la rigidité annulaire spécifique :

$$ras = \frac{E_T \cdot I}{D_m^3}$$

- E_T : module d'Young du matériau constitutif de la canalisation (kN/m^2) ;
- D_m : diamètre moyen de la canalisation (m)

$$(D_m = \frac{D_e + D_i}{2})$$

- I : inertie de la section de canalisation (m^4/m).

$$I = \frac{e^3}{12 \cdot (1 - \nu_T^2)}$$

$$U_3 = 0,0003844\text{m}$$

✓ **Détermination de u_3 :**

$$u_1 + u_2 + u_3 - u_4 - u_5 = 0$$

$u_3 = 6,9 > H_r$ le plan d'égal tassement est virtuel

✓ **Calcul de la pression P_r :**

$$P_r = \gamma_s(h_r - e_p) + \gamma_m \cdot e_p = 61,4 \text{ m}^2$$

✓ **Calcul de la charge Q :**

$$Q = P_r \cdot D_e = 61,4 \text{ KN/m}$$

✓ **Calcul du Moment d'ovalisation :**

$$M_o = K_{\alpha} \cdot Q$$

$$M_o = 11,992 \text{ KNm/m}$$

B. 2eme cas $E_p=0.5m$

✓ **Calcul de Tassement du prisme intérieur :**

$$u_1 = \frac{\gamma_s}{E_s} \left\{ -\frac{D_e}{2k_1} \left[\left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-\frac{2k_1(H_e - e_p)}{D_e}} - \left(H_r - e_p \right) + \frac{D_e}{2k_1} \right] \right\}$$

U1=0,003922 m

✓ **Tassement du matériau souple :**

$$u_2 = \frac{\gamma_m}{E_m} \cdot e_p \left\{ \frac{e_p}{2} + \frac{\gamma_s}{\gamma_m} \left[\left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-2k_1 \frac{(H_e - e_p)}{D_e}} + \frac{D_e}{2k_1} \right] \right\}$$

U2=0,002236 m

✓ **Tassement du prisme extérieur :**

$$u_4 = \frac{\gamma_s}{E_s} \left[\frac{D_e}{4k_1} \left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) \left(e^{-2k_1 \frac{(H_e - e_p)}{D_e}} - 1 \right) + (H_e - e_p) \left(\frac{3}{2} H_r - \frac{3}{4} H_e - \frac{3}{4} e_p - \frac{D_e}{4k_1} \right) \right]$$

U4=-0,00541 m

✓ **Tassement du prisme adjacent a la canalisation :**

$$u_5 = \frac{\gamma_s}{E_s} \left\{ \frac{\left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) D_e + e_p}{2} \left[3H_r + \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) D_e - 2e_p - \frac{D_e}{2k_1} - \left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2k_1} \right) e^{-\frac{2k_1(H_e - e_p)}{D_e}} \right] \right\}$$

U5=0,01100 m

✓ **Calcul l'ovalisation de la canalisation :**

$$u_3 = p_r \cdot D_e \frac{k_\alpha}{8 \cdot \text{ras}_i}$$

Soit :

$$u_3 = D_e \frac{k_\alpha}{8 \cdot \text{ras}_i} \left\{ \gamma_m \cdot e_p + \gamma_s \cdot \left[\left(H_r - H_e - \frac{D_e}{2 \cdot k_1} \right) e^{-2 \cdot k_1 \cdot \frac{(H_e - e_p)}{D_e}} + \frac{D_e}{2 \cdot k_1} \right] \right\}$$

$$K_\alpha = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\alpha}{2} \sin \alpha + \frac{3}{4} \cos \alpha + \frac{\alpha}{4 \sin \alpha} + \frac{3\pi}{8} - \frac{\cos^2 \alpha}{3} - \frac{\pi}{2} \sin \alpha \right)$$

$$K_\alpha = 0,195313$$

On définit alors la rigidité annulaire spécifique :

$$\text{ras} = \frac{E_T \cdot I}{D_m^3}$$

- E_T : module d'Young du matériau constitutif de la canalisation (kN/m^2) ;
- D_m : diamètre moyen de la canalisation (m)

$$(D_m = \frac{D_e + D_i}{2})$$

- I : inertie de la section de canalisation (m^4/m).

$$I = \frac{e^3}{12 \cdot (1 - \nu_T^2)}$$

$$U_3 = 0,0004014 \text{ m}$$

✓ **Détermination de pet :**

$$u_1 + u_2 + u_3 - u_4 - u_5 = 0$$

Pet = 6,9 > Hr le plan d'égale tassement et virtuel

✓ **Calcul de la pression Pr :**

$$Pr = \gamma_s (hr - ep) + \gamma_m \cdot ep = 59$$

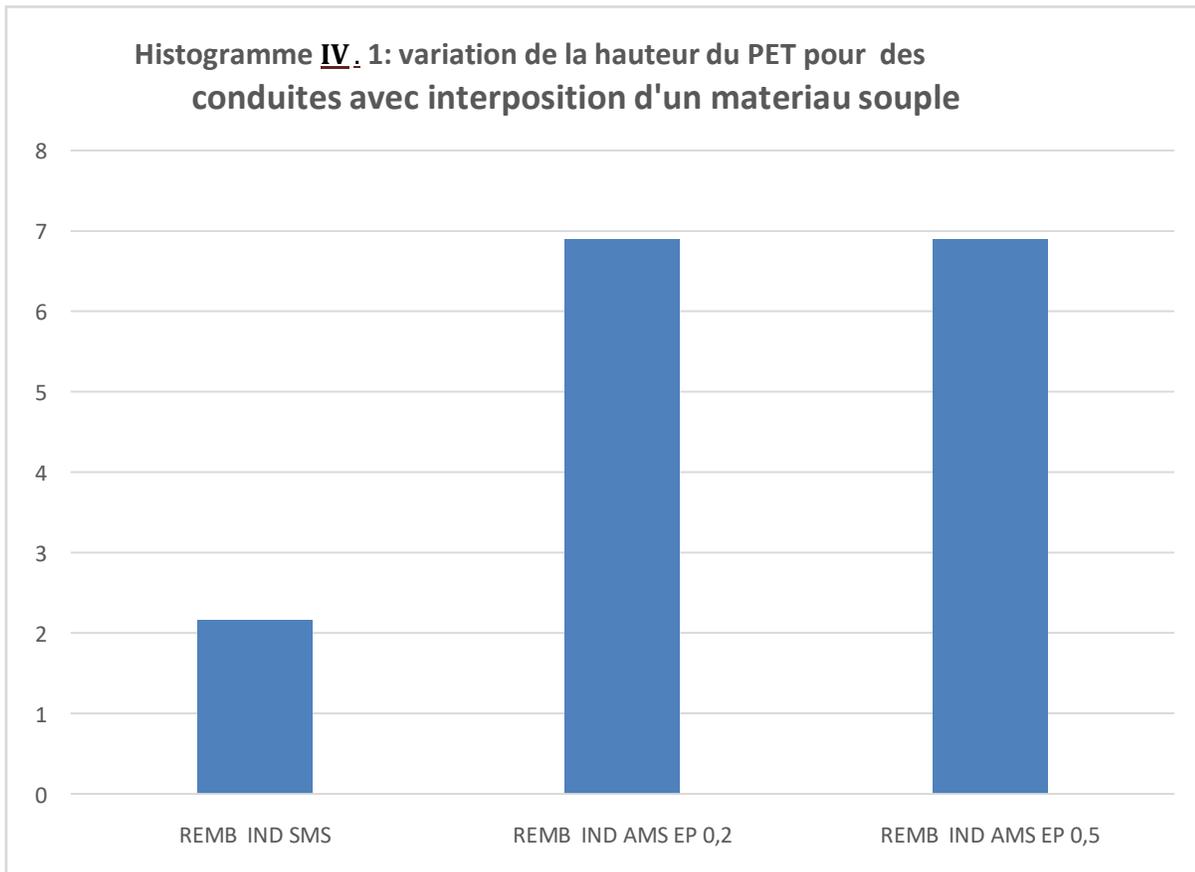
✓ **Calcul de la charge Q :**

$$Q = Pr \cdot D_e = 59 \text{ KN/m}$$

✓ **Calcul du Moment d'ovalisation :**

$$M_o = K_\alpha \cdot Q$$

$M_0=11,505 \text{ kNm/n}$



- ✓ La courbe 4.1 montre que globalement la hauteur du PET augmente avec l'addition du matériau souple.

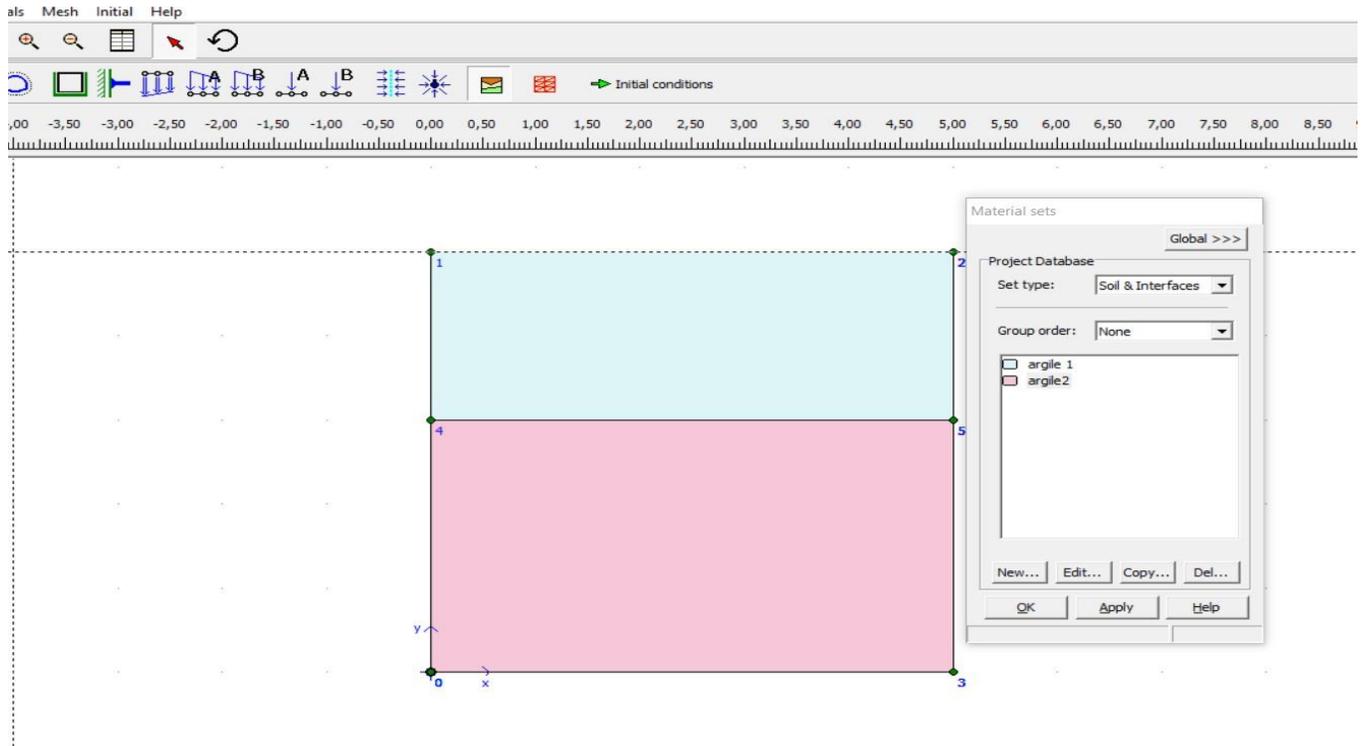
La Modélisation:

Dans ce chapitre, nous avons modélisées la conduite enterrée à du logiciel PLAXIS suivant les étapes ci-dessous:

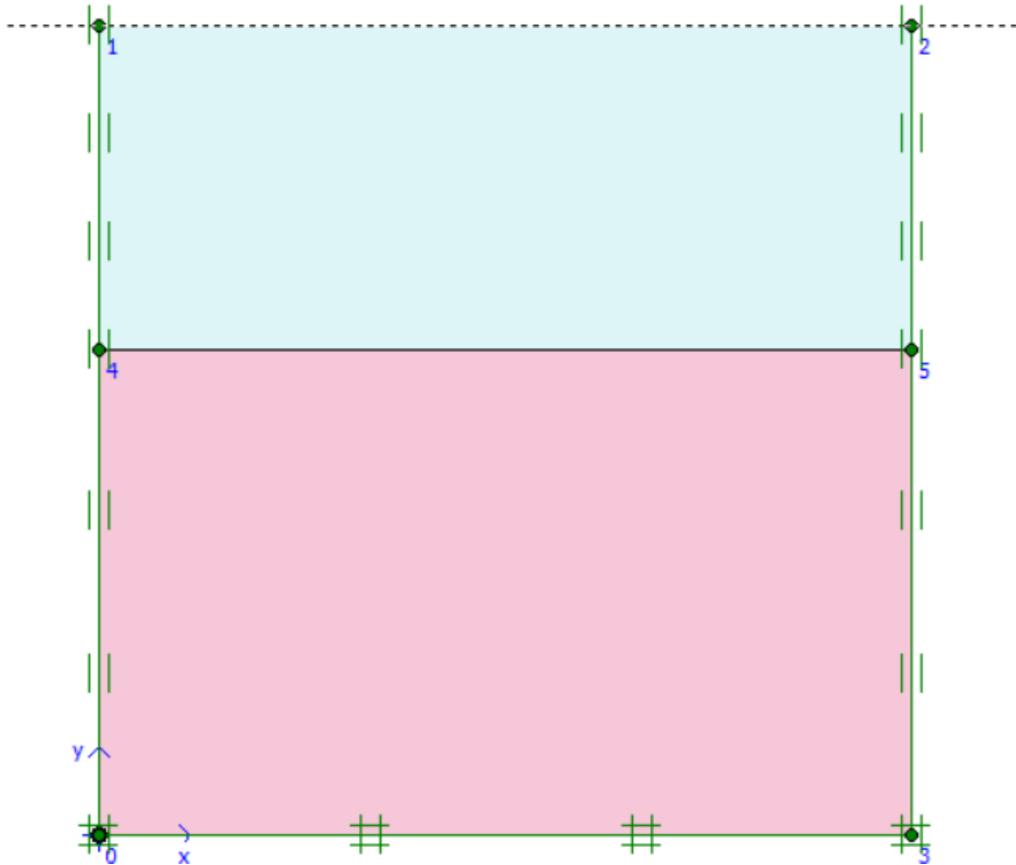
Le 1^{er} cas : cas d'une conduite en remblai indéfini

- ✓ Définir les épaisseurs de la couche de remblai.
- ✓ Définir les caractéristiques du remblai.

Chapitre .IV. Etude paramétrique et numérique

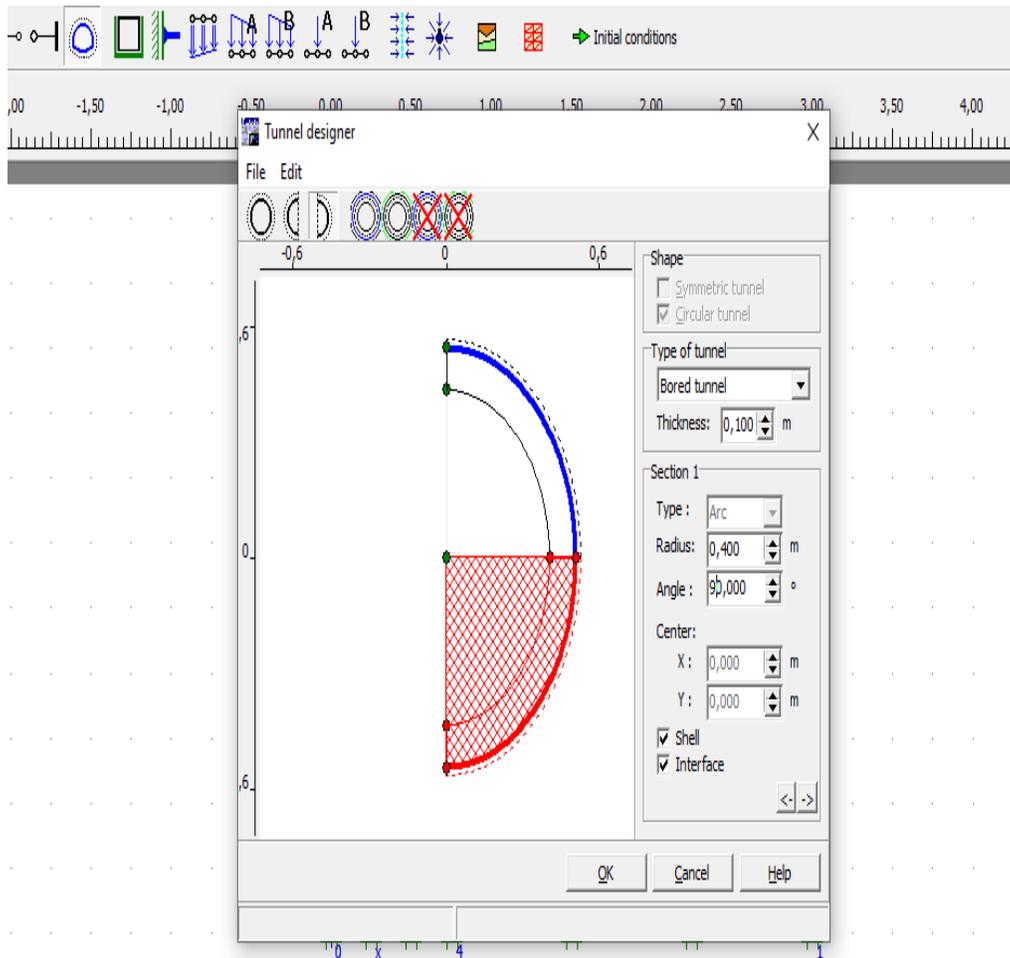


✓ Fixer la frontière de façon à éviter le glissement de sol.

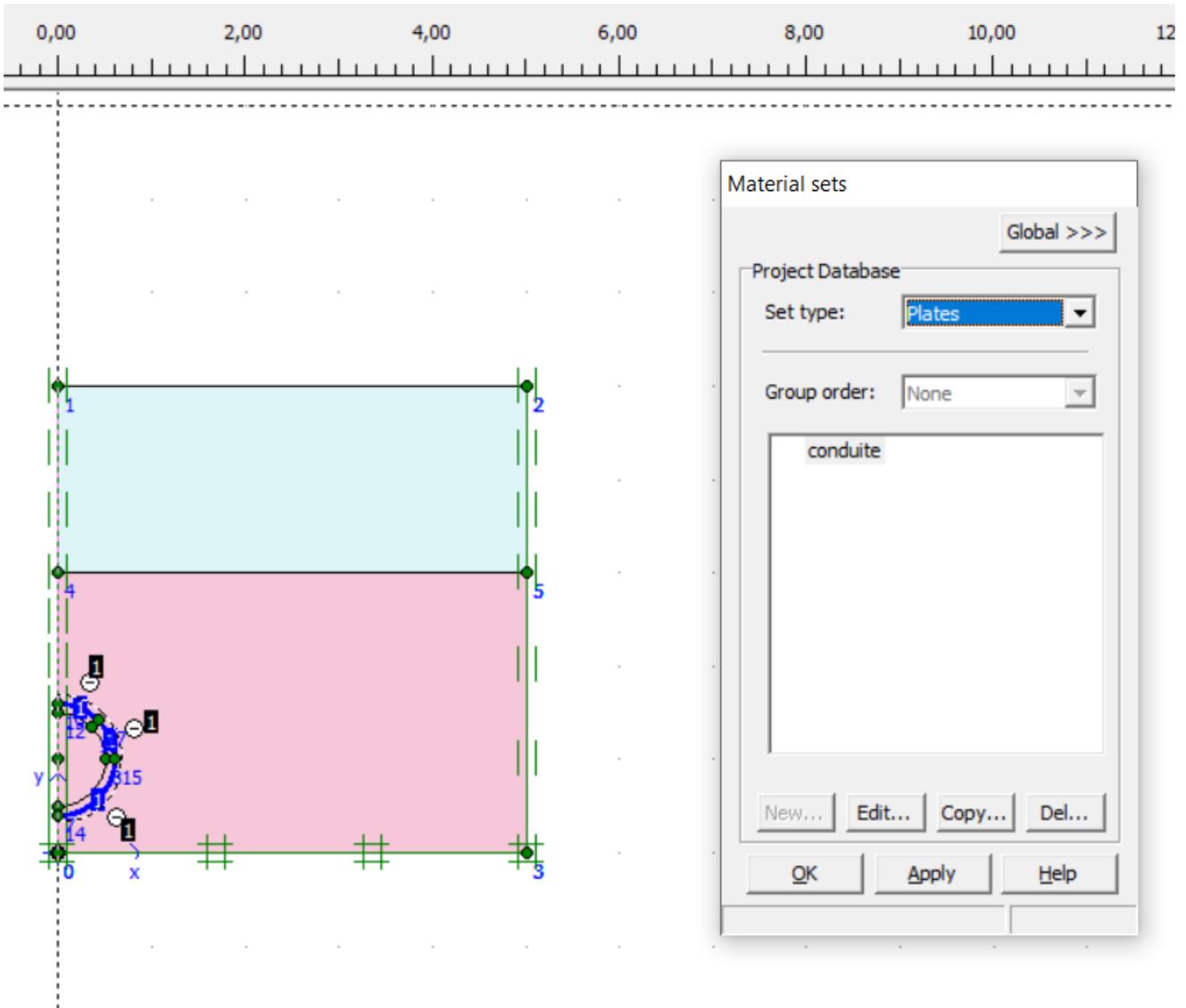


Chapitre .IV. Etude paramétrique et numérique

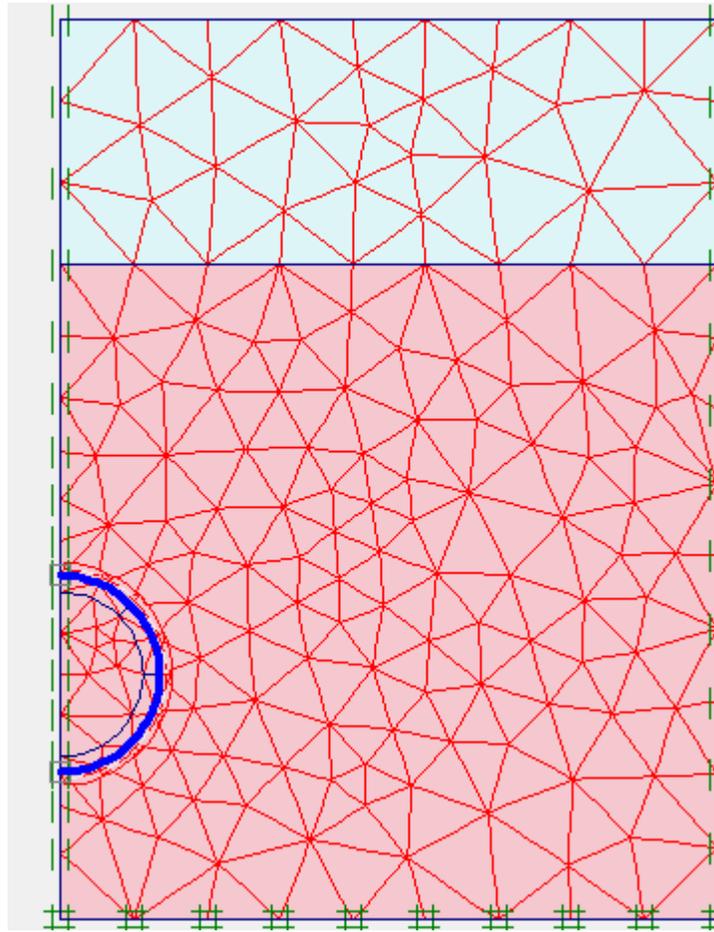
- ✓ Définir la taille de la structure souterraine.



- ✓ Définir les dimensions de la conduite et ses caractéristiques, et les mettre en place.

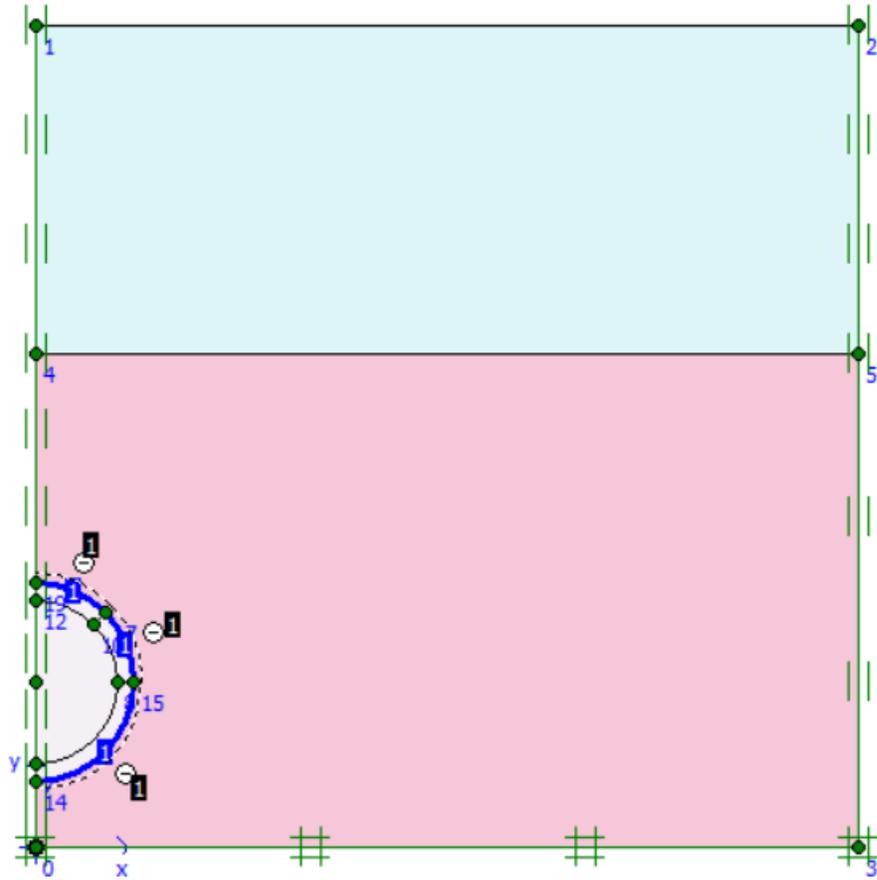


- ✓ Lancer le maillage.

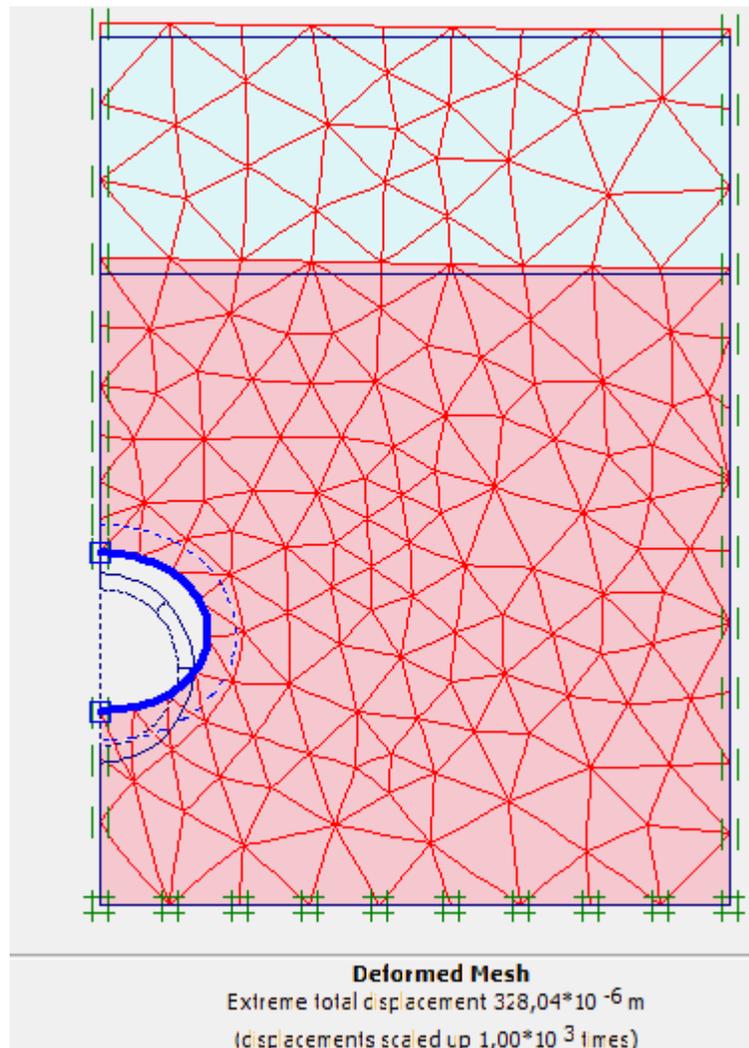


- ✓ Lancer le calcul qui se fait pour une phase nous aide à activer la buse et faire l'excavation du sol qui se trouve à l'intérieur et au niveau de l'épaisseur.

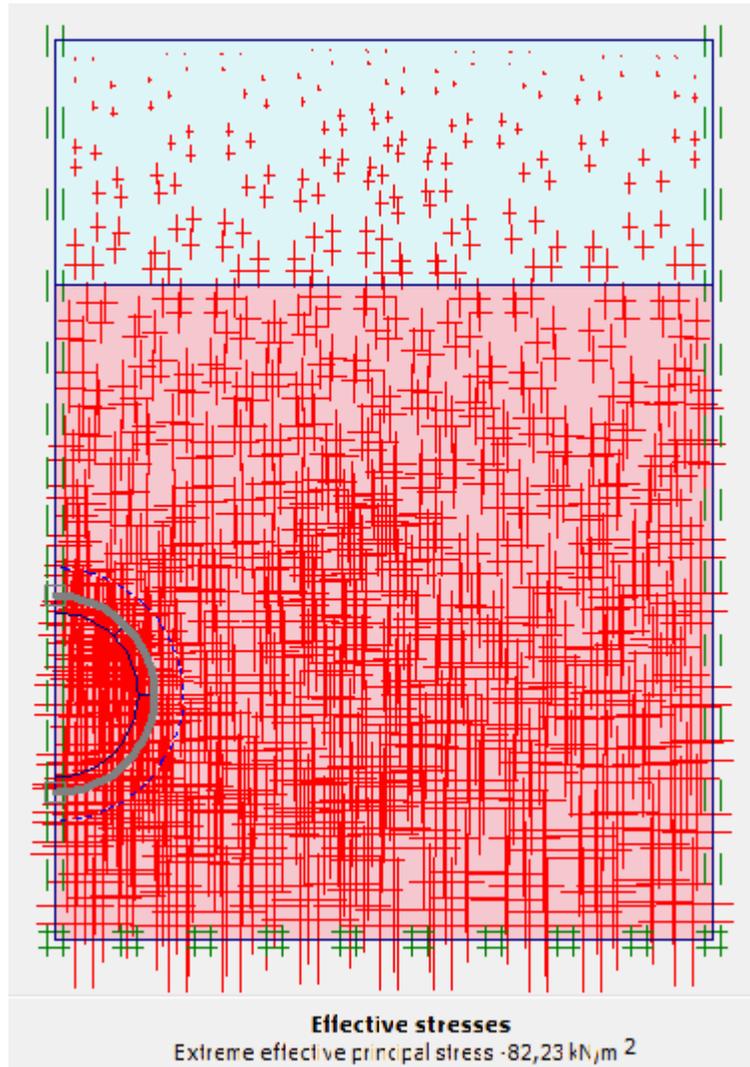
Chapitre .IV. Etude paramétrique et numérique



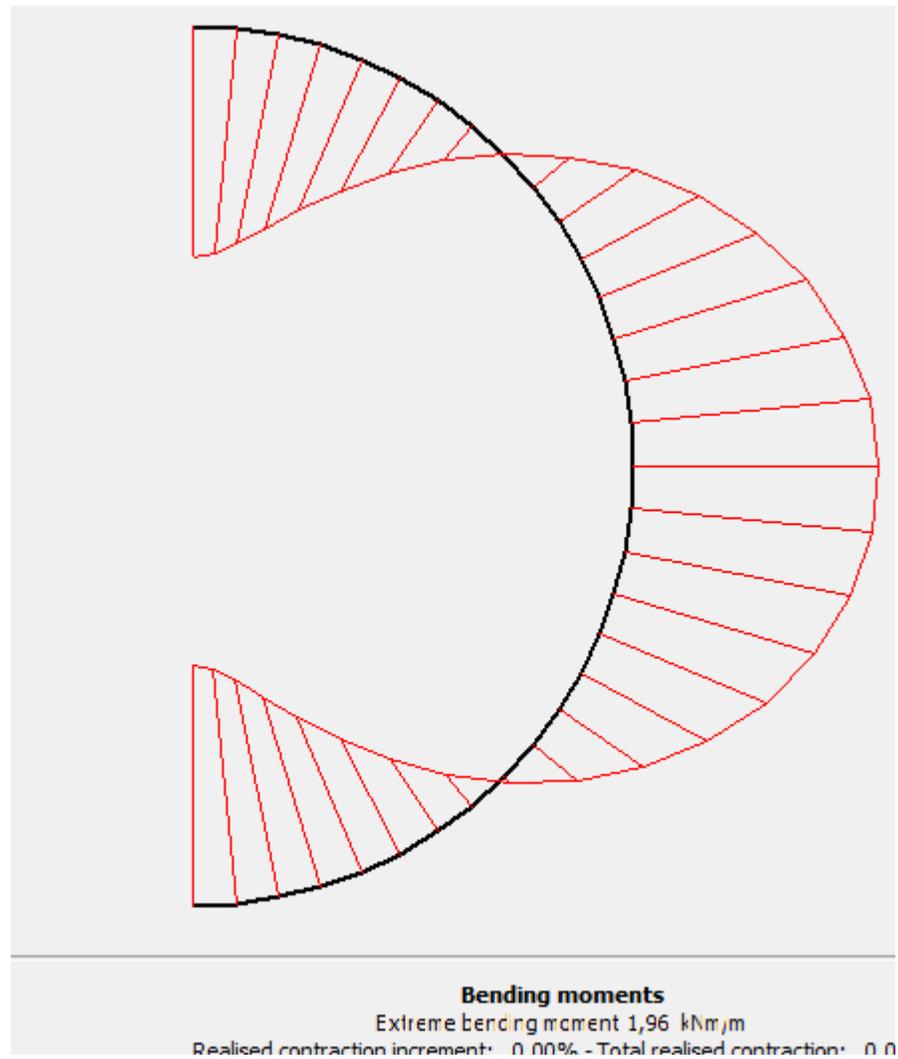
- ✓ Interprétation des résultats.



- ✓ les contraintes effectives :



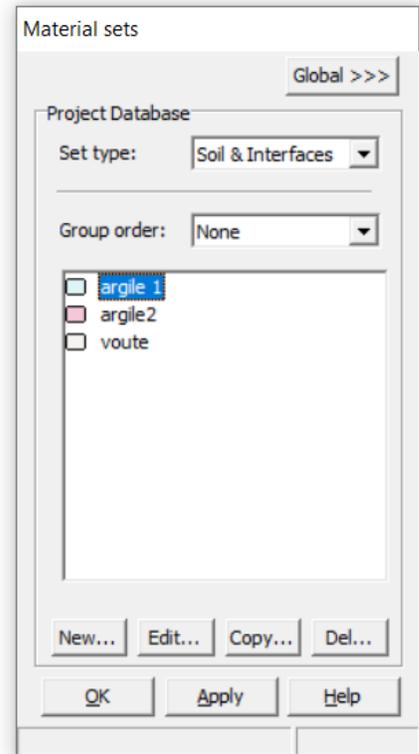
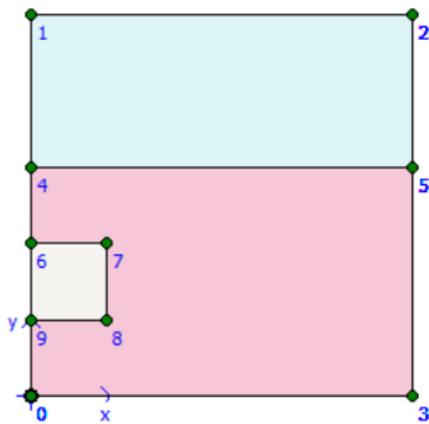
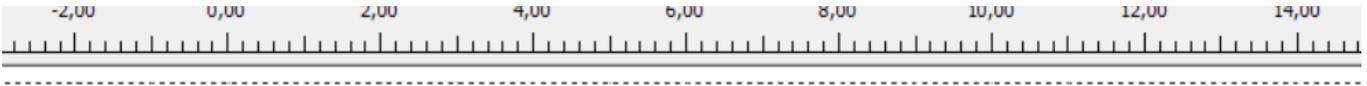
- ✓ déterminer les moments :



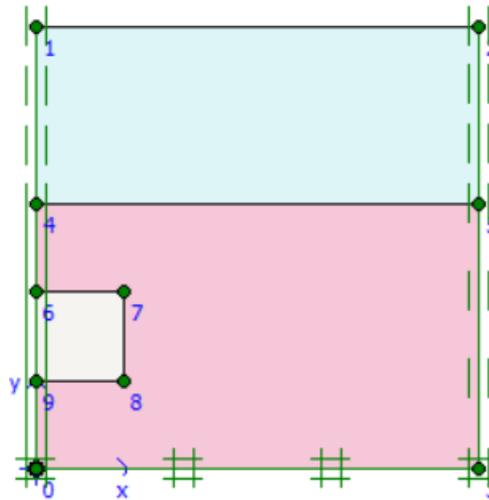
2eme cas : cas d'une conduite en remblai indéfini posée sous voûte

- ✓ Définir les épaisseurs de la couche de remblais et la voûte.
- ✓ Définir les caractéristiques du remblai et voûte:

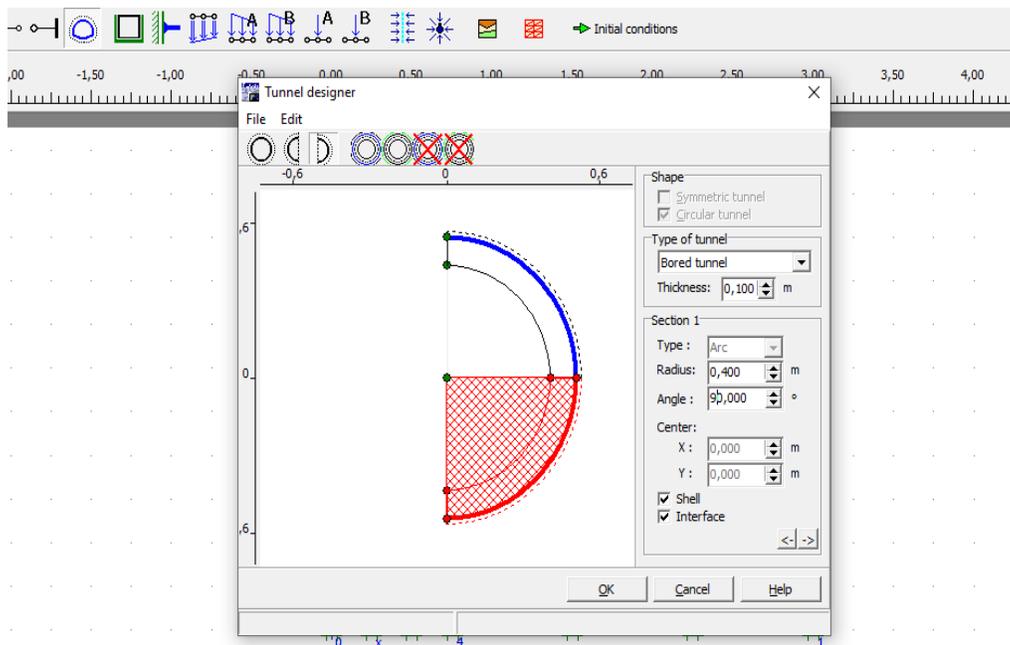
Chapitre .IV. Etude paramétrique et numérique



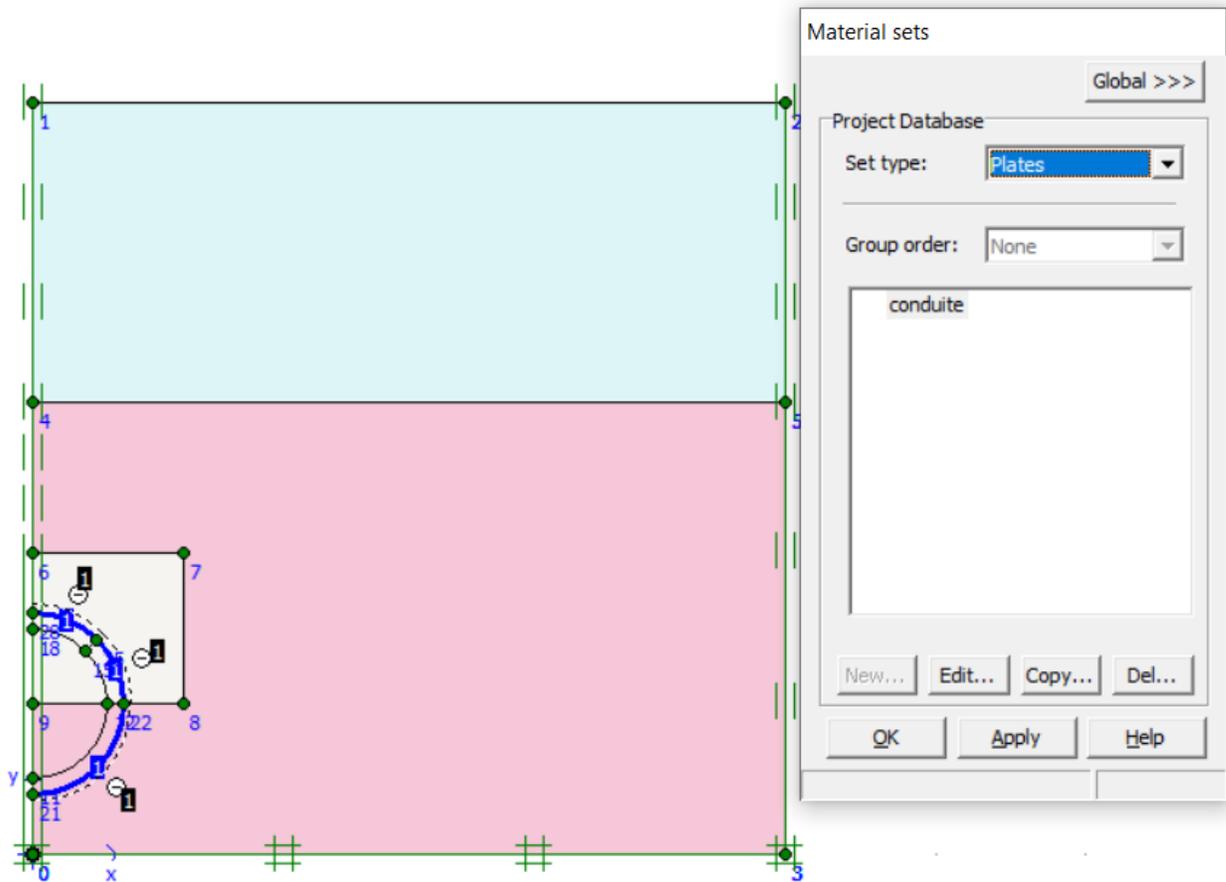
- ✓ Fixer la frontière de façon à éviter le glissement de sol.



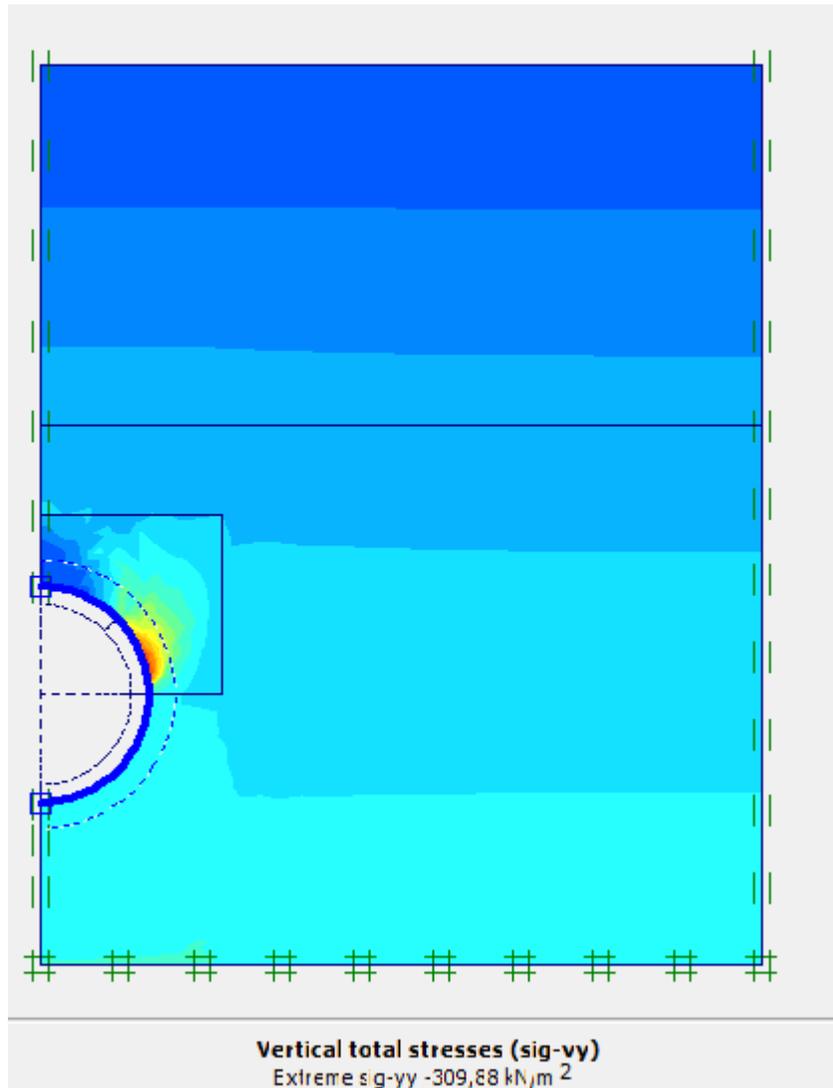
- ✓ Définir la taille de la structure souterraine.



- ✓ Définir les dimensions de la conduite et ses caractéristiques, et les mettre en place.

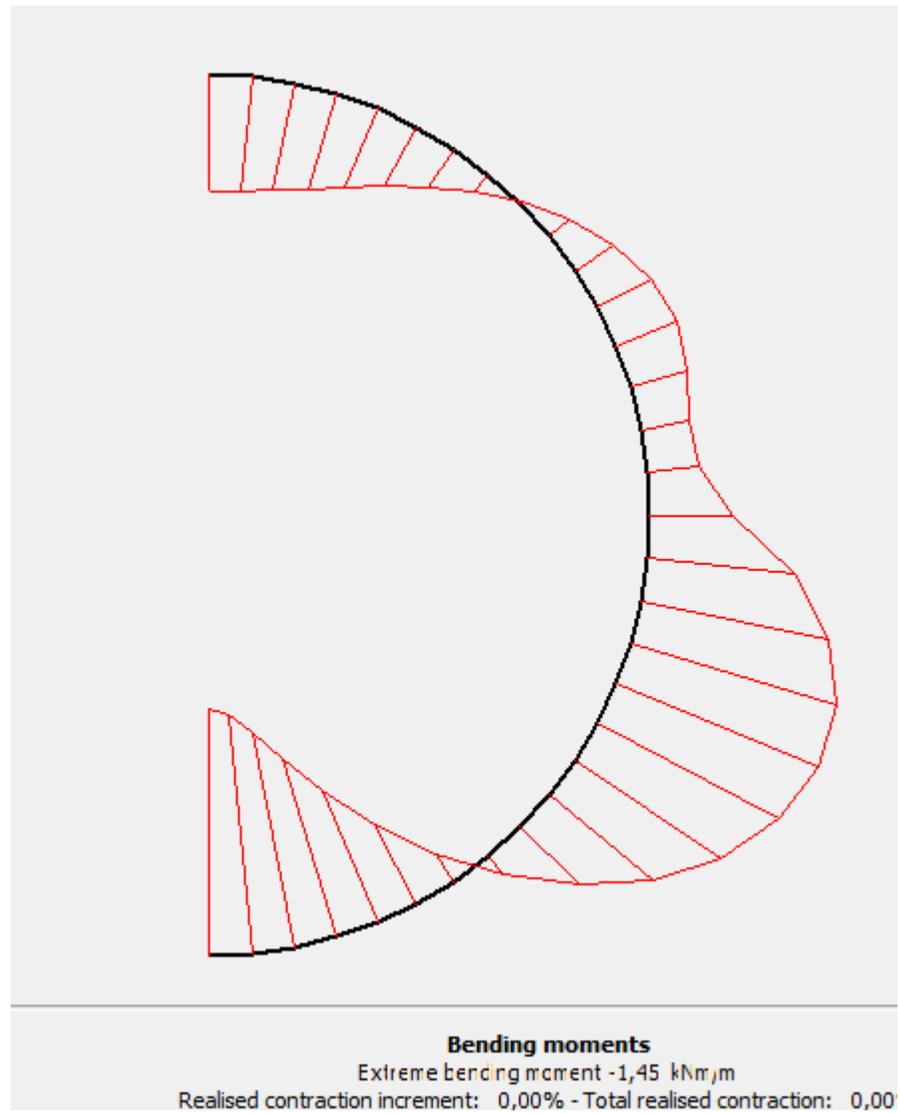


- ✓ Déterminer la contrainte effective



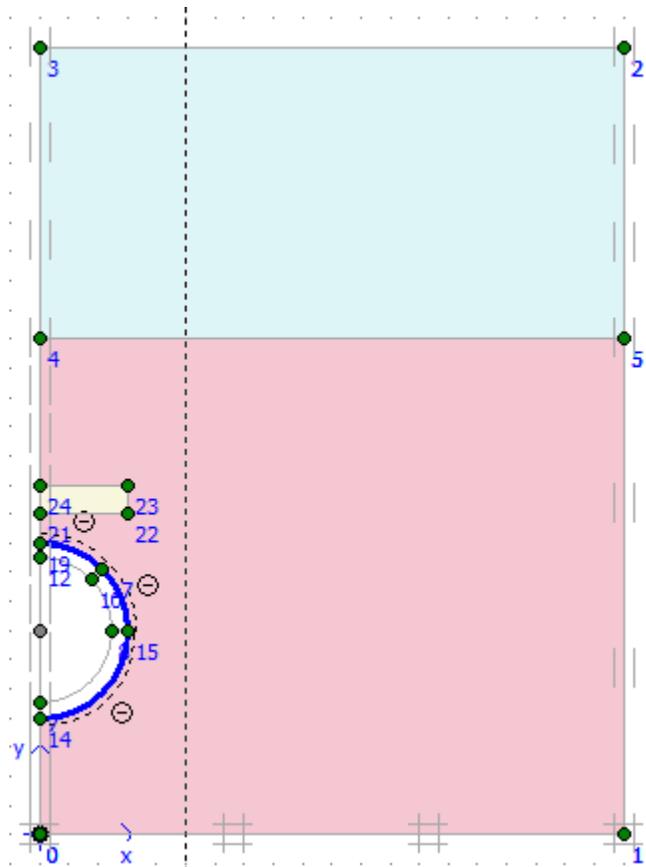
Chapitre .IV. Etude paramétrique et numérique

- ✓ Déterminer les moments d'ovalisation:

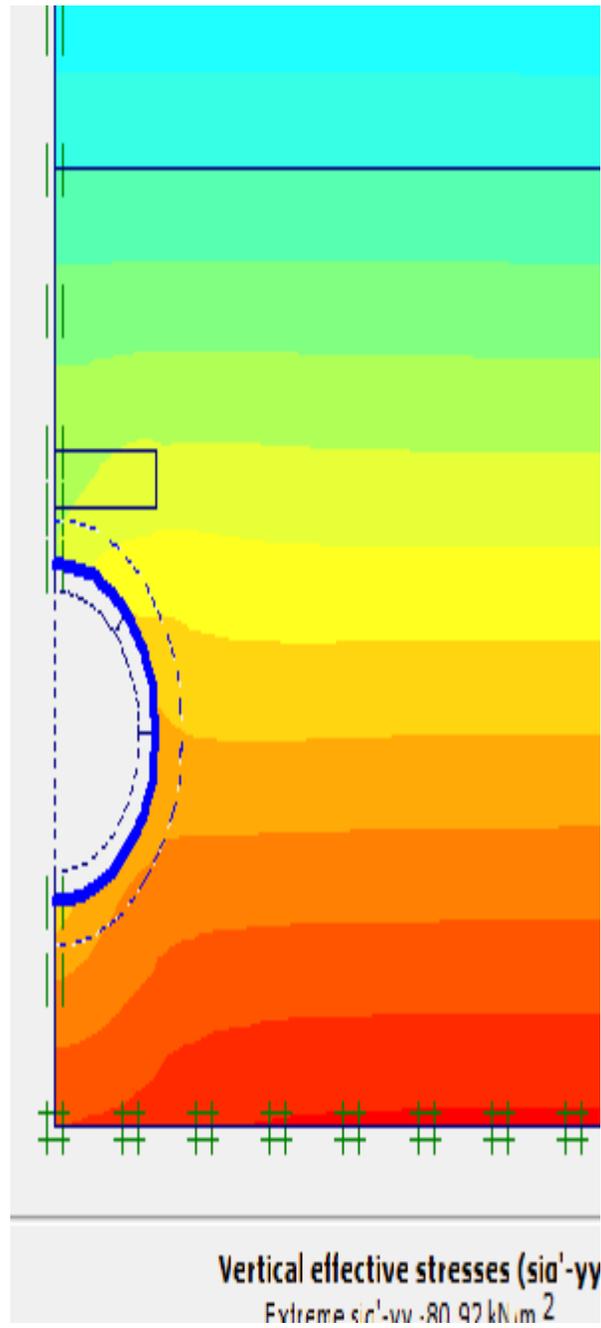


3eme cas :cas d'une conduite en remblai indéfini avec matériau souple d'épaisseur $E_p=0,2$ m

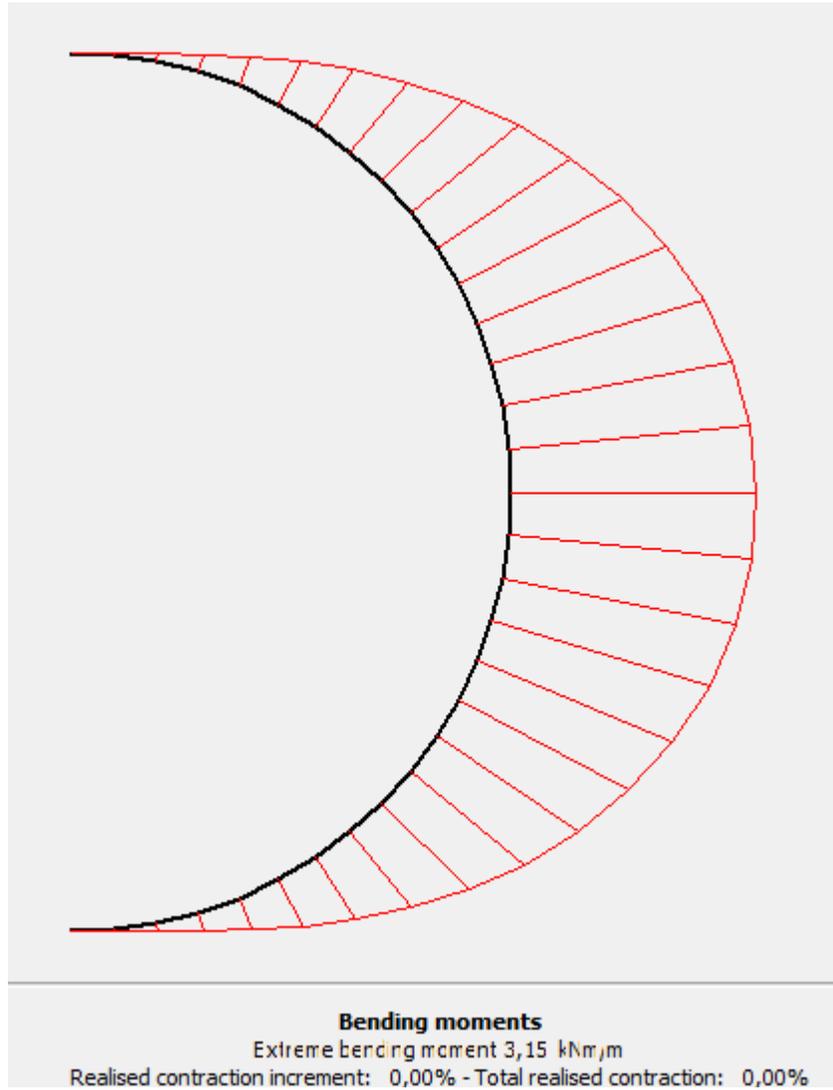
- ✓ Définir les épaisseurs de la couche de remblais et le matériau souple
- ✓ Définir les caractéristiques du remblai et matériau souple
- ✓ Fixer la frontière de façon à éviter le glissement de sol.



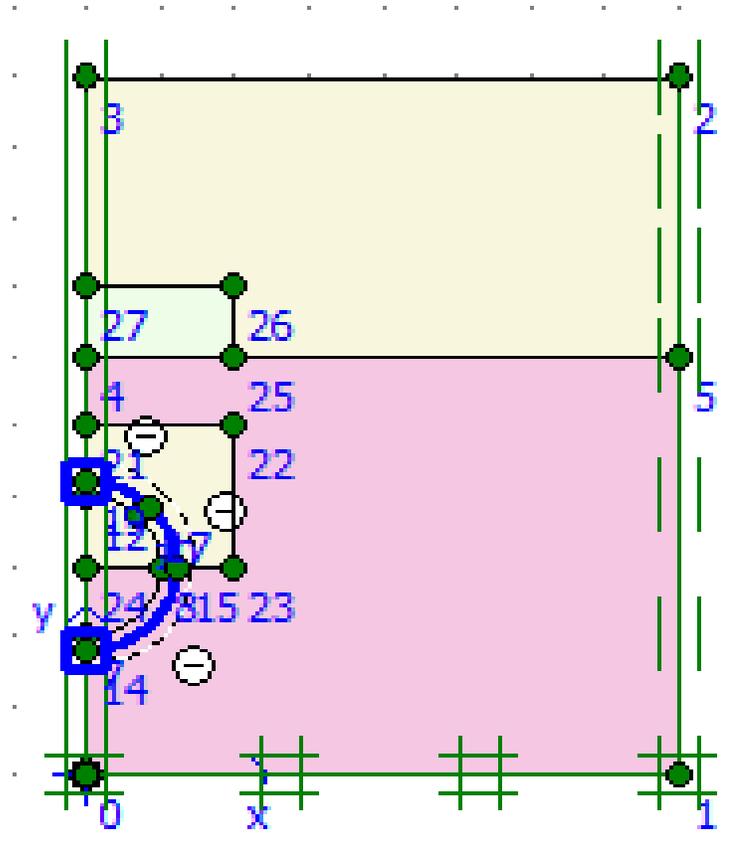
- ✓ Déterminer la contrainte effective



- ✓ déterminer les moments d'ovalisation



4eme cas :cas d'une conduite en remblai indéfini posée sous voute avec matériau souple d'épaisseur $E_p=0,5$ m



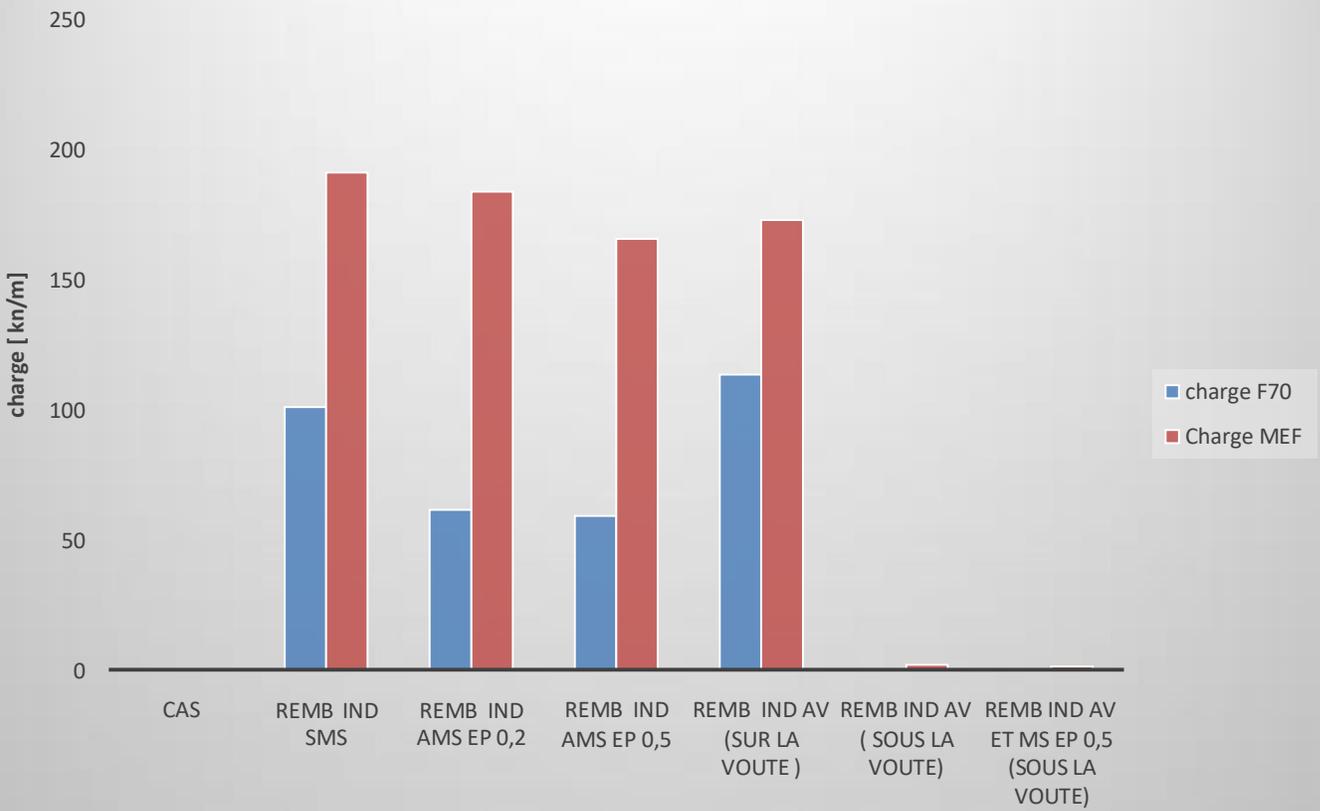
Les résultats d'après la MEF (plaxis) :

Tableau IV.4 : des charges Q et des moments d'ovalisation calculés par la MEF

tableau 4 : des charges Q et des moments d'ovalisation calculer par la MEF (plaxis)		
les cas	les charges Q	les moments d'ovalisation
REMBLAI INDEFINI SANS MATERIAU SOUPLE	190,85	1,841
REMBLAI INDEFINI AVEC MATERIAU SOUPLE EP 0,2	183,54	1,858
REMBLAI INDEFINI AVEC MATERIAU SOUPLE EPEP 0,5	165,4905	1,613
REMBLAI INDEFINI AVEC VOUTE (sur la voute)	172,674	172,674
REMBLAI INDEFINI AVEC VOUTE (sous la voute)	1,851	0,688
REMBLAI INDEFINI AVEC VOUTE ET MATERIAU SOUPLE EP0, 5	1,197	0,387

Comparaison « des charges », « des PET et de « Moment d'ovalisation » par les différentes méthodes de calcul MEF(PLAXIS) et F70:

HIISTOGRAMME IV.2: Comparaison des charges sur la conduite



Chapitre .IV. Etude paramétrique

Méthode analytique :

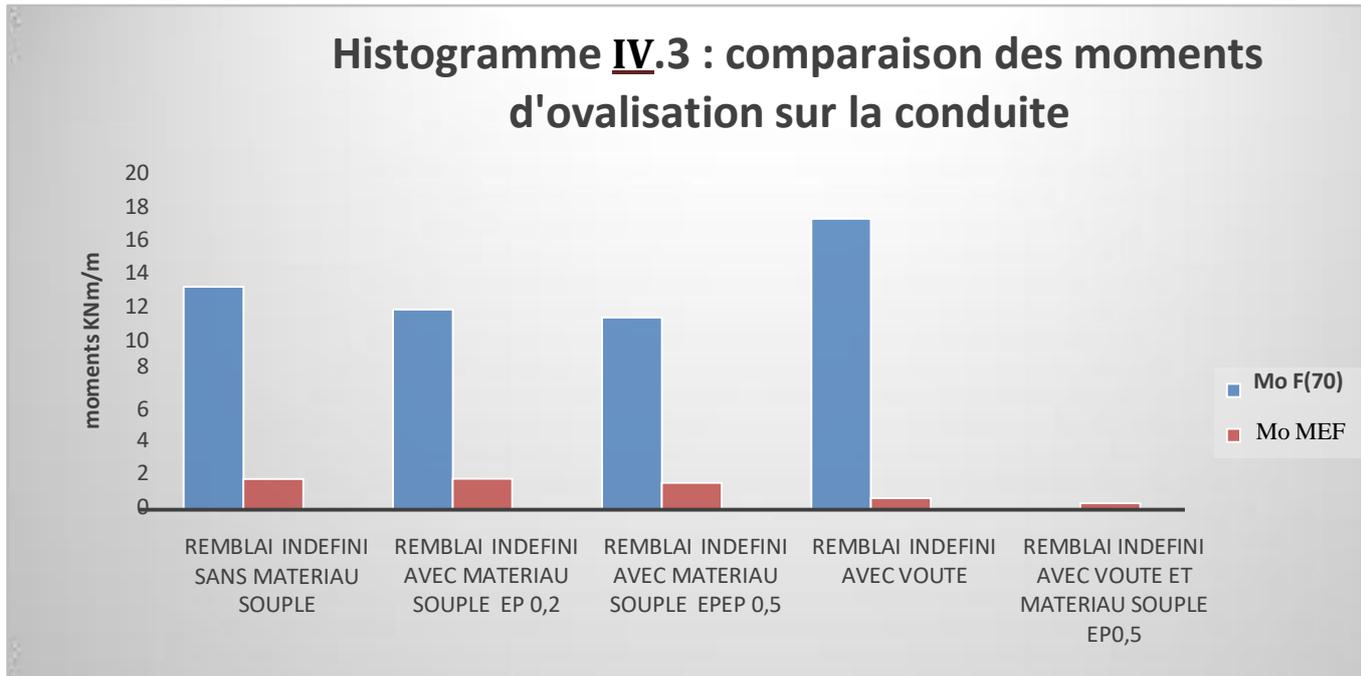
- ✓ On remarque que la charge des remblais diminue en fonction de l'introduction du matériau souple et de l'augmentation de son épaisseur
- ✓ La charge sur la voute est supérieur a la charge dans le cas d'un remblai indéfini sous voute , cela est dû à l'ajout du poids du la voute en béton arme a la charge des remblai.

Méthode MEF :

- ✓ l'approche numérique induit aussi une diminution de la charge en fonction de l'introduction de matériau souple et de l'augmentation de son épaisseur
- ✓ Aussi, la pose sous voute implique des charges du remblai sous la voute et sur la conduite d'une façon drastique.
- ✓ D'autre part, l'introduction d'une épaisseur et de matériau souple au – dessus entraine une diminution de la charge sur la conduite , Cette charge est inférieur au cas avec voute sans matériau souple.

Comparaison entre MEF / Analytique

- ✓ on remarque après comparaison des résultats de la méthode analytique(F70) et des résultats donnees par la MEF que cette dernière présent des charges supérieur a la méthode analytique F70 dans tous les cas
- ✓ en effet, la MEF tient compte de la loi de comportement elastoplastique des matériaux (argile, caoutchouc, voute en béton arme) (mhore Colomb) , de l'interaction sol , structure de la discrétisation raffinée du complexe sol structure par élément finis (élément triangulaire, membranaire ,15 nœuds)
- ✓ par contre la méthode analytique (F70) est une méthode qui ne tient pas compte de la loi de comportement des matériaux en présence
- ✓ on peut conclure que la MEF est plus fiable que la MA (F70) mais la méthode analytique reste toujours valable pour un pré dimensionnement on avant-projet sommaire.



Comparaison des moments d'ovalisation

Méthode analytique :

- ✓ les moments d'ovalisation à la clé diminuent en fonction de l'introduction de matériau souple par rapport à la méthode analytique F70
- ✓ toutefois, ce moment d'ovalisation à la clé augmente dans le cas de la voute sans matériau souple par rapport au moment précédent (conduite remblai indéfini sans matériau souple) du au surplus de charge apporté par la voute.

Méthode MEF :

- ✓ les résultats présentés dans la MEF montrent que le moment d'ovalisation diminue en fonction de l'introduction de matériau souple, cela est dû au fait que le moment d'ovalisation devient maximal au niveau du rien sous l'effet de matériau souple et de la voute.

CONCLUSIONS GENERALES:

- ✓ L'introduction de matériau souple diminue les charge par rapport la méthode applique (MEF, MA F70).
- ✓ La pose sous voute implique aussi une diminution de charge sur la conduite.
- ✓ Les moments d'ovalisation diminue en fonction de l'introduction de matériau souple et aussi en pose sous voute.
- ✓ La méthode MEF est plus fiable que la méthode analytique.
- ✓ La méthode analytique reste valable un pré dimensionnement on avant-projet sommaire.

Recommandations:

- ✓ L'utilisation dans le domaine de géotechnique de matériau naturel ou industrielle de récupération pour la sauvegarde l'environnement.
- ✓ L'introduction d'un matériau souple tel que (le caoutchouc broyé) sur la conduite s'est révélé très bénéfique du fait de la diminution des charges dues aux remblais.
- ✓ Pour une analyse plus complète, il serait souhaitable de considérer les paramètres suivants:
 - Revoir la modélisation de la voute par un autre logiciel plus approprié à ce genre de structures
 - Consolidation à long terme.
 - Effets de la présence de nappes phréatiques.
 - Effets des charges sismiques et vibratoires.

Bibliographie

- [1] wiki hydraulique.(2019). *Généralités sur les conduites*. Tout sur les conduites
- [2] guides hydrauliques.(2017). *Assainissement*. Assainissement et tuyauterie
- [3] MOUSSAOUI Nadia. (2014). *Classification des conduites*. Types de conduite
- [4] LABADLIA Khaoula, GHERABI Imene. (2011). étude de l'influence de l'introduction d'une tranche de décompression sur l'influence sol conduite circulaire enterrées rigide.
- [5] sans auteur. (2007). géotechnique journal.org.
- [6] FASCICULE 70. *Méthodes de résolution*.
- [7] catalogue Plaxis. (Chapitre 3).