

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil



**Projet de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Civil**

**Thème :**

**ETUDE DES OUVRAGES GENIE CIVIL  
DE PIPELINE**

Préparé et présenté par :

ABDELLAZIZ Mustapha

CHERROUF Elies

Dirigé par :

Pr. BELKACEMI Smain

Mr. TIRSATINE Mohamed

**Promotion : juin 2015**

*Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach  
16200 Alger, Algérie*

## ملخص

تهدف هذه الدراسة الى هندسة و تصميم أساس آلة رفع ضغط الغاز الاهتزازية التي تدخل في إطار مشروع محطة الضغط حاسي الرمل للرفع من ضغط الغاز و ارساله الى المركز الوطني لتوزيع الغاز, كما تهدف ايضا الى دراسة مسار الأنبوب و ذلك باستغلال الخرائط الموجودة عن المنطقة.

تصميم أساس الآلة الاهتزازية تم باحترام معيار المعهد الأمريكي للخرسانة التحليل الثابت تم بواسطة طرائق رقمية فيما يخص الدراسة الديناميكية فقد تمت بواسطة طريقة الخرطوم و ذلك لحساب التحركات و سمك الأساس.

**كلمات دلالية :** آلة اهتزازية، أساس البناء، انابيب الغاز، الخرسانة المسلحة

## Résumé

L'objet de ce présent travail est de concevoir la fondation du turbocompresseur dans le cadre de la réalisation de la station de compression de HassiR'Mel permettant d'augmenter la pression du gaz dans les canalisations pour l'expédier au centre national de dispatching du gaz (CNDG), ainsi que l'étude du tracé de la ligne GR5 en exploitant les différents plans de pose existants.

Le calcul et la conception de la fondation ont été fait en suivant l'norme ACI, les analyses statiques du massif et du sol ont été réalisées principalement par des méthodes numériques, en ce qui concerne l'étude dynamique, la méthode choisie est bien celle de cône pour le calcul des déformations et la détermination de l'épaisseur de la fondation.

**Mots clés :** Fondation, Pipeline, turbocompresseur, Machine vibrante, Radiers, Déformations, Ferrailage

## Abstract

The purpose of the present work is to design the foundation of the turbocompressor through the realization of the HassiR'Mel compressor station to increase the gas pressure in pipelines to ship it to the national dispatching center gas, as well as to study the route of the GR5 line by exploiting the various existing installation plans.

The calculation and design of the foundation were made following the American Concrete Institute standards, static analysis of the massif and the ground was done mainly by numerical methods, regarding the dynamic study of the method chosen is the cone to calculate deformations and determining the thickness of the foundation.

**Keys words :** mat foundation, turbocompressor, reinforcement, pipeline

## ***Remerciements***

Nos remerciements les plus distinguées au Pr. S.BELKACEMI notre promoteur pour son aide, sa disponibilité et ses conseils précieux, sans lui ce travail n'aurait jamais abouti.

On tient à exprimer notre profonde reconnaissance a Mr M.TIRSATINE une vraie bibliothèque mobile de nous avoir encadré et tant appris avec entrain.

On adresse nos sincères remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Tous ceux qui nous ont aidés dans notre projet de fin d'étude, particulièrement madame W.DJAFAR cadre de la Sonatrach, Monsieur M.BOUKMOURI Ingénieur a l'ANARGEMA.

Et enfin dans le souci de n'oublier personne, que toutes les personnes qui nous ont aidées et soutenues de près ou de loin, trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

## ***DEDICACES***

Au nom d'Allah le tout clément, le très miséricordieux

Je dédie ce mémoire de fin d'étude à :

A Mes parents :

Ma mère source de mes joies et le secret de ma force et mon père pour ses sacrifices pour moi, Que Dieu le tout puissant les protège et les garde

A Ma sœur Nesrine et mon frère Mehdi

A ma future femme Mounia

Toute ma famille

Tous mes proches et amis fidèles

Tous ceux qui m'ont soutenu de près et de loin.

ABDELLAZIZ Mustapha

## Dédicaces

Au nom d'Allah le tout clément, le miséricordieux Je dédie ce mémoire à:

*Mes très chers parents que tous les mots de la langue française ne suffiraient jamais pour témoigner ma gratitude et l'amour que j'ai pour eux.*

*Mes chères sœurs Yasmine et Celia que j'aime et qui me le rendent mille fois mieux, je n'aurai jamais assez de ma vie pour leur dire merci pour leur soutien moral et encouragements tout au long de mon parcours.*

*Selma pour être toujours présente à mes côtés pour le meilleur et pour le pire, pour son soutien moral et sa patience.*

*Mes oncles Abdelhalim, Makhlouf, Mohammed et Saadeddine pour leur soutien intellectuel et moral.*

*Mes chères tantes Mina et Kenza qui m'ont toujours soutenu avec de belles paroles et prières.*

*Mes cousins Imad, Idir, Salim, Aziz, Yacine, Tarik, Abdou, Ahmed, Chihab et Sofiane.*

*Mes amis proches Badi, Amine, Walid, Ghanou, Islem, Nasro, Mahdi, Fares, Younes, Mahmoud, Sami qui ont su être là à chaque moment difficile.*

*Mes camarades de promo qui ont su faire de mes séjours à l'école nationale polytechnique un moment très profitable.*

Et enfin à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin

CHERROUF Elies

# Table des matières

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>                                                 | <b>12</b> |
| <b>Chapitre I : PRESENTATION DU PROJET GR5.....</b>                               | <b>13</b> |
| I.1. Introduction: .....                                                          | 13        |
| I.2. Description du projet GR5:.....                                              | 15        |
| I.2.1. Section N° 1 --Tronçon Reggane-Krechba .....                               | 15        |
| I.2.2. Section N° 2 --Tronçon Krechba (CNDG).....                                 | 15        |
| I.2.3. Section N° 3 – Stations de compression.....                                | 15        |
| I.2.4. Section N° 4 --Looping.....                                                | 15        |
| I.3. Ouvrages concentrés.....                                                     | 16        |
| I.3.1. Terminal de départ (TD).....                                               | 16        |
| I.3.2. Terminal d'arrivée (TA) .....                                              | 16        |
| I.3.3. Poste de coupure: .....                                                    | 16        |
| I.3.4. Poste de sectionnement .....                                               | 17        |
| I.3.5. Station de compression :.....                                              | 18        |
| I.4. Descriptif de la section N° 02 du projet GR5: .....                          | 19        |
| I.5. Conclusion.....                                                              | 25        |
| <b>Chapitre II : ORGANISATION DES TRAVAUX DE POSE DE CANALISATIONS .....</b>      | <b>26</b> |
| <b>II.1) INTRODUCTION:.....</b>                                                   | <b>26</b> |
| II.1. Les différentes séquences de travaux .....                                  | 26        |
| II.2. Conclusion.....                                                             | 30        |
| <b>Chapitre III : CONCEPTION DU MASSIF DE FONDATION DU TURBOCOMPRESSEUR .....</b> | <b>31</b> |
| III.1. Introduction : .....                                                       | 31        |
| III.2. Turbocompresseur : .....                                                   | 31        |
| III.3. Rapport géotechnique :.....                                                | 32        |
| III.3.1. Aperçu sur le site: .....                                                | 32        |
| III.3.2. Essai IN-SITU :.....                                                     | 32        |
| III.3.3. Essai au laboratoire:.....                                               | 34        |
| III.3.4. Conclusion sur le rapport géotechnique: .....                            | 36        |
| III.4. Chargements : .....                                                        | 37        |
| III.4.1. Chargement de la turbine : .....                                         | 37        |
| III.4.2. Chargement du compresseur : .....                                        | 42        |
| III.4.3. Combinaison de charge :.....                                             | 44        |
| III.5. Dimensionnement :.....                                                     | 46        |
| III.6. Vérification de la portance du sol :.....                                  | 48        |
| III.7. Le ferrailage.....                                                         | 49        |
| III.8. Déformations : .....                                                       | 57        |
| III.8.1. Méthodes de détermination des déformations : .....                       | 57        |
| III.8.2. Calcul par la méthode des éléments finis:.....                           | 57        |
| III.8.3. Calcul numérique : .....                                                 | 58        |
| III.8.4. Calcul Analytique :.....                                                 | 68        |
| III.9. Conclusion :.....                                                          | 81        |
| <b>Conclusion générale.....</b>                                                   | <b>82</b> |
| <b>Bibliographie .....</b>                                                        | <b>83</b> |
| <b>Annexe.....</b>                                                                | <b>83</b> |

## Liste des figures

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I-1: Carte sommaire du tracé préliminaire.....                                            | 14 |
| Figure I-2:Schéma Terminal de départ .....                                                       | 16 |
| Figure I-3 : plan de poste de coupure.....                                                       | 17 |
| Figure I-4: Station de compression .....                                                         | 18 |
| Figure I-5 : Lestage en béton .....                                                              | 21 |
| Figure I-6 : Cavalier en béton .....                                                             | 21 |
| Figure I-7 : Fonçage horizontal.....                                                             | 22 |
| Figure II-1 : Bardage des tubes .....                                                            | 26 |
| Figure II-2 : Cintreuse en action .....                                                          | 27 |
| Figure II-3 : Soudure des tubes .....                                                            | 27 |
| Figure II-4 : Trancheuse en action .....                                                         | 28 |
| Figure II-5 : Mise en fouille des tubes .....                                                    | 28 |
| Figure II-6 : Cavalier de lestage en béton bardés.....                                           | 29 |
| Figure III-1 : Une turbine a gaz industrielle.....                                               | 31 |
| Figure III-2 : Résultats des analyses granulométriques .....                                     | 35 |
| Figure III-3 : Le massif et les différentes charges qui lui sont appliquées .....                | 44 |
| Figure III-4 : Géométrie du radier vu isométrique.....                                           | 48 |
| Figure III-5 : Distribution de contraintes $\sigma_{xx}$ sur l'assise du turbocompresseur .....  | 50 |
| Figure III-6 : Distribution de contraintes $\sigma_{xz}$ sur l'assise du turbocompresseur.....   | 50 |
| Figure III-7 : Distribution de contraintes $\sigma_{zz}$ sur l'assise du turbocompresseur.....   | 51 |
| Figure III-8 : Distribution de contraintes $\sigma_{zy}$ sur l'assise du turbocompresseur.....   | 52 |
| Figure III-9: Distribution de contraintes $\sigma_{yx}$ sur l'assise du turbocompresseur. ....   | 52 |
| Figure III-10 : Distribution de contraintes $\sigma_{yy}$ sur l'assise du turbocompresseur ..... | 53 |
| Figure III-11 : Déformation verticale $U_{zz}$ du plan du massif.....                            | 59 |
| Figure III-12 : Déformation horizontale $U_{xx}$ du plan du massif.....                          | 59 |
| Figure III-13 : Déformation horizontale $U_{yy}$ du plan du massif.....                          | 60 |
| Figure III-14 : Le massif en béton reposant sur le sol.....                                      | 61 |
| Figure III-15 : Caractéristiques du matériau béton .....                                         | 62 |
| Figure III-16 : Caractéristiques du matériau sol .....                                           | 63 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III-17: Le repère local.....                                         | 64 |
| Figure III-18 : Oscillateur simple à un degré de liberté.....               | 69 |
| Figure III-19 : Modèle de cône correspondant a chaque degré de liberté..... | 72 |



## Liste tableaux

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I-1: Nature et caractéristiques du terrain .....                                 | 23 |
| Tableau I-2 points singuliers du PK 534 au PK765 et leurs protections .....              | 24 |
| Tableau III-1 : Capacité portante du sol.....                                            | 34 |
| Tableau III-2 : Charges de la machine au repos.....                                      | 37 |
| Tableau III-3 : Charges d'opérations .....                                               | 37 |
| Tableau III-4 : Charges du vent selon +X.....                                            | 38 |
| Tableau III-5 : Charges du vent selon -X.....                                            | 38 |
| Tableau III-6 : Charges du vent selon +Y .....                                           | 38 |
| Tableau III-7 : Charges du vent selon -Y.....                                            | 39 |
| Tableau III-8 : Charges thermique .....                                                  | 39 |
| Tableau III-9 : Charges sismiques selon la direction X .....                             | 40 |
| Tableau III-10 : Charges sismiques selon la direction X.....                             | 40 |
| Tableau III-11 : Charges sismiques selon la direction +Z .....                           | 40 |
| Tableau III-12 : Charges sismiques selon la direction -Z.....                            | 41 |
| Tableau III-13 : Charges sismiques selon la direction +Y.....                            | 41 |
| Tableau III-14 : Charges sismiques selon la direction +Y -Z avec un angle 315° ....      | 41 |
| Tableau III-15 : Charges sismiques selon la direction +Y-Z avec un angle 225° .....      | 42 |
| Tableau III-16 : Charges statique et dynamique du compresseur .....                      | 42 |
| Tableau III-17 : Charges de la buse du compresseur .....                                 | 43 |
| Tableau III-18 : Charges sismiques.....                                                  | 43 |
| Tableau III-19 : combinaisons de charges .....                                           | 45 |
| Tableau III-20 : Section d'armatures .....                                               | 54 |
| Tableau III-21 : Déformations des nœuds de maillage de l'assise du turbocompresseur..... | 64 |
| Tableau III-22 : Déformations des nœuds de maillage de l'assise du turbocompresseur..... | 66 |
| Tableau III-23 : Déformations des nœuds de maillage de l'assise du turbocompresseur..... | 66 |
| Tableau III-24 : Déformations des nœuds de maillage de l'assise du turbocompresseur..... | 67 |
| Tableau III-25 : Résumé des déformations.....                                            | 67 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau III-26 : Valeurs de <b>z0r0</b> .....                                               | 73 |
| Tableau III-27 : Valeurs de <b>z0r0</b> .....                                               | 74 |
| Tableau III-28 : Forces et moments appliqués aux points d'ancrage de la turbine ....        | 78 |
| Tableau III-29 : Forces et moments revenants aux points d'ancrage du compresseur            | 78 |
| Tableau III-30 : Moments et forces résultants au niveau des ancrages de la turbine.         | 79 |
| Tableau III-31: Moments et forces résultants au niveau des ancrages du compresseur<br>..... | 79 |
| Tableau III-32 : Moments et forces résultants au centre de gravité du massif .....          | 80 |

## Liste des symboles et abréviations

|        |                                            |
|--------|--------------------------------------------|
| LC     | : Lestage continue                         |
| CAV    | : Cavaliers en béton                       |
| D.B.   | : Dalle en béton                           |
| Gaine  | : Gaine en acier                           |
| STC    | : système de transport par canalisation    |
| CNDG   | : centre national de dispatching du gaz    |
| PK     | : point kilométrique                       |
| SCADA  | : Supervisory Control and Data Acquisition |
| TD     | : terminal départ                          |
| TA     | : terminal arrivé                          |
| PC     | : poste de coupure                         |
| PS     | : poste de sectionnement                   |
| $C_p$  | : vitesse des ondes de compression         |
| $C_s$  | : vitesse des ondes de cisaillement        |
| E      | : module d'élasticité                      |
| $\nu$  | : Coefficient de poisson                   |
| G      | : module de cisaillement                   |
| $\Phi$ | : angle de frottement                      |
| RPA    | : Règlement Parasismique Algérien          |
| ACI    | : American Concrete Institute              |
| DL     | : charge permanente                        |
| LL     | : charge d'exploitation                    |
| T      | : charge thermique                         |
| WL     | : charge de la neige et du vent            |

EL : charge sismique

T<sub>pm</sub> : tour par minute

$\omega$  : est la fréquence propre du système

$K_v$  : la raideur du système déterminée par la méthode de cône.

CRS : ciment résistant au sulfate

$a_{(0)}$  : Fréquence adimensionnelle

$k(a_0)$  : Facteur représentant l'effet de la masse et de l'inertie du sol.

K : Raideur statique de la fondation, disponible dans la littérature.

$\mathcal{C}(a_0)$  : Facteur représentant l'effet de l'amortissement radiatif résultant de la dissipation d'énergie due à la propagation des ondes loin de la fondation.

$\mu$  : Coefficient de lamé

C : vitesse de propagation des ondes

$\{u\}$  : Vecteur déplacement

## INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie dispose de richesses naturelles considérables et diversifiées notamment en gaz naturel qui constitue le pilier de l'économie algérienne par son exportation.

De l'exploration et l'exploitation à la commercialisation en passant par le transport et la transformation, l'industrie du gaz naturel a toujours présenté un défi aux techniciens du domaine. Vu les grandes distances entre les gisements qui se trouvent principalement au sud du pays et les marchés de consommations nationaux et internationaux, le transport de cette richesse est l'une des activités essentielles de cette industrie.

Le projet GR5 est un projet porteur, qui entre dans le cadre du système national de transport par canalisation; il consiste en la réalisation d'un pipeline de 765 km de longueur reliant les gisements de toute la région du Sud-ouest Algérien au centre national de dispatching du gaz de Hassi R'Mel (CNDG) en incluant toutes les installations nécessaires.

Dans notre mémoire nous intéresserons d'abord à l'étude du point de vue génie civil de ce pipeline. Pour cela, on aura traité le tracé, en exploitant les plans de pose existants, cette approche aura pour objectif, le recensement des différentes contraintes croisant notre gazoduc, il y a lieu de proposer les solutions appropriées et normatives pour tous les cas de figure.

Dans un second temps on détaillera une note de calcul pour l'analyse et la conception du massif de fondation du turbocompresseur qui compensera les pertes de charges du pipeline survenues le long de son parcours.

Cette étude représente un des aspects importants pour la réalisation du projet GR5.

# Chapitre I : PRESENTATION DU PROJET GR5

## I.1. Introduction:

Ce chapitre présentera le projet du gazoduc de diamètre 48'' GR5 reliant le terminal départ de Reggane au Centre National de Dispatching de Gaz (CNDG) de HassiR'Mel.

Le projet GR5 est un Système de Transport par Canalisation (STC) composé essentiellement d'un pipeline, d'un dédoublement (loop) et de deux stations de compression et leurs installations y afférentes. La réalisation de ce projet permet l'acheminement du gaz de neuf champs découverts au sud-ouest de Reggane vers le CNDG de HassiR'Mel.

Le point de départ du projet STC GR5 se situe à Aoulef dans la région de Reggane, puis traverse le plateau de Tademait, passe par l'usine d'In Salah Gaz de Krechba (ISG Krechba), et se termine au terminal arrivée de HassiR'mel.

Le STC GR5 en phase finale sera composé d'un pipeline de 48'' de 765 km et d'un loop de 232 km, et comprend essentiellement des ouvrages concentrés (Postes de coupure, Poste de sectionnement, Stations de compression ...) et annexes (protection cathodiques, lestage en béton, cavaliers en béton ....). La réalisation du STC GR5 permettra de:

- Collecter le gaz de neuf champs découverts au sud-ouest de HassiR'Mel : Reggane Nord, Msari Akabli, Ahnet, Reggane Djebel Hirane, Touat, Timimoun, Zarafa, Hassi Mouina, Hassi Ba Hamou.
- Expédier la production vers le Centre National de Dispatching Gaz de HassiR'Mel CNDG qui permettra à long terme l'accroissement de l'offre du gaz naturel.



Figure I-1: Carte sommaire du tracé préliminaire

## **I.2. Description du projet GR5:**

Le projet GR5 sera réalisé en quatre sections :

### **I.2.1. Section N° 1 --Tronçon Reggane-Krechba**

Consiste à réaliser un pipeline de 310 km de longueur et de diamètre 48'' reliant le Terminal Départ de Reggane (PK 0) au poste de coupure N°3 (PK 309), avec une pression maximale de service de 70 bars. Cette ligne comprend essentiellement :

- Un terminal départ à Reggane;
- Douze postes de sectionnement;
- Trois postes de coupure;
- Cinq stations d'injection ;
- Un système de contrôle et d'acquisition de données SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ;
- Un système de protection cathodique.

### **I.2.2. Section N° 2 –TronçonKrechba (CNDG)**

Consiste à réaliser un pipeline de 456 km de longueur, de diamètre 48'', reliant le Poste de coupure N° 3 (PK. 309) au poste de coupure N°7 et la station de compression à HassiR'Mel avec une pression maximale de service de 70 bars. Cette ligne comprend essentiellement :

- Un terminal arrivé au CNDG
- Seize postes de sectionnement
- Quatre postes de coupure
- Deux stations d'injection
- Un système SCADA
- Un système protection cathodique

### **I.2.3. Section N° 3 – Stations de compression**

Consiste à réaliser deux Stations de Compression l'une à Krechba au PK 310 et l'autre à HassiR'Mel au PK765.

### **I.2.4. Section N° 4 --Looping**

Réalisation d'un loop de 232 Km entre le Poste de coupure PC 5 et la station de compression de HassiR'Mel.



## I.3. Ouvrages concentrés

### I.3.1. Terminal de départ (TD)

Cet ouvrage constitue le point d'entrée (PK0) au réseau de transport. Il est constitué d'une gare des racleurs de départ de 48'', d'un indicateur de pression et d'un événement. A la sortie de la gare, un indicateur de passage de racleurs est installé sur la ligne principale du gazoduc. D'autres indicateurs de passage sont placés au voisinage de postes de sectionnement.

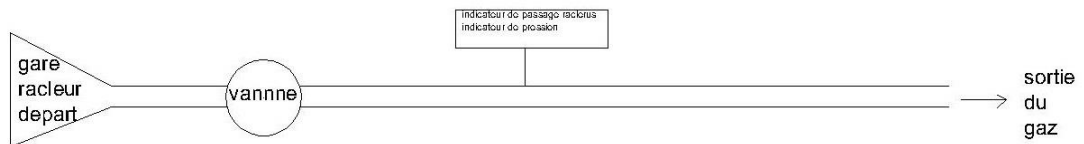


Figure I-2: Schéma Terminal de départ

### I.3.2. Terminal d'arrivée (TA)

Le terminal d'arrivée peut être un réservoir de stockage ou le début d'un réseau aval de transport ou de distribution --cas du projet GR5 à l'arrivée au CNDG. A l'arrivée au CNDG, le gazoduc est équipé d'une gare de racleurs, d'un indicateur de pression et d'un événement. A l'approche de la gare de racleurs, un indicateur de passage de racleurs est installé sur la ligne principale du gazoduc, à environ 1500 m de la clôture.

### I.3.3. Poste de coupure:

Le poste de coupure permet de lancer et de réceptionner les racleurs lors des opérations de ramonage, de séchage et de mise en gaz des canalisations pour assurer le nettoyage et la vérification de la cylindricité de ces derniers. Il joue le rôle de poste de sectionnement (McAllister, 2013), et permet le raccordement des canalisations secondaires ou d'une station de compression.

Les postes de coupure permettent d'interrompre les canalisations tout en déviant l'écoulement du gaz par un circuit dérivé (by-pass). La distance séparant les postes de coupure est fixée par le règlement algérien de sécurité pour les canalisations de transport de gaz combustible; dans notre cas la distance est de 100km.

Pour permettre une exploitation et une maintenance optimale du gazoduc, sept postes de coupure sont prévus le long de la ligne GR5. Chaque poste de coupure est constitué par :

- Une gare de racleurs d'arrivée ;
- Une gare de racleurs de départ ;
- Un by-pass de 48'' ;

L'entrée et la sortie des gares sont équipées de vannes 48'' pour la connexion avec la ligne principale du gazoduc; le by-pass est équipé de vannes 48''. Ces dernières sont actionnées en séquence pour permettre les opérations automatiques de lancement ou de réception de racleurs. Toutes les vannes des postes de coupure sont actionnées par le gaz prélevé de la conduite et contrôlées manuellement au niveau local et à travers le système SCADA à distance (figure 2).

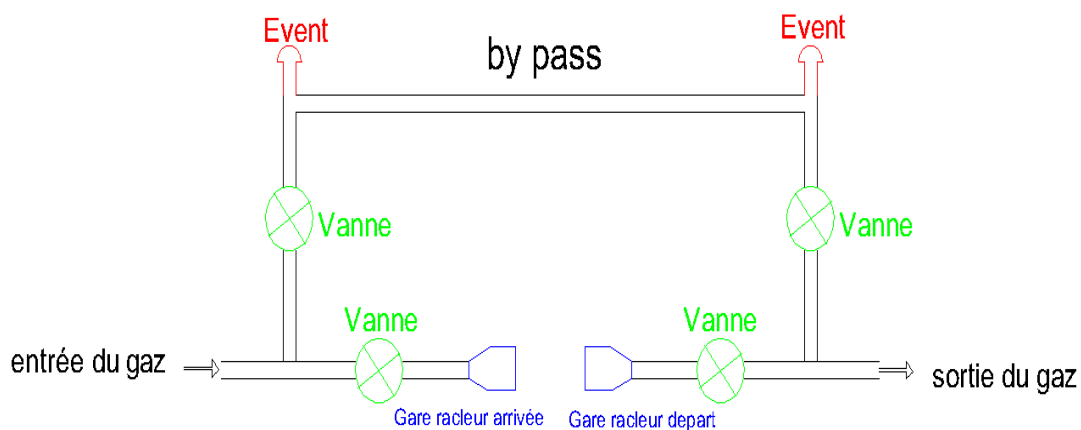


Figure I-3 : plan de poste de coupure

#### I.3.4. Poste de sectionnement

Il est nécessaire d'équiper notre gazoduc de postes de sectionnement qui délimitent deux tronçons de la canalisation. Leurs emplacements sont fixés par "le règlement algérien de sécurité pour les canalisations de transport de gaz combustible", qui fixe en général la longueur de tronçon à 20 km dans les régions désertique (faible densité de population), et à 10 km pour les zones à moyenne et forte densité de population.

Le rôle du poste de sectionnement est d'interrompre en cas de fuite la circulation du gaz naturel dans les canalisations par l'intermédiaire d'une vanne dite vanne de sectionnement dotée d'un dispositif " Line-break" permettant la fermeture automatique de la vanne en cas de problèmes.

Le nombre de postes de sectionnement du projet GR5 est de 28. La pression est mesurée des deux côtés --amont et aval – de la vanne de sectionnement et est comparée à une pression de référence figurant dans la liste des exigences fournies dans le line-break.

L'alimentation électrique dans les postes de sectionnement est fournie par l'énergie solaire. Elle est nécessaire surtout pour l'équipement de télécommunication, l'équipement du système de contrôle et l'éclairage occasionnel.

### I.3.5. Station de compression :

Le gaz naturel est introduit dans des gazoducs avec une pression importante. En raison de la perte de débit causée par les frottements avec les parois internes des pipelines, la pression dans la canalisation diminue lorsque la distance augmente. Pour cette raison, il est essentiel d'installer des stations de compression de gaz naturel dans certaines zones. La compression du gaz naturel permet le transport continu de la production à la transformation du gaz naturel pour son utilisation.

Une station de compression est une unité qui se compose d'un ou plusieurs turbocompresseurs, placés en parallèle ou en série, et qui aspirent le fluide à une pression assez basse dite pression d'aspiration notée  $P_{asp}$  et rejettent ce fluide à une pression nettement plus élevée dite pression de refoulement notée  $P_{ref}$ . Le gaz est comprimé par des compresseurs centrifuges qui fonctionnent grâce à des turbines à gaz.

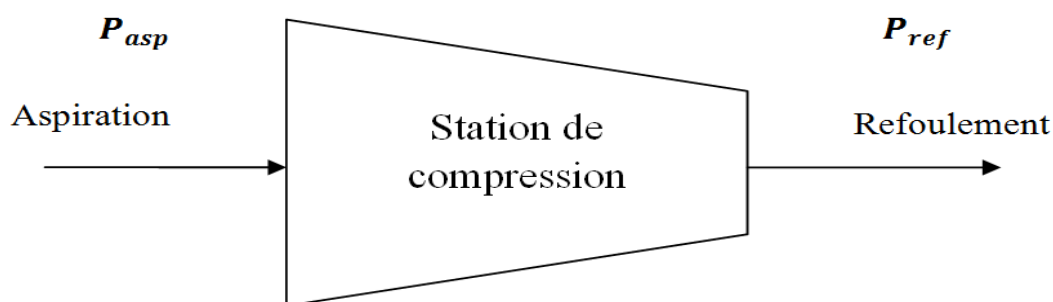


Figure I-4: Station de compression

La configuration actuelle de la station de compression GR5HassiR'Mel est (2+1) -- deux compresseurs en fonctionnement et un en secours. Cependant l'unité de compression est conçue pour recevoir deux compresseurs supplémentaires pour atteindre en phase finale une configuration (4+1)-- quatre compresseurs en fonctionnement et un en secours. Des vannes sont installées sur les collecteurs d'aspiration et de refoulement.

Les structures annexes de la station de compression sont dimensionnées pour cinq compresseurs avec la configuration (4+1)-- quatre compresseurs en fonctionnement et un en secours.

A l'aspiration, cinq filtres séparateurs permettent d'éliminer les impuretés avant que le gaz ne soit comprimé : quatre filtres fonctionnent en parallèle et un en secours. Après filtration, un collecteur d'entrée permet l'envoi du gaz vers les trains de compression. Au refoulement, le gaz est plus chaud à cause de la compression. Un collecteur de sortie dirige le gaz vers le système de refroidissement constitué par trois refroidisseurs. A la sortie des refroidisseurs, le gaz est acheminé vers l'unité de comptage pour obtenir une mesure fiscale du débit de gaz envoyé au CNDG.

- **Les installations de la station de compression**

Les principales installations sont les suivantes :

- Trois turbocompresseurs.
- Un turbogénérateur.
- Un système de refroidissement de gaz.
- Un système de génération d'air comprimé.
- Un système de drainage, avec système de séparation et récupération des huiles.
- Un système de protection cathodique.
- Un système anti-incendie avec réservoir d'eau.

#### **I.4. Descriptif de la section N° 02 du projet GR5:**

Le tracé préliminaire de la section N° 2 du gazoduc GR5 prend départ au poste de coupure N°3 de Krechbajusqu'au terminal arrivéedeHassiR'Mel.

- **Itinéraire du tracé du pipeline GR5:**

- **PK 310 -- Station de Compression GR5 et poste de coupure N°03**

La station de compression et le poste de coupure N°03 sont à une distance de 5 km environs de Krechba et sont situés dans un endroit dégagé et parallèle, à 35m de distance, au gazoduc GR3.

- **Du PK 310 au PK 470**

Le tracé du GR5 est parallèle au GR3 et traverse un nombre important d'oueds. Ces oueds sont classés soit mineurs soit majeurs. Dans ces zones, la protection du pipeline est nécessaire. Cette protection est assurée par des dispositifs mécaniques tels que le gabionnage, le lestage et les cavaliers.

- **Du PK 470 au PK 500**

Cette section du tracé est située dans des zones d'agricoles d'El-Goléa. Cette section est d'une longueur de 40 km environ. Au Pk 501 le gazoduc GR5 intercepte un piquage de Sonelgaz qui alimente la ville d'El-Goléa à partir de la vanne de sectionnement N°05 du GR3.

- **Du PK 520 au PK 600**

A partir du Pk 520 le terrain change de configuration et devient plus difficile et accidenté. La présence des zones sableuses nous impose à changer le tracé du gazoduc. Au Pk 590 le terrain devient rocheux et vallonné.

- **Du PK 600 au PK 650**

A l'arrivée au poste de coupure N°07 Pk 650, le terrain change de relief et le pipeline traverse une large zone humide, et à l'approche du PK 662 le pipeline franchit une falaise constituée de roches très dures nécessitant un passage du côté droit afin d'éviter la zone de remblai en parallèle avec le GR3.

- **Du PK 650 au PK 765**

Après avoir franchi les escarpements du Pk 662, le tracé suit son cheminement sans difficulté dans un alignement direct et sans encombrements jusqu'au terminal arrivé de HassiR'Mel au Pk 765 dans un terrain rocheux et dur.

- **Paramètres du tracé :**

Plusieurs paramètres techniques et environnementaux ont été considérés pour la détermination du tracé du gazoduc. Ces paramètres sont :

- L'indice de sinuosité pour un tracé aussi tendu que possible;
- Les accès— position du pipeline relativement aux gisements;
- La limitation, autant que possible, du nombre d'obstacles;
- Le respect des normes de réalisation en vigueur et du règlement de sécurité Algérien pour le transport du gaz par pipeline.

Les principaux outils de travail utilisés sont les cartes topographiques et les positions des pipelines existants. Ces outils permettent de répertorier les obstacles naturels, urbains ou industriels (Zones humides, infrastructures routières, installations industrielles, etc. ...).

- **Protection mécanique**(grtgaz, 2015)

Le franchissement des divers obstacles s'effectue par le biais de protections mécaniques tels que le lestage en béton, cavaliers en béton, gaines ou fonçages horizontaux.

- **Lestage en béton**

Cette technique est utilisée en zones humides. Elle consiste en un lestage en béton armé sur toute la longueur de la conduite enterrée (figure 3). Ce lestage est placé sur la conduite pour équilibrer les poussées des eaux de pluie en cas de crue et éviter le soulèvement des canalisations risquant leurs ruptures.

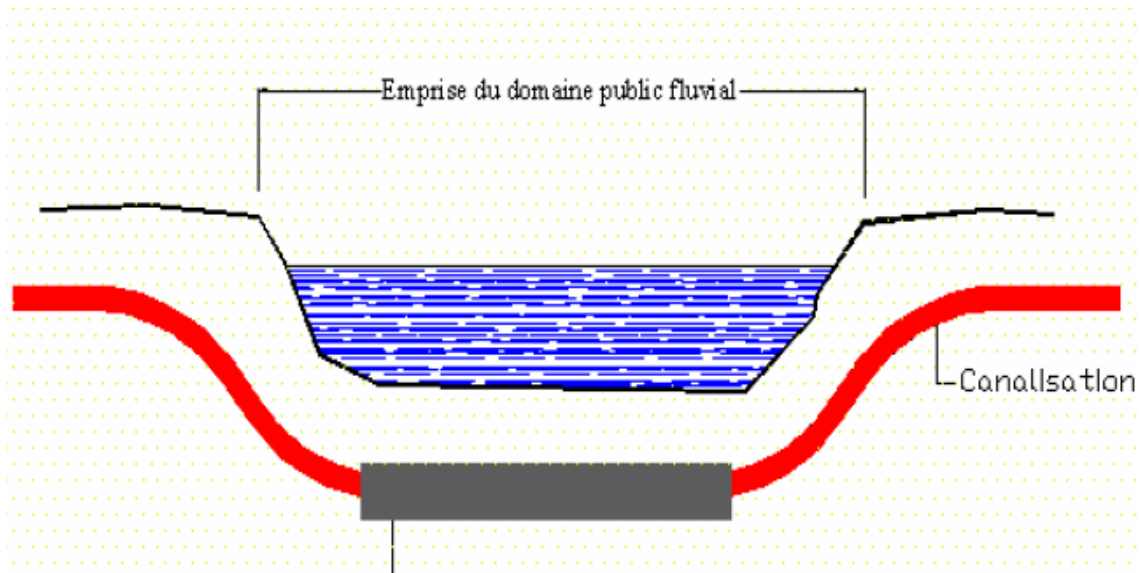


Figure I-5 : lestage en béton

- **Cavalier en béton**

Cette technique est un lestage discontinu en béton armé (figure I.4).

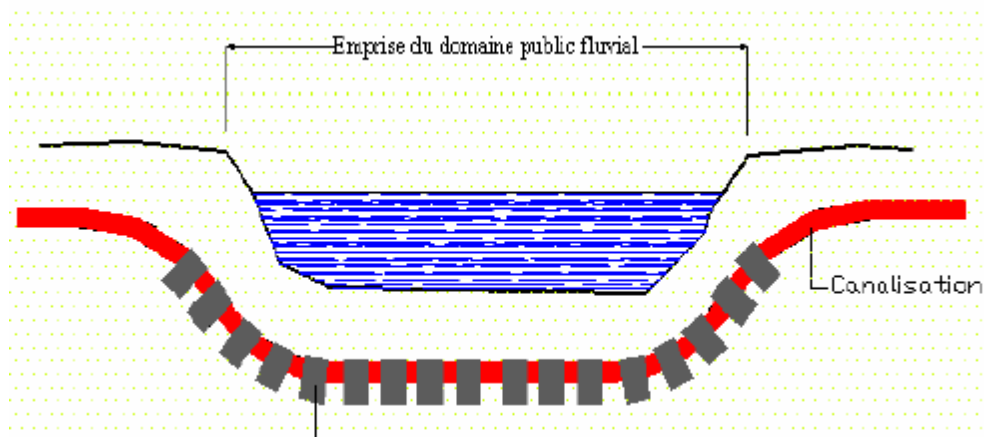


Figure I-6 : cavalier en béton

- **Gaine ou fonçage horizontal**

Le franchissement par gaine ou fonçage horizontal est utilisé pour les traversées des routes, chemins de fer et pistes importantes. La réalisation de cette technique se fait comme suit :

- Exécution d'un trou sous la structure de la chaussée ou du chemin de fer.
- Emplacement d'une gaine en acier ou en béton
- Introduction de la canalisation dans le trou tout en isolant la gaine des tubes

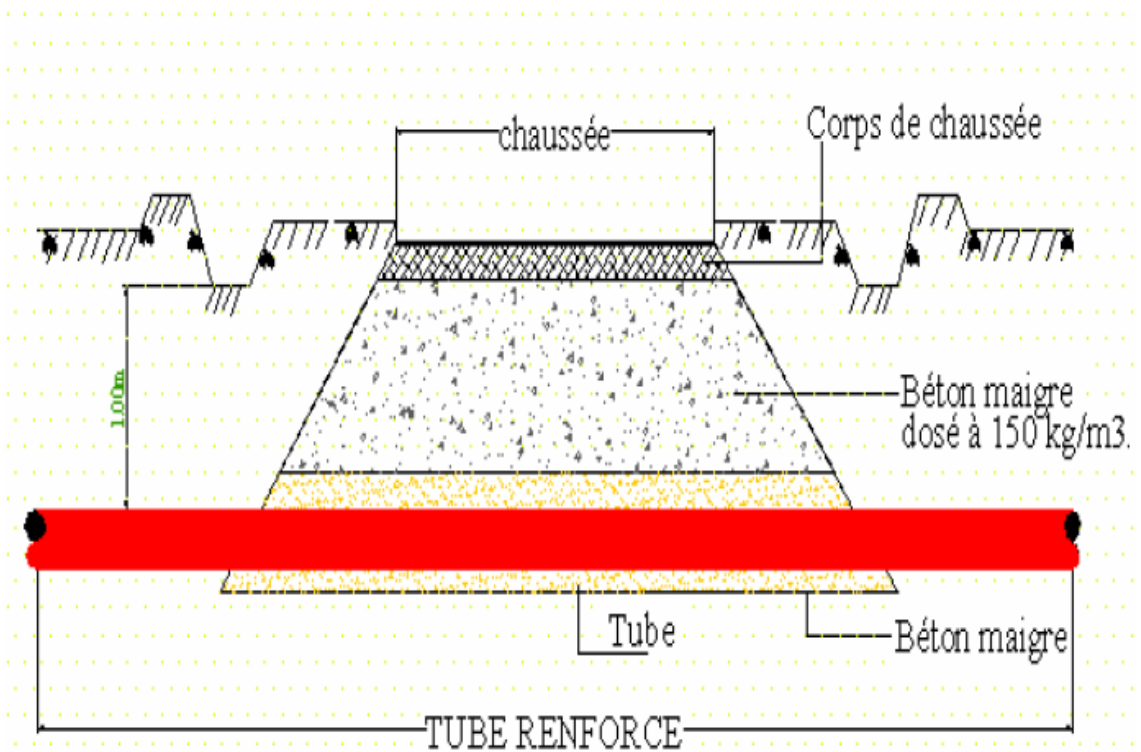


Figure I-7 : fonçage horizontal

- **Descriptif détaillé du tracé du PC05 au PC07 :**

Notre étude portera sur la deuxième section située entre les postes de coupure PC05 et PC07. Cette section est composée d'une canalisation de 230 km, de diamètre 48" soumise à une pression maximale de service de 70 bars. Cette section comprend essentiellement :

- Un terminal arrivé au CNDG;
- Huit postes de sectionnement;
- Trois postes de coupure dont un poste au niveau de la station de compression de HassiR'Mel (PC07);
- Un système SCADA ;
- Un système de Protection Cathodique;
- Une canalisation de 05 km, de diamètre 56", reliant la station de compression GR5 (HassiR'Mel) et le CNDG;

Le gazoduc passe par le poste de coupure PC05 en zone rocheuse située à 534 km du terminal départ. Sur une distance de près de 100 km au delà du poste de coupure PC05 et jusqu'au poste de coupure PC06, la zone est désertique et dépourvue d'obstacles. Le poste de coupure PC06 se trouve sur un terrain sablonneux. Le tronçon du pipeline reliant PC06 au PC07 repose sur un terrain à problèmes. La nature des terrains traversés est indiquée au tableau 1:

**Tableau I-1: Nature et caractéristiques du terrain**

|                     | Postes de coupure | Nature du terrain | Caractéristiques                |
|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|
| Du PK 534 au PK 620 | PC05 au PC 06     | Dur/Tendre        | Argileux ou marneux             |
| Du PK 620 au PK 765 | PC06 au PC07      | Très dur/ Dur     | Argiles avec niveau de gypse 1m |

○ **Obstacles rencontrés entre PC05 et PC07 :**

Le tracé du pipeline nous oblige à rechercher des solutions aux divers obstacles rencontrés. Ces obstacles peuvent être :

- **Des pipelines existants** : La position d'un nouveau pipeline relativement aux pipelines existants est régie par une réglementation.
- **Présence d'ouvrages (pistes, routes etc...)**: Elles sont omniprésentes dans les derniers 100 km.
- **Présence des zones inondables, cours d'eau, Châaba, oueds, sebkha** : Ces derniers sont fréquents et représentent des problèmes majeurs qu'il y'a lieu de solutionner.

Après l'exploitation des cartes topographiques et géologiques de la région et le recensement des structures existantes le long du tracé du pipeline, on peut identifier les différents points singuliers entre les postes de coupure PC05 et PC07. Entre ces deux postes de coupure le pipeline est protégé par divers ouvrages de génie civil.



- **Tableaux des points singuliers du Lot N°02 PK 534 au PK 765 :**

Voici un tableau illustratif de quelques obstacles rencontrés et les protections mécaniques proposées pour chaque cas de figure.

**Tableau I-2 points singuliers du PK 534 au PK765 et leurs protections**

| Obstacles         | Localisation | Nature du terrain   | Catégories(m) |       |        | Protection mécanique (m) |      |     |    |
|-------------------|--------------|---------------------|---------------|-------|--------|--------------------------|------|-----|----|
|                   | PK           |                     | CATIa         | CATII | CATIII | GAINE                    | D.B. | CAV | LC |
| Z.inondables      | 648+700      | Vallonné sablonneux |               |       |        |                          |      | 200 |    |
| Z.inondables      | 653+260      | Sablonneux          |               | 300   |        |                          |      | 300 |    |
| Châaba            | 653+765      | Sablonneux          |               | 9     | 1346   |                          |      | 50  |    |
| Oued              | 657+492      | Vallonné            | 80            |       |        |                          |      |     | 25 |
| Filet d'eau       | 658+517      | Semisablonneux      |               |       | 2810   |                          |      | 60  |    |
| PISTE             | 664+659      | Roche-falaise       |               |       | 3008   |                          | 6    |     |    |
| Route de metlili  | 691+074      | Vallonné            | 84            |       |        | 12                       |      |     |    |
| Pipeline +2câbles | 740+975      | Rocheux             | 130           |       |        | 24                       |      |     |    |
| Fild'eau          | 745+000      | Rocheux             |               |       | 1496   |                          |      | 20  |    |
| Oued              | 749+263      | Rocheux             | 90            |       |        |                          |      |     | 35 |
| L, électrique     | 755+624      | Caillouteux         |               |       | 1173   | 12                       |      |     |    |
| Piste             | 755+776      | Caillouteux         |               |       | 1173   |                          | 6    |     |    |
| Piste             | 756+041      | Rocheux             |               |       | 1173   |                          | 6    |     |    |
| Z. inondables     | 757+152      | Caillouteux         | 300           |       |        |                          |      | 300 |    |
| Z. inondables     | 758+794      | Caillouteux         | 93            |       |        |                          |      | 93  |    |
| Routegoudronnée   | 761+600      | Meuble              | 1955          |       |        | 36                       |      |     |    |

LC : Lestage continue  
CAV : Cavaliers en béton  
D.B. : Dalle en béton  
Gaine : Gaine en acier

**Observations :**

Les obstacles rencontrés le long du tracé du pipeline sont de diverses natures, et pour chaque obstacle une solution particulière est proposée.

Nota : les épaisseurs des tubes en fonction des catégories sont définies par la norme ISO 21809-2:2007 et sont données comme suit :

Ia: 22.22 mm

II: 14.70 mm

III: 12.63 mm

## **I.5. Conclusion**

Le transport par canalisation est généralement le moyen le plus économique pour transporter le gaz naturel sur des grandes distances terrestres. Le choix du tracé de la ligne de gazoduc a été établi par une étude pour assurer la sécurité et réduire les coûts de réalisation. Le tracé du pipeline traverse plusieurs obstacles pour lesquels différentes protections par des ouvrages génie civil ont été proposées. Le chapitre suivant, nous aborderons les différentes phases d'exécution des travaux.

## Chapitre II : ORGANISATION DES TRAVAUX DE POSE DE CANALISATIONS

### II.1) Introduction:

Les travaux de réalisation de canalisations sont décomposés en différentes opérations qui sont réalisées successivement chacune par une équipe spécialisée. Les différentes équipes se succèdent en progressant d'un bout à l'autre du chantier avec une cadence d'avancement de 600 à 1000 m/jour. Les points particuliers tels que croisements de routes, rivières... constituent des « obstacles » à la progression du chantier. Leurs franchissements sont réalisés de manière indépendante par des équipes spécifiques puis raccordés sur les tronçons de canalisation posés de part et d'autre.

### II.1. Les différentes séquences de travaux

Les différentes étapes de la réalisation du chantier sont les suivantes :

#### a) Piquetage-balisage de la piste de travail :

Implantation des piquets afin de visualiser la largeur de la piste de travail.

#### b) Aménagement de la piste de travail :

La réalisation des travaux de pose d'un gazoduc nécessite l'utilisation temporaire d'une bande de terre appelée « piste de travail ». Elle permet :

- la circulation des engins nécessaires à l'approvisionnement et à l'exécution des travaux,
- de disposer d'une place nécessaire pour déposer et assembler les tubes,
- d'effectuer les travaux de terrassement et de stocker les déblais de la tranchée.

#### c) Transport et bardage des tubes :

Répartition des tubes par rapport à leurs épaisseurs le long de la piste de travail en bordure de la future tranchée ;



Figure II-1 : Bardage des tubes

#### **d) Cintrage des tubes :**

Pour assurer les changements de direction et de pente, il est nécessaire de cintrer les tubes afin de leur donner la courbure permanente voulue. Le cintrage des tubes est réalisé sur site, à froid, à l'aide de cintreuses hydrauliques. Un certain nombre de tubes sont cintrés en usine selon les spécificités du chantier. L'ensemble de ces activités fait appel à des compétences et des moyens spécifiques.



**Figure II-2 : Cintreuse en action**

#### **e) Soudage des tubes :**

Le soudage est une opération délicate confiée à des spécialistes sélectionnés avec rigueur (le mode opératoire de soudage ainsi que les soudeurs font l'objet d'épreuves de qualification avant le démarrage du chantier).



**Figure II-3 : Soudure des tubes**

**f) Contrôle des soudures d'assemblage :**

Les soudures sont rigoureusement contrôlées pour s'assurer de la bonne qualité de l'assemblage. La qualité des soudures est contrôlée « au plus près » après leur réalisation pour repérer les éventuels défauts et procéder à leur réparation sans gêner l'avancement général du chantier.

Il existe différents types de contrôle non destructif (gammagraphie, rayons X, ultrasons, TOFD). Quelques coupons témoins sont prélevés. Les résultats sont interprétés compte tenu des tolérances admises dans des spécifications particulières.

**g) Revêtement des joints soudés :**

Reconstitution de l'enrobage extérieur des tubes au droit des joints soudés.

**h) Ouverture de la tranchée :**

Réalisation des terrassements nécessaires à l'enfouissement de la canalisation.



Figure II-4 : Trancheuse en action

**i) Mise en fouille des tronçons :**

Mise en place des tronçons de canalisation au fond de la tranchée.



Figure II-5 : Mise en fouille des tubes

**j) Le lestage :**

Les effets de la poussée d'Archimède doivent parfois être compensés pour assurer une parfaite stabilité de l'ouvrage. Les tronçons de canalisation concernés par le lestage sont les zones inondables.

Les techniques de stabilisation du pipeline dans ces zones sont :

- Lestage par un enrobage béton continu.
- Lestage par anneaux ou des cavaliers de surcharge.

L'installation de ces systèmes nécessite la mise en place préalable d'une protection mécanique du revêtement des tubes.



Figure II-6 : Cavalier de lestage en béton bardés

**k) Remblaiement :**

Remblaiement de la tranchée avec remise en place de la couche de terre végétale.

**l) Franchissement des obstacles particuliers :**

Réalisation des aménagements pour les franchissements d'obstacles.

**m) Raccordements :**

Assemblages par soudage des différents tronçons posés.

**n) Contrôles et épreuves :**

Après sa finition, l'ensemble de la canalisation doit subir, par tronçon des épreuves hydrauliques réglementaires de résistance mécanique et d'étanchéité.

**o) Séchage de la canalisation :**

Élimination de l'eau résiduelle dans la canalisation.

**p) Remise en état des lieux :**

Reconstitution des lieux dans leur état initial.

**q) Équipement de la ligne :**

Construction et aménagement des installations techniques permettant l'entretien de l'ouvrage et l'interruption de transit du gaz en cas de défaut.

## **II.2. Conclusion**

Les étapes de réalisation des gazoducs sont déterminantes. Elles nécessitent des méthodes techniques et organisationnelles assurant une coordination entre les différentes tâches. L'ingénieur génie civil est fortement sollicité dans toutes les étapes de réalisation du pipeline. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude et l'analyse du massif de fondation du turbocompresseur.

## Chapitre III : ANALYSE ET CONCEPTION DU MASSIF DE FONDATION DU TURBO-COMPRESSEUR

L'analyse et la conception de la station de compression suivent les principes établis de la mécanique et de la pratique de l'ingénierie spécifiques aux besoins de la région.

### III.1. Introduction :

L'étude et la conception des fondations des machines vibrantes est assez délicate, compte tenu des effets dynamiques qui génèrent un phénomène de résonance susceptible de nuire au bon fonctionnement de la machine.

Les radiers sont souvent utilisés pour ce type de fondations, puisqu'ils sont constitués d'une dalle continue. Ces derniers permettent de réaliser une surface d'appui continue sous la superstructure et une répartition uniforme des charges tout en résistant à la réaction du sol d'assise, ainsi qu'au bon mode de fondation afin de résister aux vibrations.

### III.2. Turbocompresseur :

Un turbocompresseur est un organe composé d'un compresseur centrifuge entraîné par une turbine à gaz (siemens, 2015). Le rôle de la turbine à gaz est de produire de l'énergie mécanique sous forme de rotation, directement à partir de l'énergie cinétique des gaz produits par la combustion d'un hydrocarbure. Les turbines à gaz peuvent être alimentées soit par le gaz naturel comme dans notre cas, soit par le pétrole.

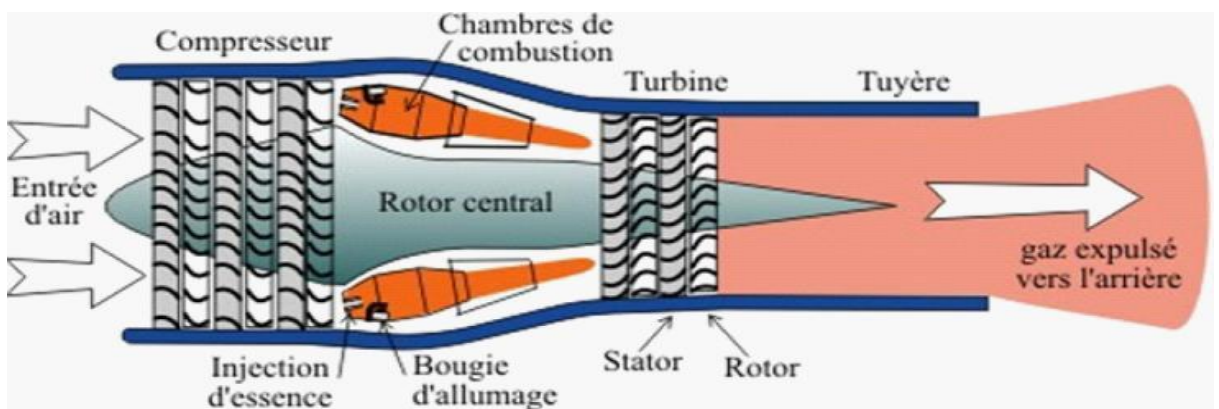


Figure III-1 : Une turbine a gaz industrielle

Les compresseurs centrifuges sont les plus utilisés, ils transforment l'énergie mécanique de rotation pour augmenter la pression du gaz. Ils comportent des organes fixes directeurs et une ou plusieurs zones à aubage dans lesquelles la vitesse du gaz est augmentée. Des organes fixés à la sortie des roues, appelés diffuseurs redressent le courant fluide et transforment la vitesse en pression. Les compresseurs centrifuges sont les plus utilisés dans l'industrie des pipelines en raison du prix, leur souplesse d'exploitation et de leur bon rendement.



### **III.3. Rapport géotechnique :**

Une part importante dans la réalisation des fondations repose sur la reconnaissance de la structure morphologique du sous-sol. L'exploration doit atteindre des profondeurs compatibles avec la portée des contraintes dérivant de la future structure. Même si la physionomie du terrain ne montre pas de signes géotechniques préjudiciables, ceci n'exclut pas d'éventuels problèmes susceptibles de nuire au bon fonctionnement des ouvrages. La caractérisation géotechnique des sites est une étape cruciale pour l'identification des sources probables de difficultés, tels que les failles et l'existence de couches salifères.

#### **III.3.1. Aperçu sur le site:**

Le site -objet de l'étude- est situé dans la commune de HassiR'Mel à 120 km au Sud-est de la ville de Laghouat chef-lieu de la Wilaya. Le site est localisé au Sud du complexe gazier de HassiR'Mel. Il s'étend sur une superficie rectangulaire de 36.55 ha (430m x 850m) et est délimité au nord par la route d'accès vers le complexe gazier.

La surface du terrain est sablo-caillouteuse rouge-jaunâtre. Les matériaux caillouteux, blocs de calcaire plus ou moins volumineux, sont de taille demi-décimétrique à une taille de pierres ou de galets.

La topographie du site est typique d'un paysage aride, et est assez ondulée dans son enceinte. Une dénivelée d'environ 6m est observable sur le site entre le point le plus haut et le plus bas. Le site est classé selon le Règlement Parasismique Algérien RPA 2003 en zone 1 (faible sismicité).

#### **III.3.2. Essai IN-SITU :**

- **Sismique réfraction:**

Avant tout commencement il est nécessaire de donner une approximation sur la nature du sol, afin d'avoir une idée sur le type d'essais et les matériels qu'il faut utiliser par la suite de l'étude géotechnique.

L'essai sismique réfraction consiste à envoyer des ondes depuis un générateur de vibrations vers des capteurs sismiques à travers le sol. La mesure de la vitesse de propagation des ondes permet de visualiser le site.

Douze essais de sismique réfraction ont été effectués dans le cadre de la campagne de reconnaissance géotechnique. Les résultats des essais géophysiques sont donnés en tableau 1 de l'annexe comprenant les vitesses de propagation des ondes émises, les épaisseurs probables des couches traversées et la nature des formations rencontrées.

○ **Sondages carottés :**

Le carottage d'extraction d'échantillons et reconnaissance du sous-sol permet de mettre l'accent sur la structure lithologique et la nature des matériaux rencontrés.

Quinze sondages ont été réalisés. Leurs résultats sont indiqués au tableau 2 de l'annexe. Les sondages sont nommés BH1 à BH15, différents matériaux et leurs stratifications ont été mis en évidence.

**L'essai down-hole :**

L'essai Down-hole mesure les vitesses des ondes de compression ( $C_p$ ) et de cisaillement ( $C_s$ ) servant à déterminer les caractéristiques dynamiques des couches de sol rencontrées.

Les sondages Down-hole réalisés ont été effectués dans les sondages carottés BH08 et BH10, par pas de 1m depuis la surface du terrain jusqu'au terme des puits. Les résultats obtenus de la campagne de sondage sont résumés dans les tableaux 3 et 4 de l'annexe.

En conclusion les deux essais Down-hole réalisés confirment que le terrain est non vulnérable aux sollicitations sismiques conformément au DTR-BC 248 du RPA-99.

Les valeurs obtenues du module d'Young, coefficient de Poisson et du module de cisaillement montrent un sol assez bien ferme et de très faible déformabilité aussi bien en compression qu'en cisaillement. Les valeurs recommandées à prendre en compte sont:

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| Modules d'élasticité dynamique   | : E=1548 MPa;   |
| Coefficient de Poisson           | : $\nu = 0.3$ ; |
| Module de cisaillement dynamique | : G= 1186 MPa.  |

○ **Portance du sol :**

- **L'essai SPT (Standard Penetration Test)**

L'essai SPT consiste à compter le nombre de coups « N » nécessaire pour l'enfoncement d'un carottier standard à une profondeur de 30 cm sous une énergie de percussion donnée. Le nombre de coups N enregistré au niveau de tous les sondages est supérieur à 50, les sols testés sont très denses ou très compacts.

- **L'essai PLT (Point Load Test)**

Cet essai consiste à comprimer la roche entre deux pointes calibrées pour déterminer l'indice  $I_s$ , qui déterminera la capacité portante du sol, le résultat obtenu est de **5,5 bars**.

Tableau III-1 : Capacité portante du sol.

| Equipement       | Dimensions | $\sigma_{sol}$ (MPa) |
|------------------|------------|----------------------|
| Turbocompresseur | 5m x18m    | 0.55                 |

### III.3.3. Essai au laboratoire:

Les essais de laboratoire ont été réalisés afin de d'identifier le comportement mécanique du sol.

- Le tableau 5 (Voir annexe) indique l'ensemble des essais de laboratoire réalisés. Pour certains échantillons, l'analyse granulométrique est effectuée à double méthode (voie sèche et voie humide). Par ailleurs, la densité sèche du sol est mesurée dans tous les sondages carottés effectués.
- L'essai triaxial a donné les résultats suivants :
  - $\Phi = 35^\circ - 40^\circ$  Angle de frottement interne.
  - $C = 0,0 \text{ kN} / \text{m}^2$  Terme de cohésion du sol.
- Les poids volumiques secs apparaissent sur le tableau 6 de l'annexe, Le reste des résultats des essais de laboratoire sont regroupés dans le tableau 7 de l'annexe, Les résultats obtenus de mesure du poids volumique des grains solides sont assez proches de l'intervalle des valeurs usuellement rencontrées dans la littérature ( $21 \text{ kN} / \text{m}^3$ ).
- Le poids volumique apparent, quant à lui, est reconnu élevé malgré le remaniement occasionné par l'opération de carottage. Cette constatation permet de conclure que la phase sableuse du sol en place est assez bien compacte, voir du type gréseux.
- Les courbes granulométriques représentatives des analyses réalisées sont montrées en figure suivante:

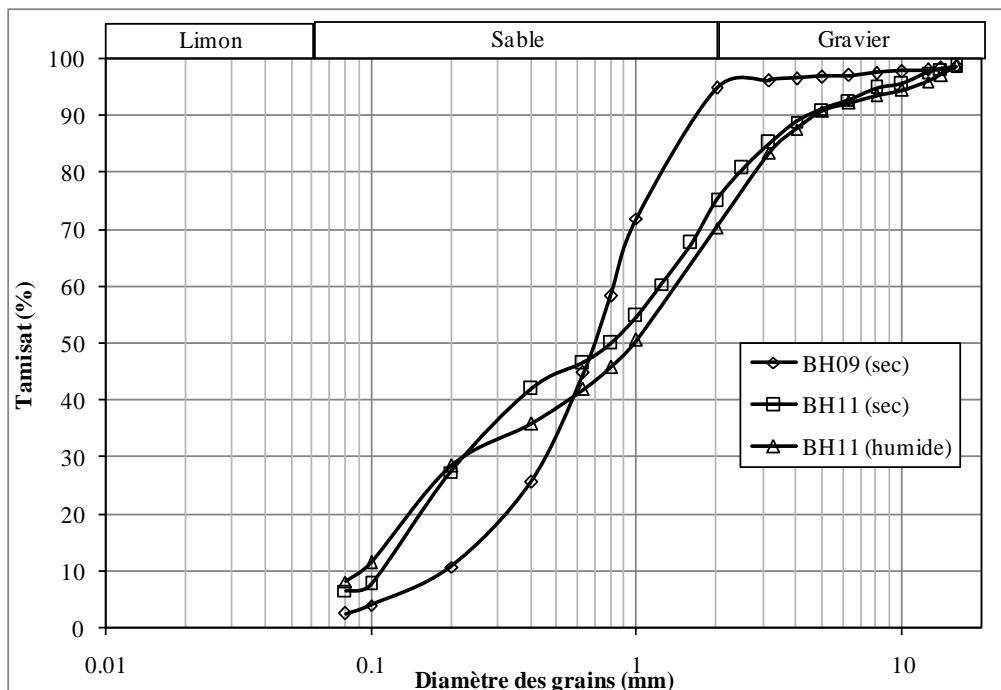


Figure III-2 : Résultats des analyses granulométriques

Les résultats des essais granulométriques montrent que les éléments détritiques contenus dans le sous-sol sont en grande majorité de dimension sableuse. La composition centésimale issue des analyses granulométriques effectuées est:

- 70% à 95% de sable réparti en:
  - 10% à 27% de sable fin (grains de dimension comprise entre 0.06mm et 0.2mm)
  - environ 33% de sable moyen (grains de dimension comprise entre 0.2mm et 0.6mm)
  - 30% à 50% de sable grossier (grains de dimension comprise entre 0.6mm et 2mm).
- 5% à 30% d'éléments graveleux fins à moyens. Les éléments graveleux grossier ( $\phi > 20\text{mm}$ ) doivent avoir été broyés lors de l'opération de carottage.

Une telle composition granulométrique des éléments détritiques contenus dans le sol est synonyme de qualité mécanique appréciable. Les modules graveleux supportés par le sable constituent, en effet, un squelette de grande inertie mécanique.

- Enfin, les résultats des essais chimiques sont assez informatifs de l'action et sensibilité chimiques du terrain. Le taux des sulfates ( $\text{SO}_3^{2-}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) dépasse 2.5% dans les deux échantillons testés, ce qui permet de juger de l'agressivité du terrain contre le béton en infrastructure. Les éléments structuraux enterrés ou en contact direct avec le sol devront être réalisés en béton résistant aux sulfates. Les conduites en acier enterrées sont à protéger contre l'agression du sol par mise en œuvre d'une couche d'enrobage en matériau bitumineux. Etant donné le pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  le site est jugé comme terrain marneux.

### **III.3.4. Conclusion sur le rapport géotechnique:**

Au terme de l'étude géotechnique complète relative au projet de réalisation de la station de compression GR5 dans la région de HassiR'Mel, les conclusions ci-dessous sont dégagées:

- 1- La topographie du site est, en gros, en pente douce du S-O vers le N-E.
- 2- L'exploration du sous-sol au biais de sondages carottés montre une structure macro-homogène du site. La lithologie du site est partout sablo-calcaire vers la surface à calcaire saine à partir de 3m de profondeur.
- 3- La nappe phréatique est inexistante à portée des sondages carottés.
- 4- L'angle du frottement interne du sol en surface est :  $\Phi = 35^\circ - 40^\circ$ .
- 5- Les résultats des essais PLT sont excellents et signes d'une bonne capacité portante du sol.
- 6- Les campagnes géophysiques réalisées confirment la structure du sous-sol et la présence de matériaux de bonne qualité mécanique:
  - a. Couche superficielle formée de sable et cailloux alluvionnaires
  - b. Couche sous-jacente constituée de mélange de sable et de calcaire altéré
  - c. Substratum calcaire saint.
- 7- Les résultats des essais de laboratoire convergent tous vers l'appréciation de la bonne qualité mécanique du sol.
- 8- Le sol est jugé agressif en matière chimique vu qu'il contient un taux de calcaire plutôt élevé, ainsi qu'un pourcentage considérablement haut en sulfates et en  $\text{CaCO}_3$ . Les futures fondations doivent donc être réalisées en béton à base de ciment résistant aux sulfates.

### III.4. Chargements :

Les charges sont transmises à la fondation via des supports d'ancrages de la machine, les ancres de la turbine sont nommées de A1 jusqu'à A6, ceux du compresseur sont nommés E1 jusqu'à E8. Les valeurs de ces charges ont été calculées par le constructeur de la machine.

Les charges considérées sont :

- Poids propre des machines : issue de l'étude mécanique
- Charges sismiques : issues du RPA 99 modifié 2003
- Charges d'opération : issue de l'étude mécanique
- Charges thermique : issue de l'étude mécanique
- Charges du vent : norme neige et vent 65
- Perte de la lame : issue de l'étude mécanique.

#### III.4.1. Chargement de la turbine :

- Charge de la machine au repos:

Tableau III-2 : Charges de la machine au repos

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | 0.1     | -3      | -156    | 3.3       | 0.1       | 0         |
| A2 | 5.2     | 5.3     | -191    | -4,6      | 1.1       | -0,3      |
| A3 | -4,5    | 2.8     | -214,7  | 2.7       | -0,7      | -0,2      |
| A4 | -4,3    | -5,6    | -221,6  | -3,5      | -0,7      | 0.2       |
| A5 | 2.4     | 4.3     | -160,2  | -0,8      | 0.2       | 0         |
| A6 | 1.1     | -3,8    | -153,9  | 0.3       | 0         | 0         |

- Charge d'opération

Tableau III-3 : Charges d'opérations

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | -0,2    | 0       | -0,8    | 0         | 0         | 0         |
| A2 | 0.1     | 0       | 1.2     | 0         | 0         | 0         |
| A3 | -1      | -0,2    | -6,9    | 0.1       | -0,2      | 0         |
| A4 | 0.6     | 0.4     | 5.1     | 0         | 0.1       | 0         |
| A5 | 0.9     | 0       | -13,2   | 0         | 0.2       | 0         |
| A6 | -0,4    | -0,1    | 5.4     | 0         | -0,1      | 0         |

- Charge du vent:

Les charges du vent sont régis par le règlement neige et vent 65.

- Charge du vent +X

Tableau III-4 : Charges du vent selon +X

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | 42,8    | 6,8     | 79.9    | -3,7      | 12,8      | 2,1       |
| A2 | 36.6    | 0.1     | 87.4    | 0.5       | 11.2      | -1,8      |
| A3 | 50.8    | 2       | 23.4    | -1,2      | 14.3      | 2.5       |
| A4 | 47.1    | 2.2     | 51.9    | 0.4       | 13.3      | -2,3      |
| A5 | 36.5    | 0.3     | -86,7   | -0,1      | 13        | 0         |
| A6 | 46,7    | -0,2    | -107,7  | -0,1      | 16,4      | 0         |

- Charge du vent -X

Tableau III-5 : Charges du vent selon -X

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | -42,3   | -1,4    | -64,2   | 0.6       | -12,5     | -2,1      |
| A2 | -43,2   | 5       | -46,7   | -2,3      | -12,7     | 2.1       |
| A3 | -48,3   | 2.4     | -22,2   | -0,3      | -13,4     | 2.4       |
| A4 | -47     | 3.9     | -47,7   | -1,9      | -13,4     | 2.3       |
| A5 | -34,4   | -0,5    | 103     | 0         | -12,5     | 0         |
| A6 | -45,2   | 1.7     | 126,2   | -0,2      | -16,1     | 0         |

- Charge du vent +Y

Tableau III-6 : Charges du vent selon +Y

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | 36,6    | 76.8    | -279,2  | -34,4     | 9.6       | 1.8       |
| A2 | -44,3   | 75,6    | 314     | -33,5     | -11,4     | 2.2       |
| A3 | 3.7     | 100.9   | -99,9   | -28       | 1.3       | 0.2       |
| A4 | -7,4    | 100,7   | 90.2    | -28,1     | -2,5      | 0.4       |
| A5 | -55,6   | 28.2    | -194,2  | -10,2     | -12,6     | 0         |
| A6 | 66.3    | 36      | 217.5   | -13       | 16.4      | 0         |

- Charge du vent -Y

Tableau III-7 : Charges du vent selon -Y

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | -37     | -77,5   | 290.6   | 34,6      | -9,9      | -1,8      |
| A2 | 45      | -77,1   | -292,5  | 34,4      | 11,5      | -2,2      |
| A3 | -3,5    | -100,7  | 122.6   | 27.7      | -1,3      | -0,2      |
| A4 | 8.4     | -102    | -64,1   | 28.8      | 2.8       | -0,4      |
| A5 | 55      | -28,4   | 210,9   | 10.3      | 12,7      | 0         |
| A6 | -68,6   | -36     | -219,2  | 13        | -16,7     | 0         |

o Charge thermique

Tableau III-8 : Charges thermique

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | 110     | 110     | 0       | 44        | 44        | 0         |
| A2 | 110     | 110     | 0       | 44        | 44        | 0         |
| A3 | 110     | 110     | 0       | 44        | 44        | 0         |
| A4 | 110     | 110     | 0       | 44        | 44        | 0         |
| A5 | 220     | 110     | 0       | 88        | 44        | 0         |
| A6 | 220     | 110     | 0       | 88        | 44        | 0         |

o Charge sismique

Les charges sismique sont régies par le règlement RPA et qui classifie la zone de HassiR'Mel en zone 1. Ces charges sont déterminées à partir d'un modèle mécanique, En appliquant des sollicitations conformement aux normes RPA99 modifié 2003, et on calculant leur réactions.



- Suivant la direction X

Tableau III-9 : Charges sismiques selon la direction X

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | 80      | 4.2     | 98.5    | 2.3       | 23.8      | 3.9       |
| A2 | 78.4    | 3.9     | 84      | 2.1       | 23.3      | 3.8       |
| A3 | 97.9    | 3.4     | 7.8     | 0.4       | 27.4      | 4.8       |
| A4 | 95.1    | 4.9     | 40.9    | 0.3       | 26.6      | 4.7       |
| A5 | 85.7    | 0       | 106.5   | 0.1       | 27.8      | 0         |
| A6 | 112.5   | 1.8     | 124.4   | 0.3       | 36.5      | 0         |

- Suivant la direction Y

Tableau III-10 : Charges sismiques selon la direction X

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | 12.5    | 75.8    | 214.3   | 34        | 2.8       | 0.6       |
| A2 | 19.4    | 76      | 199.2   | 34.2      | 4.3       | 0.9       |
| A3 | 22.3    | 150.8   | 117.5   | 42.2      | 5.4       | 1.1       |
| A4 | 18.6    | 149.2   | 145.5   | 41.1      | 4.2       | 0.9       |
| A5 | 44.6    | 42.5    | 183.4   | 15.3      | 11.7      | 0         |
| A6 | 55.3    | 55.1    | 170.7   | 20        | 15.4      | 0         |

- Suivant la direction Z

Tableau III-11 : Charges sismiques selon la direction +Z

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | 0.3     | 0.6     | 32.7    | 0.7       | 0.1       | 0         |
| A2 | 1.4     | 1.1     | 38.3    | 0.9       | 0.3       | 0.1       |
| A3 | 1       | 0.6     | 41      | 0.5       | 0.2       | 0         |
| A4 | 1       | 1.2     | 43.9    | 0.7       | 0.2       | 0         |
| A5 | 0.3     | 0.9     | 32.7    | 0.2       | 0         | 0         |
| A6 | 0       | 0.8     | 31.2    | 0.1       | 0.1       | 0         |

○ Charge de la perte de lame

- Suivant la direction -Z

**Tableau III-12 : Charges sismiques selon la direction -Z**

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz(kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|--------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | -1,1    | 0.6     | 4.1    | -0,3      | -0,2      | -0,1      |
| A2 | -1      | 0.2     | 3      | -0,1      | -0,2      | 0         |
| A3 | -5,8    | 1,6     | -83,7  | 1         | -1,1      | -0,3      |
| A4 | -6,6    | -3,2    | -80,5  | -1,2      | -1,2      | 0.3       |
| A5 | -7      | 1       | -106,1 | -0,3      | 1.4       | 0         |
| A6 | -7,4    | -0,2    | -108,8 | -0,2      | 1.8       | 0         |

- Suivant la direction +Y

**Tableau III-13 : Charges sismiques selon la direction +Y**

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz(kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|--------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | -35,1   | 1.9     | -17,8  | -0,8      | -10,2     | -1,7      |
| A2 | 32.3    | 2       | 15.5   | -0,9      | 9.3       | -1,6      |
| A3 | -53,1   | 98,3    | -92,1  | -27,3     | -14       | -2,6      |
| A4 | 50.6    | 98.5    | 96.4   | -27,1     | 13,1      | -2,5      |
| A5 | -20,8   | 38,6    | -99,4  | -14,1     | -8,4      | 0         |
| A6 | 26,1    | 50,8    | 97,4   | -18,8     | 9.8       | 0         |

- Suivant la direction +Y -Z avec un angle 315°

**Tableau III-14 : Charges sismiques selon la direction +Y -Z avec un angle 315°**

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz(kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|--------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | -25,2   | 1.9     | -9,5   | -0,8      | -7,3      | -1,2      |
| A2 | 21.8    | 1.7     | 12.9   | -0,8      | 6.4       | -1,1      |
| A3 | -41,1   | 69.9    | -123,9 | -18,4     | -10,5     | -2        |
| A4 | 30,6    | 66,7    | 10,7   | -19,8     | 8.3       | -1,5      |
| A5 | -9,4    | 27.6    | -144,6 | -10       | -4,9      | 0         |
| A6 | 23,3    | 35,3    | -9,1   | -13,2     | 8,1       | 0         |

- Suivant la direction +Y -Z avec un angle 225°

Tableau III-15 : Charges sismiques selon la direction +Y-Z avec un angle 225°

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz(kN) | Mx (kN.m) | My (kN.m) | Mz (kN.m) |
|----|---------|---------|--------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | 23.7    | -1      | 15.3   | 0.4       | 7         | 1.2       |
| A2 | -23,2   | -1,4    | -8,7   | 0.6       | -6,6      | 1.1       |
| A3 | 32.9    | -67,7   | 5.4    | 19.8      | 8.9       | 1.6       |
| A4 | -40     | -71,2   | -124,6 | 18.1      | -10       | 2         |
| A5 | 19.4    | -26,2   | -5,7   | 9.6       | 6.8       | 0         |
| A6 | -12,8   | -35,6   | -145,1 | 13        | -5,5      | 0         |

### III.4.2. Chargement du compresseur :

Tableau III-16 : Charges statique et dynamique du compresseur

|    | CHARGEMENT STATIQUE           |                    | CHARGEMENT DYNAMIQUE  |        |
|----|-------------------------------|--------------------|-----------------------|--------|
|    | Charge de la machine au repos | Charge d'opération | Charge de balancement |        |
|    | Fz(kN)                        | Fz (kN)            | Fy (kN)               | Fz(kN) |
| E1 | -51,4                         | -0,6               | 1                     | 1.5    |
| E2 | -50,9                         | 0.5                | 1                     | 1.5    |
| E3 | -58                           | -0,5               | 1                     | 1.5    |
| E4 | -55,7                         | 0.5                | 1                     | 1.5    |
| E5 | -44,3                         | -0,3               | 0.6                   | 0.9    |
| E6 | -37,5                         | 0.4                | 0.6                   | 0.9    |
| E7 | -26,9                         | -0,2               | 0.4                   | 0.6    |
| E8 | -24,8                         | 0.2                | 0.4                   | 0.6    |

- Charge de la buse du compresseur :

**Tableau III-17 : Charges de la buse du compresseur**

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) |
|----|---------|---------|---------|
| E1 | 3.03    | 11.66   | 30.7    |
| E2 | 3.04    | 11.57   | 30.23   |
| E3 | 12.06   | 13.87   | 73.22   |
| E4 | 11.62   | 13.47   | 72.41   |
| E5 | 12.06   | 13.87   | 73.22   |
| E6 | 11.62   | 13.47   | 72.05   |
| E7 | 3.03    | 11.66   | 30.7    |
| E8 | 3.04    | 11.57   | 30.23   |

- Charge sismique :

**Tableau III-18 : Charges sismiques**

|    | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) |
|----|---------|---------|---------|
| E1 | 20.59   | 20.59   | 9.15    |
| E2 | 19.16   | 19.16   | 8.51    |
| E3 | 26.5    | 26.5    | 11.78   |
| E4 | 23.64   | 23.64   | 10.51   |
| E5 | 16.02   | 16.02   | 7.12    |
| E6 | 15.32   | 15.32   | 6.81    |
| E7 | 10.12   | 10.12   | 4.5     |
| E8 | 9.93    | 9.93    | 4.41    |

### III.4.3. Combinaison de charge :

Dans ce type de structure la combinaison de charge à prendre en compte suit un choix précis vu les différentes variantes qui peuvent changer énormément les sollicitations.

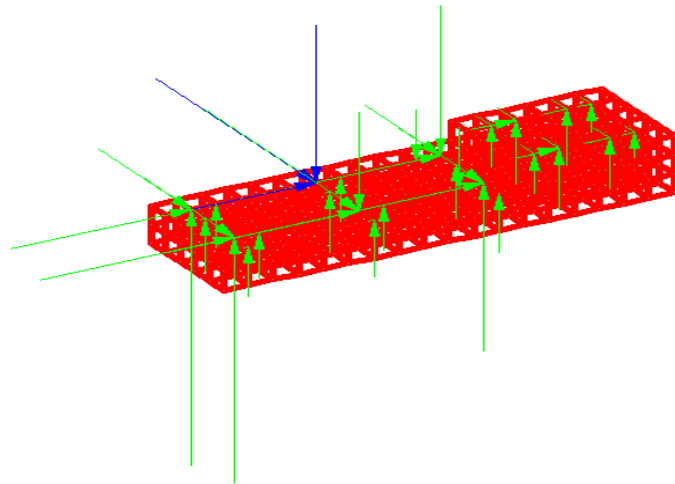


Figure III-3 : Le massif et les différentes charges qui lui sont appliquées

Tel qu'il est prescrit dans la norme ACI-318 au chapitre 9 section 2 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008) les charges à prendre en compte sont : la charge permanente, charge d'exploitation, charge sismique et charge de neige et vent. les combinaisons de charge à prendre pour le calcul sont les suivantes :

$$1.4 DL$$

$$1.4 DL + 1.7 LL$$

$$0.9 DL + 1.3 WL$$

$$0.75 (1.4 DL + 1.7 LL + 1.7 WL)$$

$$0.9 DL + 1.3 * 1.1 EL$$

$$0.75 (1.4 DL + 1.7 LL + 1.7 * 1.1 EL)$$

$$0.75 (1.4DL+1.7LL+1.4T) +1.6WL +1.1EL$$

Ou :

DL: charge permanente

LL: charge d'exploitation

T : charge thermique

WL : charge de la neige et du vent

EL : charge sismique

Pour le dimensionnement de la fondation la combinaison à prendre est la plus défavorable et cela par des combinaisons logique de charges, dans cette perspective on a étudié à l'aide du logiciel STAAD PRO les cas possibles, plus de 70 combinaisons ont été avancé par ce logiciel ou on a tiré la combinaison la plus contraignante.

Voici dans le tableau suivant un extrait de combinaisons de charge qu'on peut générer avec la norme ACI

**Tableau III-19 : combinaisons de charges**

| Combinaison | Permanente | Charge de fonctionnement | Charge de neige | Charge de sable | Charge du vent | Charge sismique |
|-------------|------------|--------------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 1           | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 1.6             | 1.6             | 1.6            | 0               |
| 2           | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 1.6             | 1.6             | 1.6            | 1.1             |
| 3           | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 1.6             | 1.6             | 0              | 1.1             |
| 4           | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 1.6             | 0               | 0              | 1.1             |
| 5           | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 0               | 1.6             | 0              | 0               |
| 6           | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 0               | 1.6             | 0              | 1.1             |
| 7           | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 0               | 0               | 0              | 1.1             |
| 8           | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 0               | 0               | 1.6            | 1.1             |
| 9           | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 0               | 0               | 1.6            | 1.1             |
| 10          | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 0               | 1.6             | 1.6            | 0               |
| 11          | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 0               | 0               | 0              | 1.1             |
| 12          | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 0               | 1.6             | 0              | 0               |
| 13          | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 1.6             | 1.6             | 0              | 0               |
| 14          | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 1.6             | 0               | 1.6            | 1.1             |
| 15          | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 1.6             | 0               | 0              | 0               |
| 16          | 0.75 X 1.4 | 0.75 X 1.4               | 1.6             | 0               | 1.6            | 0               |

### III.5. Dimensionnement :

La longueur et la largeur de la fondation sont fixées par le constructeur, en imposant une hauteur de 1m entre l'assise de la turbine à celle du compresseur, et en exigeant une élévation de 0.5m de l'assise de la turbine par rapport au sol, seule l'épaisseur a été considérée comme une variante à déterminer.

- **Calcul de l'épaisseur :**

Le calcul de l'épaisseur pourra être fait par la méthode de cône (qui simplifie énormément les calculs) pour l'étude de la résonance des fondations sous machine vibrante.

Le principe du calcul est de dimensionner l'épaisseur de telle sorte à avoir une fréquence (propre du système sol-fondation) égale à la moitié de la fréquence d'opération de la machine; afin d'éviter le phénomène de résonance.

Dans notre cas la fréquence opérationnelle de la machine est de 7700 tpm, et la fréquence du système sols-fondations souhaitée est de 3850 tpm.

On a :

$$\omega^2 = \frac{K_v}{M} \quad (\text{III.02})$$

Ou :

$\omega$  : est la fréquence propre du système

$M$  : est la masse

$K_v$  : la raideur du système déterminée par la méthode de cône.

L'expression de  $K_v$  dans la méthode de cône est :

$$K_v = \frac{G \times b}{2 - \nu} \times \left[ 6,8 \left( \frac{a}{b} \right)^{0,65} + 0,8 \left( \frac{a}{b} \right) + 1,6 \right] \quad (\text{III.03})$$

L'expression de la masse est :

$$M = \rho \times V = \rho \times S \times H \quad (\text{III.04})$$

Dans la méthode de cône on prend un disque avec un rayon équivalent pour déterminer la surface  $S$  :

$$S = \pi \times R^2 \quad (\text{III.05})$$

Avec :

$$R = \sqrt{\frac{a \times b}{\pi}} \quad (\text{III.06})$$

Donc :

$$M = \rho \times S \times H = \rho \times \pi \times R^2 \times H \quad (\text{III.07})$$

Ce qui donne :

$$\omega^2 = \frac{K_V}{\rho \times \pi \times R^2 \times H} \quad (\text{III.09})$$

L'expression de H devient donc :

$$H = \frac{K_V}{\rho \times \pi \times R^2 \times \omega^2} \quad (\text{III.10})$$

➤ **Application numérique**

$$K_V = 7 \times 10^{10} \text{ N/m}$$

$$\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$\omega = \frac{3850 \times 2 \times \pi}{60}$$

$$R = 5,28\text{m}$$

On trouve l'épaisseur **H=1.98m**

**On prend H=2m**



- **Géométrie du radier :**

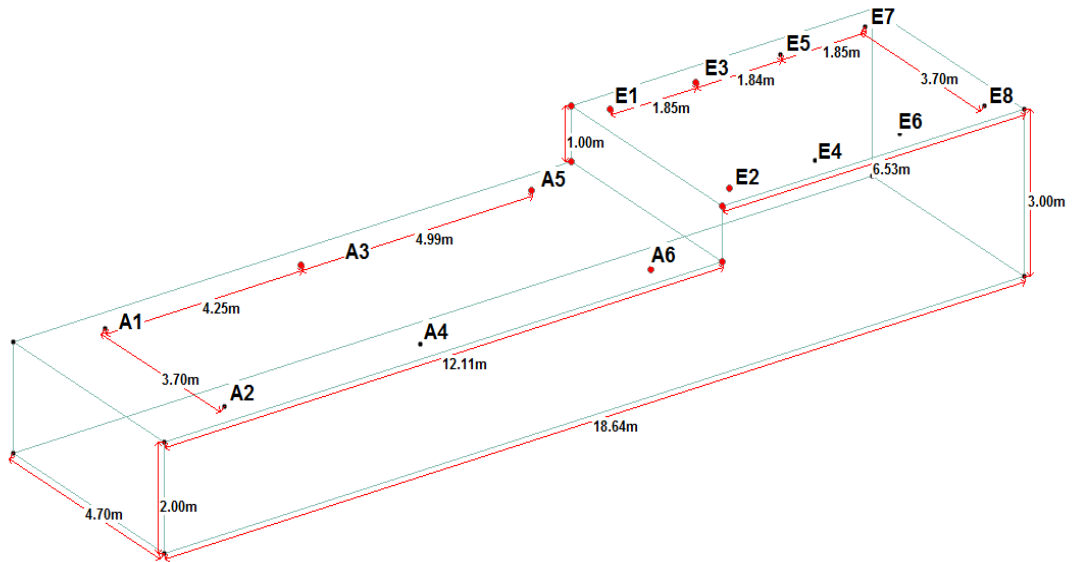


Figure III-4 : Géométrie du radier vu isométrique

### III.6. Vérification de la portance du sol :

La portance du sol est acceptable si elle demeure supérieure à la contrainte appliquée sur le sol (J.COSTET, 2001).

Le poids de turbocompresseur est donné :  $M_m = 135 \text{ T}$

Le poids de la fondation est :  $M_f = \rho \times V = 514 \text{ T}$

$$\sigma_{app} = \frac{(M_f + M_m) \times 10}{S} = \frac{(M_f + M_m) \times 10}{18,645 \times 4,7} = 0,074 \text{ MPa}$$

Selon la norme EN1992-1-1 le facteur de sécurité pour la capacité portante des radiers est de 2.

La capacité portante du sol est de 0,55 MPa donc :

$$\frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{app}} = \frac{0,55}{0,074} = 7,43 > 2$$

La capacité portante du sol aussi sécurisée soit elle, est nettement supérieure à la contrainte appliquée par le turbocompresseur.

### III.7. Le ferrailage

- **Hypothèses :**

- Calculs suivant la norme : ACI 318-08
- Méthode de calcul de la section d'acier : Analytique
- Flèche admissible : 3mm
- Type de calcul : flexion + compression/traction

- **Caractéristiques du ferrailage :**

- Type : RADIER GENERAL
- Direction armatures principales : pas de direction privilégiée
- Classe d'armatures : HA avec résistance caractéristique = 400,00 MPa
- Enrobage : inférieur 5 (cm)  
: Supérieur 5 (cm)

- **Caractéristiques du béton**

- Classe : BETON25
- résistance caractéristique : 25,00 MPa
- Densité : 2500 (kg/m<sup>3</sup>)

- **Remarque :**

D'après le rapport géotechnique concernant le taux de sulfates dans le sol, on a opté pour le ciment CRS qui est résistant aux sulfates pour la formulation du béton.

- **Résultats :**

Le ferrailage de la fondation du turbocompresseur sera calculé par deux logiciels différents STAAD-PRO et Robot structural analysis, les résultats diffèrent à des centièmes près, On illustrera dans ce qui suit les sollicitations du turbocompresseur sur l'assise sont calculés par le logiciel STAAD PRO.

- **Sollicitations :**

Les figures suivantes représentent la distribution de contraintes sur l'assise du turbocompresseur.

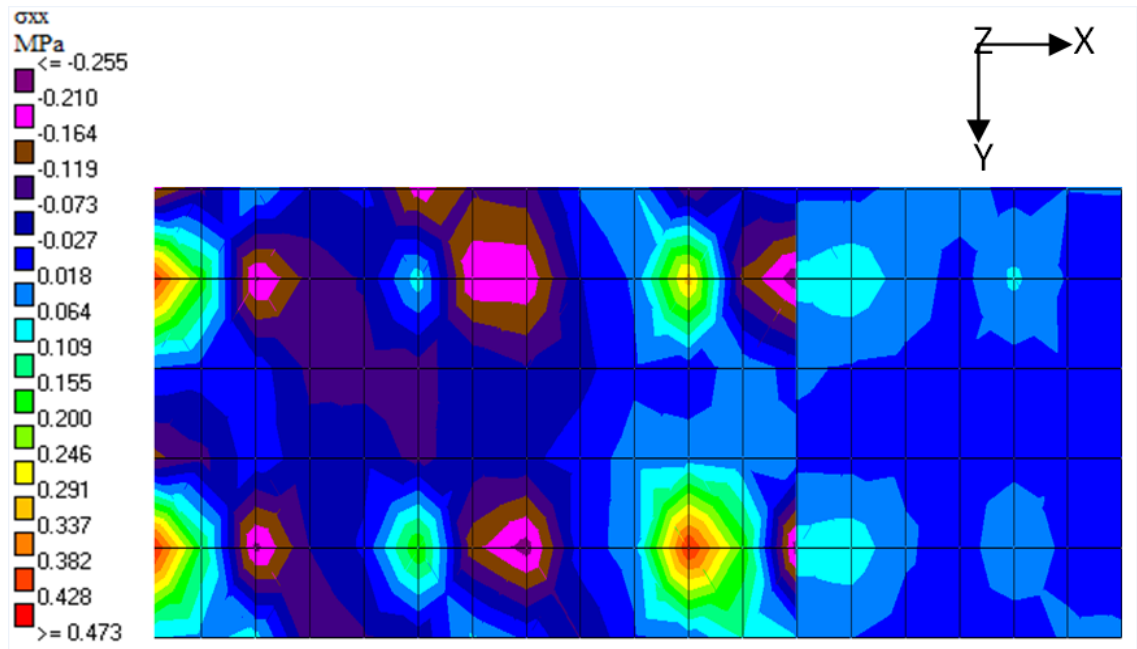


Figure III-5 : Distribution de contraintes  $\sigma_{xx}$  (MPa) sur l'assise du turbocompresseur.

**Interprétation :**

Les concentrations de contraintes normales  $\sigma_{xx}$  (MPa) se situent au voisinage des points d'ancrages.

La valeur maximale de  $\sigma_{xx}$  est de 0,473 MPa elle est due aux forces de la turbine revenant a l'ancrage A6, sa valeur minimale atteint -0,255MPa au voisinage du décrochement de la section et à l'ancrage A4.

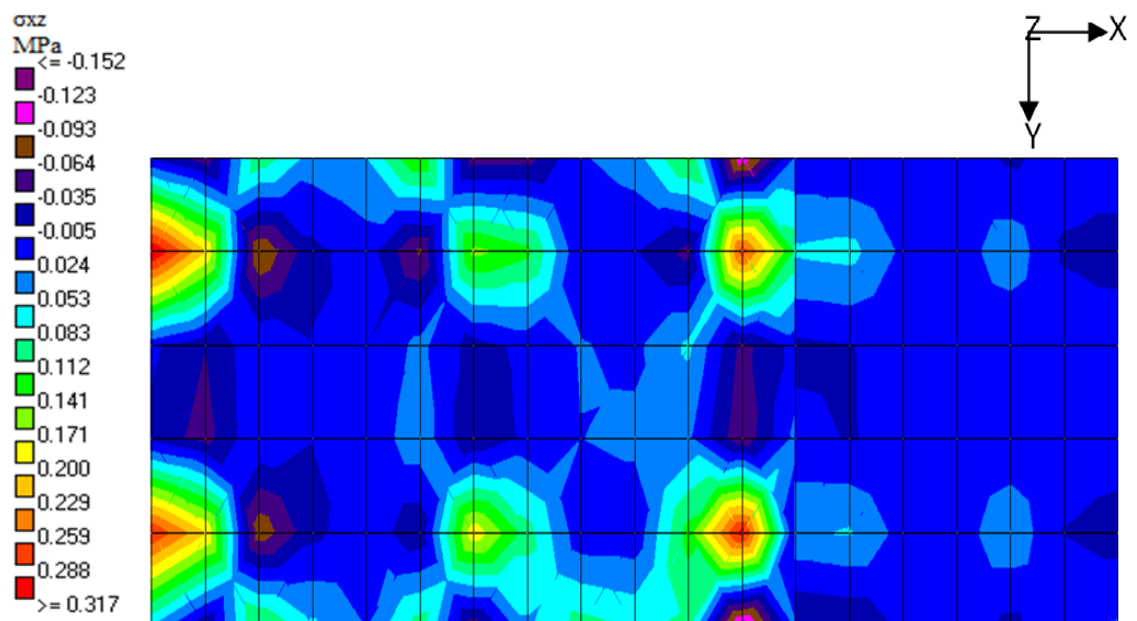


Figure III-6 : Distribution de contraintes  $\sigma_{xz}$  (MPa) sur l'assise du turbocompresseur

### Interprétation:

Les contraintes tangentielles  $\sigma_{xz}$  (MPa) atteignent une valeur maximale de 0.317 MPa dans les ancrages A5 et A6 et au voisinage des ancrages A1 et A2 dues aux moments engendrés par la turbine, ainsi qu'une valeur minimale de -0,152 MPa aux extrémités du massif due aux moments de l'ancrage A6.

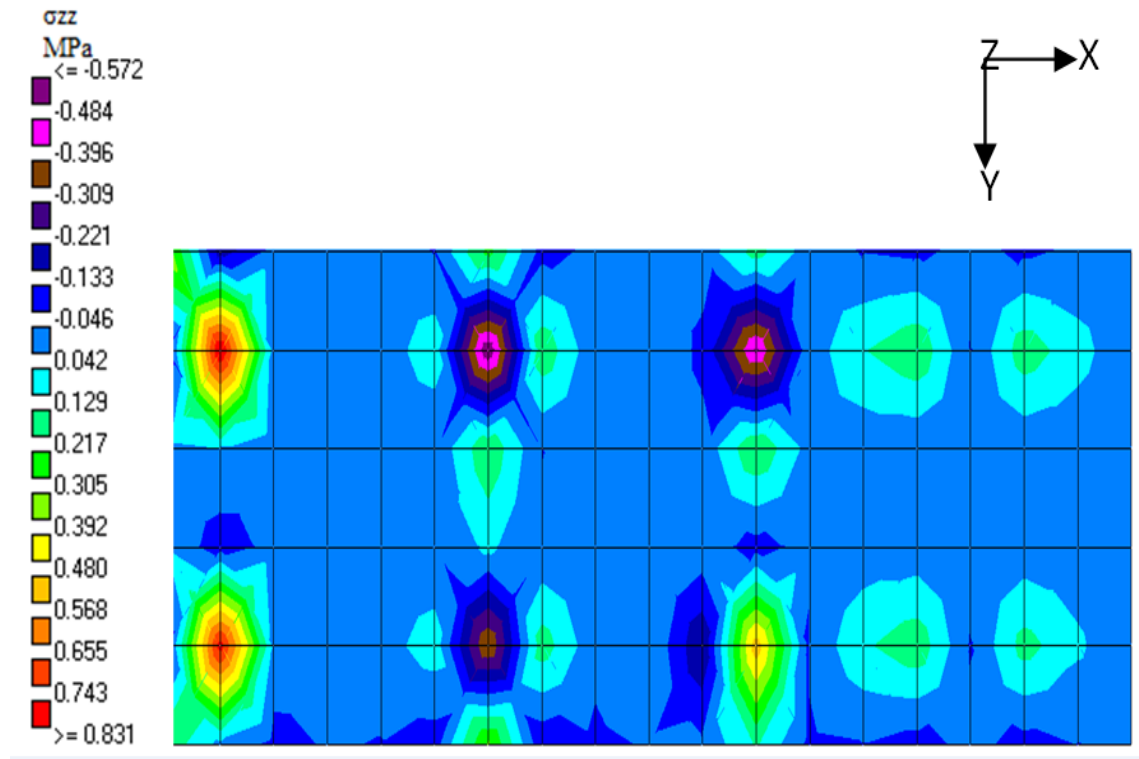


Figure III-7 : Distribution de contraintes  $\sigma_{zz}$  (MPa) sur l'assise du turbocompresseur

### Interprétation:

Les concentrations de contraintes normales  $\sigma_{zz}$  (MPa) se situent au voisinage des points d'ancrages A3 et A5 et atteignent une valeur de -0,572 MPa.

Ces contraintes normales ont comme valeurs maximales 0,831 MPa dues aux moments appliqués par la turbine dans les ancrages A1 et A2.

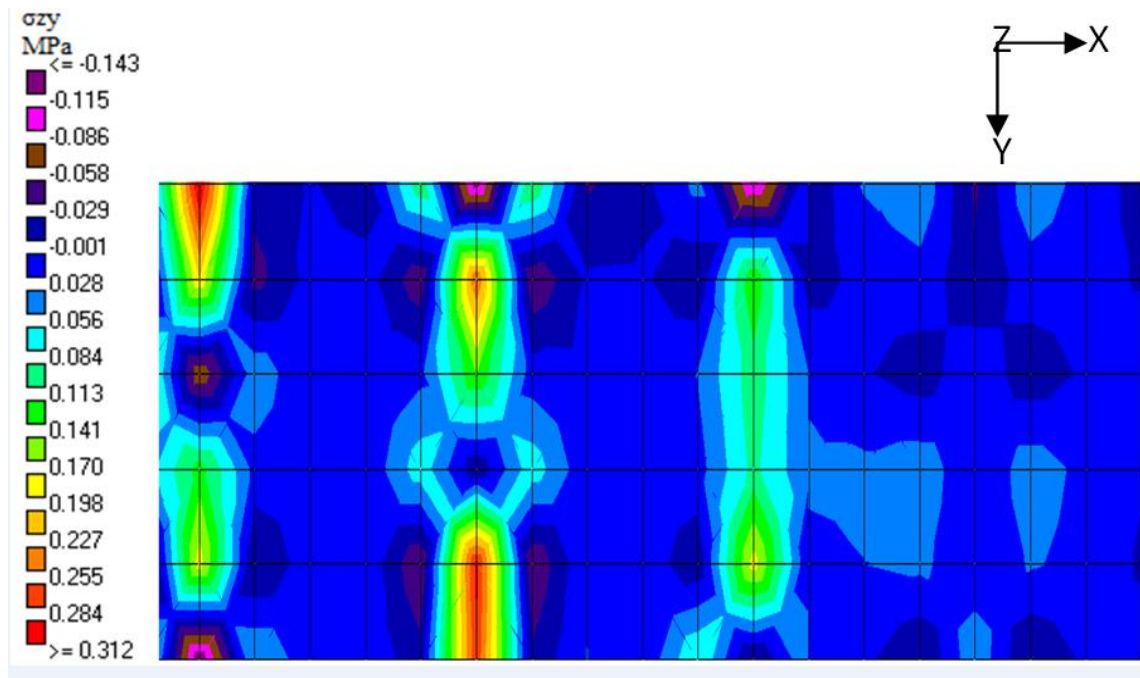


Figure III-8 : Distribution de contraintes  $\sigma_{zy}$  (MPa) sur l'assise du turbocompresseur

**Interprétation:**

Les contraintes tangentielles  $\sigma_{zy}$  (MPa) atteignent leur summum entre les ancrages A3 et A4 arrivant à 0.312MPa.

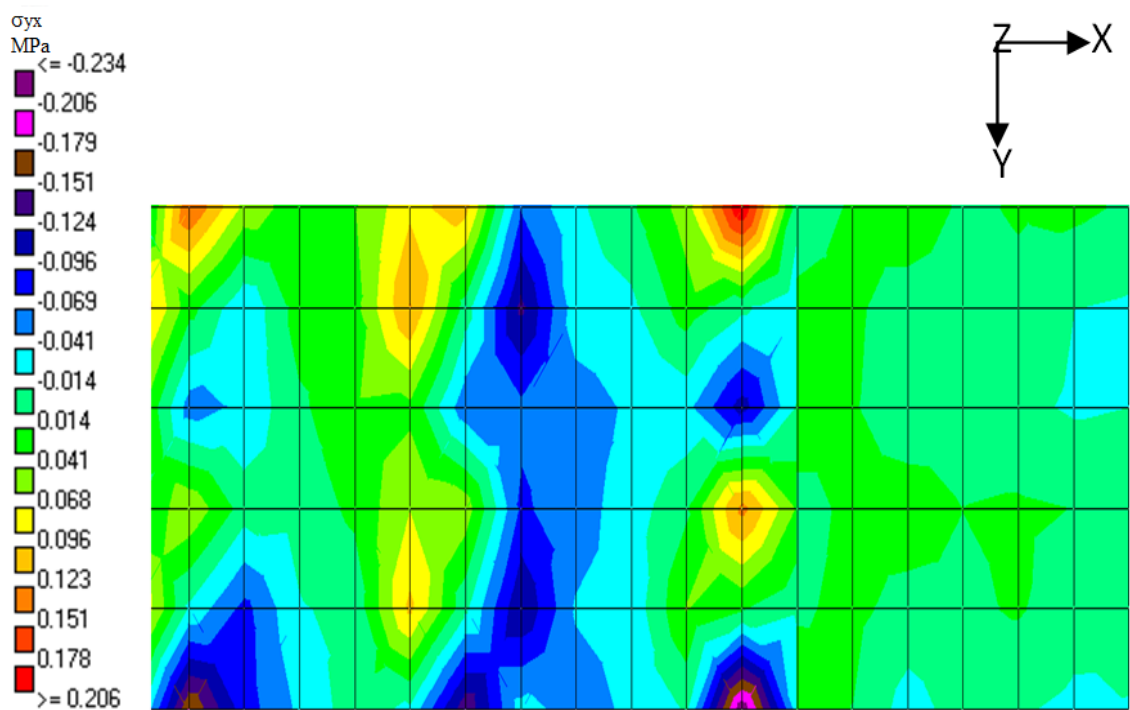
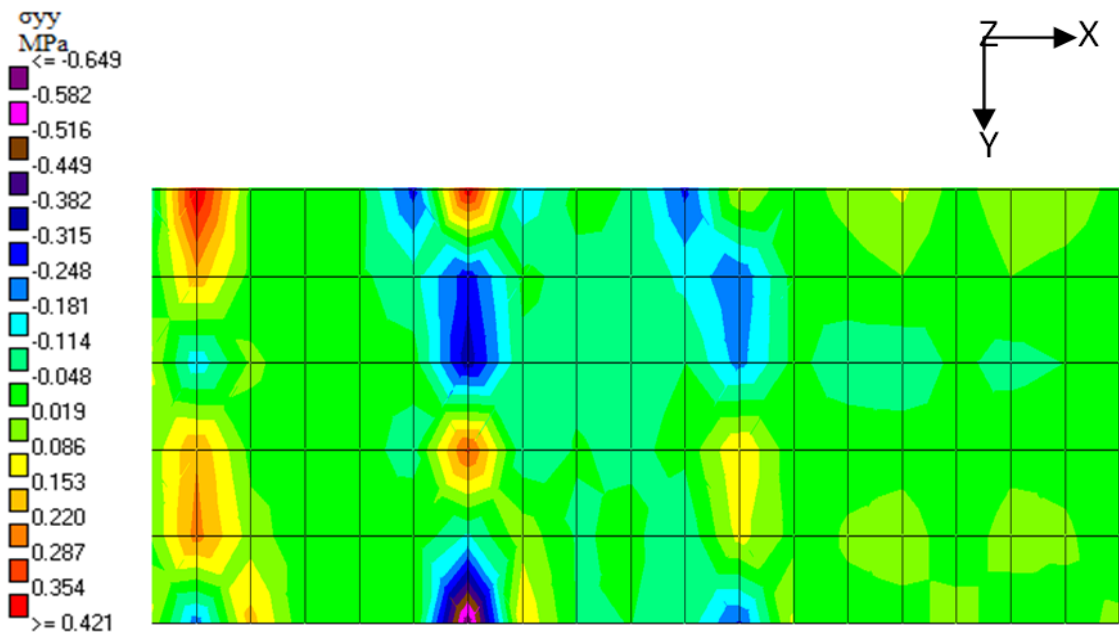


Figure III-9: Distribution de contraintes  $\sigma_{yx}$  (MPa) sur l'assise du turbocompresseur.

### Interprétation:

Les contraintes tangentielles  $\sigma_{yx}$  (MPa) varient dans une plage entre -0.234MPa et 0.206 MPa.



**Figure III-10 : Distribution de contraintes  $\sigma_{yy}$  (MPa) sur l'assise du turbocompresseur**

### Interprétation :

Les contraintes normales  $\sigma_{yy}$ (MPa) sont négligeables sauf dans certaines zones où elles atteignent des pics pouvant aller jusqu'à 0,421MPa et -0,649MPa.

On remarque dans ces figures que les concentrations de contraintes normales se situent au voisinage des points d'ancrages.

Après avoir déterminé les différentes sollicitations revenant au massif, on passe maintenant au ferrailage.

Le modèle de ferrailage pour le radier est :

- Une nappe supérieure
- Une nappe inférieure
- Un ferrailage minimum dans la surface entre les deux nappes

Tel que prescrit la norme ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008) dans la section R10.5.4 et 7.12.2.1 ; le ferrailage minimum est égale à 0.0018%.

Tableau III-20 : Section d'armatures

|                                           | Nappe supérieure selon le plan XX | Nappe inférieure selon XX | Nappe supérieure selon YY | Nappe inférieure selon YY |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Section d'armatures (cm <sup>2</sup> /ml) | 40,51                             | 38,26                     | 38,21                     | 38,46                     |

On adopte les armatures de diamètre  $\phi=16\text{mm}$  et qui ont pour section  $2.01\text{cm}^2$ . En choisissant un espacement de  $d=10\text{cm}$ .







### **III.8. Déformations :**

Les déplacements de notre radier ne doivent pas nuire au bon comportement de la structure portée. Son étude doit toujours s'accompagner d'une vérification de déformations à savoir les translations et les rotations, en effet ce type d'ouvrage ne doit pas être soumis à des charges pouvant provoquer des déformations trop grandes entre ses différentes zones.

#### **III.8.1. Méthodes de détermination des déformations :**

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les déformations des fondations superficielles, on site :

- Les méthodes à partir des essais de laboratoire : il s'agit essentiellement de l'essai œnométriques, surtout utilisé pour les sols fins cohérents ;
- Les méthodes à partir des essais in-situ (essai de pénétration au carottier SPT, essai de pénétration statique CPT, essai au dilatomètre plat Marchetti DMT et essai pressiométrique Ménard), très utilisées notamment pour les sols pulvérulents, à cause des difficultés évidentes de prélèvement et d'essai en laboratoire.
- Les méthodes par éléments finis utilisés généralement dans le cas de fondations complexes.

#### **III.8.2. Calcul par la méthode des éléments finis:**

La méthode des éléments finis (MEF) permet de calculer numériquement le comportement des objets continus, même les plus complexes. Elle consiste à découper le domaine qu'on veut étudier .En lui choisissant un maillage adéquat, ce dernier permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis, la géométrie idéale et continue est remplacée par une géométrie discrète, et les valeurs sont interpolées entre des points ; plus les points sont espacés, plus la fonction d'interpolation risque de s'écarter de la réalité, mais à l'inverse, un maillage trop fin conduit à des temps de calculs extrêmement longs; Et enfin imposer des conditions aux limites à savoir les déplacements ou les contraintes s'exerçant sur le système, Les conditions aux frontières sont définies sur les frontières du système global.

Les résultats obtenus se présentent au niveau des nœuds du maillage, c'est-à-dire que la solution est calculée en des points donnés (résolution discrète) et non en chaque point du domaine. Cela nécessite de pouvoir interpoler, c'est-à-dire déterminer les valeurs en tout point à partir des valeurs connues en certains points.

Un aspect intéressant est à noter, qui rend plus aisée la mise en œuvre de cette méthode dans le cas des fondations superficielles, il s'agit des contraintes initiales régnant dans le sol une fois la fondation construite, mais avant application du chargement par la structure. On doit, supposer que le sol possède encore ses caractéristiques intactes.

Pour l'analyse de déformations de cette fondation en éléments finis, le modèle élastique sans fluage est utilisé vu que l'effet du fluage est généralement négligé comme dans notre sol d'étude.

Pour se faire, les logiciels STAAD PRO et Robot structural analysis qui sont souvent très sollicités par les ingénieurs permettent de faire une analyse en élément finis de notre fondation.

- **Calcul des déformations :**

Le fournisseur du turbocompresseur exige une tolérance aux déformations, afin d'éviter tout risque pouvant nuire au bon fonctionnement de ce dernier. Cette tolérance est fixée à 3mm dans les trois directions de l'espace, on peut dire que c'est une tolérance sévère d'où la nécessité de faire une étude précise aux déformations.

On entamera une étude numérique dans le cas des chargements statiques à l'aide des logiciels Robot structural analysis et STAAD PRO, puis une étude analytique dans le cas des chargements dynamiques.

### **III.8.3. Calcul numérique :**

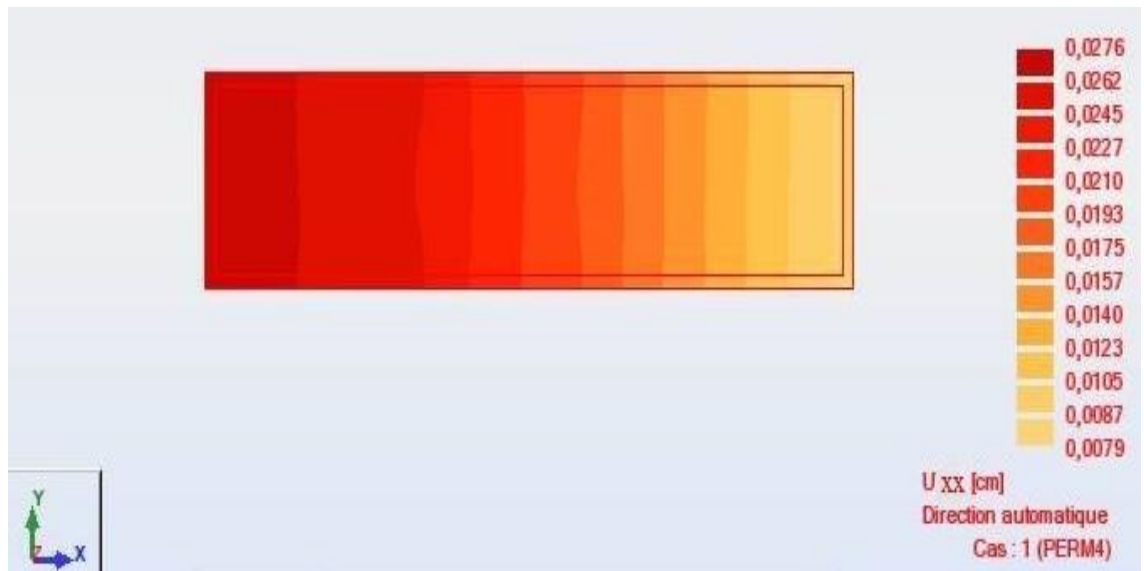
On étudiera dans ce qui suit les déformations à l'aide de logiciels Robot structural analysis et STAAD PRO.

On verra les différentes déformations du plan du massif de fondation se trouvant à 1,22 m du sol en utilisant le logiciel Robot structural analysis, on approfondira cette vue l'aide du logiciel STAAD PRO (permettant une étude détaillée en éléments finis ou il étudie même les déformations du sol et l'interaction sol-structure).

a. Déformations du massif :

o Cartographie de déformations du massif en béton :

Les déformations du plan du massif en béton se situant à 1,22 m de l'assise de la fondation, ces derniers ont été tirés du logiciel **Robot structural analysis**.





**Figure III-13 : Déformation horizontale  $U_{yy}$  du plan du massif**

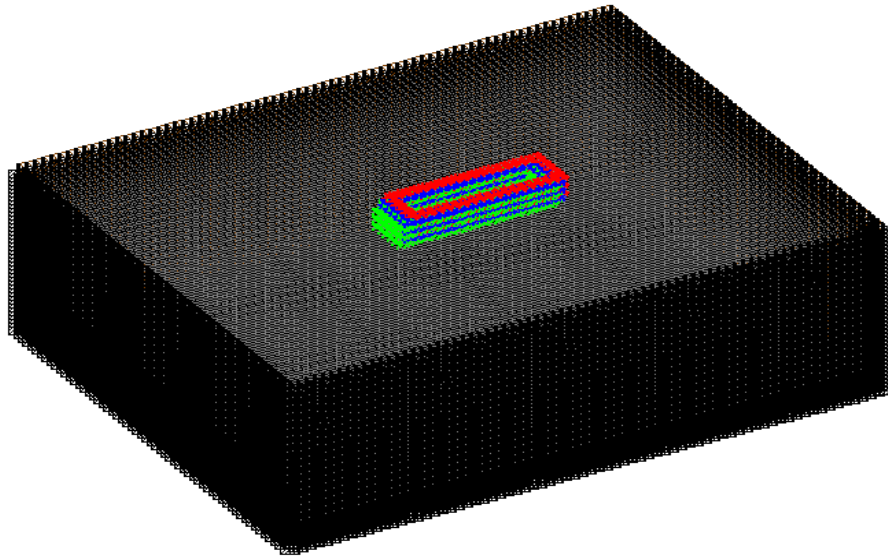
On peut vérifier que le déplacement maximal du plan du massif se situant à 1,22m du sol est dans la direction de Z et qui a pour valeur 0,37mm, on en conclue que le déplacement du massif en béton ne va pas nuire au bon fonctionnement du turbocompresseur.

#### **b. Déformations massif - sol :**

- **Principe de travail :**

Le principe est de modéliser la fondation par un bloc ayant les caractéristiques du béton, tout en lui ajoutant les différentes charges qui lui sont appliquées (voir figure 25 tirée du logiciel STAAD PRO).

La fondation se logera dans un bloc ayant les caractéristiques du sol, avec des dimensions les plus grandes possibles afin d'avoir une simulation plus réelle, et enfin mettre des appuis fixes sur le contour du bloc sol et étudier les déformations.

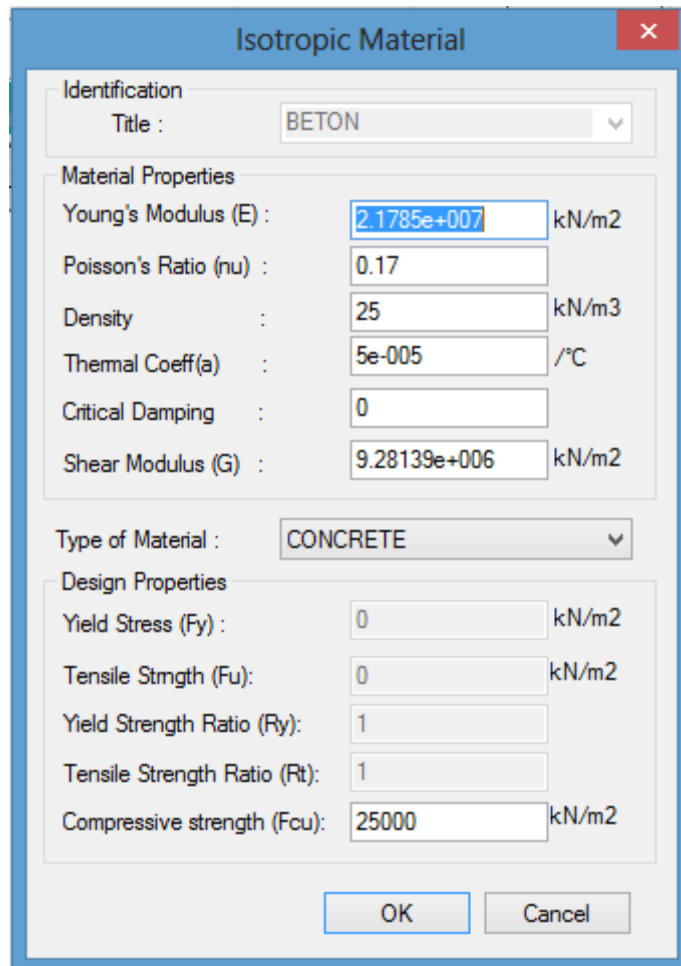


**Figure III-14 : Le massif en béton reposant sur le sol**

- **Les caractéristiques des matériaux considérées:**

Pour la modélisation de notre massif de fondation on utilisera le matériau ayant les caractéristiques suivantes:

- Module de Young:  $E = 2,1785 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
- Coefficient de poisson : 0,17
- Densité :  $25 \text{ kN/m}^3$
- Coefficient thermique :  $5 \times 10^{-5} /^\circ\text{C}$
- Module de cisaillement dynamique:  $G = 9.28139 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$ .



**Figure III-15 : caractéristiques du matériau béton**

Les caractéristiques du matériau sol sont les suivantes :

- Module de Young:  $E = 1,548 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$

Coefficient de poisson : 0,3

Densité : 21 KN/m

Coefficient thermique : 0 /°C

Module de cisaillement dynamique:  $G = 1.186 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$ .

Figure III-16 : Caractéristiques du matériau sol

- **Le maillage et le type d'éléments :**

Le maillage dépend essentiellement de la géométrie mais aussi des sollicitations extérieures, sans oublier bien entendu le type d'outils dont on dispose pour réaliser ce dernier.

En raison de la forte concentration de contraintes dans la fondation et son voisinage, un maillage serré est pris jusqu'à 4m de profondeur et 5m aux alentours ainsi que dans le massif. La distance entre nœuds varie de 0,25 m à 0,5m, contrairement aux nœuds se trouvant au-delà de cette zone qui sont distants de 1m jusqu'à 2m.

Des éléments hexaédriques ont été pris lors de cette modélisation en éléments finis.

- **Volume du sol considéré:**

Le volume du sol considéré lors de cette modélisation en éléments finis est choisi en effectuant un calcul itératif sur la variation de l'énergie de déformations entre éléments.



Débutant d'un volume de  $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$  on itérait par pas de 5 m jusqu'à ce que l'écart de l'énergie de déformation devient le plus faible possible. Le volume du sol considéré est de  $50 \times 50 \times 20 \text{ m}^3$ .

- **Nombre de nœuds et d'éléments :**

Dans cette étude on a utilisé 103249 nœuds ainsi que 99772 éléments hexaédriques.

- **Conditions aux limites :**

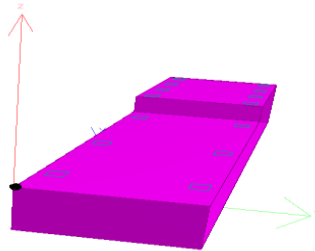
Afin de représenter l'interaction sol-structure on a introduit aux nœuds communs du bloc Béton et du bloc Sol des appuis élastiques ayant comme caractéristiques :

$$K_x = K_y = K_z = 53000 \text{ kN/m}$$

Ces valeurs ont été calculées par le logiciel.

- **Résultats:**

Comme on s'intéresse qu'à l'assise du compresseur et de la turbine, on prend que les nœuds se trouvant dans de cette dernière, et afin de ne pas trop encombrer le rapport on citera que les nœuds distants de 1m, leurs coordonnées ont été prises par rapport au repère local qui est au coin droit de l'assise de la turbine comme le montre la figure suivante :



**Figure III-17: le repère local**

**Tableaux de déformations :**

**Tableau III-21 : Déformations des nœuds de maillage de l'assise du turbocompresseur**

| Nœud   | Coordonnées (m) |   |   | Déplacements (mm) |        |       | Résultante (mm) | Rotation (rad) |                |                | Résultante (rad) |
|--------|-----------------|---|---|-------------------|--------|-------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
|        | X               | Y | Z | X                 | Y      | Z     |                 | R <sub>x</sub> | R <sub>y</sub> | R <sub>z</sub> |                  |
| 103026 | 0               | 0 | 0 | 0,106             | -0,868 | 0,088 | <b>0,879</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103027 | 1               | 0 | 0 | 0,093             | -0,903 | 0,079 | <b>0,911</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103028 | 2               | 0 | 0 | 0,098             | -0,915 | 0,082 | <b>0,924</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103029 | 3               | 0 | 0 | 0,097             | -0,933 | 0,085 | <b>0,942</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103030 | 4               | 0 | 0 | 0,095             | -0,948 | 0,089 | <b>0,957</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103031 | 5               | 0 | 0 | 0,096             | -0,957 | 0,102 | <b>0,967</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103032 | 6               | 0 | 0 | 0,082             | -0,957 | 0,108 | <b>0,966</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103033 | 7               | 0 | 0 | 0,077             | -0,976 | 0,095 | <b>0,983</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |

|        |    |   |   |       |        |       |              |      |      |      |      |
|--------|----|---|---|-------|--------|-------|--------------|------|------|------|------|
| 103034 | 8  | 0 | 0 | 0,077 | -0,98  | 0,086 | <b>0,986</b> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 103035 | 9  | 0 | 0 | 0,079 | -0,985 | 0,082 | <b>0,991</b> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 103036 | 10 | 0 | 0 | 0,085 | -0,987 | 0,087 | <b>0,994</b> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

| Nœud          | Coordonnées (m) |          |          | Déplacements (mm) |               |              | Résultante (mm) | Rotation (rad) |                |                | Résultante (rad) |
|---------------|-----------------|----------|----------|-------------------|---------------|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
|               | X               | Y        | Z        | X                 | Y             | Z            |                 | R <sub>x</sub> | R <sub>y</sub> | R <sub>z</sub> |                  |
| 103037        | 11              | 0        | 0        | 0,073             | -0,989        | 0,082        | <b>0,995</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103045        | 12              | 1        | 0        | 0,082             | -1,001        | 0,075        | <b>1,008</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103046        | 13              | 1        | 0        | 0,082             | -1,006        | 0,07         | <b>1,012</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103047        | 14              | 1        | 0        | 0,082             | -1,013        | 0,065        | <b>1,018</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103048        | 15              | 1        | 0        | 0,085             | -1,018        | 0,061        | <b>1,024</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103049        | 16              | 1        | 0        | 0,085             | -1,03         | 0,055        | <b>1,035</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103050        | 17              | 1        | 0        | 0,086             | -1,04         | 0,05         | <b>1,045</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103051        | 18              | 1        | 0        | 0,086             | -1,053        | 0,044        | <b>1,057</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103069        | 0               | 0        | 1        | 0,097             | -0,89         | 0,076        | <b>0,899</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103070        | 1               | 0        | 1        | 0,118             | -0,87         | 0,098        | <b>0,883</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103071        | 2               | 0        | 1        | 0,101             | -0,924        | 0,08         | <b>0,933</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103072        | 3               | 0        | 1        | 0,096             | -0,948        | 0,084        | <b>0,956</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103073        | 4               | 0        | 1        | 0,092             | -0,964        | 0,088        | <b>0,973</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103074        | 5               | 0        | 1        | 0,09              | -0,974        | 0,092        | <b>0,983</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| <b>103075</b> | <b>6</b>        | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>0,101</b>      | <b>-1,012</b> | <b>0,126</b> | <b>1,024</b>    | <b>0,00</b>    | <b>0,00</b>    | <b>0,00</b>    | <b>0,00</b>      |
| 103076        | 7               | 0        | 1        | 0,083             | -0,984        | 0,089        | <b>0,992</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103077        | 8               | 0        | 1        | 0,081             | -0,996        | 0,084        | <b>1,003</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103078        | 9               | 0        | 1        | 0,081             | -0,999        | 0,079        | <b>1,005</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103079        | 10              | 0        | 1        | 0,084             | -1,008        | 0,075        | <b>1,015</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103080        | 11              | 0        | 1        | 0,113             | -1,032        | 0,086        | <b>1,042</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103088        | 12              | 1        | 1        | 0,085             | -1,012        | 0,074        | <b>1,018</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103089        | 13              | 1        | 1        | 0,088             | -1,009        | 0,072        | <b>1,016</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103090        | 14              | 1        | 1        | 0,092             | -1,012        | 0,069        | <b>1,018</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103091        | 15              | 1        | 1        | 0,09              | -1,03         | 0,06         | <b>1,036</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103092        | 16              | 1        | 1        | 0,093             | -1,03         | 0,058        | <b>1,036</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103093        | 17              | 1        | 1        | 0,094             | -1,046        | 0,052        | <b>1,051</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103094        | 18              | 1        | 1        | 0,093             | -1,063        | 0,044        | <b>1,068</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103112        | 0               | 0        | 2        | 0,098             | -0,891        | 0,08         | <b>0,9</b>      | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103113        | 1               | 0        | 2        | 0,097             | -0,911        | 0,084        | <b>0,92</b>     | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103114        | 2               | 0        | 2        | 0,101             | -0,937        | 0,085        | <b>0,946</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103115        | 3               | 0        | 2        | 0,096             | -0,957        | 0,084        | <b>0,966</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103116        | 4               | 0        | 2        | 0,093             | -0,975        | 0,087        | <b>0,983</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103117        | 5               | 0        | 2        | 0,088             | -0,99         | 0,091        | <b>0,998</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103118        | 6               | 0        | 2        | 0,086             | -0,989        | 0,091        | <b>0,997</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103119        | 7               | 0        | 2        | 0,086             | -1,005        | 0,091        | <b>1,013</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103120        | 8               | 0        | 2        | 0,082             | -1,005        | 0,081        | <b>1,012</b>    | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,00             |

|        |    |   |   |       |        |       |              |      |      |      |      |
|--------|----|---|---|-------|--------|-------|--------------|------|------|------|------|
| 103121 | 9  | 0 | 2 | 0,083 | -1,007 | 0,076 | <b>1,013</b> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 103122 | 10 | 0 | 2 | 0,084 | -1,01  | 0,07  | <b>1,016</b> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 103123 | 11 | 0 | 2 | 0,083 | -1,005 | 0,067 | <b>1,011</b> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

**Tableau III-22 : Déformations des nœuds de maillage de l'assise duturbocompresseur**

**Tableau III-23 : Déformations des nœuds de maillage de l'assise du turbocompresseur**

| Nœud          | Coordonnées (m) |          |          | Déplacements (mm) |               |             | Résultante (mm) | Rotations (rad) |                |                | Résultante (rad) |
|---------------|-----------------|----------|----------|-------------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
|               | X               | Y        | Z        | X                 | Y             | Z           |                 | R <sub>x</sub>  | R <sub>y</sub> | R <sub>z</sub> |                  |
| 103131        | 12              | 1        | 2        | 0,091             | -1,018        | 0,071       | <b>1,024</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103132        | 13              | 1        | 2        | 0,092             | -1,023        | 0,067       | <b>1,029</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103133        | 14              | 1        | 2        | 0,093             | -1,03         | 0,064       | <b>1,037</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103134        | 15              | 1        | 2        | 0,095             | -1,038        | 0,059       | <b>1,004</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103135        | 16              | 1        | 2        | 0,095             | -1,048        | 0,054       | <b>1,054</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103136        | 17              | 1        | 2        | 0,096             | -1,058        | 0,049       | <b>1,064</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103137        | 18              | 1        | 2        | 0,097             | -1,07         | 0,044       | <b>1,076</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103155        | 0               | 0        | 3        | 0,105             | -0,895        | 0,086       | <b>0,906</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103156        | 1               | 0        | 3        | 0,097             | -0,926        | 0,082       | <b>0,935</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103157        | 2               | 0        | 3        | 0,097             | -0,945        | 0,083       | <b>0,954</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103158        | 3               | 0        | 3        | 0,096             | -0,967        | 0,085       | <b>0,975</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103159        | 4               | 0        | 3        | 0,092             | -0,984        | 0,086       | <b>0,992</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103160        | 5               | 0        | 3        | 0,092             | -0,996        | 0,092       | <b>1,005</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103161        | 6               | 0        | 3        | 0,085             | -1,003        | 0,093       | <b>1,011</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103162        | 7               | 0        | 3        | 0,084             | -1,01         | 0,086       | <b>1,018</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103163        | 8               | 0        | 3        | 0,083             | -1,011        | 0,079       | <b>1,018</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103164        | 9               | 0        | 3        | 0,084             | -1,011        | 0,073       | <b>1,017</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103165        | 10              | 0        | 3        | 0,088             | -1,009        | 0,072       | <b>1,015</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103166        | 11              | 0        | 3        | 0,086             | -1,015        | 0,065       | <b>1,02</b>     | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103174        | 12              | 1        | 3        | 0,098             | -1,02         | 0,07        | <b>1,027</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103175        | 13              | 1        | 3        | 0,098             | -1,027        | 0,064       | <b>1,033</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103176        | 14              | 1        | 3        | 0,099             | -1,035        | 0,06        | <b>1,041</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103177        | 15              | 1        | 3        | 0,1               | -1,043        | 0,056       | <b>1,05</b>     | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103178        | 16              | 1        | 3        | 0,1               | -1,054        | 0,051       | <b>1,06</b>     | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103179        | 17              | 1        | 3        | 0,101             | -1,064        | 0,047       | <b>1,07</b>     | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103180        | 18              | 1        | 3        | 0,101             | -1,076        | 0,043       | <b>1,082</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103198        | 0               | 0        | 4        | 0,095             | -0,916        | 0,08        | <b>0,924</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103199        | 1               | 0        | 4        | 0,116             | -0,9          | 0,104       | <b>0,913</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103200        | 2               | 0        | 4        | 0,097             | -0,953        | 0,084       | <b>0,961</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103201        | 3               | 0        | 4        | 0,093             | -0,976        | 0,085       | <b>0,984</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103202        | 4               | 0        | 4        | 0,09              | -0,992        | 0,085       | <b>1</b>        | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103203        | 5               | 0        | 4        | 0,091             | -1,001        | 0,086       | <b>1,009</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103204        | 6               | 0        | 4        | 0,108             | -1,029        | 0,119       | <b>1,041</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103205        | 7               | 0        | 4        | 0,085             | -1,008        | 0,083       | <b>1,015</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103206        | 8               | 0        | 4        | 0,084             | -1,015        | 0,077       | <b>1,021</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103207        | 9               | 0        | 4        | 0,085             | -1,011        | 0,071       | <b>1,017</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103208        | 10              | 0        | 4        | 0,088             | -1,018        | 0,065       | <b>1,024</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| <b>103209</b> | <b>11</b>       | <b>0</b> | <b>4</b> | <b>0,127</b>      | <b>-0,987</b> | <b>0,08</b> | <b>0,998</b>    | <b>0,00</b>     | <b>0,00</b>    | <b>0,00</b>    | <b>0,00</b>      |

|        |    |   |   |       |        |       |              |      |      |      |      |
|--------|----|---|---|-------|--------|-------|--------------|------|------|------|------|
| 103217 | 12 | 1 | 4 | 0,102 | -1,024 | 0,068 | <b>1,031</b> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 103218 | 13 | 1 | 4 | 0,106 | -1,023 | 0,066 | <b>1,03</b>  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

**Tableau III-24 : Déformations des nœuds de maillage de l'assise du turbocompresseur**

| Nœud          | Coordonnées (m) |          |          | Déplacements (mm) |               |              | Résultante (mm) | Rotations (rad) |                |                | Résultante (rad) |
|---------------|-----------------|----------|----------|-------------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
|               | X               | Y        | Z        | X                 | Y             | Z            |                 | R <sub>x</sub>  | R <sub>y</sub> | R <sub>z</sub> |                  |
| 103219        | 14              | 1        | 4        | 0,109             | -1,029        | 0,063        | <b>1,036</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103220        | 15              | 1        | 4        | 0,105             | -1,049        | 0,055        | <b>1,055</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103221        | 16              | 1        | 4        | 0,108             | -1,05         | 0,054        | <b>1,057</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103222        | 17              | 1        | 4        | 0,108             | -1,066        | 0,049        | <b>1,072</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103223        | 18              | 1        | 4        | 0,107             | -1,083        | 0,042        | <b>1,089</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103224        | 0               | 0        | 5        | 0,088             | -0,929        | 0,082        | <b>0,937</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103225        | 1               | 0        | 5        | 0,087             | -0,945        | 0,092        | <b>0,954</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103226        | 2               | 0        | 5        | 0,098             | -0,971        | 0,092        | <b>0,98</b>     | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103227        | 3               | 0        | 5        | 0,092             | -0,984        | 0,084        | <b>0,992</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103228        | 4               | 0        | 5        | 0,089             | -0,998        | 0,084        | <b>1,006</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103229        | 5               | 0        | 5        | 0,086             | -1,012        | 0,088        | <b>1,019</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103230        | 6               | 0        | 5        | 0,085             | -1,001        | 0,087        | <b>1,009</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103231        | 7               | 0        | 5        | 0,094             | -1,025        | 0,091        | <b>1,033</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103232        | 8               | 0        | 5        | 0,088             | -1,015        | 0,075        | <b>1,022</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103233        | 9               | 0        | 5        | 0,088             | -1,01         | 0,069        | <b>1,016</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103234        | 10              | 0        | 5        | 0,091             | -1,003        | 0,061        | <b>1,009</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103235        | 11              | 0        | 5        | 0,09              | -0,998        | 0,066        | <b>1,004</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103243        | 12              | 1        | 5        | 0,107             | -1,025        | 0,067        | <b>1,033</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103244        | 13              | 1        | 5        | 0,109             | -1,033        | 0,065        | <b>1,041</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103245        | 14              | 1        | 5        | 0,11              | -1,044        | 0,062        | <b>1,052</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103246        | 15              | 1        | 5        | 0,11              | -1,052        | 0,056        | <b>1,059</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103247        | 16              | 1        | 5        | 0,109             | -1,065        | 0,053        | <b>1,072</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| 103248        | 17              | 1        | 5        | 0,111             | -1,076        | 0,049        | <b>1,083</b>    | 0,00            | 0,00           | 0,00           | 0,00             |
| <b>103249</b> | <b>18</b>       | <b>1</b> | <b>5</b> | <b>0,112</b>      | <b>-1,089</b> | <b>0,043</b> | <b>1,095</b>    | <b>0,00</b>     | <b>0,00</b>    | <b>0,00</b>    | <b>0,00</b>      |

o **Résumé des déformations :**

**Tableau III-25 : Résumé des déformations.**

| Nœud   | Coordonnées(m)                                   |   |   | Déplacements (mm) |        |       | Résultats (mm) | Rotations (rad) |                |                | Résultante (rad) |
|--------|--------------------------------------------------|---|---|-------------------|--------|-------|----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
|        | X                                                | Z | Y | X                 | Z      | Y     |                | R <sub>x</sub>  | R <sub>z</sub> | R <sub>y</sub> |                  |
| 103209 | 11                                               | 0 | 4 | 0,127             | -0,987 | 0,08  | 0,998          | 0,0             | 0,0            | 0,0            | 0,0              |
|        | <b>Observations: Déplacement maximal selon X</b> |   |   |                   |        |       |                |                 |                |                |                  |
| 103248 | 18                                               | 1 | 5 | 0,112             | -1,089 | 0,043 | 1,095          | 0,0             | 0,0            | 0,0            | 0,0              |
|        | <b>Observations: Déplacement maximal selon z</b> |   |   |                   |        |       |                |                 |                |                |                  |
| 103075 | 6                                                | 0 | 1 | 0,101             | -1,012 | 0,126 | 1,024          | 0,0             | 0,0            | 0,0            | 0,0              |

|   |                                                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|--------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|   | <b>Observations: Déplacement maximal selon y</b> |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 1 | -29                                              | -20 | -26 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
|   | <b>Observations: Déplacements minimaux</b>       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

### Discussion des résultats:

Les tableaux précédents montrent les déformations des nœuds se trouvant sur l'assise du turbocompresseur, il est intéressant de noter que notre massif de fondation ne subit pas de rotations (rotations inférieures à  $10^{-3}$  (rad)), comme on peut constater que les déplacements maximaux ne dépassent pas les 1,1 mm, ce qui garantit sa grande stabilité.

Répondant ainsi aux exigences du fournisseur concernant la tolérance de déformations qui est nettement supérieure à celle qu'on a trouvé  $1,1\text{mm} < 3\text{mm}$ , on peut conclure que notre massif pourra assurer une bonne assise pour un bon rendement du turbocompresseur.

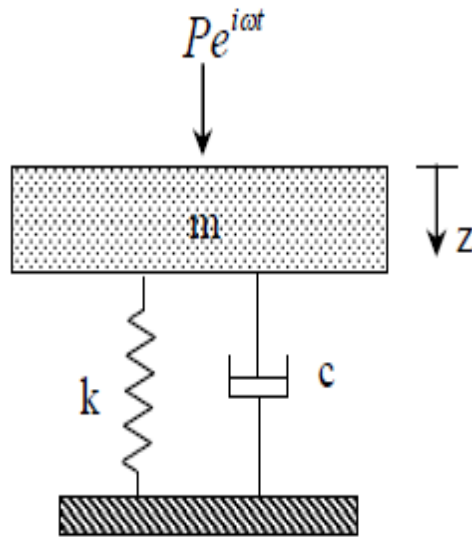
### III.8.4. Calcul Analytique :

La résolution des équations différentielles découlant des lois fondamentales de la dynamique nous permettent d'étudier analytiquement les différentes déformations que peuvent causer les forces des machines vibrantes comme le cas du turbocompresseur.

- **Impédance d'un oscillateur simple à un degré de liberté**

On considère un oscillateur simple à un degré de liberté constitué d'une masse  $m$ , d'un ressort de raideur  $k$  et d'un amortisseur de caractéristique  $c$ , afin d'illustrer la forme générale des fonctions d'impédance. L'équation d'équilibre dynamique de cet oscillateur soumis à une excitation harmonique  $P_0 e^{i\omega t}$  s'écrit :

$$M \times \ddot{y} + C \times \dot{y} + K \times y = P_0 e^{i\omega t} \quad (\text{III.11})$$



**Figure III-18 : Oscillateur simple à un degré de liberté.**

La solution générale de cette équation s'écrit :

$$y(t) = \frac{P e^{i\omega t}}{(k - m\omega^2) + i\omega c} \quad (\text{III.12})$$

A partir de l'équation on peut définir l'impédance dynamique de cet oscillateur :

$$S = (k - m\omega^2) + i\omega c \quad (\text{III.13})$$

- **Cas de plusieurs degrés de liberté :**

On peut généraliser cette relation à plusieurs degrés de liberté pour les modes de translations et mode rotations, on obtiendra un système à six degrés de liberté.

Les équations du mouvement s'écrivent alors sous forme matricielle :

$$[M] \times \{\ddot{u}\} + [S] \times \{u\} = \{F\} \quad (\text{III.14})$$

Ou :

[S] : désigne la matrice déduite de la matrice d'impédance.

[M] : Matrice de masse.

\{u\} : vecteur déplacement généralisé.

\{F\} : vecteur des sollicitations généralisées.

La matrice impédance est :

$$S = \begin{pmatrix} S_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_x & 0 & -S_x * Zc & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_y & 0 & -S_y * Zc & 0 \\ 0 & -S_x * Zc & 0 & S_{\theta_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -S_y * Zc & 0 & S_{\theta_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{\theta_z} \end{pmatrix} \quad (\text{III.15})$$

La matrice masse est :

$$M = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \quad (\text{III.16})$$

Plusieurs méthodes de résolutions de systèmes pareils existent, qu'elles soient analytiques ou numériques, parmi elles on trouve la méthode decône qui peut donner des résultats satisfaisants.

- **Définition générale de l'impédance d'une fondation :**

Les fonctions d'impédance sont utilisées pour l'analyse des vibrations des massifs de fondation, et plus généralement pour les problèmes de l'interaction sol-structure (MAATIB, 2010).

Considérons une fondation de forme quelconque reposant sur la surface d'un milieusemi-infini et soumise à une sollicitation harmonique  $P_0 e^{i\omega t}$ . Outre la sollicitation appliquée, les forces s'exerçant sur la fondation sont les forces d'inertie et les forces de réaction de sol  $R(t)$ . Il en résulte, en régime stationnaire, un déplacement  $Z_0 e^{i\omega t}$  de la fondation.

Par définition, on appelle impédance de la fondation le quotient de la force appliquée au déplacement de la fondation sans masse:

$$S = \frac{P}{Z}$$

Dans le cas d'une fondation partiellement enterrée, la réaction  $R$  se compose des efforts développés sous la base de la fondation et des efforts développés le long des faces latérales en contact avec le sol.

A partir de cette équation on peut définir l'impédance d'une fondation pour les modes de translation (horizontale ou verticale), de balancement et de torsion. Notons que l'application d'une force horizontale donnant naissance à la fois à un déplacement horizontal et à une rotation.

- **La méthode de cône**

C'est une méthode simplifiée qui permet la détermination des fonctions d'impédances dans les modes translations et rotations.

Soit une plaque circulaire rigide de rayon  $r_0$ , sans masse, appelée disque, reposant à la surface du sol, dans le cas général pour les fondations de forme quelconque, on définit un rayon équivalent  $r_0$ , ayant la même surface  $A_0$  pour les modes de translation, et le même moment d'inertie  $I_0$  pour les modes de rotation.

Le sol est associé à un cône élastique tronqué semi-infini ayant pour chaque degré de liberté sa propre dimension caractéristique par  $z_0$ , appelée hauteur d'apex (*Wolf, 1994 ; Wolf & Meek, 1994c*). Le rapport  $z_0 / r_0$  détermine l'angle d'ouverture du cône, qui ne dépend que du coefficient de Poisson du sol. L'angle d'ouverture du cône n'est pas choisi d'une manière arbitraire, il est déduit, dans les cas d'un disque sur un demi-espace homogène, par égalisation du coefficient de la raideur statique issue du modèle de cône, avec la valeur qui lui correspond issue de la théorie rigoureuse du demi-espace élastique pour chaque degré de liberté.



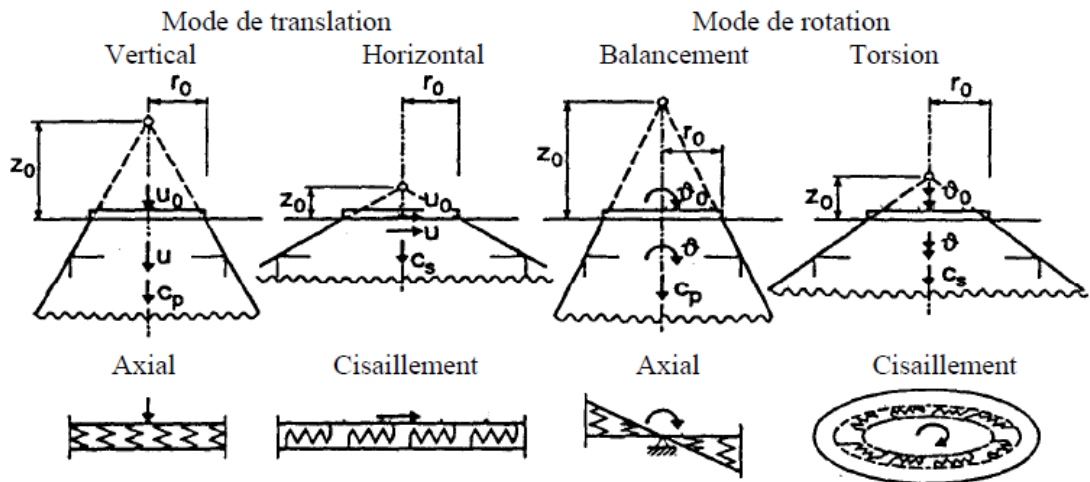


Figure III-19 modèle de cône correspondant à chaque degré de liberté

- **Expressions des coefficients de l'impédance dynamique**

Dans le cas du modèle de cône, les expressions analytiques pour les coefficients de

L'impédance dynamique  $S(a_0)$  en fonction de la fréquence adimensionnelle ( $a_0$ ), sont les suivants :

**Mode de translation :**

$$S(a_0) = K[k(a_0) + i \times a_0 \times c(a_0)] \quad (\text{III.17})$$

Ou :

$a_{(0)}$  : Fréquence adimensionnelle

$k(a_0)$ : Partie réelle représentant l'effet de la masse et de l'inertie du sol.

$C(a_0)$ : Partie imaginaire représentant l'effet de l'amortissement radiatif résultant de la dissipation d'énergie due à la propagation des ondes loin de la fondation.

K : Raideur statique de la fondation, disponible dans la littérature.

$$a_0 = \frac{w \times Z_0}{c} \quad (\text{III.18})$$

$$k(a_0) = 1 - \frac{\mu \times Z_0}{\pi \times r_0} \times \frac{c_s^2}{c^2} \times (a_0)^2 \quad (\text{III.19})$$

$$c(a_0) = \frac{c_s \times Z_0}{c \times r_0} \quad (\text{III.20})$$

$c_s$  : Vitesse de propagation des ondes de cisaillement

$C$  : Vitesse de propagation des ondes

$c_p$  : Vitesse de propagation des ondes longitudinales

$\mu$  : Coefficient de lamé

Les paramètres  $c_s$ ,  $c$ ,  $r_0$  et  $z_0$  sont déterminés à partir des relations de la méthode des cônes, on cite ici que les relations qu'on a utilisé pour notre cas.

**Détermination du rapport  $\frac{z_0}{r_0}$  :**

**Tableau III-26 : Valeurs de  $\frac{z_0}{r_0}$**

|                   | Mode                             |                                                                      |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|                   | Horizontal                       | Vertical                                                             |
| $\frac{z_0}{r_0}$ | $\frac{\pi}{8} \times (2 - \nu)$ | $\frac{\pi}{4} \times (1 - \nu) \times \left(\frac{c}{c_s}\right)^2$ |

Pour le mouvement horizontal  $c = c_s$  et  $\mu = 0$ , quelque soit la valeur du coefficient de Poisson  $\nu$ .

Concernant le mouvement vertical  $c = c_p$  et  $\mu = 0$  pour  $\nu < 1/3$ , et pour les valeurs de coefficient de Poisson  $\nu$  comprises entre  $1/3 < \nu < 1/2$ ,  $c = 2 c_s$ .

$$\text{Mouvement vertical : } C = \begin{cases} c_p & \nu < \frac{1}{3} \\ 2 \times c_s & \frac{1}{3} < \nu < \frac{1}{2} \end{cases}$$

**Mode de rotation:**

$$S_\theta(a_o) = K_\theta \times [K_\theta(a_o) + i \times a_o \times c_\theta(a_o)] \quad (\text{III.21})$$

Ou :

$$k_{\theta}(a_o) = 1 - \frac{4 \mu_{\theta} Z_0 c_s^2}{3 \pi r_0 C^2} \times (a_o)^2 - \frac{1}{3} \times \frac{a^2}{\frac{(r \times c)}{z \times c_s} + a^2} \quad (\text{III.22})$$

$$c_{\theta} = \frac{z_0}{3} \times \frac{c}{r_0 c_s} \frac{a^2}{\frac{(r \times c)}{z \times c_s} + a^2} \quad (\text{III.23})$$

**Détermination du rapport  $\frac{z_0}{r_0}$  :**

**Tableau III-27 : Valeurs de  $\frac{z_0}{r_0}$**

|                   | Mode                        |                                                                                  |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                   | Torsion                     | Balancement                                                                      |
| $\frac{z_0}{r_0}$ | $\frac{(9 \times \pi)}{32}$ | $\frac{(9 \times \pi)}{32} \times (1 - \nu) \times \left(\frac{c}{c_s}\right)^2$ |

Pour la torsion  $c = c_s$  et  $\mu_{\theta} = 0$  pour toutes les valeurs de  $\nu$ .

Pour le mouvement de balancement  $c = c_p, \mu_{\theta} = 0$  pour  $\nu < 1/3$ , et pour les valeurs de

Coefficient de Poisson  $\nu$  comprises entre  $1/3 < \nu < 1/2$ ,  $c = 2 c_s$ .

$$\text{Mouvement de balancement : } C = \begin{cases} C_p & \nu < \frac{1}{3} \\ 2 \times C_s \frac{1}{3} & \frac{1}{3} < \nu < \frac{1}{2} \end{cases}$$

- Application numérique**

**Calcul de la matrice impédance :**

On a:

$$C_p = \sqrt{2 \frac{G}{\rho} \frac{1-\nu}{1-2\nu}} = 2488 \text{ N} \times \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 1195 \text{ N} \times \text{s/m}$$

➤ **Modes translations**

**Calcul de  $S_z$ :**

$$K = 8,7 \times 10^{10} \text{ N/m}$$

$$c=c_p$$

$$\frac{r_o}{z_o} = \frac{\pi}{8} \times (2 - \nu) = 0,117$$

$$a_o = \frac{w \times Z_0}{c} = 0,2$$

$$c(a_o) = \frac{C_s \times Z_0}{c \times r_o} = 0,117$$

$$|S_z| = K[k(a_o) + i \times a_o \times c(a_o)] = \mathbf{8,70 \times 10^{10} \text{ N/m}}$$

**Calcul de  $S_x$  et  $S_y$  :**

$$K = 7,13 \times 10^{10} \text{ N/m}$$

$$c=c_s$$

$$\frac{z_o}{r_o} = \frac{\pi}{4} \times (1 - \nu) \times \left(\frac{c}{c_s}\right)^2 = 0,51$$

$$a_o = \frac{w \times Z_0}{c} = 1,81$$

$$c(a_o) = \frac{C_s \times Z_0}{c \times r_o} = 0,255$$

$$|S_x| = |S_y| = K[k(a_o) + i \times a_o \times c(a_o)] = \mathbf{7,80 \times 10^{10} \text{ N/m}}$$

➤ **Modes rotations**

**Calcul de  $S_{\theta z}$**

$$K = 1,55 \times 10^{13} \text{ N/m}$$

$$c = c_s$$

$$\frac{z_o}{r_o} = \frac{(9 \times \pi)}{32} = 0,88$$

$$c_{\theta} = \frac{z_o}{3 \times r_o} \frac{C}{C_s} \frac{a^2}{\frac{(r \times c)}{z \times c_s} + a^2} = 0,27$$

$$a_o = \frac{w \times Z_0}{c} = 3,11$$

$$k_{\theta}(a_o) = 1 - \frac{4 \mu_{\theta} Z_0 C_s^2}{3 \pi r_o C^2} \times (a_o)^2 - \frac{1}{3} \times \frac{a^2}{\frac{(r \times c)}{z \times c_s} + a^2} = 0,69 \text{ N/m}$$

$$|S_{\theta z}| = K_{\theta} \times [k_{\theta}(a_o) + i \times a_o \times c_{\theta}(a_o)] = 1,65 \times 10^{12} \text{ N/m}$$

### Calcul de $S_{\theta x}$ et $S_{\theta y}$

$$K = 2,52 \times 10^{12} \text{ N/m}$$

$$c = c_p$$

$$\frac{z_0}{r_0} = \frac{(9 \times \pi)}{32} \times (1 - \nu) \times \left(\frac{c}{c_s}\right)^2 = 2,29$$

$$c\theta = \frac{z_0}{3 \times r_0} \frac{C}{C_s} \frac{a^2}{\frac{(r \times c)}{z \times C_s} + a^2} = 5,03$$

$$a_0 = \frac{w \times Z_0}{c} = 4,08$$

$$k_{\theta}(a_0) = 1 - \frac{4}{3} \frac{\mu_{\theta}}{\pi} \frac{Z_0}{r_0} \frac{C_s^2}{C^2} \times (a_0)^2 - \frac{1}{3} \times \frac{a^2}{\frac{(r \times c)}{z \times C_s} + a^2} = 0,73$$

$$|S_{\theta x}| = |S_{\theta y}| = K_{\theta} \times [K_{\theta}(a_0) + i \times a_0 \times c_{\theta}(a_0)] = 5,11 \times 10^{13} \text{ N/m}$$

### Calcul de la coordonnée du centre de gravité $Z_c$ :

$$Z_c = \frac{V_1 \times Z_{c1} + V_2 \times Z_{c2}}{V_1 + V_2} = 1,22 \text{ m}$$

Ou  $V_1$  et  $V_2$  représentent respectivement les volumes de la partie du massif de fondation de la turbine et du compresseur

$$V_1 = 12,11 \times 2 \times 4,7 = 113,834 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 6,535 \times 3 \times 4,7 = 92,7435 \text{ m}^3$$

**La matrice impédance :**

$$S = \begin{pmatrix} 8,7 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7,8 \times 10^{10} & 0 & -1,014 \times 10^{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7,8 \times 10^{10} & 0 & -1,014 \times 10^{11} & 0 \\ 0 & -1,014 \times 10^{11} & 0 & 5,11 \times 10^{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1,014 \times 10^{11} & 0 & 5,11 \times 10^{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,65 \times 10^{12} \end{pmatrix} \quad N / m$$

### La matrice masse M:

De l'équation(III.14) on doit calculer la masse et les moments d'inertie selon les trois axes.

$$M = \rho \times V = 514000 \text{ Kg}$$

$$Iy = \iiint (x^2 + z^2) \times \rho \times dv = 1840375,6 \text{ Kg.m}^2$$

$$Ix = \iiint (z^2 + y^2) \times \rho \times dv = 10926750,99 \text{ Kg.m}^2$$

$$Iz = \iiint (x^2 + y^2) \times \rho \times dv = 15143783,08 \text{ Kg.m}^2$$

$$[M] = \begin{pmatrix} 514000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 514000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 514000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1840375,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10926750,99 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15143783,08 \end{pmatrix} \quad \text{Kg}$$

### Le vecteur force {f} :

Pour calculer le vecteur de la force f on se doit de calculer les efforts et les moments revenant au centre de gravité du massif.

Les coordonnées du centre de gravité du massif sont calculées comme suit :

$$Z_c = \frac{V_1 \times Z_{c1} + V_2 \times Z_{c2}}{V_1 + V_2} = 1,22 \text{ m}$$

$$y_c = \frac{V_1 \times y_{c1} + V_2 \times y_{c2}}{V_1 + V_2} = 2,35 \text{ m}$$

$$x_c = \frac{V_1 \times x_{c1} + V_2 \times x_{c2}}{V_1 + V_2} = 4,767 \text{ m}$$

Avec:

$V_1$  et  $V_2$  respectivement les volumes de l'assise de la turbine et celle du compresseur

$$V_1 = 12,11 \times 2 \times 4,7 = 113,834 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 6,535 \times 3 \times 4,7 = 92,7435 \text{ m}^3$$

Les moments au centre de gravité du massif sont calculés comme suit :

$$M_{x_g} = M_{xi} + F_z \times (y - y_g) - F_y \times (z - z_g) \quad (\text{III.24})$$

$$M_{y_g} = M_{yi} + F_x \times (z - z_g) - F_z \times (x - x_g) \quad (\text{III.25})$$

$$M_{z_g} = M_{zi} + F_y \times (x - x_g) - F_x \times (y - y_g) \quad (\text{III.26})$$

Avec

$i$  : numéro d'ancrage

$M_{x_g}$ ,  $M_{y_g}$ ,  $M_{z_g}$  : respectivement moments au centre de gravité selon l'axe x, y et z

$M_{xi}$ ,  $M_{yi}$ ,  $M_{zi}$  : respectivement moments a l'ancrage  $i$  selon l'axe x, y et z

**Tableau III-28 : Forces et moments appliqués aux points d'ancrage de la turbine**

|    | Forces et moments résultants |                  |                  |                    |                    |                    | Coordonnées(m) |     |   |
|----|------------------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|-----|---|
|    | $F_x(\text{kN})$             | $F_y(\text{kN})$ | $F_z(\text{kN})$ | $M_x(\text{kN.m})$ | $M_y(\text{kN.m})$ | $M_z(\text{kN.m})$ | X              | Z   | Y |
| A1 | 226,5                        | 195,7            | 207              | 79,9               | 60,1               | 2,7                | 1,65           | 0,5 | 2 |
| A2 | 239,9                        | 202,4            | 215,8            | 74,5               | 80,5               | 3,2                | 1,65           | 4,2 | 2 |
| A3 | 192,3                        | 374,1            | -325,7           | 63,2               | 60                 | 2,5                | 5,9            | 0,5 | 2 |
| A4 | 266,1                        | 355,7            | -54,2            | 51,8               | 84,8               | 4,1                | 5,9            | 4,2 | 2 |
| A5 | 374,8                        | 198,3            | -173,6           | 88                 | 79,4               | 0                  | 10,89          | 0,5 | 2 |
| A6 | 411                          | 215,6            | 29               | 89,2               | 110,1              | 0                  | 10,89          | 4,2 | 2 |

**Tableau III-29 : Forces et moments revenant aux points d'ancrage du compresseur**

|  | Forces et moments aux ancrages |                  |                  |                    |                    |                    | Coordonnées(m) |   |   |
|--|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|---|---|
|  | $F_x(\text{kN})$               | $F_y(\text{kN})$ | $F_z(\text{kN})$ | $M_x(\text{kN.m})$ | $M_y(\text{kN.m})$ | $M_z(\text{kN.m})$ | X              | Z | Y |

|    |    |       |   |   |   |   |        |     |   |
|----|----|-------|---|---|---|---|--------|-----|---|
| E1 | 35 | 93,5  | 0 | 0 | 0 | 0 | 12,61  | 0,5 | 3 |
| E2 | 34 | 91,6  | 0 | 0 | 0 | 0 | 12,61  | 4,2 | 3 |
| E3 | 56 | 144,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14,455 | 0,5 | 3 |
| E4 | 53 | 140,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14,455 | 4,2 | 3 |
| E5 | 41 | 125,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16,3   | 0,5 | 3 |
| E6 | 44 | 118,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16,3   | 4,2 | 3 |
| E7 | 25 | 65,6  | 0 | 0 | 0 | 0 | 18,145 | 0,5 | 3 |
| E8 | 24 | 60,23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18,145 | 4,2 | 3 |

Tableau III-30 : Moments et forces résultants au niveau des ancrages de la turbine

|    | Moments résultants |             |             | Forces résultantes |           |           |
|----|--------------------|-------------|-------------|--------------------|-----------|-----------|
|    | $M_x(kN,m)$        | $M_y(kN,m)$ | $M_z(kN,m)$ | $F_x(kN)$          | $F_y(kN)$ | $F_z(kN)$ |
| A1 | 307,00             | 881,22      | -188,33     | 226,5              | 195,7     | 207       |
| A2 | 1104,67            | 939,45      | -1071,55    | 239,9              | 202,4     | 215,8     |
| A3 | 242,00             | 578,20      | 781,99      | 192,3              | 374,1     | -325,7    |
| A4 | -451,36            | 352,77      | -85,28      | 266,1              | 355,7     | -54,2     |
| A5 | -804,96            | 1433,26     | 1907,50     | 374,8              | 198,3     | -173,6    |
| A6 | -1177,20           | 251,61      | 559,70      | 411                | 215,6     | 29        |

Tableau III-31: Moments et forces résultants au niveau des ancrages du compresseur

|    | Moments résultants |             |             | Forces résultantes |           |           |
|----|--------------------|-------------|-------------|--------------------|-----------|-----------|
|    | $M_x(kN.m)$        | $M_y(kN.m)$ | $M_z(kN.m)$ | $F_x(kN)$          | $F_y(kN)$ | $F_z(kN)$ |
| E1 | -247,48            | -282,90     | 798,04      | 35                 | 93,5      | 44        |
| E2 | -85,01             | -268,99     | 655,49      | 34                 | 91,6      | 42        |
| E3 | -364,15            | -462,41     | 1504,43     | 56                 | 144,6     | 58        |
| E4 | -150,02            | -428,98     | 1265,00     | 53                 | 140,7     | 54        |
| E5 | -317,81            | -515,33     | 1526,66     | 41                 | 125,8     | 51        |
| E6 | -106,18            | -567,67     | 1280,61     | 44                 | 118,1     | 56        |



|    |         |         |        |    |       |    |
|----|---------|---------|--------|----|-------|----|
| E7 | -177,57 | -397,05 | 923,82 | 25 | 65,6  | 33 |
| E8 | -45,93  | -398,83 | 761,33 | 24 | 60,23 | 33 |

Tableau III-32 : Moments et forces résultants au centre de gravité du massif

|                              | Mx (kN.m) | My(kN.m) | Mz(kN.m) | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz(kN)   |
|------------------------------|-----------|----------|----------|---------|---------|----------|
| Turbine                      | -779,85   | 4436,53  | 1904,02  | 1710,6  | 1541,8  | -101,7   |
| Compresseur                  | -1494,19  | -3322,2  | 8715,41  | 312     | 840,13  | 371      |
| Poids propre de la fondation | 0         | 0        | 0        | 0       | 0       | -5149,43 |
| Total                        | -2274,04  | 1114,32  | 10619,44 | 2022,6  | 2381,93 | -4778,43 |

Donc les composantes du vecteur f sont :

$$[f] = \begin{Bmatrix} -4778,438 \\ 2022,60 \\ 2381,93 \\ -2274,04 \\ 1114,32 \\ 10619,44 \end{Bmatrix} \text{ kN}$$

L'effort prépondérant se trouve dans l'axe z qui représente en majeure partie le poids propre du massif.

### Résolution du système

L'équation (III.12) dit :

$$[M] \times \{\ddot{u}\} + [S] \times \{u\} = \{f\}$$

Du fait que notre chargement est harmonique avec une pulsation d'opération fixe on peut résoudre le système d'une façon simplifiée

$$\{\ddot{u}\} = -\omega^2 \times \{u\} \quad \text{(III.27)}$$

En faisant sortir  $\{u\}$  en facteur :

$$(-\omega^2 \times [M] + [S]) \{u\} = \{f\} \quad (\text{III.28})$$

En multipliant l'équation (IV.20) par l'inverse de  $(-\omega^2 \times [M] + [S])$  on trouve :

$$\{u\} = (-\omega^2 \times [M] + [S])^{-1} \times \{f\} \quad (\text{III.29})$$

La résolution de ce système a été effectuée par le logiciel MATLAB.

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} 0,1942 \times 10^{-04} \\ -0,0790 \times 10^{-4} \\ -0,0934 \times 10^{-4} \\ -0,0006 \times 10^{-4} \\ 0,000 \times 10^{-4} \\ -0,0130 \times 10^{-4} \end{Bmatrix} m$$

Nous pouvons constater que le déplacement dynamique est très petit par rapport au déplacement statique calculé précédemment.

### III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié l'aspect génie civil de la fondation du turbocompresseur, en voyant comment déterminer son épaisseur sous machine vibrante, comment la ferrailer, et pour finir on s'est intéressé à la modélisation en éléments finis de cette fondation afin d'étudier les différentes déformations causées par cette dernière sur le sol d'assise.

## **Conclusion générale**

Du tracé préliminaire à l'étude du massif de fondation du turbocompresseur en passant par les travaux de pose, l'étude génie civil du pipeline GR5 représente une étape importante dans la réalisation du projet.

Nous avons vu dans notre travail de mémoire que le tracé des pipelines est élaboré en fonction de la nature du terrain traversé, ainsi que les contraintes auquel il est soumis, et les différentes solutions proposées consistent en des ouvrages de génie civil.

L'étude et l'analyse de la fondation du turbocompresseur ont été effectuées conformément à la norme ACI 318.08.

La fondation est susceptible d'être soumise à des efforts de vibrations induites par le turbocompresseur. La détermination de l'épaisseur de la fondation a été faite par la méthode de cônes. Son ferrailage a été déterminé après avoir choisit la combinaison de charges la plus contraignante à l'aide des logiciels STAAD PRO et Robot structural analysis. Ces mêmes logiciels nous ont permis de faire une modélisation en éléments finis afin d'étudier les déformations du sol et du massif de fondation. Ce travail de mémoire nous a permis d'acquérir de nouvelles connaissances et de mettre en pratique sur un cas réel les notions fondamentales étudié auparavant.

## **Bibliographie**

-AMERICAN CONCRETE INSTITUE. (2008). ACI 318. USA.

grtgaz. (2015). Consulté le 2015, sur [www.grtgaz.com](http://www.grtgaz.com).

J.COSTET, G. e. (2001). cours pratique de mecanique des sols. Dunod.

MAATIB, F. (2010). MODELISATION DES FONCTIONS D'IMPEDANCE POUR L'ANALYSE DES VIBRATIONS DES MASSIFS DE FONDATION SUR SOLS MULTICOUCHES. Alger: Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

McAllister, E. (2013). Pipeline Rules of Thumb Handbook.

siemens. (2015). [www.energy.siemens.com](http://www.energy.siemens.com). Consulté le 2015, sur [www.energy.siemens.com](http://www.energy.siemens.com).

T.C. Pharris and R.L. Kolpa.(2007). Overview of the Design, Construction, and Operation of Interstate Liquid Petroleum Pipelines

**Tableau 2: description des sondages carottés**

| <b>BHN°</b> | <b>Prof. (m)</b> | <b>DESCRIPTION</b>                                                                                                                                 |                                                                        |
|-------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 1           | 0.0 à 1.5        | Sable caillouteux rouge clair à rognons calcaires ± grossiers                                                                                      |                                                                        |
|             | 1.5 à 6.5        | Banc calcaire sain à peu fissuré                                                                                                                   |                                                                        |
|             | 6.5 à 8.0        | Alternance calcaire et sable caillouteux à proportions comparables                                                                                 |                                                                        |
|             | 8.0 à 10.0       | Environ un quart de calcaire fissuré noyé dans une matrice sableuse                                                                                |                                                                        |
| 2           | 0.0 à 0.9        | Remblai en tuf sableux caillouteux                                                                                                                 |                                                                        |
|             | 0.9 à 10.0       | Calcaire alvéolaire blanchâtre.<br>Perte de matériaux entre 3.0m et 3.5m, et entre 7.5m et 8.7m. Le calcaire est parfois gypseux dans les alvéoles |                                                                        |
| 3           | 0.0 à 0.5        | Couche de remblai en tuf rouge jaunâtre                                                                                                            |                                                                        |
|             | 0.5 à 1.0        | Blocs de calcaire englutis dans une matrice de sable grossier                                                                                      |                                                                        |
|             | 1.0 à 3.5        | Dalle calcaire peu alvéolaire.<br>Environ 20% de sable perdu au carottage                                                                          |                                                                        |
|             | 3.5 à 6.5        | Dalle calcaire peu alvéolaire.<br>Environ 30% de sable perdu au carottage                                                                          |                                                                        |
|             | 6.5 à 10.0       | Dalle calcaire dur et peu alvéolaire                                                                                                               |                                                                        |
| 4           | 0.0 à 0.7        | Sable caillouteux rouge clair                                                                                                                      | Alternance de sable caillouteux et sable calcaire à modules volumineux |
|             | 0.7 à 1.0        | Modules calcaires dans matrice sableuse                                                                                                            |                                                                        |
|             | 1.0 à 1.8        | Sable caillouteux rouge clair                                                                                                                      |                                                                        |
|             | 1.8 à 2.0        | Modules calcaires dans matrice sableuse                                                                                                            |                                                                        |
|             | 2.0 à 3.0        | Sable caillouteux rouge clair                                                                                                                      |                                                                        |
|             | 3.0 à 10.0       | Dalle calcaire plutôt saine avec quelques passages de sable en faible pourcentage (<10%)                                                           |                                                                        |
| 5           | 0.0 à 3.0        | Sable caillouteux et modules calcaires.<br>Bonne récupération                                                                                      |                                                                        |
|             | 3.0 à 4.0        | Matrice sableuse contenant des rognons calcaires parfois mêmes décimétriques.<br>Récupération totale                                               |                                                                        |
|             | 4.0 à 5.5        | Sable moyen peu récupérable au sondage                                                                                                             |                                                                        |
|             | 5.5 à 10.0       | Banc calcaire avec faible présence de sable                                                                                                        |                                                                        |
| 6           | 0.0 à 1.5        | Sable grossier contenant des blocs de calcaire en faible proportion                                                                                |                                                                        |
|             | 1.5 à 4.2        | Dominance calcaire sous forme de bancs presque continus.<br>Le sable est perdu durant le carottage                                                 |                                                                        |
|             | 4.2 à 5.3        | Calcaire rougeâtre fissuré, à matrice sableuse non récupérable, devenant de plus en plus blanchâtre vers le bas                                    |                                                                        |
|             | 5.3 à 6.2        | Matériau perdu: du sable vraisemblablement                                                                                                         |                                                                        |
|             | 6.2 à 10.0       | Dominance calcaire à poches de sable non récupérable au sondage.<br>Structure plus ou moins fissurée                                               |                                                                        |
| 7           | 0.0 à 0.8        | Remblai en tuf sableux rougeâtre clair                                                                                                             |                                                                        |
|             | 0.8 à 1.1        | Rognons de calcaire fissuré                                                                                                                        |                                                                        |
|             | 1.1 à 1.2        | Banc calcaire                                                                                                                                      |                                                                        |
|             | 1.2 à 1.5        | Sable perdu au carottage                                                                                                                           |                                                                        |
|             | 1.5 à 5.0        | Dalle calcaire saine dans l'ensemble                                                                                                               |                                                                        |
|             | 5.0 à 6.0        | Matrice sableuse presque complètement lessivée + rognons calcaires de taille graveleuse à décimétrique                                             |                                                                        |
|             | 6.0 à 10.0       | Calcaire presque sain avec passages de couches altérées: de 6.0m à 6.5m, de 7.0m à 7.5m et de 8.5m à 9.0m                                          |                                                                        |
| 8           | 0.0 à 0.8        | Sable caillouteux à rognons calcaires graveleux à décimétriques                                                                                    |                                                                        |
|             | 0.8 à 3.0        | Alternance de bancs calcaires d'épaisseur 10cm à 20cm et de couches sableuses à matériaux difficilement récupérable                                |                                                                        |
|             | 3.0 à 10.0       | Calcaire plus ou moins altéré à passage de sable lessivé                                                                                           |                                                                        |

| BHN° | Prof. (m)  | DESCRIPTION                                                                                                                                 |
|------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9    | 0.0 à 0.4  | Remblai de tuf caillouteux                                                                                                                  |
|      | 0.4 à 1.0  | Blocs de calcaire assez fissuré mais à structure continue et sable lessivé                                                                  |
|      | 1.0 à 2.3  | Alternance de blocs calcaires et de couches sableuses: environ 1/3 de calcaire pour 2/3 de sable                                            |
|      | 2.3 à 10.0 | Dalle calcaire sain à très peu alvéolaire                                                                                                   |
| 10   | 0.0 à 0.8  | Sable grossier avec passage d'un banc calcaire entre 0.5m et 0.7m                                                                           |
|      | 0.8 à 2.4  | Calcaire peu altéré, alvéolaire, avec passage sableux plus ou moins volumineux                                                              |
|      | 2.4 à 6.0  | Calcaire un peu altéré à sain en profondeur. Passage d'horizons sableux de moins en moins fréquents                                         |
|      | 6.0 à 8.0  | Environ 50% de perte en sable                                                                                                               |
|      | 8.0 à 10.0 | Calcaire non fissuré à proportion peu inférieure à celle du sable                                                                           |
| 11   | 0.0 à 0.8  | Remblai en tuf caillouteux                                                                                                                  |
|      | 0.8 à 1.5  | Cailloux calcaires dans matrice sableuse lessivée                                                                                           |
|      | 1.5 à 2.2  | Sable grossier à caillouteux                                                                                                                |
|      | 2.2 à 2.85 | Blocs de calcaires lessivés                                                                                                                 |
|      | 2.85 à 3.5 | Sable grossier à caillouteux                                                                                                                |
|      | 3.5 à 8.4  | Bancs de calcaire d'épaisseur pouvant atteindre 0.8m, avec passages d'horizons sableux lessivés. Calcaire de plus en plus sain vers la base |
|      | 8.4 à 10.0 | Cailloux calcaires dépourvus de sable. La composition en cailloux de calcaire et en sable est d'environ 1 pour 4 respectivement             |
| 12   | 0.0 à 1.0  | Calcaire sableux beige caillouteux                                                                                                          |
|      | 1.0 à 2.0  | Calcaire gypseux blanc à rougeâtre alvéolaire mais peu altéré                                                                               |
|      | 2.0 à 2.5  | Modules calcaires dans matrice sableuse. Le sable est perdu au carottage                                                                    |
|      | 2.5 à 3.5  | Banc calcaire alvéolaire avec passages d'horizons sableux                                                                                   |
|      | 3.5 à 5.5  | Alternance de bancs calcaires et de sable en proportions comparables                                                                        |
|      | 5.5 à 10.0 | Alternance de calcaire alvéolaire et de sable grossier, avec dominance calcaire vers la base                                                |
| 13   | 0.0 à 0.8  | Couche de remblai de tuf sableux peu caillouteux                                                                                            |
|      | 0.8 à 1.0  | Blocs calcaires                                                                                                                             |
|      | 1.0 à 1.3  | Sable tufeux grossier à peu caillouteux                                                                                                     |
|      | 1.3 à 6.5  | Calcaire sain rougeâtre avec passage d'une couche de sable entre 3.6m à 4.0m. Le calcaire devient de plus en plus blanchâtre vers le bas    |
|      | 6.5 à 10.0 | Alternance de dalles calcaires (20cm à 50cm) et de sable grossier                                                                           |
| 14   | 0.0 à 0.7  | Sable beige caillouteux                                                                                                                     |
|      | 0.7 à 1.0  | Cailloux calcaires dans matrice sableuse. Cette dernière est perdue au carottage                                                            |
|      | 1.0 à 2.3  | Sable dépourvu de rognons calcaires et difficilement récupérable                                                                            |
|      | 2.3 à 10.0 | Dalle calcaire à faible contenance en sable. Sable perdu au carottage. Le calcaire est rougeâtre vers le toit et blanchâtre vers la base    |
| 15   | 0.0 à 0.7  | Sable limoneux et caillouteux                                                                                                               |
|      | 0.7 à 1.5  | Modules calcaires décimétriques et matrice sableuse                                                                                         |
|      | 1.5 à 2.0  | Dominance sableuse et rognons calcaires graveleux                                                                                           |
|      | 2.0 à 6.0  | Rognons calcaires plus ou moins volumineux et peu de sable. Ce dernier est perdu au carottage                                               |
|      | 6.0 à 6.5  | Banc calcaire plutôt sain                                                                                                                   |
|      | 6.5 à 7.5  | Rognons calcaires plus ou moins volumineux et peu de sable. Ce dernier est perdu au carottage                                               |
|      | 7.5 à 10.0 | Dalle calcaire peu fissurée à passages sableux à proportion estimée à 1/3                                                                   |

**Tableau 3 : Résultats des calculs dérivant de l'essai Down-hole effectué dans BH-08.**

| Prof. (m) | V <sub>p</sub> (m/s) | V <sub>s</sub> (m/s) | □    | G <sub>dyn</sub> (MPa) | E <sub>dyn</sub> (MPa) | K (MPa) | INTERPRETATION                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------|----------------------|----------------------|------|------------------------|------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.00      | 1380                 | 571                  | 0.4  | 554.27                 | 1548.31                | 2498.45 | - Vitesse des ondes de compression: 1380m/s<br>- Vitesse des ondes de cisaillement: 571 m/s<br>- Matériaux rencontrés au carottage: sables caillouteux et alternance de sables et de bancs de calcaires<br>- Modules d'élasticité: E <sub>dyn</sub> =1548 MPa      G <sub>dyn</sub> =554 MPa |
| 2.00      | 1380                 | 571                  | 0.4  | 554.27                 | 1548.31                | 2498.45 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 3.00      | 1380                 | 571                  | 0.4  | 554.27                 | 1548.31                | 2498.45 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 4.00      | 1380                 | 571                  | 0.4  | 554.27                 | 1548.31                | 2498.45 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 5.00      | 1380                 | 571                  | 0.4  | 554.27                 | 1548.31                | 2498.45 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 6.00      | 1380                 | 571                  | 0.4  | 554.27                 | 1548.31                | 2498.45 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 7.00      | 2170                 | 909                  | 0.39 | 1652.56                | 4606                   | 7214.38 | - Vitesse des ondes de compression: 2170m/s<br>- Vitesse des ondes de cisaillement: 909 m/s<br>- Matériaux rencontrés: calcaires altérés<br>- Modules d'élasticité: E <sub>dyn</sub> =4606MPa      G <sub>dyn</sub> =1652MPa                                                                 |
| 8.00      | 2170                 | 909                  | 0.39 | 1652.56                | 4606                   | 7214.38 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 9.00      | 2170                 | 909                  | 0.39 | 1652.56                | 4606                   | 7214.38 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 10.0      | 2170                 | 909                  | 0.39 | 1652.56                | 4606                   | 7214.38 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

**Tableau 4 : Résultats des calculs dérivant de l'essai Down-hole effectué dans BH-10.**

| Prof. (m) | V <sub>p</sub> (m/s) | V <sub>s</sub> (m/s) | □    | G <sub>dyn</sub> (MPa) | E <sub>dyn</sub> (MPa) | K (MPa)  | INTERPRETATION                                                                                                                                                  |
|-----------|----------------------|----------------------|------|------------------------|------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.00      | 1850                 | 770                  | 0.4  | 1185.8                 | 3308.93                | 5263.93  | V <sub>p</sub> : 1850m/s      V <sub>s</sub> : 770 m/s<br>Matériaux rencontrés: calcaires altérés<br>E <sub>dyn</sub> =3309 MPa      G <sub>dyn</sub> =1186 MPa |
| 2.00      | 1850                 | 770                  | 0.4  | 1185.8                 | 3308.93                | 5263.93  |                                                                                                                                                                 |
| 3.00      | 2500                 | 1111                 | 0.38 | 2962.37                | 8158.09                | 11050.17 | V <sub>p</sub> : 2500m/s      V <sub>s</sub> : 1111 m/s<br>Matériaux rencontrés: calcaires<br>E <sub>dyn</sub> =8158 MPa      G <sub>dyn</sub> =2962 MPa        |
| 4.00      | 2500                 | 1111                 | 0.38 | 2962.37                | 8158.09                | 11050.17 |                                                                                                                                                                 |
| 5.00      | 2500                 | 1111                 | 0.38 | 2962.37                | 8158.09                | 11050.17 |                                                                                                                                                                 |
| 6.00      | 2500                 | 1111                 | 0.38 | 2962.37                | 8158.09                | 11050.17 |                                                                                                                                                                 |
| 7.00      | 2040                 | 833                  | 0.4  | 1179.61                | 3302.79                | 5501.91  | V <sub>p</sub> : 2040m/s      V <sub>s</sub> : 833 m/s<br>Matériaux rencontrés: calcaires sableux<br>E <sub>dyn</sub> =3303 MPa      G <sub>dyn</sub> =1180 MPa |
| 8.00      | 2040                 | 833                  | 0.4  | 1179.61                | 3302.79                | 5501.91  |                                                                                                                                                                 |
| 9.00      | 2040                 | 833                  | 0.4  | 1179.61                | 3302.79                | 5501.91  |                                                                                                                                                                 |

**Tableau 5: Programme des essais de laboratoire réalisés.**

| Code du Sondage | Profondeur (m) | Nombre d'échantillons | TYPE D'ESSAI EFFECTUE |            |            |            |               |                |               |               |
|-----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|                 |                |                       | Abs.                  | $\gamma_s$ | $\gamma_h$ | $\gamma_d$ | Granulométrie | R <sub>c</sub> | Chimie        |               |
| BH 01           | 1.8            | 1                     |                       |            |            |            |               |                | + (état sec)  |               |
|                 | 2.0 à 2.3      | 1                     | +                     |            |            |            |               |                |               |               |
| BH 08           |                | 1                     |                       |            |            |            |               |                |               | +             |
| BH 09           | 1.5            | 2                     |                       |            |            | +          |               |                |               |               |
|                 |                | 1                     |                       |            |            |            | +             | (voie sèche)   |               |               |
|                 | 2.5            | 1                     |                       |            |            |            |               |                | +             | (état humide) |
| BH 10           | 2.0            | 1                     |                       |            |            | +          |               |                |               |               |
|                 | 2.5            | 4                     |                       |            |            | +          |               |                |               |               |
| BH 11           | 1.5 à 2.0      | 2                     |                       |            |            | +          |               |                |               | +             |
|                 |                | 2                     |                       |            |            |            | +             | (voie sèche)   |               |               |
|                 | 2.5 à 3.0      | 4                     |                       |            |            | +          |               | +              | (voie humide) |               |

**Tableau 6: Résultats de mesure des poids volumiques secs.**

| BH | $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$ | BH | $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$ | BH | $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$ | BH | $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$ | BH | $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$ |
|----|---------------------------|----|---------------------------|----|---------------------------|----|---------------------------|----|---------------------------|
| 01 | 20.3                      | 04 | 20.2                      | 07 | 21.9                      | 10 | 20.1                      | 13 | 20.0                      |
| 02 | 20.8                      | 05 | 20.8                      | 08 | 21.2                      | 11 | 19.7                      | 14 | 19.6                      |
| 03 | 19.7                      | 06 | 21.1                      | 09 | 20.5                      | 12 | 19.9                      | 15 | 20.4                      |



Tableau 7: Programme des essais de laboratoires réalisés

| Code Sondage | Prof. (m) | RESULTATS OBTENUS |                           |                           |      |             |                        |       |
|--------------|-----------|-------------------|---------------------------|---------------------------|------|-------------|------------------------|-------|
|              |           | Abs.(%)           | $\gamma_s(\text{kN/m}^3)$ | $\gamma_h(\text{kN/m}^3)$ |      | $R_c$ (MPa) | Chimie                 |       |
| BH 01        | 1.8       | ---               | ---                       | ---                       |      | 17.3        | ---                    | ---   |
|              | 2.0 à 2.3 | 0.04              | ---                       | ---                       |      | ---         | ---                    | ---   |
| BH 08        | 2.0       | ---               | ---                       | ---                       | ---  | ---         | Ins. (%)               | 11.32 |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | $\text{SO}_3^-$ (%)    | 2.98  |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | $\text{CaSO}_4$ (%)    | 16.00 |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | $\text{CaCO}_3$ (%)    | 66    |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | Cl <sup>-</sup> (%)    | 0.005 |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | NaCl (%)               | 0.009 |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | $\text{SO}_4^{2-}$ (%) | 3.58  |
| BH 09        | 2.5       | ---               | ---                       | 23.7                      |      | ---         | ---                    | ---   |
|              |           |                   |                           | 23.7                      |      | 18          | ---                    | ---   |
| BH 10        | 2.0       | ---               | 25.5                      | ---                       | ---  | ---         | Ins. (%)               | 11.86 |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | $\text{SO}_3^-$ (%)    | 1.20  |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | $\text{CaSO}_4$ (%)    | 6.48  |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | $\text{CaCO}_3$ (%)    | 79    |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | Cl <sup>-</sup> (%)    | 0.013 |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | NaCl (%)               | 0.021 |
|              |           |                   |                           |                           |      |             | $\text{SO}_4^{2-}$ (%) | 1.45  |
|              | 2.5       | 4                 | 26.0                      | ---                       |      | ---         | ---                    | ---   |
| BH 11        | 1.5 à 2.0 | ---               | ---                       | 21.3                      | 21.7 | ---         | ---                    | ---   |
|              |           | ---               | ---                       | ---                       |      | ---         | ---                    | ---   |
|              | 2.5 à 3.0 | 3                 | 25.5                      | ---                       |      | ---         | ---                    | ---   |

Tableau 1: Coordonnées et résultats des sondages par sismique réfraction.

| S.N°  | COORDONNEES<br>WGS84 UTM31 |                 | VITESSE<br>(m/s) | EPAISSEUR<br>(m)       | DESCRIPTION ET RIPPABILITE (*)<br>EVALUEE SELON<br>CLASSIFICATION DE<br>CATERPILLAR                                |
|-------|----------------------------|-----------------|------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SRT 1 | 523021<br>Est              | 3640045<br>Nord | $V_1 = 751$      | $H_1 = 1.93$           | sables caillouteux (rippable)                                                                                      |
|       |                            |                 | $V_2 = 1377$     | $H_2 = 2.71$           | lentille calcaire fracturée (rippable)                                                                             |
|       |                            |                 | $V_3 = 1531$     | $H_3 = 7.29$           | Alternance vraisemblable rencontrée<br>dans le sondage carotté<br>BH-01. C'est à dire calcaire/sable<br>(rippable) |
|       |                            |                 | $V_4 = 2435$     | Substratum             | Calcaire ± fracturé (rippable)                                                                                     |
| SRT 2 | 522988<br>Est              | 3639868<br>Nord | $V_1 = 1274$     | $0.51 < H_1 < 4.0$     | Sables caillouteux et rognons calcaires<br>(rippable)                                                              |
|       |                            |                 | $V_2 = 2130$     | $H_3 \leq 7.87$        | Calcaire fracturé                                                                                                  |
|       |                            |                 | $V_3 = 2691$     | Substratum             | Terrain calcaireux ± altéré de vitesse 2691<br>m/s.<br>Rippabilité marginale                                       |
| SRT 3 | 523434<br>Est              | 3639843<br>Nord | $V_1 = 703$      | $H_1 \leq 3.13$        | Sables limoneux caillouteux (rippable)                                                                             |
|       |                            |                 | $V_2 = 1251$     | $H_2 \leq 3.56$        | Calcaire sableux apparaissant en surface<br>par endroits (rippable)                                                |
|       |                            |                 | $V_3 = 1929$     | $5.5 \leq H_3 \leq 12$ | Alternance de blocs calcaireux et dalle<br>calcaire (rippable)                                                     |
|       |                            |                 | $V_4 = 2287$     | Substratum             | Calcaires sains à très peu altérés<br>(rippable)                                                                   |
| SRT 4 | 523045<br>Est              | 3639746<br>Nord | $V_1 = 941$      | $0.91 < H_1 < 2.0$     | remblais sablo- tuffeux caillouteux<br>(rippable)                                                                  |
|       |                            |                 | $V_2 = 2128$     | $H_3 \leq 5.63$        | Calcaires sains avec passages de sables<br>(rippable)                                                              |
|       |                            |                 | $V_3 = 3274$     | Substratum             | Dalle calcaire saine et sables grossiers<br>(défonçable à l'explosif)                                              |