



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

## MEMOIRE

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

En : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Par : *SOLTANI Abdellatif*

*KHELILI Fouazi*

### Sujet

**Modélisation numérique d'une paroi moulée  
(daphragm wall) ancrée par quatre nappes  
de tirants**

Présenté et soutenu publiquement, le 22/09/2020, devant les membres de Jury composé de :

*MESSAOUD Farid*

*M.C.A*

*Président*

*ROUILI Ahmed*

*Prof*

*Rapporteur*

*HAOUAM A.kader*

*Prof*

*Examineur*

Promotion: 2019/2020

## DEDICACE

*« Louange A Dieu, le seul et unique »*

*A LA mémoire de ma très chère mère, qui j'ai perdu Que Dieu le bénisse par sa miséricorde à Mon très cher père que Dieu les garde pour moi.*

*À tous mes frères et mes sœurs À toute ma famille, À tous ceux que j'aime.*

*À toute la promotion du Master spécialité géotechnique 2019-2020.*

*Avec l'expression de tous mes sentiments de respect, Je dédie ce modeste travail.*

*SOLTANI Abdellatif*

## DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont toujours présents dans mon cœur, Mes chers parents que dieu les garde et les protège, pour leur patience et leurs sacrifices.*

*A toute ma famille, et à tous personnes ayant contribué à ce travail de près ou de loins.*

*KHELILI Faouzi*

## REMERCIEMENTS

*Nous remercions avant tout DIEU, le tout puissant, pour nous avoir guidés durant toutes nos années d'études et de nous avoir donnés la volonté et le courage pour terminer ce travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur : Prof/ ROUILI Ahmed pour nous avoir proposés un sujet intéressant et pour la confiance qu'il nous a accordés. Il nous a dirigés tout au long de cette étude et nous a donnés les grands axes de recherche. Nous le remercions aussi pour sa disponibilité et sa gentillesse.*

*Nous remercions également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nous saisissons cette occasion pour exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences et de la Technologie Département Génie Civil. Et tous les responsables de notre université de cheikh larbi tebessi –Tebassa-*

*Nous remercions tous nos familles frères et sœurs et nos amis qui nous ont encouragés à réaliser ce travail.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.*

*Abdellatif SOLTANI*

*Fouazi KHELILI*

**Abstract:**

The anchored diaphragm walls offer a wide field of use in the field of carrying out excavations of great depth and in urban sites.

The objective of this work is to numerically model a diaphragm wall anchored by four layers of tie rods carried out as part of a research action aimed at a better knowledge of the behavior of the open air excavations selected. by molded walls anchored by the Plaxis 2D and 3D finite element code.

The results obtained during numerical modeling are compared with those obtained by the experimental and finite element studies.

The reference model is a diaphragm wall anchored by four layers of tie rods in an erected building site located at rue du Chateau-des-Rentiers, in the 13th arrondissement of Paris, of which construction of levels in the basement.

The study was carried out on one of its constituent panels with the aim of determining the forces applied to this wall as well as its displacements throughout the duration of the work.

**Key words:** diaphragm wall , numerical modeling , anchor, reinforcement, retaining walls.

## **Résumé :**

Les parois moulées ancrées offrent un large champ d'utilisation dans le domaine de réalisation des fouilles de grande profondeur et en site urbain.

Le présent travail a pour objectif de modélisation numérique d'une paroi moulée (diaphragm wall) ancrée par quatre nappes de tirants réalisée dans le cadre d'une action de recherche ayant pour objectif une meilleure connaissance du comportement des fouilles à l'air libre retenues par des parois moulées ancrées par le code d'éléments finis Plaxis 2D et 3D.

Les résultats obtenus lors de la modélisation numérique sont comparés de celles obtenues par les études expérimentales et éléments finis.

Le modèle de référence c'est une paroi moulée ancrée par quatre nappes de tirants dans un site immobilier édifié se trouvant à rue du Château-des-Rentiers, dans le 13<sup>ème</sup> arrondissement de Paris, dont la construction des niveaux en sous-sol.

L'étude a été effectuée sur un de ses panneaux constitutifs ayant pour objectif de déterminer les efforts appliqués à cette paroi ainsi que ses déplacements pendant toute la durée des travaux.

**Mots clés :** paroi moulée , modélisation, tirants d'ancrages, Renforcement, murs de soutènements.

## ملخص :

توفر الجدران الغشائية الراسية مجالاً واسعاً للتطبيق في مجال إجراء الحفريات ذات العمق الكبير وفي المواقع الحضرية.

الهدف من هذا العمل هو وضع نموذج رقمي لجدار حاجز مثبت بأربع طبقات من قضبان الربط التي يتم إجراؤها كجزء من إجراء بحثي يهدف إلى معرفة أفضل بسلوك الحفريات في الهواء الطلق المختارة. بواسطة جدران مصبوب مثبتة بواسطة برنامج الحساب العناصر المحدودة بلاكسيزثنائي و ثلاثي الأبعاد.

تتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها أثناء النمذجة العددية مع تلك التي تم الحصول عليها من خلال الدراسات التجريبية و المحدودة.

النموذج المرجعي عبارة عن جدار حاجز مثبت بأربع طبقات من قضبان الربط في موقع بناء مقام يقع في شارع Château-des-Rentiers في الدائرة 13 من باريس من اجل بناء طوابق سرداب.

أجريت الدراسة على إحدى اللوحات المكونة له بهدف تحديد القوى المطبقة على هذا الجدار بالإضافة إلى إزاحته طوال مدة العمل.

**كلمات البحث :** الجدار الحاجب الحاجز ، النمذجة الرقمية ، قضبان الربط ، التعزيز ، الجدران الإستنادية.

## Sommaire

• Dédicace.....	I-II
• Remerciements.....	III
• Abstract.....	IV
• Résumé.....	V
• Résumé en arabe (ملخص).....	VI
• Sommaire.....	VII-X
• Liste des figures.....	XI-XVII
• Liste Liste des tableaux.....	XVIII
• des notations et abréviations.....	XIX

---

### Chapitre I : Généralité

---

I.1. Introduction généralité.....	01
I.2. Problématique.....	01
I.3. Objectif.....	02
I.4. Plan de mémoire.....	02

---

### Chapitre II : Recherche bibliographique

---

II.1. Généralité sur les ouvrages de soutènement.....	04
II.1.1.Introduction.....	04
II.1.2.Définition.....	04
II.1.3.Différents types des murs de soutènement.....	04
II.2.Les parois moulées.....	06
II.2.1.Historique.....	06
II.2.2.Définition.....	06
II.2.3.Méthode d'exécution de la paroi moulée.....	07
II.2.3.1.Perforation.....	07
II.2.3.2. Méthodes de forage.....	07
a) Forage en continu.....	08
b) Forage par panneaux alternés.....	08
II.2.3.3.Les cages d'armatures.....	08
II.2.3.4.Le béton et le bétonnage.....	09
II.2.3.5.Les joints entre panneaux.....	10
II.2.4.Différents types de parois moulées.....	10
II.2.4.1.Paroi d'étanchéité.....	10
II.2.4.2.Paroi de soutènement simple.....	11
a-Domaine d'emplois.....	12
II.2.4.3.Les parois moulées classiques.....	12
a- la paroi de tranchée couverte.....	13
b- Les "jambes de pantalon".....	13
II.2.4.4.Les parois caissons.....	14
II.2.4.5. Les parois préfabriquées.....	14

a -Simple.....	15
b-Les parois mixtes (ou composites).....	15
II.3. Principe de fonctionnement et domaine d'emploi .....	16
II.3.1.Principe de fonctionnement .....	16
II.3.2 Domaine d'emploi .....	17
II.4. Dimensions caractéristiques.....	18
II.5. Les systemes d'ancrage .....	19
II.5.1.Classification des ancrages .....	20
II.5.2.Domains d'utilisation.....	22
a-Excavation .....	22
b- Confortement de talus .....	22
c- Barrages.....	22
d- Murs de quais .....	22
e- Souterrains.....	22
f-Ancrages de structures.....	22
g-Fondations.....	22
II.5.3.Charges de soulèvement hydrostatiques.....	23
II.5.4.Les deux principes de fonctionnement.....	24
II.5.4.1. Soutènement .....	24
II.5.4.2.Ancrage de structure .....	24
II.6.Les différentes parties du tirant .....	24
II.6.1.Force de précontrainte.....	24
II.6.2.Tête d'ancrage .....	24
II.6.3. la longueur de scellement .....	24
II.6.4. la longueur libre .....	24
II.7. Phases de mise en oeuvre.....	24
II.7.1. Préfabrication et transport.....	24
II.7.2 Forage.....	25
II.7.3. Installation dans le forage et injection.....	25
II.7.4. Essais.....	26
II.7.5. Mise en tension.....	26
II.7.6. Protection définitive.....	26

---

### Chapitre III : Modèle de référence

---

III.1. Site de projet.....	28
III.2. Description de l'ouvrage.....	29
III.2.1.Terassemnt .....	29
III.2.2 .La fouille .....	29
III.2.3. La paroi moulée (panneau 34).....	29
III.3. Les Caractéristiques des sols .....	30
III.3.1.Alluvions anciennes .....	31
III.3.2. Sables de Beauchamp .....	31
III.3.3. Les Marnes et Caillasses .....	31
III.3.4. Le Calcaire grossier.....	32
III.4.Caractéristiques des tirants.....	32
III.5.Phases de travaux (phases de terrassement et de mise en tension des tirants) .....	33
III.6.Equipement du panneau de mesures.....	33
III.7.Résultats des mesures .....	34
III.7.1.Pression des terres.....	34

III.7.1.1.Pression initiale sur la paroi.....	34
III.7.1.2.mesurer les efforts externes appliqués à la paroi .....	35
III.7.3.Déplacements de la paroi.....	36
III.7.4.Comparaison des mesures et du calcul.....	37
III.7.4.1.Déplacements .....	37
III.7.4.2.Moments fléchissants .....	37
III.7.4.3.Pression des terres.....	37
III.7.4.4. Tensions d'ancrage .....	38

---

## Chapitre IV : Modélisation numérique

---

IV.1 Introduction.....	41
IV.2. Géométrie et propriétés des matériaux .....	41
IV.2.1.Géométrie du modèle.....	42
IV.2.2.Caractéristiques physiques et mécanique des matériaux .....	42
IV.2.2.1. Propriétés des couches de sols.....	43
IV.2.2.20Paroi moulée.....	43
IV.2.2.30Les Caractéristiques des tirants du panneau de mesures.....	43
IV.3.Génération du maillage.....	43
IV.3.1.Conditions initiales.....	44
IV.3.2.Conditions hydrauliques .....	44
IV.3.3. Contraintes initiales dans le sol.....	44
IV.4: Calcul numérique :.....	46
IV.4.1: Procédure de calcul.....	46
IV.4.1.1.Définition des phases de calcul.....	46
IV.4.1.2.Les principaux résultats.....	50
IV.4.1.3.Résultats de la phase 01.....	51
IV.4.1.4.Résultats de la phase 02.....	52
IV.4.1.5.Résultats de la phase 03.....	53
IV.4.1.6.Résultats de la phase 04.....	54
IV.4.1.7.Résultats de la phase 05.....	55
IV.4.1.8.Résultats de la phase 06.....	56
IV.4.1.9.Résultats de la phase 07.....	57
IV.4.1.10. Résultats de la phase 08.....	58
IV.4.1.11. Résultats de la phase 09.....	59
IV.4.1.12. Résultats de la phase 10.....	60
IV.4.2.Calcul à l'aide de logiciel PLAXIS 3D Tunnel 1.2.....	61
IV.4.2.1.Les phases de calcul 3D .....	61
IV.4.2.2.Résultats de la phase 10 .....	62
IV.4.2.3.Déplacement de la paroi moulée phase 10.....	63
IV.4.3. Résumé des résultats de 10 phases 10 2D.....	64
IV.4.3.1. Déformation de maillage 2D.....	64
IV.4.3.2.Déformation des éléments structuraux ( Paroi moulée ) 2d .....	64
IV.4.3.3. Résumé des résultats de la phase 10 3d.....	64
IV.4.3.3.1. Déformation de maillage 3d.....	64
IV.4.3.3.2 . Déformation des éléments structuraux (Paroi moulée) phase 10 3D.....	65

IV.4.3.3.3.Commentaire .....	65
IV.4.4.les tensions d'encrages.....	65
IV.4.4.1.Commentaire.....	65
IV.4.5.1.Interprétation des courbes des déplacements.....	66
IV.4.5.2.Commentaire .....	66
IV.4.5.3.Remarque .....	66
IV.4.5.4.Interprétation des courbes des moments fléchissants.....	67
IV.4.5.5.Commentaire.....	67
IV.4.5. 6. Remarque.....	67
IV.4.5.7.Interprétation des courbes des pressions des terres.....	68
V.4.5.8.Commentaire .....	68
V.5.Conclusions .....	69

---

## Chapitre V : Etude paramétrique

---

V.1. Introduction.....	71
V.2.L'influence de la surcharge des ouvrages en surface du sol sur le comportement de la paroi.....	71
V.2.1.Surcharge Repatie en surface 10 kn.m2 .....	72
V.2.2. Surcharge Repatie en surface 30 kn.m2 .....	73
V.2.3. Surcharge en surface 80 kn.m2.....	74
V.2.4.Surcharge en surface 86 kn.m2 .....	75
V.2.5.Surcharge a la base 400 kn.m2 .....	76
V.2.6.Charge horizontal 10 kn.m2.....	77
V.2.7.Les charges commulés (la derniere phase ) .....	78
V.2.8.Effet dynamique (une effort dynamique 25 kn.m2 ).....	79
V.2.9.Effet dynamique (Pour une effort dynamique 125 kn.m2 ).....	80
V.2.10.Les tendions d'encrages.....	81
V.2.11.Déformation de maillage.....	82
V.2.12.Déformation des éléments structuraux ( Paroi moulée).....	82
V.2.14.Interprétation des courbes de déplacements.....	83
V.2.14.commentaire.....	83
V.3.Conclusion.....	84

---

## Chapitre VI : Conclusion générale

---

VI. 1.Conclusion générale :	86
-----------------------------	----

---

## Chapitre VII : Bibliographie

---

VII.1.Bibliographie :	88
-----------------------	----

## *Liste des figures*

N <sup>o</sup> Figure	Intitulé	N <sup>o</sup> Page
<b>Chapitre II : Les soutènements</b>		
Figure II.1	Exemple de soutènement complexe en site urbain au moyen de paroi moulée et ancrages Précontraints	05
Figure II.2	Photo de la paroi moulée	06
Figure II.3	Principe général d'exécution(cas d'un panneau primaire).	07
Figure II.4	Méthodes de forage en continu	08
Figure II.5	Méthodes de forage par panneaux alternés	08
Figure II.6	Les cages d'armatures	09
Figure II.7	Le bétonnage	10
Figure II.8	Schéma de principe parois moulée d'étanchéité (présentation du N.N.P.)	10
Figure II.9	schéma de principe d'une paroi moulée en place avec une nappe de tirants	12
Figure II.10	schéma montre les parois moulées de tranchée couverte avec planché qui sert à buter les parois	13
Figure II.11	montre la différence entre paroi moulée jambe de pantalon et paroi simple	14
Figure II.12	Principe de construction d'une paroi préfabriquées	15
Figure II.13	Schéma de principe d'une paroi moulée en place avec quatre nappes de tirants	17
Figure II.14	Représentation schématique des dimensions d'un panneau de paroi moulée	19
Figure II.15	Tirant dont l'armature est scellée directement dans le terrain	20
Figure II.16	Constitution et fonctionnement d'un tirant scellé	20
Figure II.17	Différents types de têtes d'ancrage. (D'après Unimétal)	21
Figure II.18	Les différents types de protection des armatures des tirants en partie libre	21
Figure II.19	les domaines d'utilisation d'ancrage	23
Figure II.20	Charges de soulèvement hydrostatiques	23
Figure II.21	Image de forage	25
Figure II.22	Image de la mise en place d'ancrage	26
<b>Chapitre III : Modèle de reference</b>		
Figure III.1	Plan de situation de terrain de projet	28
Figure III.2	Situation du panneau de mesure et détail de la paroi	28
Figure III.3	Plan de masse de terrain de projet	28
Figure III.4	Coupe de la paroi	29
Figure III.5	Situation du panneau de mesure et détail de la paroi à proximité de celui-ci	30
Figure III.6	Panneau 34	30
Figure III.7	Les phases de travaux	33

Figure III.8	Implantation des appareils équipant sur le panneau de mesure	35
Figure III.9	Distribution de la pression des terres à la fin des terrassements	35
Figure III.10	Comparaison des résultats du calcul avec les résultats expérimentaux obtenus en dernière phase de travaux : a) pression des terres b) déplacements c) moments fléchissants	38
<b>Chapitre IV :Modélisation numérique</b>		
Figure IV.1	6 noeuds triangle	43
Figure IV.2	Modèle géométrique du projet	44
Figure IV.3	Maillage du projet.	46
Figure IV.4	Conditions hydrauliques	46
Figure IV.5	Contraintes initiales dans le sol.	47
Figure IV.6	Génération des contraintes initiales.	47
Figure IV.7	1ere Phase de calcul	48
Figure IV.8	2 <sup>eme</sup> Phase de calcul	49
Figure IV.9	3 <sup>eme</sup> Phase de calcul	49
Figure IV.10	4 <sup>eme</sup> Phase de calcul	49
Figure IV.11	5 <sup>eme</sup> Phase de calcul	50
Figure IV.12	6 <sup>eme</sup> Phase de calcul	50
Figure IV.13	7 <sup>eme</sup> Phase de calcul	50
Figure IV.14	8 <sup>eme</sup> Phase de calcul	51
Figure IV.15	9 <sup>eme</sup> Phase de calcul	51
Figure IV.16	10 <sup>eme</sup> Phase de calcul	51
Figure IV.17	Déplacement de sol Phase 1 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	52
Figure IV.18	Déplacement de la paroi moulée Phase 1 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d:moment fléchissant	52
Figure IV.19	Déplacement de sol Phase 2 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	52

Figure IV.20	Déplacement de la paroi moulée Phase 2 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d:moment fléchissant	52
Figure IV.21	Déplacement de sol Phase 3 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	53
Figure IV.22	Déplacement de la paroi moulée Phase 3 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d:moment fléchissant	53
Figure IV.23	Déplacement de sol Phase 4 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	53
Figure IV.24	Déplacement de la paroi moulée Phase 4 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d:moment fléchissant	53
Figure IV.25	Déplacement de sol Phase 5 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	54
Figure IV.26	Déplacement de la paroi moulée Phase 5 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d:moment fléchissant	54
Figure IV.27	Déplacement de sol Phase 6 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	54

Figure IV.28	Déplacement de la paroi moulée Phase 6 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d: moment fléchissant	54
Figure IV.29	Déplacement de sol Phase 7 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	55
Figure IV.30	Déplacement de la paroi moulée Phase 7 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d: moment fléchissant	55
Figure IV.31	Déplacement de sol Phase 8 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	55
Figure IV.32	Déplacement de la paroi moulée Phase 8 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d: moment fléchissant	55
Figure IV.33	Déplacement de sol Phase 9 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	56
Figure IV.34	Déplacement de la paroi moulée Phase 9 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d: moment fléchissant	56
Figure IV.35	Déplacement de sol Phase 10 a :Maillage déformé b : déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	56

Figure IV.36	Déplacement de la paroi moulée Phase 10 a: Déplacement total b: Déplacement Horizontal c: Déplacement vertical d:moment fléchissant	56
Figure IV.37	Les 10 phases 3D	61
Figure IV.38	Déplacement de sol phase 10 3D a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertictal	62
Figure IV.39	Les points plastics	62
Figure IV.40	Déplacement de la paroi moulée phase 10 3D a : Déplacement total b : Déplacement horizontal c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertictal e :moment fléchissant	63
Figure IV.41	Comparaison des résultats du calcul des déplacements de paroi avec les résultats expérimentaux et les résultats des éléments finis obtenus en dernière phase de travaux	66
Figure IV.42	Comparaison des résultats du calcul des moments fléchissants avec les résultats expérimentaux et les résultats des éléments finis obtenus en dernière phase de travaux	67
Figure IV.43	Comparaison des résultats du calcul des pressions des terres avec les résultats expérimentaux et les résultats des éléments finis obtenus en dernière phase de travaux	68
<b>Chapitre V: Etude Paramétrique</b>		
Figure V.1	Déplacement de sol (Surcharge répartie en surface 10 kn.m <sup>2</sup> ) a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertictal	72
Figure V.2	Déplacement de la paroi moulée (Surcharge répartie en surface 10 kn.m <sup>2</sup> ) a : Déplacement total b : Déplacement horizontal d : Déplacement vertictal e :moment fléchissant	72

Figure V.3	Déplacement de sol (Surcharge répartie en surface 30 kn.m2) a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	73
Figure V.4	Déplacement de la paroi moulée (Surcharge répartie en surface 30 kn.m2) a : Déplacement total b : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical e : moment fléchissant	73
Figure V.5	Déplacement de sol (Surcharge répartie en surface 80 kn.m2) a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	74
Figure V.6	Déplacement de la paroi moulée (Surcharge répartie en surface 80 kn.m2) a : Déplacement total b : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical e : moment fléchissant	74
Figure V.7	Déplacement de sol (Surcharge répartie en surface 86 kn.m2) a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	75
Figure V.8	Déplacement de la paroi moulée (Surcharge répartie en surface 86 kn.m2) a : Déplacement total b : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical e : moment fléchissant	75
Figure V.9	Déplacement de sol (Surcharge répartie à la base 400 kn.m2) a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	76
Figure V.10	Déplacement de la paroi moulée (Surcharge répartie à la base 400 kn.m2) a : Déplacement total b : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical e : moment fléchissant	76
Figure V.11	Déplacement de sol ( Charge horizontale 10 kn.m2 ) a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	77

Figure V.12	Déplacement de la paroi moulée ( Charge horizontale 10 kn.m2 ) a : Déplacement total b : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical e : moment fléchissant	77
Figure V.13	Déplacement de sol Les charges communes ( la dernière phase ) a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	78
Figure V.14	Déplacement de la paroi moulée Les charges communes (la dernière phase) a : Déplacement total b : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical e : moment fléchissant	78
Figure V.15	Déplacement de sol (une effort dynamique 25 kn.m2 ) a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	79
Figure V.16	Déplacement de la paroi moulée (une effort dynamique 25 kn.m2 ) a : Déplacement total b : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical e : moment fléchissant	79
Figure V.17	Déplacement de sol (une effort dynamique 125 kn.m2 ) a : Maillage déformé b : Déplacement total c : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical	80
Figure V.18	Déplacement de la paroi moulée (une effort dynamique 125 kn.m2 ) a : Déplacement total b : Déplacement horizontal d : Déplacement vertical e : moment fléchissant	80
Figure V.19	Comparaison des résultats du calcul des déplacements avec les résultats expérimentaux et les résultats des éléments finis obtenus en dernière phase de travaux	83

## *Liste des tableaux*

<b>N° Tableau</b>	<b>Intitulé</b>	<b>N° Page</b>
<b>Chapitre II : Les soutènements</b>		
Tableau II.01	Différens types de soutènements d'après Schlosser.	5
<b>Chapitre III : Modèle de référence</b>		
Tableau III.1	caractéristiques du sols	32
Tableau III.2	Caractéristiques des tirants du panneau de mesures	32
Tableau III.3	Comparaison des tensions d'ancrage mesurées et calculées en phase finale	39
<b>Chapitre IV : Modélisation numérique</b>		
Tableau IV.1	Model dimensions	41
Tableau IV.2	Propriétés des couches de sols et des interfaces	43
Tableau IV.3	Propriétés mécaniques de la paroi moulée.	43
Tableau IV.4	Propriétés des tirants d'ancrages.	43
Tableau IV.5	les distances d'excavations.	46
Tableau IV.6	Variation des déplacements de sol pendant les différentes phases 2d	64
Tableau IV.7	Variation des déplacements de paroi pendant les différentes phases 2d	64
Tableau IV.8	Variation des déplacements de sol pendant la phase 10 -3d	64
Tableau IV.9	Variation des déplacements de la paroi pendant la phase 10 -3d	65
Tableau IV.10	comparaisons des tensions d'ancrages	65
<b>Chapitre V :Etude paramétrique</b>		
Tableau V.1	Tensions d'encrages de surcharge répartie en surface	81
Tableau V.2	Tensions d'encrages de surcharge répartie à la base	81
Tableau V.3	Tensions d'encrages de charge horizontale	81
Tableau V.4	Tensions d'encrages de charge dynamique	82
Tableau V.5	Variation des déplacements de sol sous Surcharge ,charge et charge dynamique	82
Tableau V.6	Variation des déplacements de sol sous Surcharge , charge et charge dynamique	82

## Liste des notations et abréviations

### Majuscules latines :

E	[kN/m <sup>2</sup> ]	Module d'Young
EA	[kN/m]	Raideur normale des tirants
U <sub>x</sub>	[m]	Déplacement horizontal
U <sub>Y</sub>	[m]	Déplacement vertical
U <sub>TOTAL</sub>	[m]	Déplacement total
D.G.R.S.T		Délégatin générale à la recherche scientifique et technique
S.E.R.E.T.E		Siege administratif Serete
S.I.F		Sondages injection forage
PL		Pressionmètre limite
TMF		Terrain meuble fondation
TMD		Terrain meuble injectin differe
U <sub>Z</sub>	[m]	Déplacement par rapport a l'axe z
A	[kN/m <sup>2</sup> ]	Charge repartee en surface
B	[kN/m <sup>2</sup> ]	Charge répartie à la base
X	[m]	La distance par rapport a l'axe x
Y	[m]	La distance par rapport a l'axe y ( profondeur)
L <sub>s</sub>	[m]	Longueur de scellement
L	[m]	Longueur libre
UU		Essais non consolidés - non drainés
CU		Essais consolidés-drainés
K <sub>0</sub> :		Poussé de terre au repos
K <sub>x</sub>	[m/j]	La perméabilité dans le sens x
K <sub>y</sub>	[m/j]	perméabilité dans le sens y

### Minuscules latines :

c	[kN/m <sup>2</sup> ]	Cohésion
c'	[kN/m <sup>2</sup> ]	Cohésion effective
cu	[kN/m <sup>2</sup> ]	Cohésion drainé.
d	[m]	Epaisseur équivalente

### Caractères grecques :

γ	[kN/m <sup>3</sup> ]	Poids volumique.
γ unsat	[kN/m <sup>3</sup> ]	Poids volumique non saturé.
φ	[°]	Angle de frottement
φ'	[°]	Angle frottement effective.
φ <sub>u</sub>	[°]	Angle de frottement
ν	[-----]	Coefficient de Poisson
σ:	[kN/m <sup>2</sup> ]	Contrainte normale mobilisée.
σ <sub>h</sub>	[kN/m <sup>2</sup> ]	Contrainte horizontal.
σ <sub>v</sub>	[kN/m <sup>2</sup> ]	Contrainte vertical
ψ	[°]	L'angle de dilatance

---

*Chapitre I :*  
*Généralité*

---

## **I.1. Introduction générale :**

Le domaine d'utilisation des structures de soutènement est très large. Il peut intéresser plusieurs types d'ouvrages tels que les soubassements d'immeubles, les parkings souterrains, les infrastructures enterrées ainsi que les murs de quais.

Parmi ses structures de soutènement La paroi moulée est une solution technique conçue pour résoudre les problèmes, la déformation de la paroi influe directement sur les mouvements des sols autour de l'enceinte.

Le but de ce travail est de mener une modélisation numérique en utilisant le logiciel d'éléments finis PLAXIS, du comportement d'un écran de soutènement en paroi moulée ancrée par quatre nappes de tirants réalisée par Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, l'entreprise S.I.F.-Bachy et le Laboratoire de Mécanique des Solides de l'École Polytechnique se sont associés pour l'étude expérimentale d'une paroi moulée, réalisée dans le cadre d'une action de recherche concertée de la D.G.R.S.T. ayant pour objectif une meilleure connaissance du comportement des fouilles à l'air libre retenues par des parois moulées ancrées.

Tout en se concentrant sur la comparaison des résultats des déplacements obtenus par ce logiciel avec ceux obtenus par des mesures inclinométriques recueillies lors de la réalisation du projet, ainsi qu'avec ceux obtenus par le calcul aux éléments finis Moyen du logiciel ROSALIE (Guellec et al. 1976)

## **I.2. Problématique :**

On peut poser la question fondamentale suivante :

La méthode de modélisation numérique par le code plaxis peut-elle nous conduire à des résultats satisfaisants par rapport à d'autres méthodes numériques et expérimentales ?

Si oui, il faut que les résultats de calcul soient les mêmes ou plus proches des autres résultats.

### **I.3. Objectif :**

Dans ce présent travail un modèle numérique est proposé, dans lequel on étudie la stabilité d'une paroi encrée par quatre tirants d'ancrage ( les déplacements les moments flichissants les pressions des terres).

On considère modèle numérique pour comparer les resultats avec les resultats de modèle de référence, après on fait une étude paramétrique.

### **I.4. Plan de mémoire :**

Notre mémoire a été articulée sur six chapitres Pour bien présenter les informations sur la stabilité d'une paroi moulée ancrée par quatre nappes de tirants :

- Chapitre I : Généralité.
- Chapitre II : Recherche Bibliographie.
- Chapitre III : Modèle de Référence.
- Chapitre IV : Modélisation Numérique.
- Chapitre V : Etude Paramétrique.
- Chapitre VI : Conclusion Générale.

---

*Chapitre II :*  
*Recherche bibliographique*

---

## **II.1. Généralité sur les ouvrages de soutènement:**

### **II.1.1 .Introduction:**

La conception de murs de soutènement à retenue multiple nécessite l'utilisation de méthodes d'analyse qui tiennent compte de l'interaction sol-structure et permet de simuler la séquence de construction par étapes.

Il en existe une grande variété se caractérisant par des fonctionnements différents et conduisant à des études de stabilité interne spécifiques.

Tous ces ouvrages ont en commun la force de poussée exercée par le massif de sol retenu. Par contre, c'est principalement la manière dont est reprise cette force de poussée qui différencie les différents types d'ouvrages.

### **II.1.2. Définition:**

Un ouvrage de soutènement est une construction destinée à prévenir.

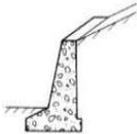
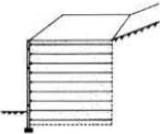
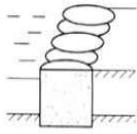
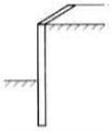
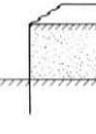
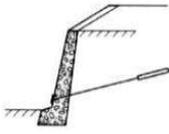
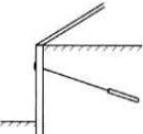
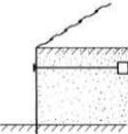
L'éboulement ou le glissement d'un talus raide . Les ouvrages de soutènement sont Essentiellement employés, soit en site montagneux pour protéger les chaussées Routières contre le risque d'éboulement ou d'avalanches, soit en site urbain pour Réduire l'emprise d'un talus naturel, en vue de la construction d'une route, d'un Bâtiment ou d'un ouvrage d'art. Il existe deux grandes classes d'ouvrages de soutènement : ceux composés d'une paroi résistante et d'une semelle de fondation et ceux composés d'une paroi [1].

### **II.1.3. Différents types des murs de soutènement:**

La notion (d'écran de soutènement) couvre l'ensemble des structures servant à retenir un massif de sol autour d'une excavation à l'aide d'éléments de matériaux Résistants à la poussée des terres. Dans la définition Eurocode (EC7\_1, 2004), un Ouvrage de soutènement retient des terrains (sols, roche ou remblai) et/ou de l'eau L'effort de poussée exercé par le massif de terres retenu peut être repris de Divers manières, trois modes principaux peuvent être distingués :

- Cas où la poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement
- Cas où la poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement
- Cas où la poussée est reprise par des ancrages

**Tableau II.1** : Différents types de soutènements d’après Schlosser

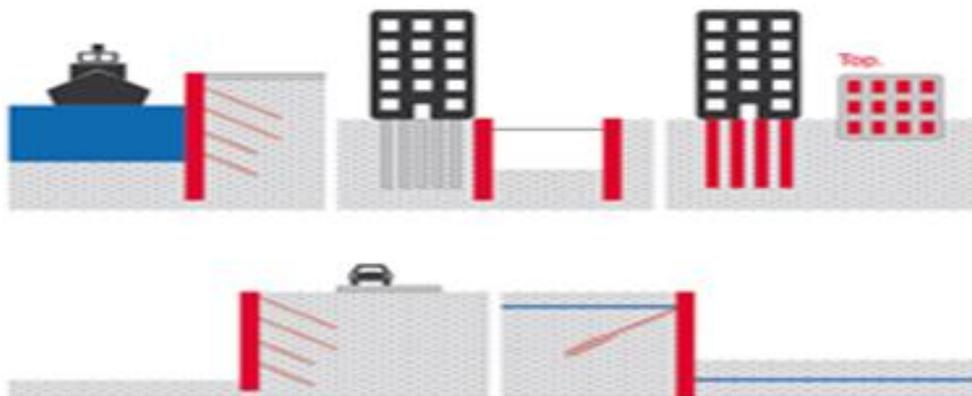
Mode de reprise de la poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids de l’ouvrage	 Mur poids en béton ou maçonnerie	 Mur en Terre Armée	 Ouvrage cellulaire
Encastrement	 Mur cantilever en béton armé	 Paroi moulée	 Rideau de palplanches
Ancrage	 Mur en béton, ancré	 Paroi moulée ancrée	 Rideau ancré

- Dans notre travail on a choisis le type de murs parois moulée ancrée.

Pour le choix des parois moulées, on ne peut pas vraiment parler d'avantage mais de nécessité. En effet pour construire sous le niveau naturel du terrain, une autre solution envisageable aurait été de terrasser sur une surface beaucoup plus grande et de réaliser ensuite la paroi extérieure.

Mais ce cas de figure n’est pas envisageable pour une construction en site urbain, qui ne laisse pas assez de place en périphérie de l’ouvrage pour la réalisation. La solution envisageable des parois moulées restera l’unique solution.

L’idée consiste à réaliser le mur d’enceinte du futur bâtiment avant le terrassement. C’est ce mur qui soutiendra ensuite les terres : C’est le principe de la paroi moulée [1].



**Figure.II.1:** Exemple de soutènement complexe en site urbain au moyen de paroi moulée et ancrages Précontraints

## II.2. Les parois moulées :

### II.2.1. Historique :

Après les premiers travaux théoriques en 1913 sur l'effet positif de la boue pour stabiliser les forages, et utilisation ponctuelle de boue dans des forages miniers dès 1920, la bentonite est utilisée dans des forages pour la première fois en 1927. Un ingénieur autrichien, Christian Veder imagine en 1938 le concept de mur coulé dans une tranchée emplie de boue, puis en 1948 a lieu la première réalisation similaire sur Terminal Island à Long Beach. La première réalisation en France est faite à Paris par Solétanche à l'impasse d'Antin ; la première paroi moulée des États-Unis est faite en 1962, et en 1966 c'est avec cette technique qu'est faite la « baignoire » étanche des fondations du World Trade Center [2].

### II.2.2. Définition :

Une paroi moulée dans le sol est constituée d'une juxtaposition, le plus souvent dans le même plan, de panneaux verticaux en béton armé. Chacun des panneaux est réalisé par exécution préalable d'une tranchée dans le sol, mise en place d'une cage d'armatures dans celle-ci puis bétonnage, à l'aide d'un tube plongeur.



**Figure.II.2** : Photo de la paroi moulée

### II.2.3 Méthode d'exécution de la paroi moulée :

Les méthodes d'exécution nécessitent d'être rappelées, car elles sont la cause de nombreux défaut.

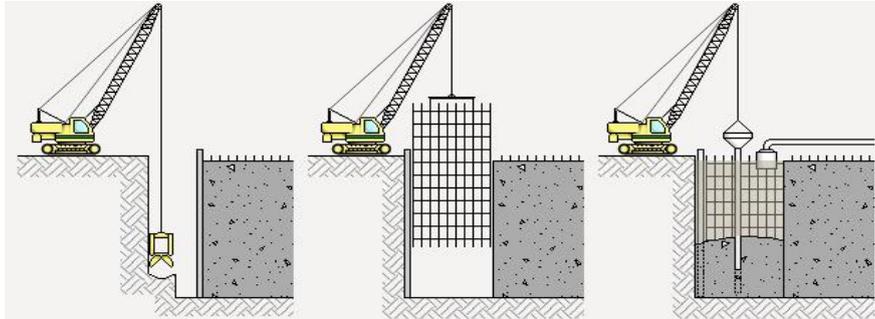


Figure.II.3 : Principe général d'exécution (cas d'un panneau primaire)

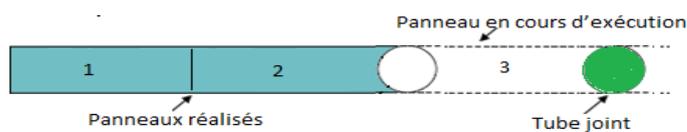
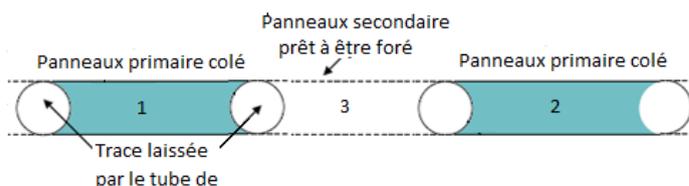
#### II.2.3.1 Perforation :

Outre la fonction de la boue comme soutènement des parois de l'excavation, les principaux problèmes liés à l'exécution de fouille concernant sa verticalité et la traversée des horizons durs. Le maintien de verticalité est obtenu en réalisant des murettes guide en béton armé, guidant l'engin de perforation qui s'ajuste entre elles durant sa descente dans les sols meubles, l'excavation est traditionnellement réalisée à l'aide d'un outil travaillant en rotation ou en roto-percussion, en association avec une circulation inverse de la boue permettant la remontée des sédiments au besoin un trépan peut être à cet dispositif. [3].

L'hydro fraise (ou hydro haveuse), technique datant de 1975 et constamment améliorée, permet une plus grande précision et le passage des horizons durs épais. Cette technique est par contre sensible à certains sols et à la présence de gros blocs qui bloquent les tambours de l'engin. Les grandeurs d'outils varient de 0,52m à 1,52m ; dans le génie civil routier, les épaisseurs courantes variant de 0,52m à 0,80m des profondeurs de 35 à 50 m sont atteintes couramment et peuvent exceptionnellement atteindre 100 m avec une hydro fraise ;

##### II.2.3.1.1.Méthodes de forage :

Le forage est réalisé par panneaux de longueur limitée, en tenant compte de la cohésion du terrain en place et des contraintes extérieures au voisinage de la paroi (mur mitoyen, surcharges, Il se fait soit en continu ou soit par panneaux alternés (méthode des panneaux primaires et secondaires).

**a) Forage en continu:****Figure.II.4** : Méthodes de forage en continu**b) Forage par panneaux alternés:****Figure.II.5** : Méthodes de forage par panneaux alternés

Suivant la méthode en continu, un seul tube joint suffit à l'extrémité de chaque panneau foré, tandis que suivant la méthode en alterné, deux tubes joints sont nécessaires dans chaque panneau primaire foré. Le tube joint peut être remplacé par un profilé spécial comportant un dispositif de maintien du joint water-stop.

**II.2.3.2 Les cages d'armatures :**

Les cages d'armatures, pour les parois moulées, sont mises en place dans la tranchée pleine de boue, avant le bétonnage. Elle doivent être suffisamment rigides pour ne pas se déformer durant les phases de manutention.

L'espacement des aciers doit être suffisant pour que le béton qui arrive puisse être correctement mis en œuvre (20 cm sont recommandés). D'autre part, les cages sont soumises à une pression importante du béton lors des phases de bétonnage et doivent donc comporter beaucoup d'aciers horizontaux.

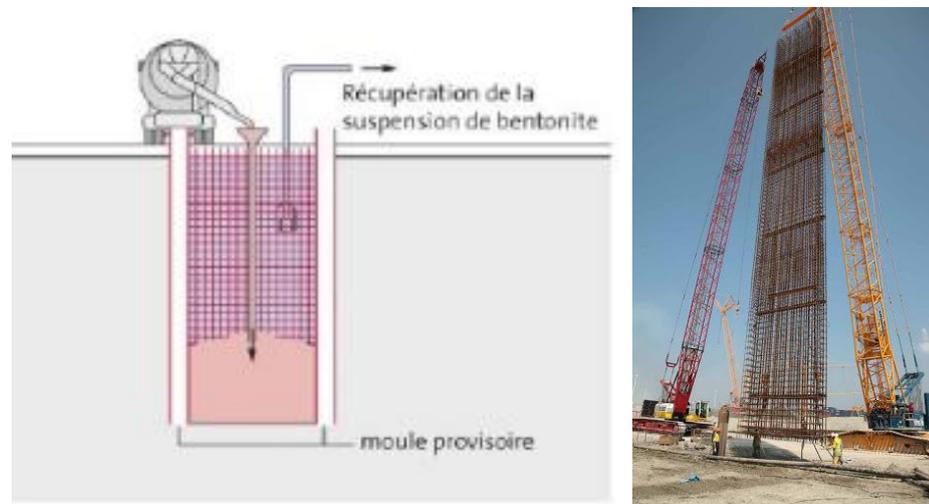
Compte tenu de la présence du cake de bentonite et des incertitudes sur le positionnement des cages (équipées de cales), l'enrobage de projet des aciers est supérieur à celui en vigueur pour les autres ouvrages en béton.

Toutes les réservations diverses pour les dispositifs d'auscultation des parois ou les passages de tirants, doivent être disposées à l'avance dans les éléments de cages d'armatures.

De même, un renforcement de la cage est prévu au niveau des tirants dans le cas des parois ancrées, pour assurer la répartition des efforts d'ancrage. [3].

En cas de mise en œuvre de la cage en plusieurs éléments verticaux, la continuité du

ferrailage est assurée généralement par recouvrement des éléments et, dans certains cas particuliers, par manchonnage. [3]



**Figure.II.6** : Les cages d'armatures

### II.2.3.3. Le béton et le bétonnage :

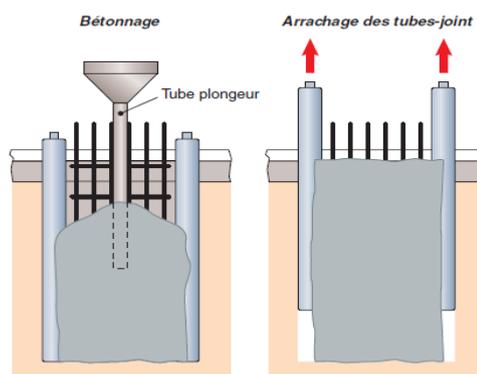
Le béton de paroi moulée n'est jamais vibré. Le bétonnage s'effectue au tube plongeur, depuis le bas de la fouille jusqu'en haut. C'est une opération délicate :

le bétonnage doit s'effectuer régulièrement de façon à ce que la boue et les éléments dont elle s'est chargée soient correctement chassés par le béton, le tube plongeur doit rester engagé de plusieurs mètres dans le béton frais, trois mètres étant considéré comme un minimum, des retardateurs de prise sont incorporés au béton afin que la prise du béton mis en œuvre en premier n'intervienne pas avant la fin du bétonnage de l'ensemble du panneau, le béton doit être suffisamment liquide et non ségrégeable pour occuper correctement tout le volume de la fouille ; il doit cependant être suffisamment compact par simple mise en œuvre gravitaire. Le béton doit faire l'objet d'une étude au niveau de sa formulation et de sa maniabilité.

Le béton doit répondre aux spécifications réglementaires avec des caractéristiques néanmoins légèrement inférieures à celles des ouvrages en élévation.

La composition du ciment retenu doit être conditionnée par le niveau d'agressivité du milieu.

La protection des armatures contre la corrosion est assurée à la fois par la qualité du béton et par une épaisseur d'enrobage adaptée.



**Figure.II.7** : le bétonnage

#### II.2.3.4. Les joints entre panneaux :

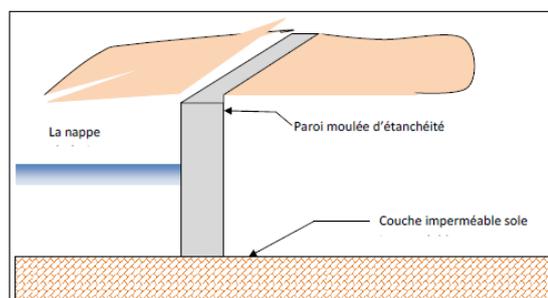
Les joints sont des points délicats de jonction entre panneaux qui, s'ils n'ont pas dans le cas général de fonction structurelle proprement dite, sont par contre très souvent amenés à assurer une continuité vis-à-vis des aspects hydrauliques.

La technologie de coffrage des joints a été sans cesse améliorée; l'époque de construction d'un ouvrage et la connaissance de l'entreprise qui en a assuré la construction peuvent utilement renseigner sur le type de joint. [3]

#### II.2.4. Différents types de parois moulées :

##### II.2.4.1 Paroi d'étanchéité :

Destiné à créer une barrière étanche dans l'épaisseur du sol (par exemple pour protéger une nappe), ce type de paroi ne comporte pas de terrassement après son exécution.



**Figure.II.8** : Schéma de principe paroi moulée d'étanchéité (présentation du N.N.P.)

N'étant pas armée, la paroi est coulée soit avec un mélange de boue de bentonite et de graviers (épaisseur importante, d'au moins 1,50 m). Soit en béton de ciment plastique à dosage de ciment à réduit, introduit au tube plongeur sous boue de bentonite (épaisseur variable de quelques centimètres

une soixantaine, suivant le dosage) ; soit avec un mélange de bentonite, de ciment et d'adjuvants assurant son auto durcissement (épaisseur 50 à 60 cm).

Les parois d'étanchéité à base d'un liant spécial offrent une solution idéale pour maîtriser les fluctuations de la nappe phréatique. Les parois peuvent être placées à la verticale et à l'horizontale. Elles assurent une résistance durable à l'eau. Les applications possibles sont :

- excavations
- digues, tunnels et parkings souterrains
- chemins creux
- sites pollués
- Mise en oeuvre :

Pour mettre en place une paroi en ciment-bentonite, une tranchée est creusée sans vibrations et de façon insonore, jusqu'à la couche imperméable. Les tranchées jusque 100 m de profondeur sont réalisables. Le mélange à base de liant spécial, d'eau et de terre, assure la stabilité de la tranchée.

Après durcissement, il forme une paroi étanche et suffisamment résistante. Pour mettre en place une paroi d'étanchéité par injection de coulis sous pression, le coulis à base d'un liant spécial et d'eau est introduit à la profondeur souhaitée, au moyen d'un tube d'injection. La tête d'injection tournante permet de recouper le sol sous pression de l'injection de coulis. Lors de la remontée de la tête d'injection tournante, une paroi étanche est créée sous forme d'une colonne de terre et de ciment [4].

#### **II.2.4.2 .Paroi de soutènement simple :**

Cas où il n'est pas prévu de construction dans l'excavation après terrassement.

La paroi, en béton armé, est alors maintenue par des tirants d'ancrage permanents, ou par des contreforts, intérieurs ou extérieurs, réalisés par le même procédé que la paroi proprement dite. Le fonctionnement des parois. Paroi moulée classique est celui d'une structure chargée par la poussée des terres et de l'eau soutenue et résistante en flexion pour mobiliser des appuis constitués, d'une part, par le sol en fiche et d'autre part par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran.

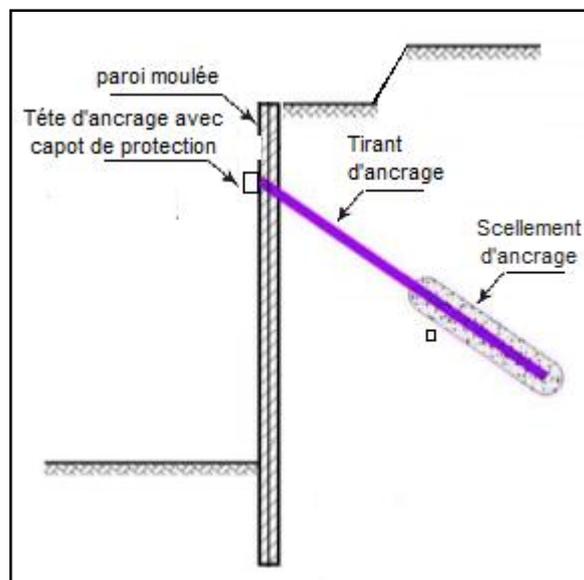
L'écran est généralement fiché de façon significative dans le terrain : de façon typique, la fiche pour une paroi ancrée varie de 30% à 50% de la hauteur de fouille, en permettant la mobilisation d'un appui au sein du terrain, cette fiche joue un rôle déterminant dans l'équilibre de l'ouvrage.

La nature de cette appuis est variable selon les propriétés de terrain, la longueur en fiche de l'écran et sa rigidité et la distribution des autres appuis, tirants ou butons en partie aérienne. Elle peut se réduire à un appui simple pour un écran très rigide, ancrés en partie supérieure et dont la

fiche est courte tandis que pour des écrans ne possédant pas d'appuis en partie supérieur l'encastrement en fiche devra être totale. Dans le cas générale l'écorant se trouve partiellement encastré dans le terrain.

Les appuis en partie supérieur de l'écran sont présents dès que la hauteur libre dépasse environ 5m, de façon à limité les déplacements de renvoyer les efforts d'appuis suffisamment loin en arrière de l'écran, au sein d'une partie stable de massif de sol.il peut également s'agir de butons,dans le cas ou l'effort être renvoyé à une structure faisant face à l'écran (cas des tranchées couvert, par exemple)

La répartition des appuis pour chaque niveau est variable suivant la nature des appuis et l'intensité des efforts à reprendre. L'espace horizontal est plus important dans le cas des butons que dans celui des tirants



**Figure.II.9** : schéma de principe d'une paroi moulée en place avec une nappe de tirants

#### **a-Domaine d'emplois :**

Soutènement notamment pour les fouilles de grande profondeur (usine, centrale ...) Ouvrage hydraulique tel que les quais fondation profonde qui transmette aux sols sous-jacents des charges permanentes et d'exploitations

Dans les zones urbaines pour protéger les structures proximité de la fouille [4].

#### **II.2.4.3. Les parois moulées classiques :**

À côté de la technique classique déjà décrite, à triple fonction (fondation, soutènement,écran étanche), on trouve aussi

#### **a- la paroi de tranchée couverte :**

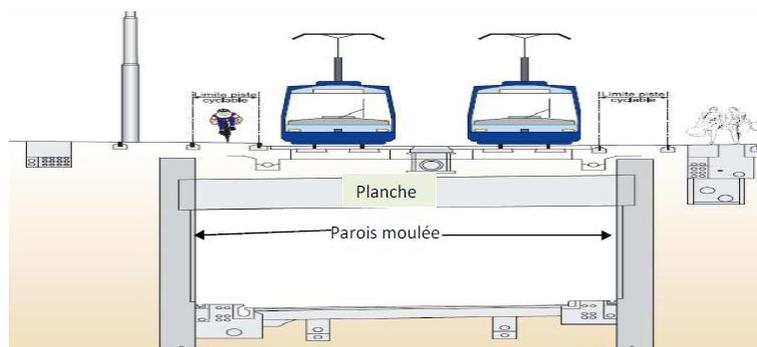
Surtout utilisée en travaux publics pour les voies de circulation : routes, chemins de fer, métro,

canaux souterrains, parkings à niveaux multiples.

On coule les parois moulées de rive en béton armé (éventuellement celles formant appuis intermédiaires), puis le plancher de couverture au niveau du sol, qui sert à buter les parois en tête.

Le terrassement est ensuite effectué en souterrain, sous ce plancher sur la hauteur du premier sous-sol. Plusieurs planchers successifs peuvent être coulés au cours du terrassement. Cette technique a deux avantages :

- \_ Libération immédiate de la surface pour la circulation au niveau du sol existant ;
- \_ Suppression des tirants et des butons.



**Figure.II.10** : schéma montre les parois moulées de tranchée couverte avec planché qui sert à buter les parois

- La méthode de "tranchée couverte"

La méthode de "tranchée couverte" est généralement choisie pour procéder à la réalisation d'un ouvrage dans un environnement urbanisé et sous faible couverture. La méthode consiste à créer :

- ✓ deux murs de soutènements parallèles en parois moulées : parois en béton armé moulées dans le sol .
- ✓ une dalle de couverture reposant sur ces parois.

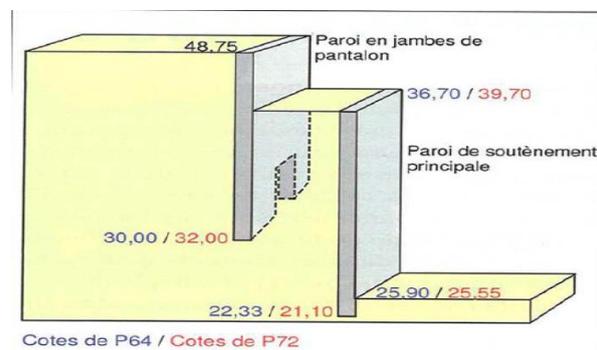
#### **b - Les "jambes de pantalon" :**

Dans le cas d'une paroi à fonction porteuse, la couche d'assise peut être située beaucoup plus bas que le dernier sous-sol et que les couches imperméables sous la nappe : la paroi de soutènement et d'étanchéité continue n'a pas besoin d'être prolongée jusqu'à l'assise de fondation.

On la prolonge seulement sous une partie des panneaux de la paroi. On obtient ainsi une disposition dite "en jambes de pantalon".[4].

Parois en jambe de pantalon à deux fonctions : une fonction vis-à-vis de la stabilité et une fonction hydraulique, les panneaux les plus longs assurant la stabilité de l'ouvrage tandis qu'un meilleur écoulement de l'eau est assuré sous les panneaux adjacents plus courts ; cette disposition

se rapproche quelque peu, du point de vue du fonctionnement en écran, de celui des parois composite



**Figure.II.11** : montre la différence entre paroi moulée jambe de pantalon et paroi simple

#### II.2.4.4. Les parois caissons :

Autre mode d'utilisation de la technique de la paroi moulée, la paroi caisson consiste en une enveloppe, en béton armé, que l'on remplit de béton cyclopéen après avoir retiré les terres contenues à l'intérieur.

Elle remplace, pour de très grandes dimensions et de grandes profondeurs, la technique des caissons havés Caissons havés ("ouverts") Les extrémités inférieure et supérieure sont ouvertes.

Le caisson est foncé, en place Lorsque la cote finale est atteinte on assèche le caisson et on le remplit de béton Pour faciliter la pénétration du caisson dans le sol, les extrémités inférieures des parois latérales du caisson sont façonnées en biseau ; sur cette partie biseautée, ou "crinoline", est fixée une "trousse coupante" munie d'un "couteau" prolongeant la paroi extérieure du caisson; elle permet de fonder des charges ou d'ancrer des efforts de traction considérables.

#### II.2.4.5. Les parois préfabriquées :

La finition d'une paroi moulée présente toujours une certaine grossièreté du fait de son moulage dans le sol : inégalités de la face visible après terrassement, joints entre panneaux imparfaits, mauvaise position de l'armature, etc.

La paroi préfabriquée est un perfectionnement de la paroi moulée : le béton n'est plus coulé au tube plongeur sous une boue de bentonite, mais introduit dans celle-ci sous forme de panneaux de béton armé entiers, fabriqués à l'avance en atelier

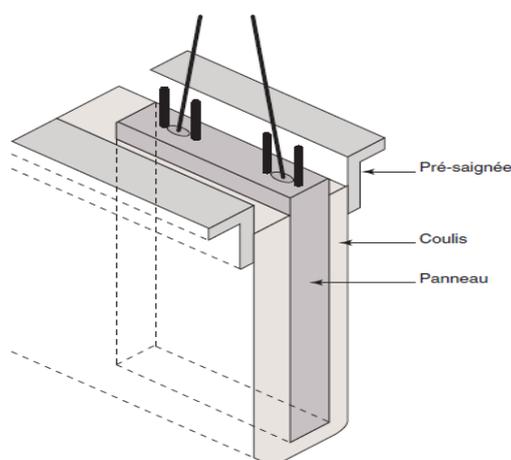
**a-Simple :**

Le forage est fait comme pour une paroi moulée, mais un peu plus large que la future paroi, avec remplissage de boue de bentonite. Les panneaux préfabriqués, en béton armé, sont descendus à la suite les uns des autres dans le forage et calés sur les parois de la pré-saignée. [4].

Ils sont centrés de manière à laisser une épaisseur de boue de chaque côté. Un coulis de sable et ciment est ensuite injecté par le bas, qui prend la place de la boue sur les deux faces des panneaux. Il existe des mélanges autodurcissants qui font office à la fois de boue de forage et de coulis, ce qui simplifie les opérations. Les extrémités des panneaux préfabriqués sont façonnées en forme de joints, de manière à assurer la liaison de panneau à panneau, le coulis de ciment assurant le scellement. Au moment du terrassement le coulis durci est enlevé sur la face de la paroi qui devient apparente.

Les dimensions des panneaux préfabriqués sont conditionnées par leur poids qui ne doit pas être prohibitif vis-à-vis de la manutention et de l'appui sur les murettes de la pré-saignée.

La longueur est en général comprise entre 2 et 4 m. Les épaisseurs sont un peu inférieures à celles des parois moulées, la préfabrication autorisant des contraintes du béton plus élevées. des passages sont réservés dans les panneaux pour les tirants d'ancrage qui seront mis en place au cours du terrassement. [4]



**Figure.II.12 :** Principe de construction d'une paroi préfabriquée

**b-Les parois mixtes (ou composites)**

On citera, pour mémoire, les techniques ainsi appelées, qui associent les procédés de la paroi moulée et de la paroi préfabriquée. Par exemple : une paroi préfabriquée armée, en partie haute, sur la hauteur des sous-sols à terrasser et de la nappe phréatique (rôle triple : porteur, de soutènement et d'étanchéité), encadrée au pied dans une paroi moulée non armée, descendant plus profondément jusqu'au substratum porteur (rôle porteur simple).

- Domaine d'emploi

- ouvrages de déblai
- en site terrestre
- hors d'eau
- dans pratiquement tous les terrains
- très utilisées en site urbain
- hauteur moyenne à forte
- Constitution
- Pieux isolés: entraxe 2,5 à 4 m - pieux métalliques (h) ou préfabriqué en béton armé mis en place et scellés (à l'aide de béton) dans un forage
- Voile réalisé entre les pieux au fur et à mesure du terrassement : béton projeté ou coulé en place, armé

### **II.3. Principe de fonctionnement et domaine d'emploi :**

#### **II.3.1. Principe de fonctionnement :**

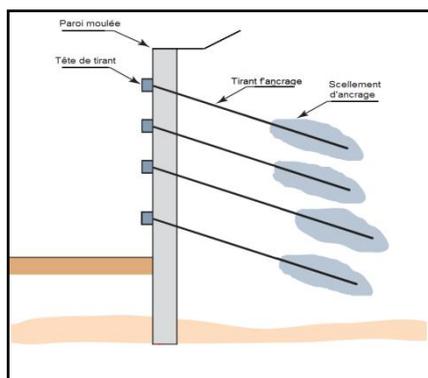
Le fonctionnement des parois est celui d'une structure chargée par la poussée des terres et de l'eau soutenue et résistant en flexion pour mobiliser des appuis constitués, d'une part, par le sol en fiche et, d'autre part, par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran. L'écran est généralement fiché de façon significative dans le terrain: de façon typique, la fiche, pour une paroi ancrée, varie de 30 à 50 % de la hauteur de fouille. En permettant la mobilisation d'un appui au sein du terrain, cette fiche joue un rôle déterminant dans l'équilibre de l'ouvrage. La nature de cet appui est variable suivant les propriétés du terrain, la longueur en fiche de l'écran et sa rigidité et la distribution des autres appuis, tirants ou butons, en partie aérienne. Elle peut se réduire à un appui simple, pour des écrans très rigides, ancrés en partie supérieure et dont la fiche est courte, tandis que, pour des écrans ne possédant pas d'appui en partie supérieure, l'encastrement en fiche devra être total.

Dans le cas général, l'écran se trouve partiellement encasté dans le terrain. [2].

Les appuis en partie supérieure de l'écran sont présents dès que la hauteur libre dépasse environ 5 m, de façon à limiter les déplacements en tête de l'ouvrage et à assurer sa stabilité. Il s'agit alors de tirants permettant de renvoyer les efforts d'appui suffisamment loin en arrière de l'écran, au sein d'une partie stable du massif de sol. Il peut également s'agir de butons, dans le cas où l'effort d'appui peut être renvoyé à une autre structure faisant face à l'écran (cas des tranchées couvertes, par exemple).

La répartition des appuis pour chaque niveau est variable suivant la nature des appuis et l'intensité des efforts à reprendre.

L'espace horizontal est plus important dans le cas des butons que dans celui des tirants.



**Figure.II.13** : Schéma de principe d'une paroi moulée en place avec quatre nappes de tirants

### II.3.2 Domaine d'emploi :

La paroi moulée offre un large champ d'application dans le domaine routier pour la réalisation d'ouvrages de Génie Civil. Comme soutènement classique, elle intervient pour la réalisation de fouilles en déblai, et notamment pour les fouilles de grande profondeur (usines, centrales, etc.) et en site urbain.

Elle permet aussi la réalisation de nombreux ouvrages hydrauliques tels que les quais, et est parfois utilisée en protection de sites montagneux.

En présence de nappe phréatique importante, et en association avec une injection de fond ou un substratum étanche, la paroi moulée permet de réaliser de grandes enceintes à l'intérieur desquelles sont effectués les travaux de génie civil, après pompage et rabattement de la nappe.

Par ailleurs, en raison de l'importance de sa section transversale (épaisseur nominale variant de 0,52 m à 1,20 m, voire 1,50 m), la paroi moulée est aussi appelée à transmettre aux sols sous-jacents, des charges d'ouvrages et d'exploitation, assurant ainsi le rôle de fondations profondes. C'est le cas des tranchées couvertes où elle est intégrée à l'ouvrage comme piédroits recevant les charges de la dalle de couverture, et des grands parkings en site urbain [2].

où elle reçoit les charges des différents niveaux de planchers. Dans ces types d'ouvrages, la paroi moulée sert à la fois de soutènement des terres et de fondations.

Une géométrie un peu particulière consiste en la présence de certains panneaux, régulièrement espacés, et systématiquement plus profonds que ceux adjacents. Cette disposition dite en jambes de pantalon a deux fonctions: une fonction vis-à-vis de la stabilité et une fonction hydraulique, les panneaux les plus longs assurant la stabilité de l'ouvrage tandis qu'un meilleur écoulement de l'eau est assuré sous les panneaux adjacents plus courts; cette disposition se rapproche quelque peu, du point de vue du fonctionnement en écran, de celui des parois composites.

Dans toutes ces applications, il s'agit généralement d'écrans plans, ancrés au besoin selon la profondeur des fouilles, par un ou deux niveaux de tirants précontraints définitifs ou provisoires. Les tirants provisoires sont généralement remplacés par des planchers intermédiaires (cas de parkings), ou par la dalle de couverture et éventuellement le radier qui fonctionnent alors comme des butons définitifs.

Lorsque les conditions de site ou d'environnement ne permettent pas la mise en œuvre des tirants, ou lorsque les efforts de flexion sont très élevés pour les sections rectangulaires courantes, la paroi moulée peut être munie de contreforts, intérieurs ou extérieurs selon le cas, lui conférant ainsi une forme de section en T qui offre une plus grande rigidité à la flexion. Mais ceci constitue souvent une solution trop lourde à laquelle on n'a recours qu'en dernier ressort.

Enfin, la technique de la paroi moulée est aussi employée pour réaliser de simples écrans étanches, sans aucun rôle de soutènement.

Avec les récents développements technologiques des matériels, il est désormais possible de faire de la paroi moulée dans presque tous les types de sols, et sous de multiples contraintes de site, d'environnement, de géométrie et de hauteur.

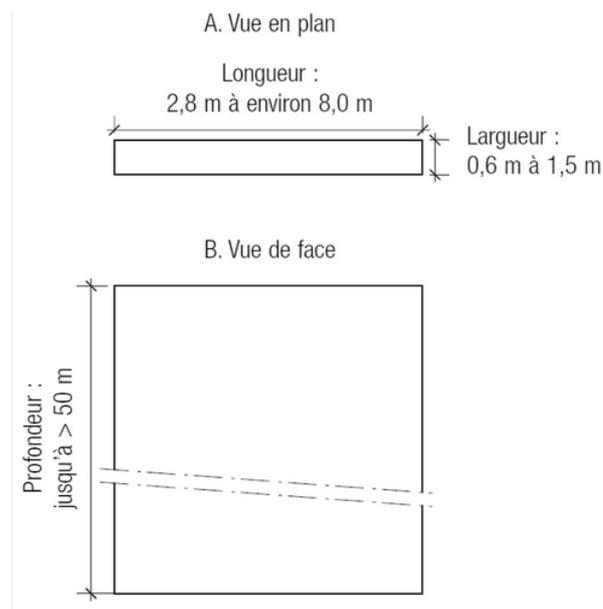
La paroi préfabriquée est de dimension transversale (largeur) plus modeste que la précédente. Compte tenu de son mode de mise en œuvre qui nécessite une manutention des panneaux, elle ne permet pas d'atteindre les mêmes hauteurs soutenues que la paroi moulée.

Elle est intéressante dans la mesure où un linéaire important, dans des conditions géotechniques régulières, permet une préfabrication uniforme. Elle nécessite en contrepartie la possibilité d'aires de préfabrication et de stockage suffisants [2].

#### **II.4. Dimensions caractéristiques :**

La longueur des panneaux est généralement de 2,8 m (ce qui correspond à une fois la longueur du grappin), mais peut également être comprise entre 6,5 et 8,0 m. La largeur des panneaux varie en règle générale entre 0,6 et 1,5 m. Leur profondeur se limite habituellement à environ 30 m, ce qui n'empêche pas que des profondeurs de 50 m ou plus soient envisageables.

La hauteur des murettes-guides est généralement comprise entre 1 et 1,5 m, tandis que leur épaisseur est d'au moins 20 cm. La distance entre les murettes-guides doit excéder de 20 à 50 mm la largeur des panneaux. [5]



**Figure.II.14:** Représentation schématique des dimensions d'un panneau de paroi moulée

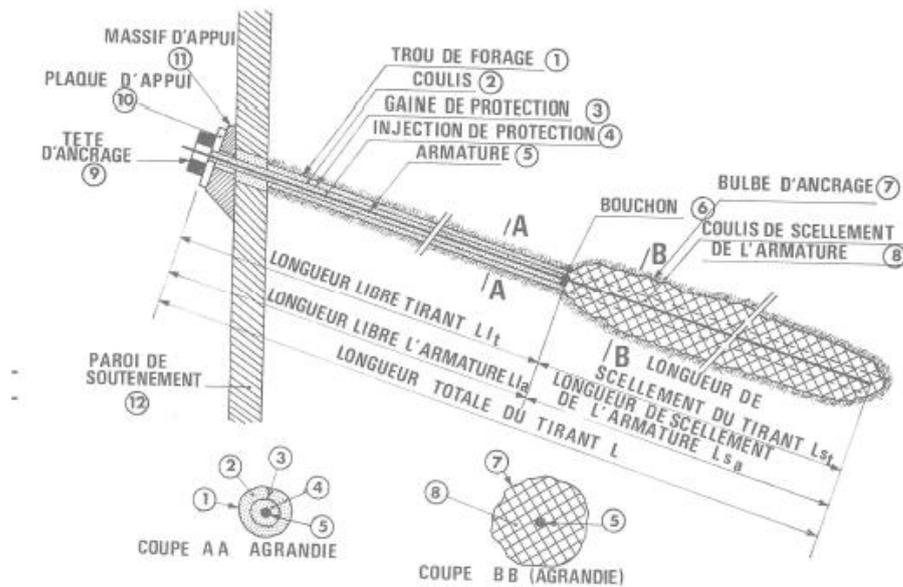
## II.5. Les systèmes d'ancrage :

Les ancrages peuvent constituer un facteur principal dans la stabilité de l'ouvrage et les techniques de leur réalisation utilisées sont très variées, compte tenu notamment de la des ouvrages, des efforts à reprendre, du contexte géotechnique, des conditions d'accès, etc. ...

Ils représentent des dispositifs actifs ou passifs destinés à reprendre des efforts transversaux résultant essentiellement des poussées du sol et de l'eau sur la paroi moulée et des efforts d'amarrage; ces dispositifs ne peuvent que reprendre des efforts de traction.

Un ancrage présente presque toujours deux parties:

- 1- L'ancrage proprement dit qui transmet au sol résistant les efforts à reprendre; cette action n'est possible que si l'ancrage est situé à une distance suffisante de l'ouvrage à retenir afin d'éviter l'interaction entre les prismes de butée du rideau d'ancrage, et de poussée de la paroi.
- 2- Un dispositif de liaison entre cet ancrage proprement dit et l'ouvrage, fréquemment appelé "longueur libre" de l'ancrage [6].

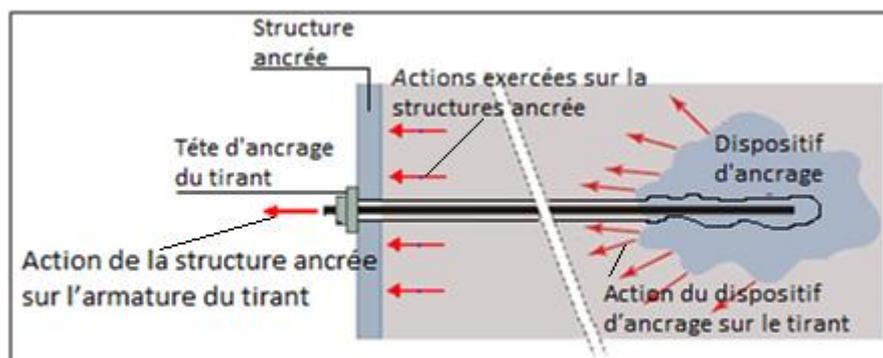


**Figure.II.15** : Tirant dont l'armature est scellée directement dans le terrain

**II.5.1. Classification des ancrages :**

Les ancrages peuvent être classés suivant la manière dont ils sollicitent le sol résistant et suivant leur état de contrainte initiale. On distingue deux familles d'ancrages:

- Les dispositifs à frottement, constitués par des scellements injectés dans le sol au coulis ou mortier. Réalisés après forage, ce sont ceux les plus fréquemment utilisés pour les quais en parois moulées; l'armature est constituée de barres, fils ou torons. [6]



**Figure.II.16:** Constitution et fonctionnement d'un tirant scellé

- Les dispositifs qui mobilisent une butée dans le sol, qui consistent essentiellement en écrans continus ou discontinus constitués de rideaux de palplanches de hauteur généralement limitée (on parle alors de rideau d'ancrage) ; l'organe de liaison entre ce rideau et la paroi est un tirant action du dispositif d'ancrage sur le tyrant.

Les têtes d'ancrages peuvent être ordinaires (fixes) ou articulées selon l'état de contrainte initial, on distingue les ancrages suivants :

- Les ancrages passifs qui sont mis en tension par l'ouvrage lui-même au fur et à mesure que les charges leurs sont appliquées.
- Les ancrages actifs ou précontraints qui sont mis en tension de manière contrôlée à l'aide d'un dispositif adapté, et qui prennent réaction sur l'ouvrage lui-même.

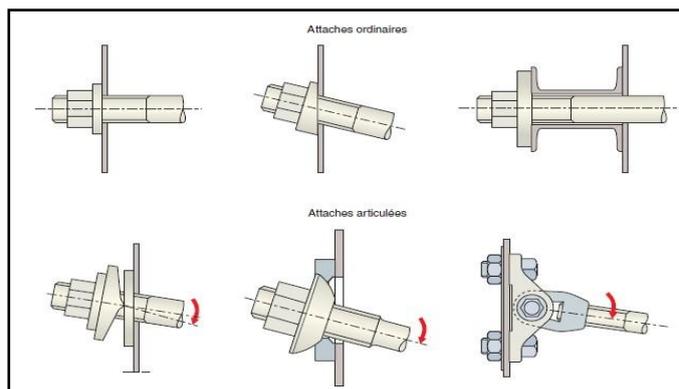


Figure.II.17 : Différents types de têtes d'ancrage. (D'après Unimétal)

Armature constituée :		Description
de câbles ou torons	d'une barre	
<p>Torons</p> <p>Paroi du forage</p> <p>Coulis de gaine</p> <p>Gaine plastique de protection</p>	<p>Barre</p>	Armature simplement protégée par une gaine plastique étanche
<p>Produit de protection</p>		Remplissage de l'espace entre la gaine de protection et l'armature par un produit de protection
<p>Gaine extérieure de protection</p> <p>Torons gainés graissés</p> <p>Gaine de protection</p>		" Double protection de l'armature " (ex : torons gainés - graissés)
<p>Produit de remplissage</p>		Double protection de l'armature avec remplissage de l'espace compris entre les différentes gaines de protection

Figure.II.18 : Les différents types de protection des armatures des tirants en partie libre

**II.5.2. Domaines d'utilisation :**

Les ancrages sont utilisés dans tous les domaines de la construction.

**a- Excavation:**

L'ancrage assure la stabilité du sol et autorise la réalisation de fouilles profondes et larges. Il est souvent temporaire, car la stabilité du terrain est assurée à long terme par le bâtiment construit dans la fouille (parkings, sous-sols,...)

**b- Confortement de talus:**

L'installation d'ancrages inclinés évite les glissements de terrain et améliore la résistance du sol.

**c- Barrages**

Les ancrages verticaux, généralement précontraints, améliorent la résistance au basculement des barrages et limitent les infiltrations d'eau au droit du contact avec la roche.

**d- Murs de quais:**

Les tirants portuaires assurent la stabilité d'un mur de quai en reportant les efforts sur un rideau arrière. Ce principe est également appliqué à des remblais soutenus par des murs préfabriqués (rampes d'accès ,...)

**e- Souterrains**

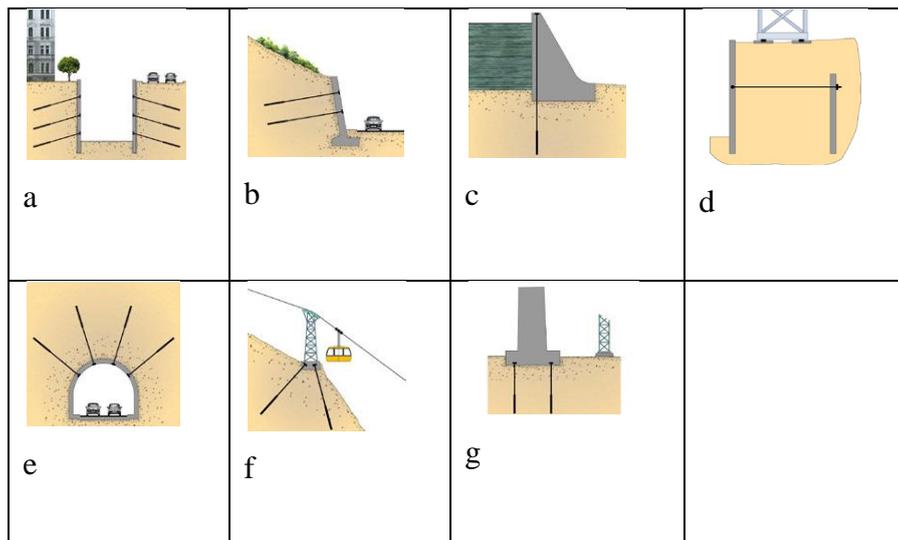
Les techniques d'ancrage consolident le soutènement des galeries par équilibrage des forces du terrain. On retrouve ce type d'utilisation dans les mines et les tunnels.

**f- Ancrages de structures**

Les ancrages verticaux assurent une liaison efficace de la fondation avec le terrain, et limitent les effets de fatigue lorsqu'ils sont précontraints. Ces ancrages sont applicables aux pylônes, antennes de télécommunication, éoliennes,...

**g- Fondations**

Les ancrages permettent la réalisation de constructions sur des terrains ayant de faibles capacités portantes , ou instables. Les descentes de charge de la construction sont transmises aux zones stables en profondeur.

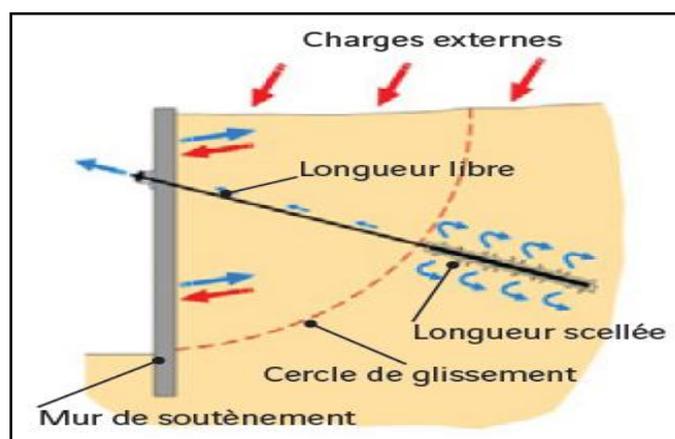


**Figure.II.19:** les domaines d'utilisation d'ancrage

### II.5.3.Charges de soulèvement hydrostatiques:

Des ancres, protégés contre la corrosion, sont employés pour maintenir en place des structures soumises à de fortes sous-pression d'eau et autorisent ainsi la construction d'ouvrages dans les zones humides, en compensant la poussée d'Archimède. [1]

Les tirants d'ancrage sont utilisés pour des efforts de traction. Ils transmettent les forces d'une structure (mur, fondation,...) au terrain dans lequel ils sont scellés. Ils sont généralement précontraints.



**Figure.II.20:** Charges de soulèvement hydrostatiques

## **II.5.4. Les deux principes de fonctionnement:**

### **II.5.4.1. Soutènement :**

Le tirant permet de stabiliser un mur de soutènement en reportant les efforts induits par la poussée naturelle du terrain et les charges d'exploitation au-delà du cercle de glissement. Les efforts sont transmis au terrain par la longueur scellée. Le tirant est généralement précontraint afin de contrôler le déplacement de la paroi lors des différentes phases de construction.

### **II.5.4.2. Ancrage de structure :**

Le tirant a pour but de générer un effort sur une structure, soit pour compenser un effort de soulèvement, soit pour comprimer la fondation sur le terrain. Il doit mobiliser un volume de terrain ayant un poids suffisant pour compenser l'effort souhaité. La longueur scellée est prévue pour transmettre les efforts au terrain, et la longueur libre est définie en fonction du volume de terrain recherché. La force de précontrainte revêt une importance capitale pour limiter ou supprimer le mouvement vertical. Dans le cas d'efforts répétés, elle supprime les risques de fatigue sur le scellement.

## **II.6. Les différentes parties du tirant:**

### **II.6.1. Force de précontrainte :**

Elle peut être inférieure à la force de service du tirant. Elle est définie en fonction des déplacements acceptables de la structure.

### **II.6.2. Tête d'ancrage :**

C'est elle seule qui assure la liaison mécanique entre l'armature du tirant et la structure. Sa résistance et sa pérennité doivent faire l'objet d'une attention particulière. [6].

### **II.6.3. la longueur de scellement :**

de l'armature (qui est la même que la longueur de scellement du tirant), qui correspond donc à la longueur utile théorique du bulbe d'ancrage ;

### **II.6.4. la longueur libre :**

Théorique de l'armature, qui est mesurée entre le bouchon et la face externe de la laque d'appui [7].

## **II.7. Phases de mise en oeuvre :**

### **II.7.1. Préfabrication et transport :**

Les ancrages sont réalisés à l'aide de barres ou de torons, sur lesquels sont montés des accessoires (gaines pour la longueur libre, tubes d'injection pour le scellement, centreurs...). Les systèmes de protection anticorrosion sont réalisés en usine afin de garantir une qualité

et une efficacité maximale. Un conditionnement adapté permet de transporter les produits dans de bonnes conditions de sécurité et de protection.

### **II.7.2. Forage :**

Le forage est réalisé avec un diamètre généralement compris entre 50 et 200 mm au moyen d'un outillage et d'un fluide de perforation adaptés au terrain. Toutes les inclinaisons sont envisageables et déterminées par les contraintes de l'ouvrage et du sol. Le forage doit permettre la mise en place de l'ancrage dans le sol. Il a une influence importante sur la résistance finale du scellement.

La constitution des ancrages doit tenir compte du mode de forage, du diamètre, de l'inclinaison (solution de centrage de l'armature dans le trou, emplacement du système d'injection par rapport à l'armature...) [1].



**Figure.II.21:** Image de forage

### **II.7.3. Installation dans le forage et injection :**

La mise en place de l'ancrage dans le trou de forage est réalisée avec des moyens adaptés : palonnier, dérouleur, grue, ... ou à bras d'hommes dans certains cas. Une fois l'ancrage en place, le produit de scellement, généralement un coulis de ciment fortement dosé, est injecté dans le trou de forage au moyen d'un tube d'injection. Il existe plusieurs méthodes d'injection, adaptées aux terrains rencontrés.



**Figure.II.22** : image de la mise en place d'ancrage

#### **II.7.4. Essais :**

Des essais de traction sont indispensables. Certains sont effectués en début de chantier sur des ancrages perdus, afin de valider que les hypothèses de calcul de pré dimensionnement duscellement sont suffisantes. D'autres, non destructifs sont effectués sur des tirants intégrés à l'ouvrage. Des techniciens Freyssinet spécialisés interviennent sur chantier pour effectuer ces opérations, dans le respect des normes applicables au type d'ancrage et au pays. Le respect de ces normes est primordial au bon déroulement d'un projet. [1]

#### **II.7.5. Mise en tension :**

Sur les ancrages précontraints (tirants d'ancrage ou boulons en roche), la mise en tension s'effectue dans un délai de 1 à 7 jours après l'injection, suivant le type de terrain et le produit de scellement utilisé. Un vérin est utilisé pour exercer la tension. Lors de cette opération, chaque tirant subit une traction d'épreuve permettant de valider la bonne tenue du scellement. Du matériel spécifique et des techniciens spécialisés sont nécessaires pour effectuer cette opération sensible.

#### **II.7.6. Protection définitive :**

La protection définitive de la tête d'ancrage est réalisée par un remplissage des vides autour de l'armature, avec des produits adéquats (graisse, cire, coulis déciment).

Les parties métalliques sont elles aussi l'objet d'un traitement anticorrosion adapté au milieu et aux normes applicables. [1].

---

***Chapitre III :***  
***Modèle de référence***

---

### III.1. Site de projet:

Après plus d'une année de recherches, un site satisfaisant à ces différents critères a trouvé. Il s'agit du site de l'immeuble de la S.E.R.E.T.E., édifié rue du Château-des-Rentiers, dans le 13ème arrondissement de Paris. [9].

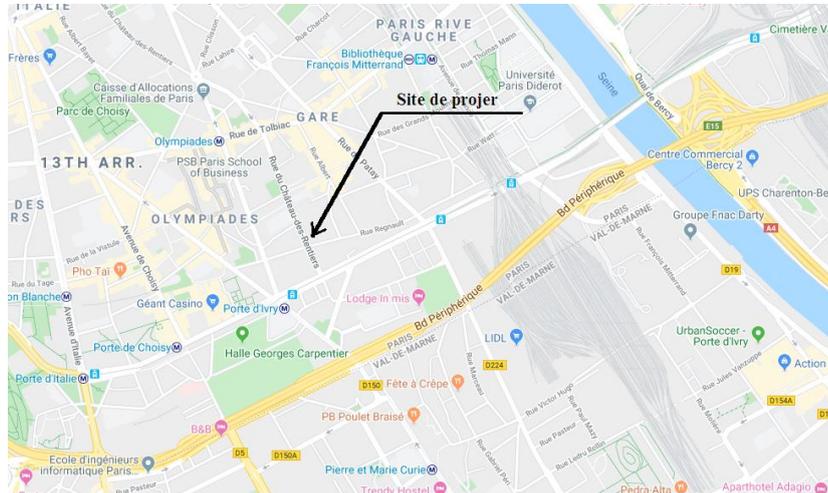


Figure.III.1: Plan de situation de terrain de projet

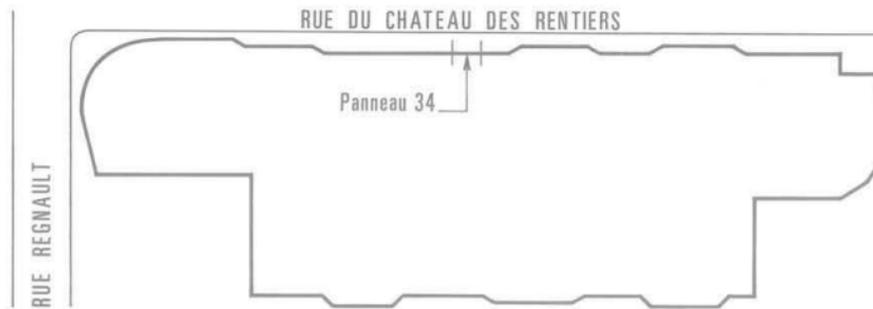


Figure III.02: Situation du panneau de mesure et détail de la paroi

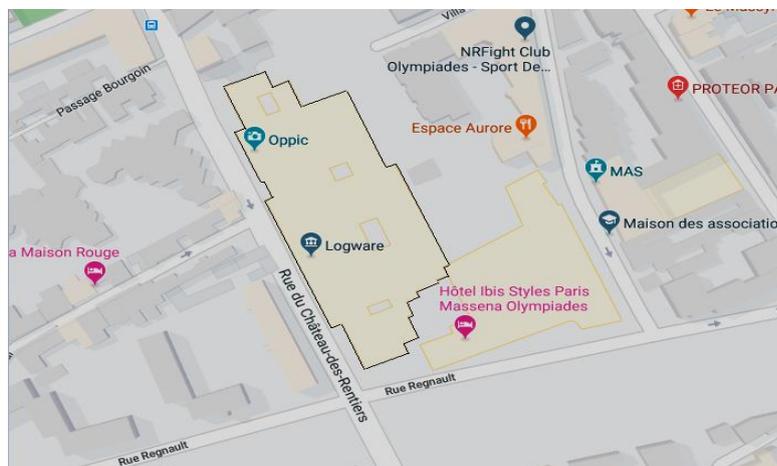


Figure.III.3: Plan de masse de terrain de projet

## III.2. Description de l'ouvrage:

L'ouvrage est constitué d'un écran de soutènement en béton armé, réalisé par la technique de la paroi moulée. L'écran est fiché dans des couches des sols et ancré par quatre nappes de tirants forés du type Bachy, mis en place dans le sol et précontraints au fur et à mesure des terrassements.

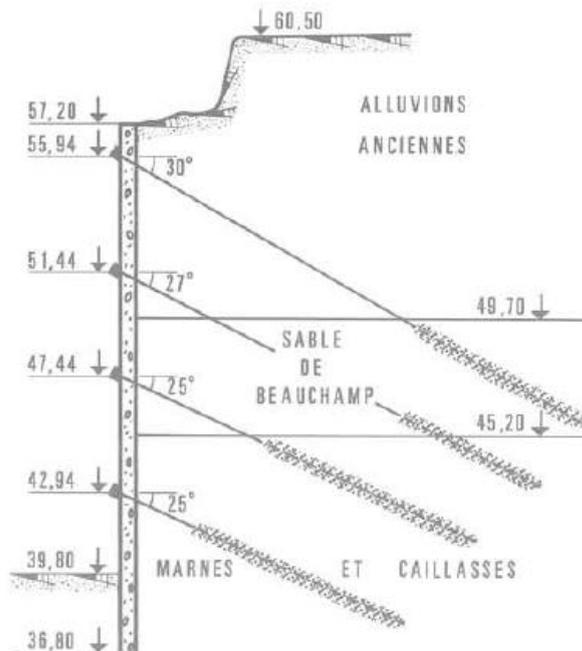


Figure.III. 4: Coupe de la paroi

Les mesures ont été effectuées sur le panneau 34, situé dans une section rectiligne de l'enceinte. La paroi moulée a été réalisée à partir d'une plateforme au-dessous de la surface du terrain naturel. Ses principales caractéristiques vis à vis de l'exploitation sont les suivantes :

### III.2.1. Terrassement:

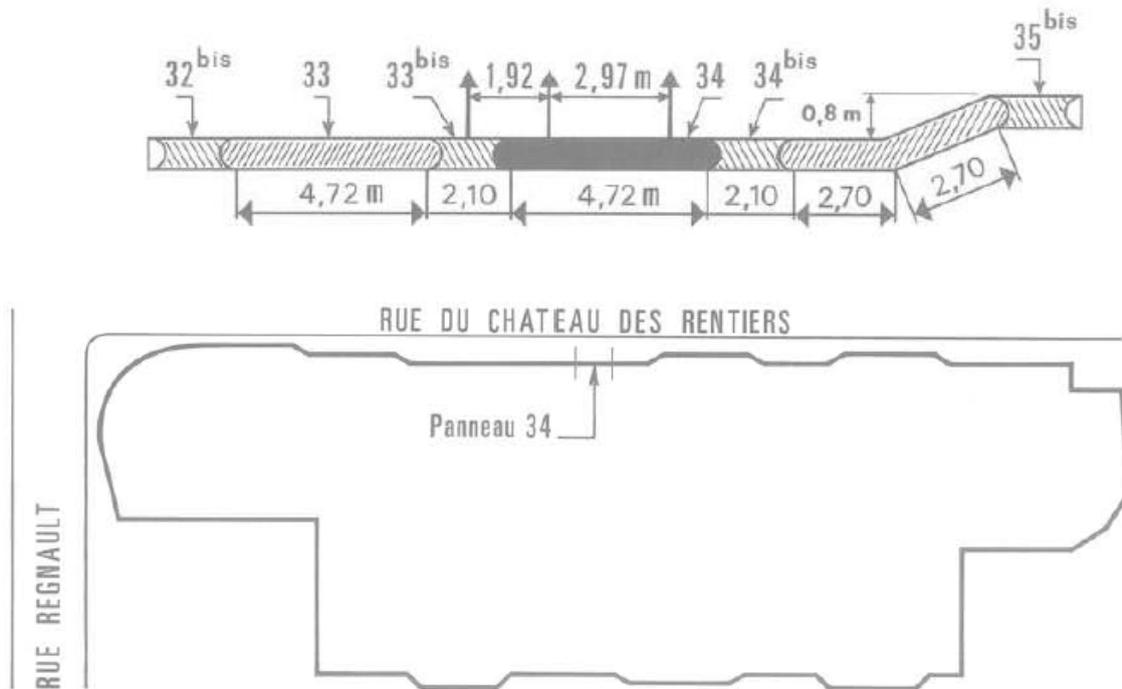
Plateforme établie à 3,30. au-dessous de la surface du terrain naturel

### III.2.2. La fouille:

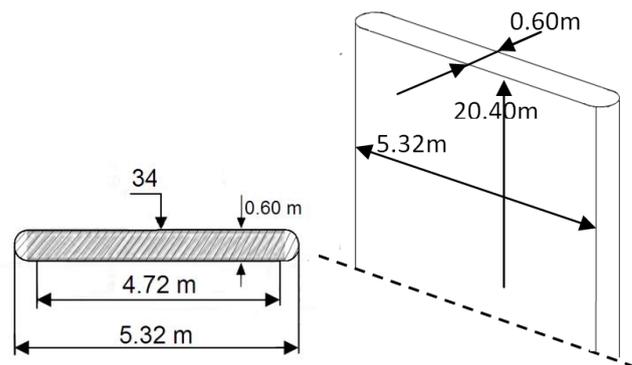
La construction des niveaux en sous-sol nécessitait l'ouverture d'une fouille d'environ 21 m de profondeur

### III.2.3. La paroi moulée (panneau 34):

- La longueur totale de ce panneau était de **5,32 m**.
- Epaisseur de 0,60 m.
- Hauteur totale de 20,40 m. coulée par panneaux alternés (panneaux primaires et secondaires). [9].



**Figure.III.5:** Situation du panneau de mesure et détail de la paroi à proximité de celui-ci



**Figure.III.6:** Panneau 34

### III.3. Les Caractéristiques des sols:

- les caractéristiques physiques et mécaniques du sol devaient pouvoir être mesurées à partir d'essais classiques faits en laboratoire et en place,
- les caractéristiques hydrauliques devaient être parfaitement définies.

Les caractéristiques mécaniques des échantillons extraits de ce sondage ont été déterminées en laboratoire à partir d'essais non consolidés - non drainés (UU). d'une part, et d'essais consolidés - drainés (CD).

Les valeurs moyennes des paramètres de résistance au cisaillement essais pressiométriques effectués dans les marnes et caillasses devant le panneau de mesures. [9].

### III.3.1. Alluvions anciennes:

Sables et graviers, limons anciens. Les Alluvions anciennes constituent de vastes formations de remblaiement déposées par les cours d'eau aux différents stades de l'évolution morphologique des vallées, étagées en terrasses successives d'autant plus anciennes qu'elles sont plus élevées. Elles sont constituées par des matériaux prélevés dans les formations géologiques traversées par les fleuves à l'amont. Les éléments quartzeux, silex et meulière, prédominent, les uns dans les alluvions de la Seine, les autres dans celles de la Marne. Des calcaires empruntés au Lutétien, des roches granitiques et des chailles jurassiques sont fréquents dans les graviers de la Seine; les fossiles sparnaciens et lutétiens sont plus fréquents dans ceux de la Marne. Les alluvions débutent généralement par un conglomérat plus ou moins dur ou « calcin » renfermant parfois des blocs volumineux et des ossements. Au-dessus viennent des bancs de galets, puis des lits de cailloutis et de sable fin. Leur sommet est constitué par des sables argileux, souvent gris, ou rubéfiés par des infiltrations qui leur confèrent une fausse apparence de ravinement.

### III.3.2. Sables de Beauchamp :

Dans Paris. les Sables de Beauchamp sont représentés par des sables quartzeux vert foncé. bleus. verts ou gris, assez fins. devenant plus argileux à la base, renfermant des grès tantôt scoriacés et fossilifères. tantôt compacts. Extrêmement durs. en bancs ou en géodes.

### III.3.3. Les Marnes et Caillasses :

constituent une série laguno-lacustre, puissante de 10 mètres environ. Au sommet prédominent des marnes blanches, plus ou moins argileuses et magnésiennes, alors qu'à la base, les bancs de calcaire siliceux (caillasses) deviennent nombreux. Des feuilletts argileux et plusieurs bancs de calcite grenue, cristalline, sans consistance, s'insèrent dans la moitié inférieure de l'assise. Un banc calcaire fossilifère la « rochette ». à faune lagunaire, est bien constante à 1 mètre du sommet du Calcaire grossier. Quelques minéraux accessoires: quartzine, lutécite, fluorine, ont été reconnus dans les Marnes et Caillasses. Les fossiles principaux sont : *Corbula angulata*, *Sphaenia rostrata*, *Potamides lapidum*, *Cerithium denticulatum*. A Nanterre, les marnes ont livré des ossements de *Lophiodon*. Le Calcaire grossier supérieur correspond aux calcaires à *Orbitolites complanatus*. Il est constitué par une série de bancs massifs, compacts, bien lités, séparés par de minces délits sableux ou marneux.

Il renferme des Miliolites et de nombreuses empreintes de fossiles : *Potamides lapidum*, *P. cristatum*, *Batillaria echinoides*, *Ampullina parisiensis*, *Phacoides saxorum*, etc. Le « Banc Vert », épisode lacustre vers la base de la zone IV, a fourni au Trocadéro des empreintes de *Sabalites* et des fruits de *Nipadites heberti*. Il repose sur la couche de base de cette zone, ou « Banc Royal », à *Orbitolites complanatus*, *Terebellum convolutum*, *Lithocardium aviculare*, *Corbis lamellosa*,

Lucina mutabilis. Le Calcaire grossier supérieur peut atteindre 8 mètres.

### III.3.4. Le Calcaire grossier :

Représenté à Paris par une série de calcaires grisâtres ( lambourdes), peu fossilifères, d'environ 4 mètres d'épaisseur. reposant sur les calcaires glauconieux du Lutétien inférieur. Ceux-ci sont parfois très durs, parfois tendres et sableux. Le sommet du Calcaire grossier inférieur est occupé par les couches à Cerithium giganteum. pouvant atteindre 6 mètres, recouvrant les « bancs chlorités » à Mesalia sulcata, Cepatia cepacea, Rimella fissurella, Voluta spinosa. Les « bancs coquilliers » , qui viennent au-dessous. renferment en plus d'Echinolampas calvimontanus et Echinanthus issyavensis : Cardita planicosta, Cardium gigas, Nautilus parisiensis. L'ensemble de la zone III atteint 12 mètres.

**Tableau III.01:** caractéristiques du sols

Couches des sols	Prof (m)	$\gamma$ (Kn/m)	$c'$ (Kpa)	$\phi'$ (°)	Cu (Kpa)	$\phi_u$ (°)	pl (Mpa)	E (Mpa)
Desalluvions anciennes	10.80	20	28	28				20
Sable de Beauchamp	4.5	20	20	33	137	0		38
Marnes et caillasses	8.4	20	37	32	145 320	0	1.9	12
Le Calcaire rossier	>8.4	20	37	32	780	0	3	27

### III.4. Caractéristiques des tirants:

L'ancrage d'un panneau primaire était assuré par 4 tirants (type Bachy) mis en place dans le sol et précontraints au fur. [9].

**Tableau III. 02 :** Caractéristiques des tirants du panneau de mesures

N° de Nappe	Nappe Type	Longueur libre (m)	Longueur de scellement (m)	Tension de précontrainte théorique (Kn)
1	1 TMF	13	9	366
2	2 TMD	12	6	611
3	3 TMD	6	9	840
4	4 TMD	3	9	1040

### III.5. Phases de travaux ( phases de terrassement et de mise en tension des tirants ) :

Les phases de travaux peuvent se résumer en une succession d'excavations et de mises en tension des tirants jus qu'au niveau de la 4eme nappe, suivies d'une dernière excavation jusqu'au fond de fouille.

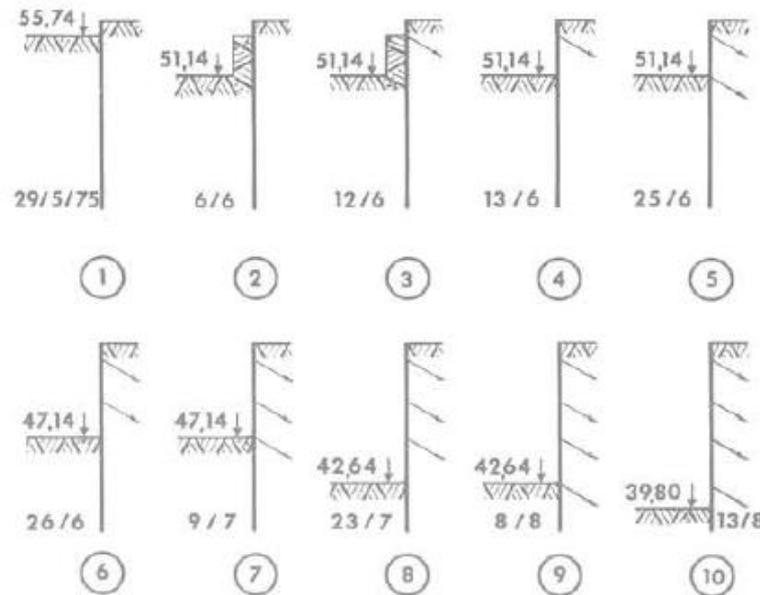


Figure.III.07: Les phases de travaux

### III.6. Equipement du panneau de mesures:

La pose d'appareils de mesure sur la paroi avait pour but:

- De mesurer les efforts externes appliqués à la paroi , c'est-à-dire la pression des terres et les réactions d'ancrage .
- De déterminer les contraintes dans la paroi par l'intermédiaire des déformations relatives du béton .
- De déterminer les déplacements de la paroi à partir de mesures de déformée et de déplacement en tête. [9].

La pression des terres a été mesurée au moyen de 33 capteurs de pression totale du type Glötzl dont les dimensions de la semelle étaient 200 mm x 300 mm. Chaque capteur était monté sur une plaque métallique adaptée à l'extrémité d'un petit vérin fixé sur les armatures de la cage .

Une fois celle-ci descendue dans la tranchée, et avant bétonnage, les capteurs étaient mis au contact du sol au moyen des vérins commandés depuis la surface. 28 capteurs ont été ainsi mis

en place sur la face côté terrain, et 5 sur la face côté fouille, dans la partie en fiche.

Les tensions d'ancrage ont été mesurées au moyen de cales annulaires du type Glötzl, interposées entre la plaque d'ancrage et la tête du tirant. Une cale a été adaptée à chacun des 8 tirants du panneau de mesure, lors de sa mise en tension.

La déformée de la paroi a été déterminée au moyen d'un inclinomètre du type Soit Instruments, permettant de mesurer à tous niveaux inclinaison sur la verticale d'un tube inclinométrique noyé dans le béton de la paroi. La rotation de la tête de paroi a également été mesurée au moyen d'un clinomètre fixe. [9].

Les données concernant le déplacement horizontal de la tête de paroi ont été obtenues:

- Au moyen d'un tassomètre (distancemètre) à fil invar dont une extrémité était scellée au fond d'un forage subhorizontal de 15 m. de profondeur réalisé au niveau de la tête de paroi ;
- Au moyen de visées optiques effectuées à partir de points situés aux extrémités de la fouille, en dehors de son emprise (ces visées n'ont pas été effectuées sur le panneau de mesure mais sur des panneaux voisins).

Les appareillages de mesure ont presque tous fonctionné. seuls un extensomètre implanté côté fouille au niveau de la 2<sup>ème</sup> nappe de tirants et la cale dynamométrique adaptée l'un des tirants de la nappe supérieure n'ont fourni aucun résultat. En outre, les mesures inclinométriques ont dû être interrompues à la fin de la 2<sup>ème</sup> phase de travaux et n'ont pu être reprises que le 18 juillet, entre les 7<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> phases de travaux, avec un autre appareillage du même type. Les mesures effectuées avec le second appareil n'ont permis de déterminer que les déformées relatives de la paroi au cours des dernières phases de travaux.

### **III.7.Résultats des mesures:**

#### **III.7.1.Pression des terres:**

##### **III.7.1.1.Pression initiale sur la paroi:**

Les premières mesures de pression des terres n'ont pu être effectuées qu'une semaine après le bétonnage, alors qu'une excavation d'environ 1,40 m. de profondeur avait été creusée devant la paroi. Compte tenu de la faible profondeur de cette excavation, la distribution de la pression des terres le long de la paroi à ce stade des travaux peut être considérée comme la distribution initiale.

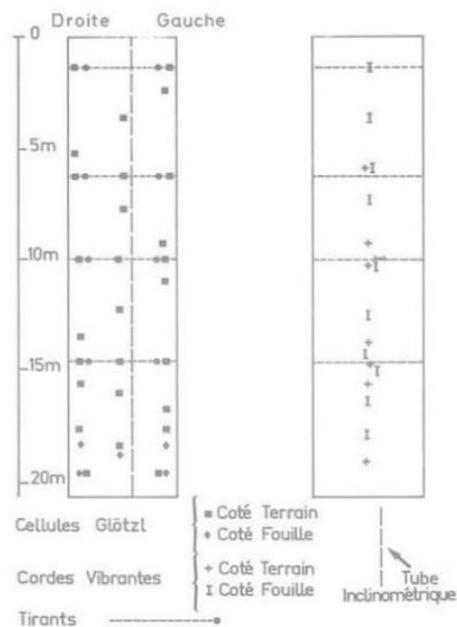
La pression  $\sigma_h$  croît de façon sensiblement linéaire avec la profondeur  $z$  comptée à partir de la tête de paroi [9]

### III.7.1.2. mesurer les efforts externes appliqués à la paroi:

(la pression des terres et les réactions d'ancrage)

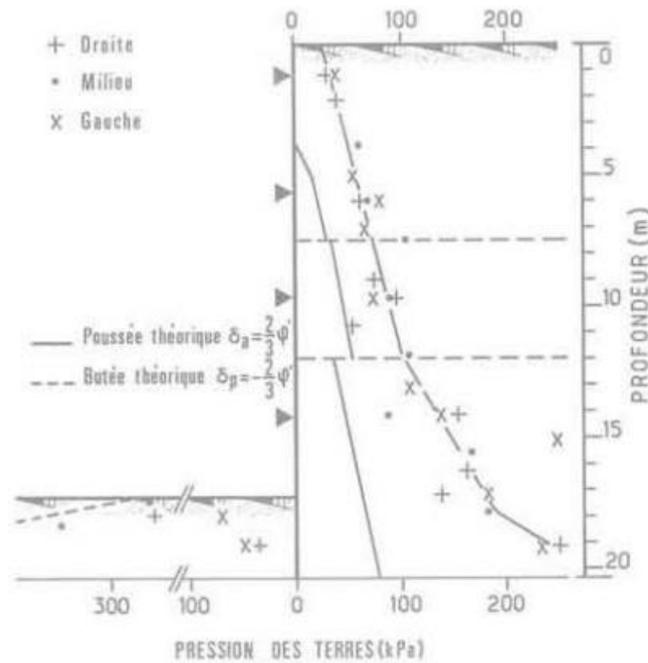
- De déterminer les contraintes dans la paroi par l'intermédiaire des déformations relatives du béton
- De déterminer les déplacements de la paroi à partir de mesures de déformée et de déplacement en tête.

La pression des terres a été mesurée au moyen de 33 capteurs de pression totale du type Glötzl dont les dimensions de la semelle étaient 200 mm x 300 mm.



**Figure.III.8:** Implantation des appareils équipant sur le panneau de mesure

La déformée de la paroi a été déterminée au moyen d'un inclinomètre du type Soit Instruments, permettant de mesurer à tous niveaux l'inclinaison sur la verticale d'un tube inclinométrique noyé dans le béton de la paroi. La rotation de la tête de paroi a également été mesurée au moyen d'un clinomètre fixe [9]



**Figure.III.9:** Distribution de la pression des terres à la fin des terrassements

### III.7.3. Déplacements de la paroi:

Le déplacement horizontal de la tête de paroi par rapport au scellement du tassomètre croît assez régulièrement au cours de la fouille pour atteindre 15 mm. en fin d'excavation.

Les mesures par visées optiques du déplacement de repères placés en tête de panneaux voisins du panneau de mesures indiquent des déplacements beau coup plus importants mettant ainsi en évidence un mouvement du scellement du tassomètre. Bien que les mesures par visées optiques n'aient été réalisées qu'au cours des dernières phases de travaux, il est possible d'en déduire une limite inférieure du déplacement absolu de la tête de paroi en fin de travaux, en admettant que, pendant la période couvrant les 5 premières phases, les déplacements sont de l'ordre de ceux indiqués par le tassomètre.

Dans cette hypothèse le déplacement de la tête de paroi en fin de travaux est d'au moins 45 mm. c'est-à-dire supérieur à 2/1000 de la hauteur de la paroi. Il s'ensuit que le scellement du tassomètre situé à 15 m. en arrière de la paroi (c'est-à-dire à l'extérieur du coin de poussée théorique) se déplace vers la fouille d'au moins 30 mm. Cela implique que les déformations du sol à l'arrière de la paroi intéressent une zone étendue dont la largeur est vraisemblablement très supérieure à la profondeur d'excavation. L'importance de la zone concernée par la décompression du sol à l'arrière d'un soutènement de grande hauteur a d'ailleurs été mise en évidence par des études théoriques basées sur le calcul aux éléments finis (Deroy, 1975). [9]

### **III.7.4.Comparaison des mesures et du calcul:**

Les résultats expérimentaux obtenus après que le fond de fouille eut atteint sa cote définitive au droit du panneau étudié ont été comparés aux valeurs théoriques, fournies par le calcul aux éléments finis d'une part et mesurés d'une autre part.

#### **III.7.4.1.Déplacements:**

Le calcul aux éléments finis donne un ordre de grandeur assez satisfaisant des déplacements de la tête de paroi (30 mm pour une valeur réelle d'au moins 45 mm) et du point de scellement du tassomètre (19 mm pour une valeur réelle d'au moins 30 mm). Il met également en évidence l'importance de la zone de décompression du sol à l'arrière de la paroi, le calcul indiquant un déplacement horizontal de la surface du sol égal à 5 mm à 60 mètres de la tête de paroi, soit à une distance de celle-ci correspondant à trois fois la profondeur totale de la fouille.

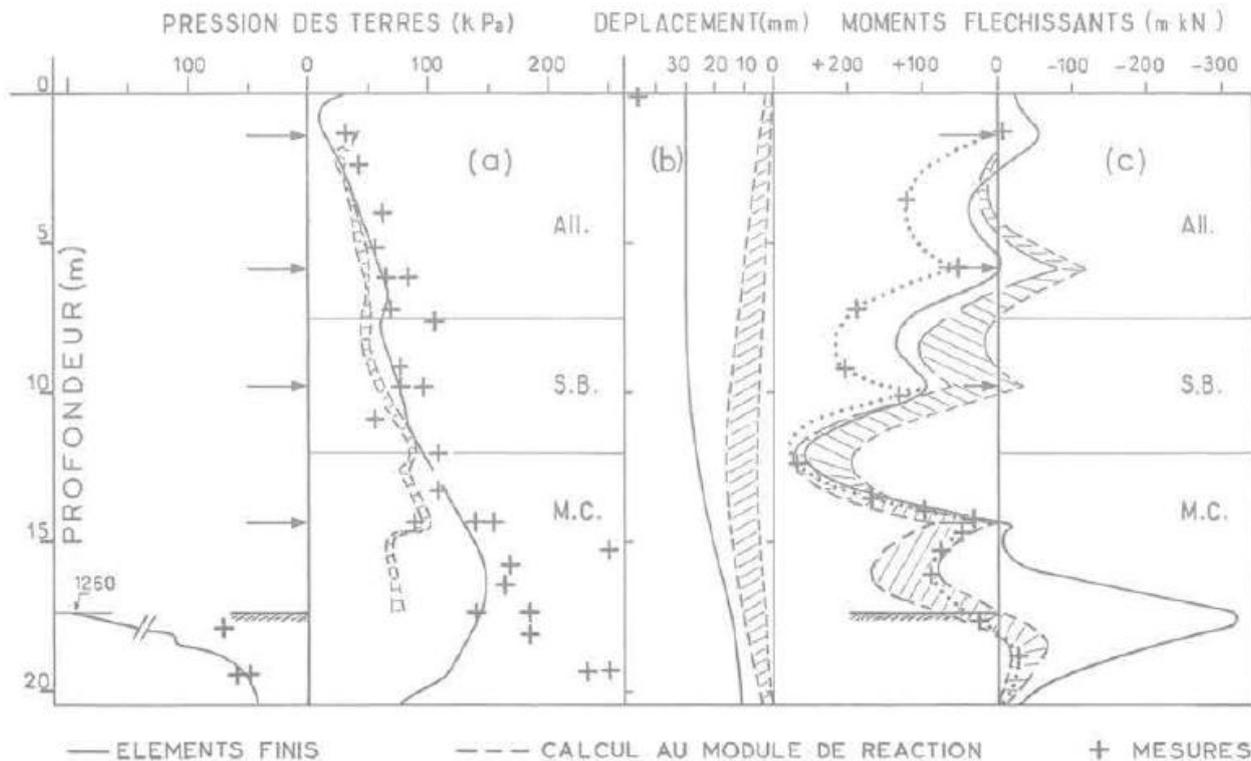
En revanche le calcul au module de réaction conduit à des déplacements très inférieurs aux déplacements réels. Dans le cas étudié, cette sous-estimation des déplacements résulte essentiellement du fait que ce type de calcul ne tient pas compte des déplacements du sol en arrière des points de scellement théoriques des tirants, ceux-ci étant considérés comme fixes.

#### **III.7.4.2.Moments fléchissants:**

Compte tenu d'une plastification locale probable du sol en fond de fouille, les diagrammes de moment fléchissant obtenus à la base de la paroi, par le calcul elastoplastique au module de réaction, doivent être considérés comme les plus réalistes du moins en ce qui concerne leur allure, car, contrairement à une opinion très répandue, dans la moitié inférieure de la paroi, les diagrammes obtenus par les deux méthodes de calcul sont très importantes, le calcul aux éléments finis conduisant toutefois aux valeurs les moins discordantes.

#### **III.7.4.3.Pression des terres:**

Dans la partie hors fiche, y compris à la partie supérieure des marnes et caillasses, les mesures concordent relativement bien avec les valeurs calculées, les premières étant toutefois systématiquement supérieures aux secondes. Les pressions calculées par les éléments finis et les pressions mesurées divergent fortement. Ceci tient, au moins en partie, au fait que le calcul élastique n'impose aucune limite aux contraintes dans le sol et ne peut tenir compte d'une plastification locale au sol. telle que celle qui s'est vraisemblablement produite cote fouille sur le tiers supérieur de la fiche. En revanche, dans la partie hors fiche, où la pression sur la face arrière est toujours supérieure à la pression à l'équilibre limite de poussée, le schéma élastique est bien adapté. [9]



**Figure.III.10:** Comparaison des résultats du calcul avec les résultats expérimentaux obtenus en dernière phase de travaux :

- a) pression des terres
- b) déplacements
- c) moments fléchissants

#### III.7.4.4. Tensions d'ancrage:

La comparaison des tensions moyennes mesurées pour chaque couple de tirants avec les valeurs calculées ne fait pas apparaître de divergences très importantes entre les mesures et le calcul. Le calcul aux éléments finis donne toutefois des résultats plus satisfaisants sauf en ce qui concerne la 4<sup>ème</sup> nappe. Il apparaît donc que les résultats du calcul aux éléments finis concordent mieux, dans l'ensemble, avec les résultats expérimentaux que ceux obtenus par le calcul au module de réaction. Ceci résulte en particulier du fait que le schéma de comportement du sol considéré dans le premier type de calcul est relativement bien adapté au cas étudié, alors que le second ne peut tenir compte des déplacements des points de scellement des tirants, qui semblent jouer un rôle assez important vis-à-vis du comportement de l'ouvrage. [9]

**Tableau III.3 :** Comparaison des tensions d'ancrage mesurées et calculées en phase finale

<b>Nappe</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Tension effective de precontrainte (kn)</b>		324	635	704	845
<b>Tension Finale (kn)</b>	<b>Mesur2e</b>	375	700	770	870
	<b>Elementsfinis</b>	359	691	804	1010

---

*Chapitre IV :*  
*Modélisation numérique*

---

### IV .1. Introduction :

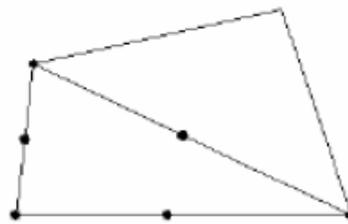
Le but de cette étude est de développer un modèle numérique pour simuler le comportement d'une paroi moulée renforcé par quatre nappes de tirants et pour ce la en utilise code des éléments finis plaxis ,version 8.2. Il sera utilisé comme base de référence et de comparaison lors de l'étude de cette paroi moulée ; cet modèle doit spécifier les propriétés des matériaux ainsi que les conditions aux limites, et utilisé comme base de référence et de comparaison lors de l'étude de cette paroi moulée la technique de modélisation du la paroi moulée, du sol de et de l'ancrage Le modèle de référence a été établi et calculé avec le logiciel PLAXIS 2D 8.2.

Les résultats théoriques, fournies par le calcul aux code de éléments finis plaxis ont été comparés aux résultats expérimentaux obtenus après que le fond de fouille atteint sa cote définitive au droit du panneau étudié.

### IV .2.Géométrie et propriétés des matériaux:

Le choix s'est porté sur :

- Éléments à 6 nœuds pour le sol.



**Figure.IV.1** : 6 noeuds triangle

- Modèle 2D axisymétriques.
- Unités: m, kn, jour.

**Tableau IV.1:** Model dimensions

	min.	max.
X	0,000	45,000
Y	-35,000	0,000

### IV .2.1: Géométrie du modèle :

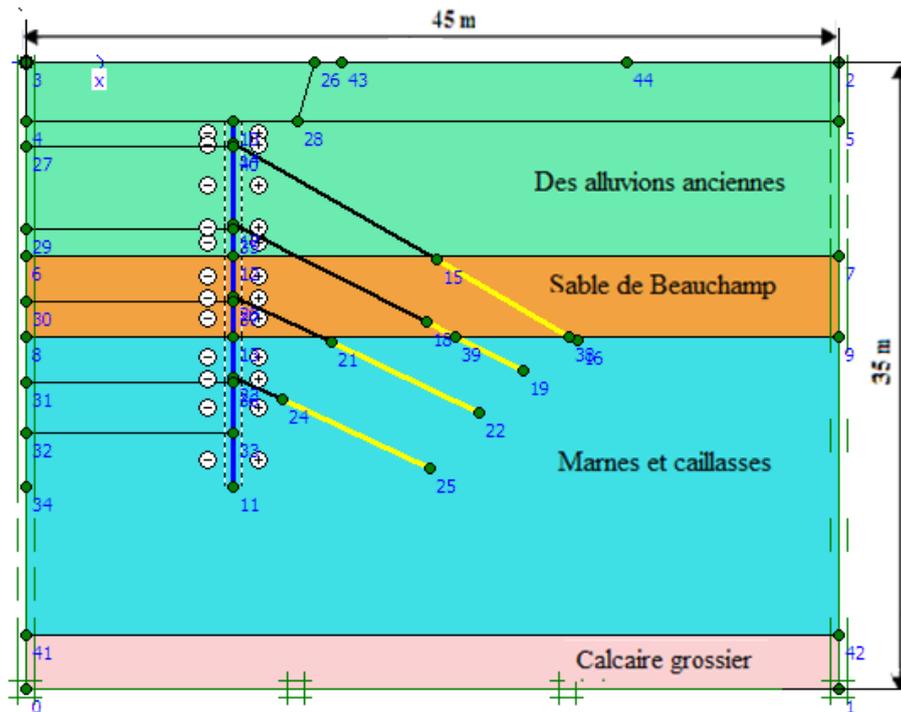


Figure.IV.2 : Modèle géométrique du projet

Le modèle fait 45 m de largeur et 35 m de profondeur. Le soutènement est assuré par une paroi moulée a été réalisée à partir d'une plateforme établie à 3,30 m. au-dessous de la surface du terrain naturel de 20.40 m de profondeur ; 0,60 m d'épaisseur et 5,32 m de largeur a été coulée par panneaux alternés (panneaux primaires et secondaires). Elle était ancrée par 4 nappes de tirants forés, mis en place dans le sol et précontraints et inclinés de 30°, 27°, 25°, 25°, par rapport à l'horizontale.

Les mesures ont été effectuées sur un panneau secondaire. le panneau 34, situé dans une section rectiligne de l'enceinte .

### IV.2.2. Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux:

La modélisation numérique par le code de calcul PLAXIS, exige la définition de quelques paramètres. Les valeurs de ces derniers ont été déterminées en laboratoire à partir d'essais, Les valeurs moyennes des paramètres de résistance au cisaillement obtenus sont calculs sont regroupées dans les tableaux suivants :

#### IV.2.2.1. Propriétés des couches de sols:

**Tableau IV.2:** Propriétés des couches de sols et des interfaces.

Couches	$\gamma$ (kn/m)	$c'$ (kpa)	$\phi'$ (°)	$C_u$ (kpa)	$\phi_u$ (°)	$p_l$ (Mpa)	$E$ (Mpa)
Des alluvions anciennes	20	28	28				20
Sable de Beauchamp	20	20	33	137	0		38
Marnes et caillasses	20	37	32	145 320	0	1.9	32
Calcaire grossier	20	37	32	780	0	3	27

#### IV.2.2.2. Paroi moulée:

**Tableau IV.3:** Propriétés mécaniques de la paroi moulée.

Largeur (m)	Epaisseur (m)	Hauteur (m)	$\nu$ (nu)	$E$ (Gpa)
5.32	0.60	20.40	0.2	30

#### IV.2.2.3. Les Caractéristiques des tirants du panneau de mesures

L'ancrage d'un panneau primaire était assuré par 4 tirants (type Bachy) mis en place dans le sol et précontraints au fur.

**Tableau IV.4:** Propriétés des tirants d'ancrages.

Nappe Type	Longueur libre (m)	Longueur de scellement (m)	Tension de précontrainte théorique (kn)
1 TMF	13	9	366
2 TMD	12	6	611
3 TMD	6	9	840
4 TMD	3	9	1040

### IV.3. Génération du maillage :

L'analyse est réalisée dans le cadre des déformations planes et le maillage se compose d'éléments triangulaires à 06 nœuds. Le nombre d'éléments est de 401 éléments et le nombre des nœuds est de 902 nœuds. on règle la finesse du maillage (Moyen).

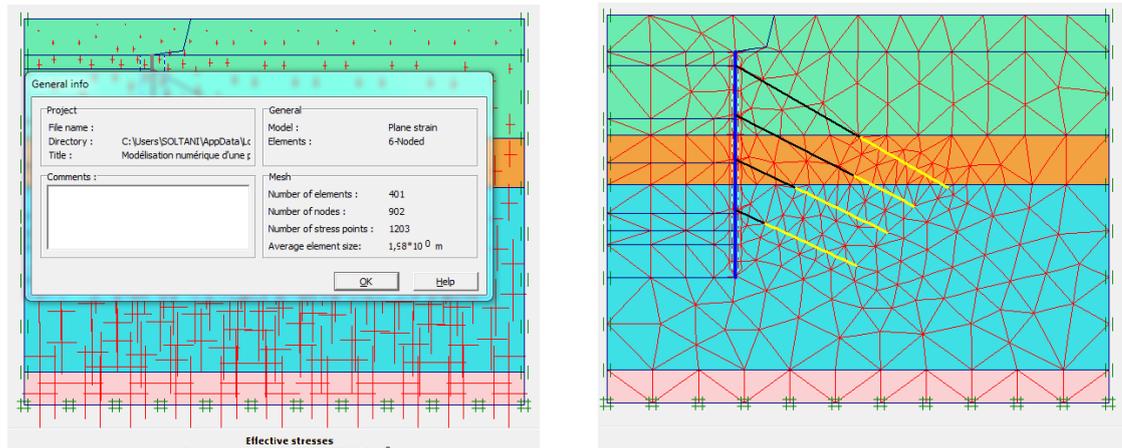


Figure.IV.3 : Maillage du projet.

**IV.3.1: Conditions initiales:**

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles initiales et les contraintes initiales du sol.

**IV.3.2: Conditions hydrauliques:**

Aucune nappe n'a été détectée dans les sondages de reconnaissance des couches du sols .

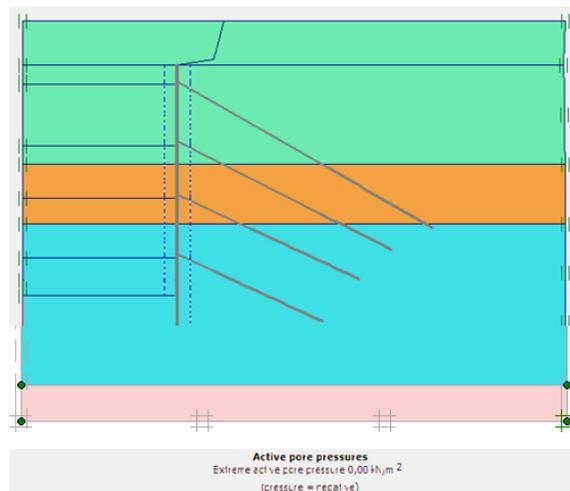


Figure.IV.4 : Conditions hydrauliques.

**IV.3.3. Contraintes initiales dans le sol:**

Il faut désactiver les éléments structuraux pour le calcul des contraintes initiales , alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de  $K_0$  par défaut. La valeur de  $K_0$  est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky. tel que

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad \text{et } \varphi \text{ est l'angle de frottement.}$$

Les contraintes initiales dans un sol sont influencées par le poids du matériau et par l'histoire de sa formation, cet état de contrainte est caractérisé généralement par une

contrainte effective verticale initiale  $\sigma'_{v0}$ . La contrainte effective horizontale initiale  $\sigma'_{h0}$  est liée à la contrainte effective verticale initiale par le coefficient de pression des terres au repos  $K_0$  :

$$\sigma'_{h0} = k_0 \cdot \sigma'_{v0}$$



Figure.IV.5 : Contraintes initiales dans le sol.

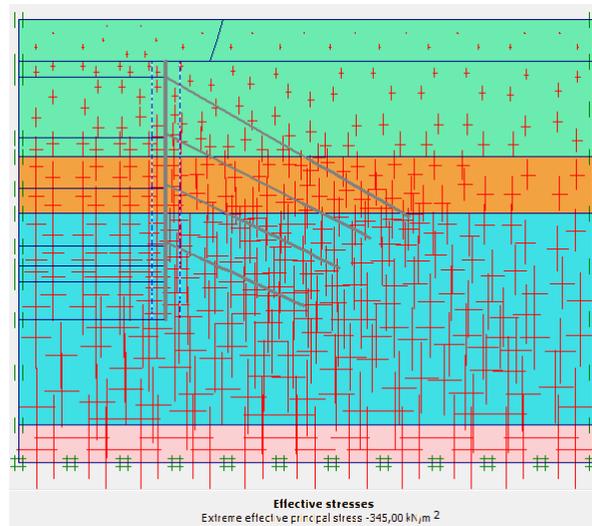


Figure.IV.6 : Génération des contraintes initiales.

## IV.4.Calcul numérique :

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

### IV.4.1.Procédure de calcul :

#### IV.4.1.1. Définition des phases de calcul :

Les phases de travaux peuvent se résumer en une succession d'excavations et de mises en tension des tirants jusqu'au niveau de la 4<sup>e</sup> nappe, suivies d'une dernière excavation jusqu'au fond de fouille. Le calcul complet se décompose en 10 phases :

**Tableau IV.5:** Les distances d'excavations.

Phases	excav	les nappes	Profondeur de tête de nappe (m)
1	3,3	Plateforme	
2	1,46		
3		1 <sup>ere</sup> Nappe	4,56
4	4,6		
5		2 <sup>eme</sup> Nappe	9,06
6	4		
7		3 <sup>eme</sup> Nappe	13,06
8	4,5		
9		4 <sup>eme</sup> Nappe	17,56
10	2,84	fin d'excav	20,4

**Phase 0 :** initiation des contraintes (procédure K0) ; on détermine les contraintes effectives initiales.

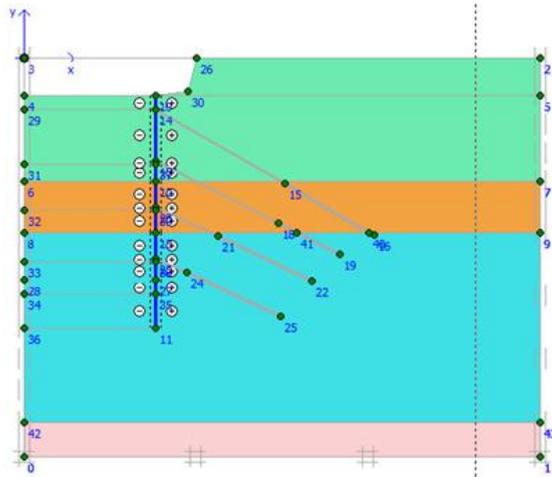


Figure.IV.7 : 1<sup>ère</sup> Phase de calcul

**1<sup>ère</sup> Phase :** Réalisation une plateforme établie à 3,30 m. au-dessous de la surface du terrain naturel et la réalisation du

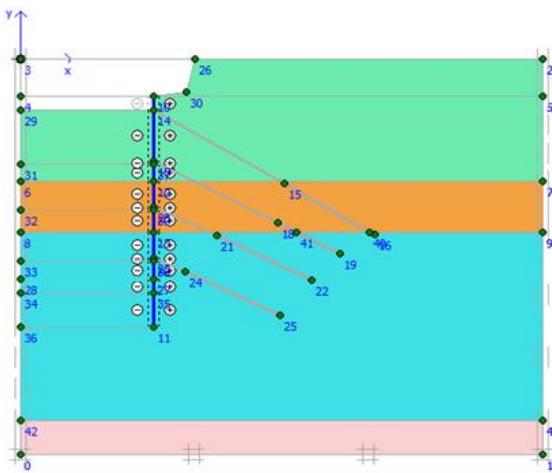


Figure.IV.8 : 2<sup>ème</sup> Phase de calcul

**2<sup>ème</sup> Phase :** Réalisation une excavation de profondeur de 1.46 m.

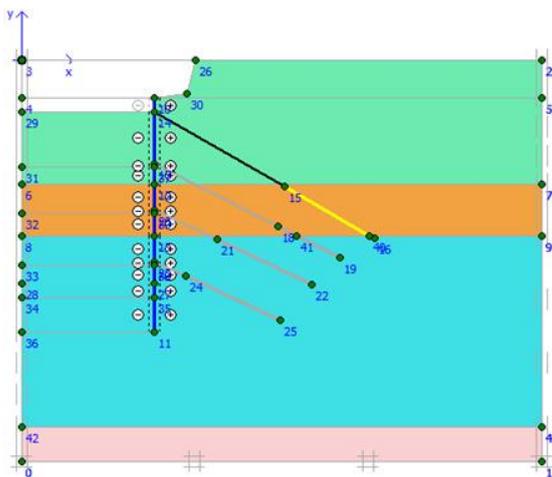


Figure.IV.9 : 3<sup>ème</sup> Phase de calcul

**3<sup>ème</sup> Phase :** Mise en tension la première nappe de tirant.

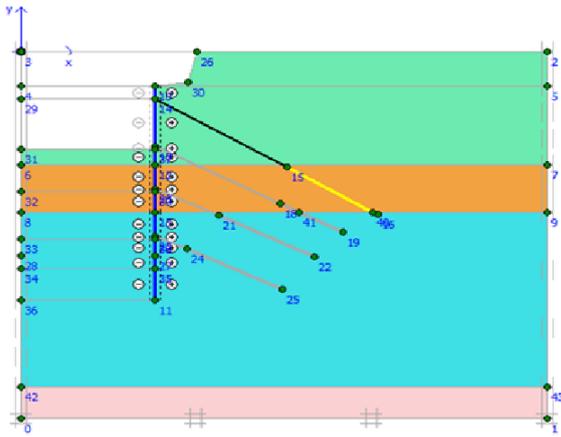


Figure.IV.10 : 4<sup>eme</sup> Phase de calcul

**4<sup>eme</sup> Phase :** Réalisation une deuxieme excavation de 4.6 m de profondeur.

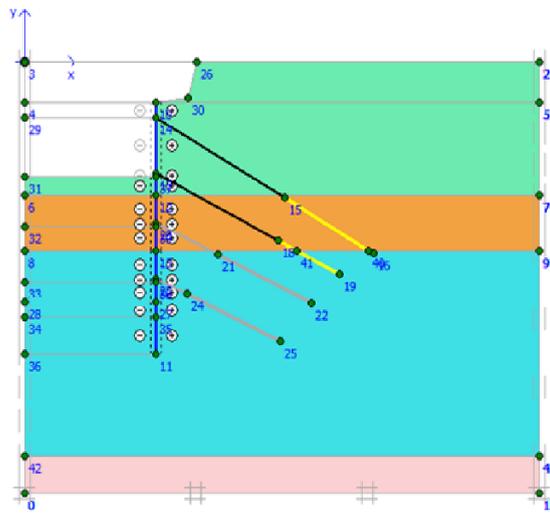


Figure.IV.11 : 5<sup>eme</sup> Phase de calcul

**5<sup>eme</sup> Phase :** Mise en tension de la deuxième nappes de tirants

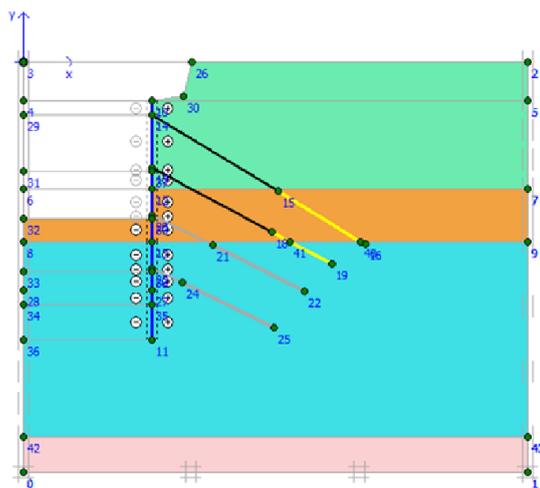
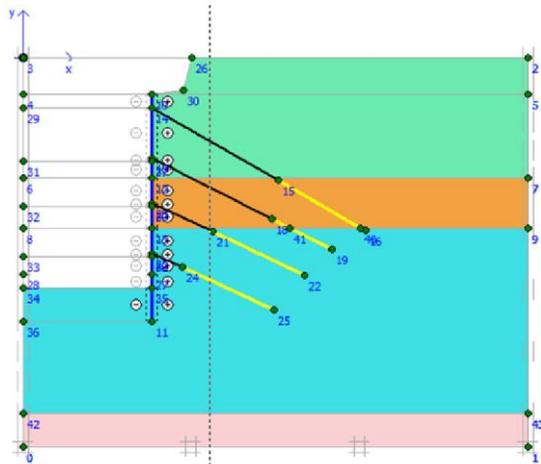


Figure.IV.12 : 6<sup>eme</sup> Phase de calcul

**6<sup>eme</sup> Phase :** Réalisation une troisieme excavation de 4.0 m de profondeur.





**10<sup>ème</sup> Phase:**Réalisation une dereniére  
excavaion de 2.84 m de profondeur.

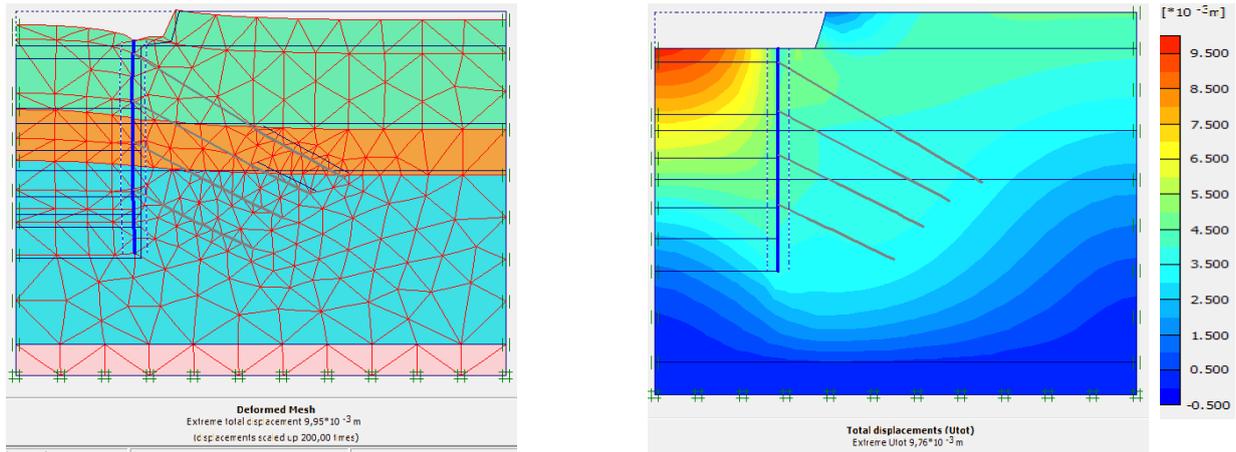
**Figure.IV.16 :** 10<sup>ème</sup> Phase de calcul

#### IV.4.1.2. Les principaux résultats:

Deux types de déformation: déformation de forme et déformation interne telle que

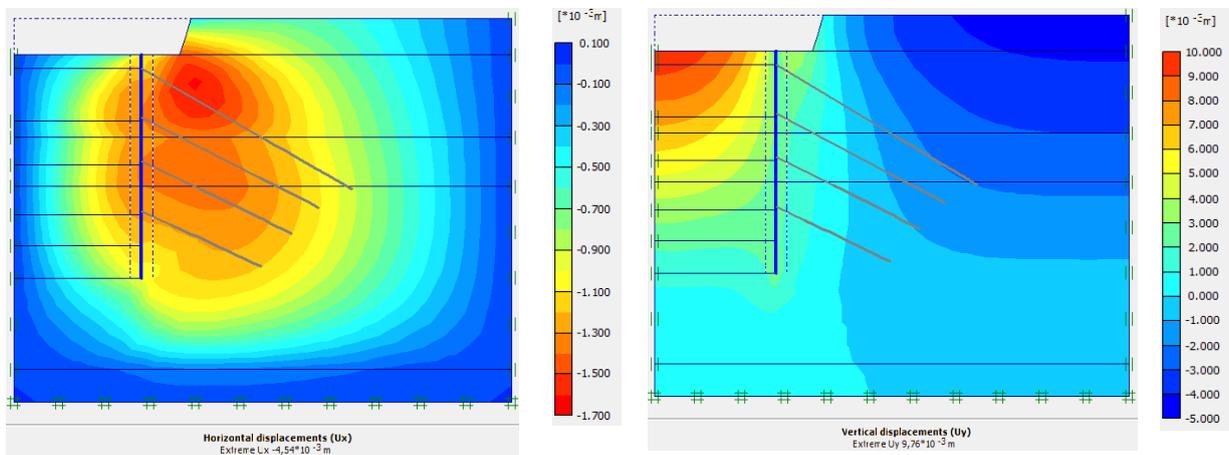
1. Déformation de maillage.
2. Déformation des éléments structuraux indiquée par :
  - Les courbes de déplacements.
  - La courbe du moment fléchissant

IV.4.1.3- Résultats de la phase 01 :



**a** : Maillage déformé  
 $9.76 \cdot 10^{-3}$  m

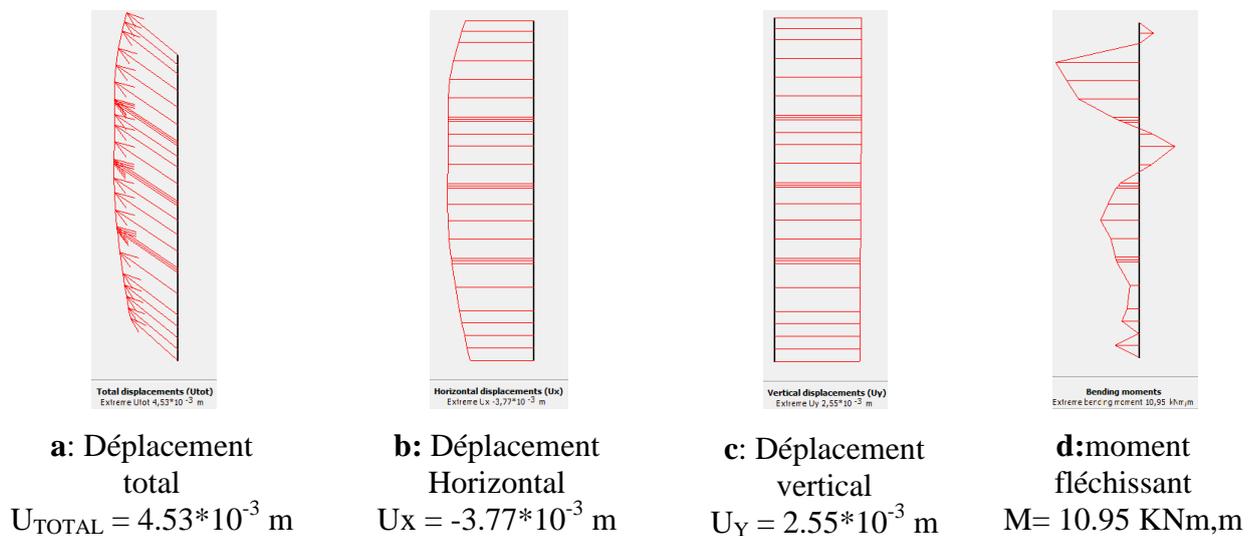
**b** : déplacement total  
 $U_{TOTAL} = 9.76 \cdot 10^{-3}$  m



**c** : Déplacement horizontal  
 $U_x = -4.54 \cdot 10^{-3}$  m

**d** : Déplacement vertical  
 $U_y = 9.76 \cdot 10^{-3}$  m

Figure.IV.17 : Déplacement de sol



**a** : Déplacement total  
 $U_{TOTAL} = 4.53 \cdot 10^{-3}$  m

**b** : Déplacement Horizontal  
 $U_x = -3.77 \cdot 10^{-3}$  m

**c** : Déplacement vertical  
 $U_y = 2.55 \cdot 10^{-3}$  m

**d** : moment fléchissant  
 $M = 10.95$  KNm,m

Figure.IV.18 : Déplacement de la paroi moulée

IV.4.1.4. Résultats de la phase 02 :

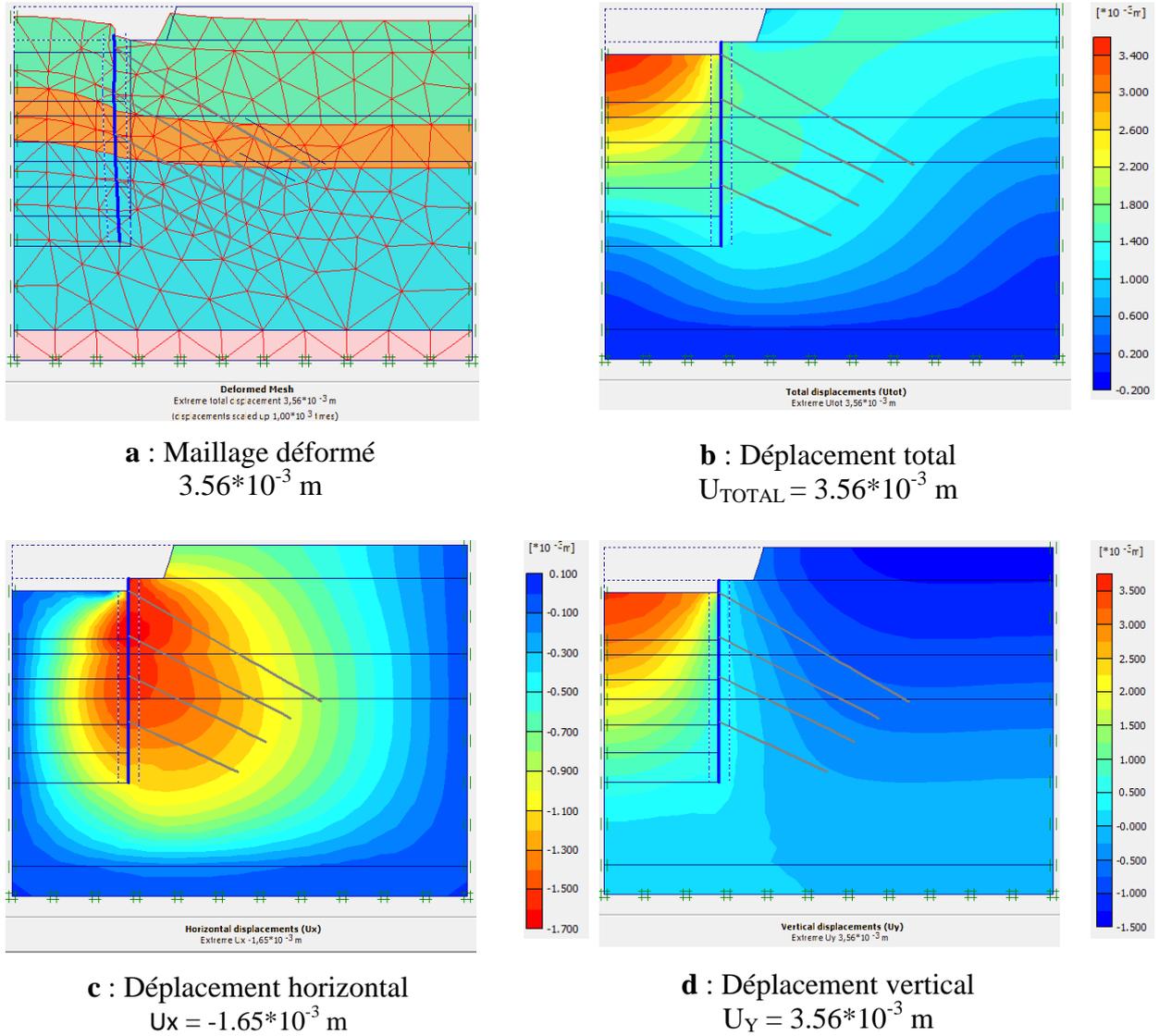


Figure.IV.19 : Déplacement de sol

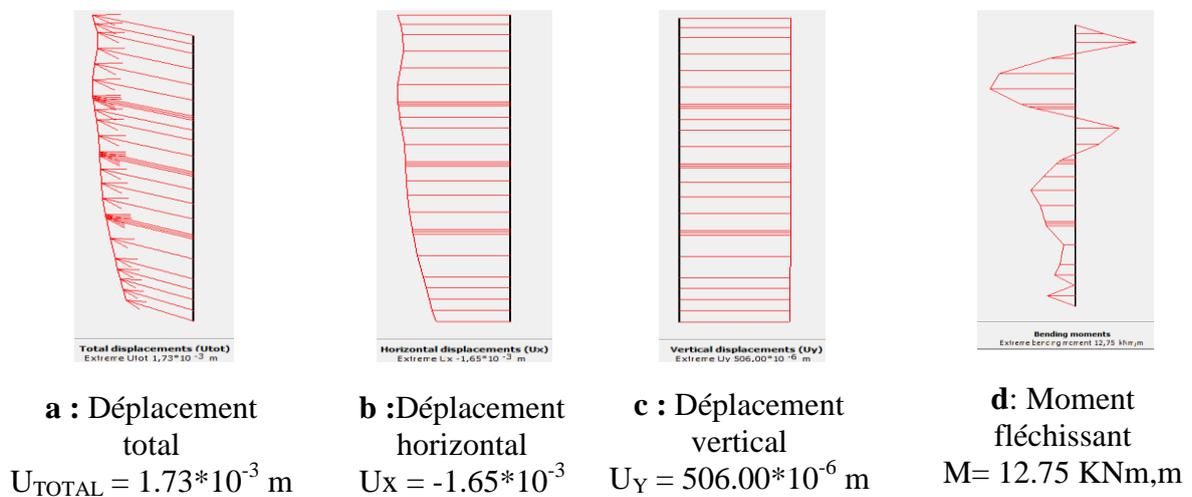


Figure.IV.20 : Déplacement de la paroi moulée .

V.4.1.5. Résultats de la phase 03 :

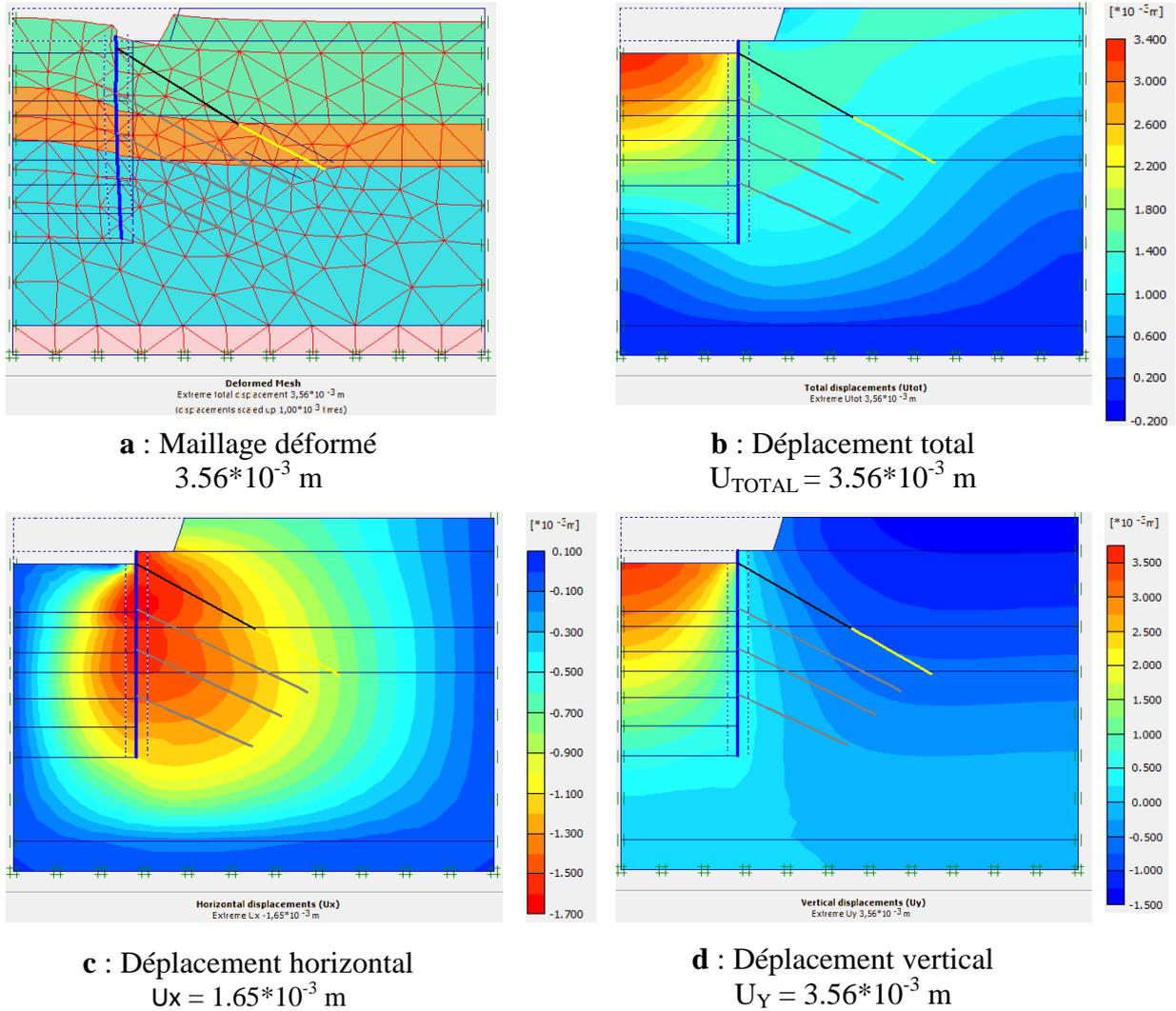


Figure.IV.21 : Déplacement de sol

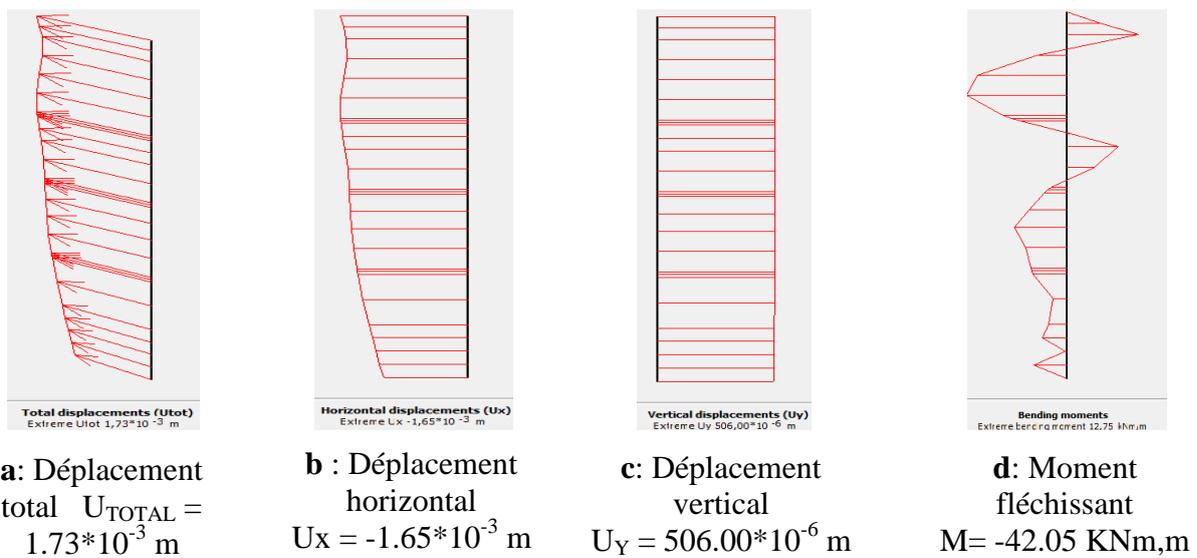


Figure.IV.22 : Déplacement de la paroi moulée

IV.4.1.6. Résultats de la phase 04 :

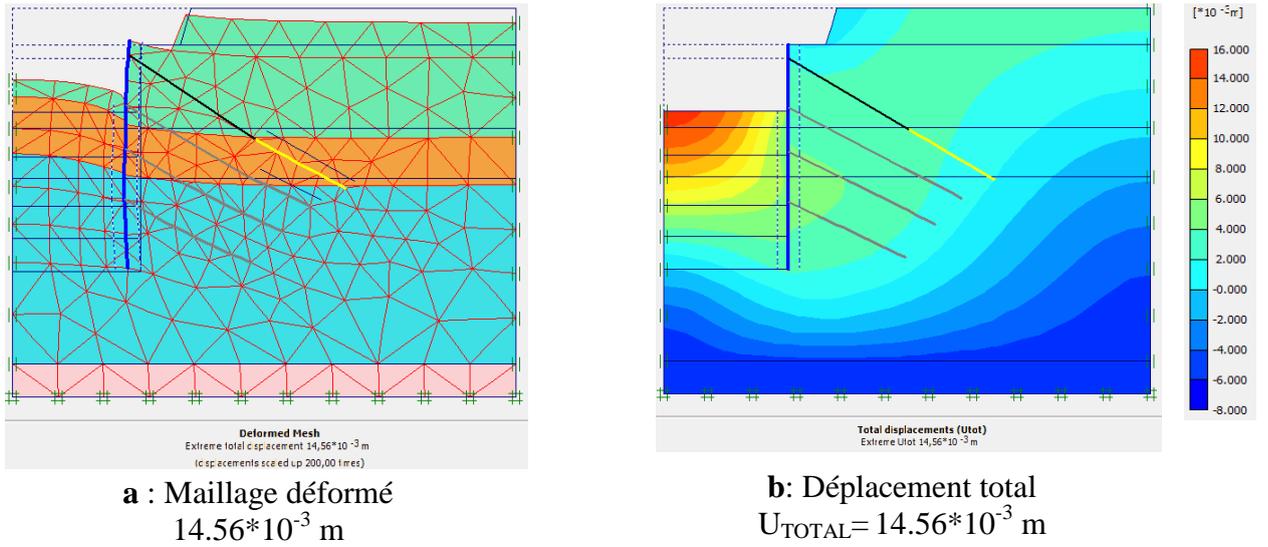


Figure.IV.23 : Déplacement de sol

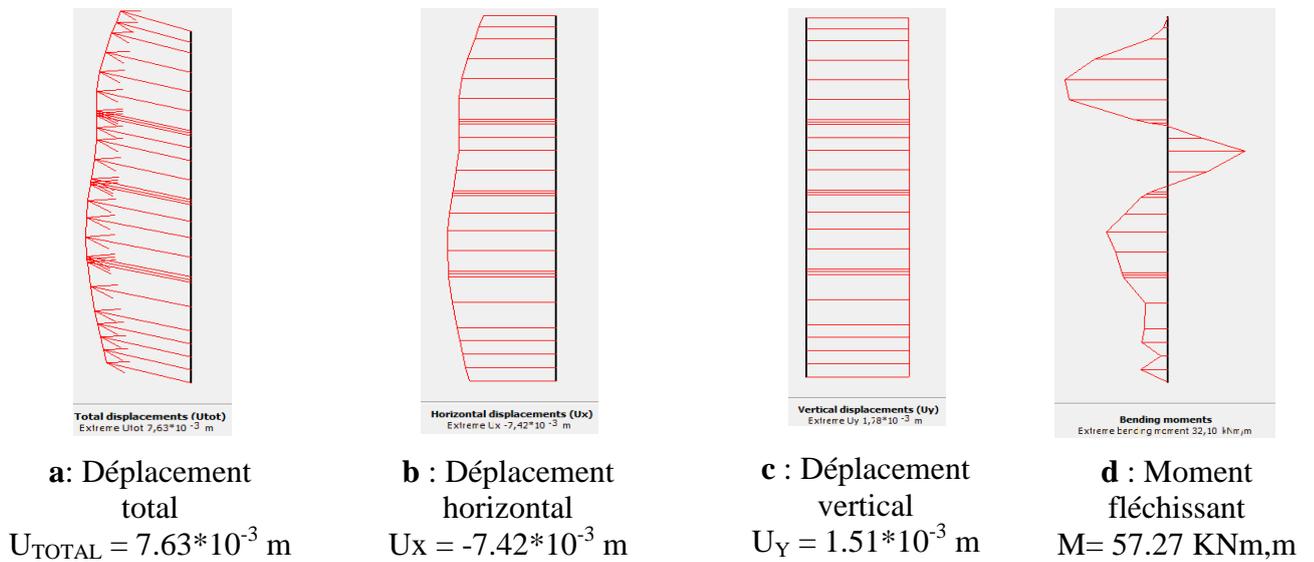


Figure.IV.24 : Déplacement de la paroi moulée

IV.4.1.7. Résultats de la phase 05 :

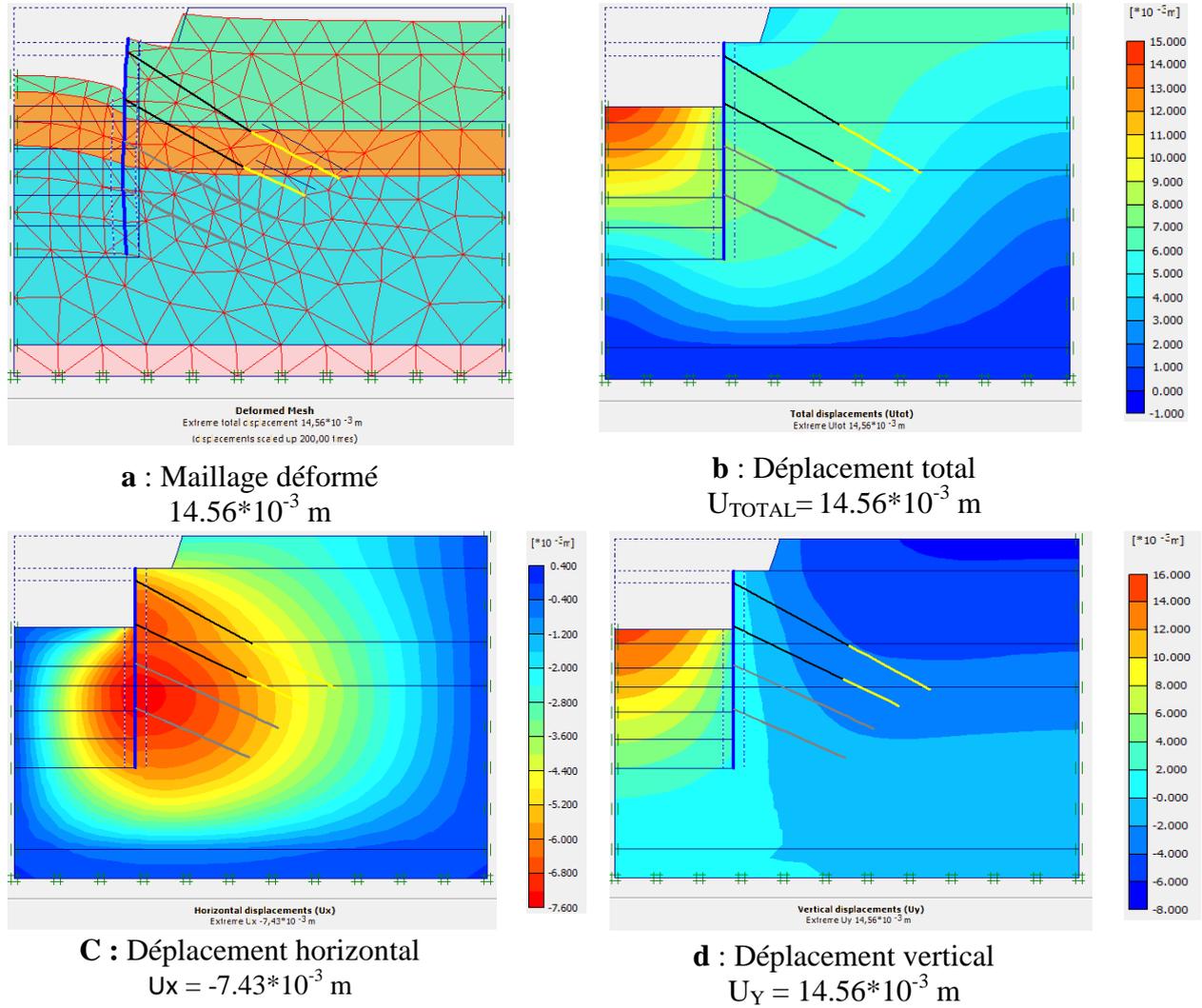


Figure.IV.25 : Déplacement de sol

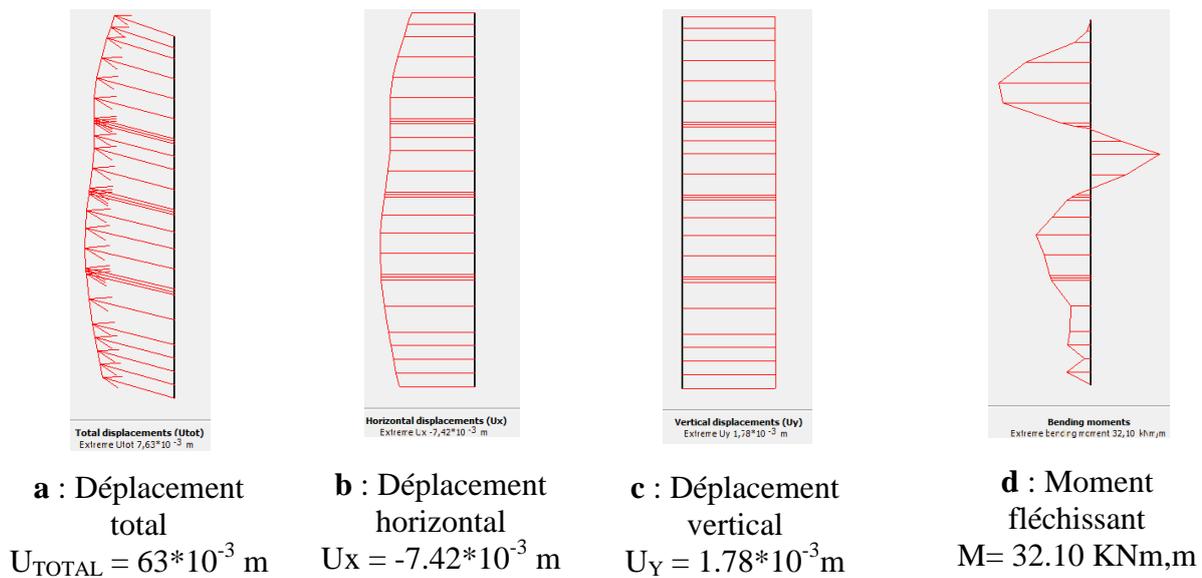
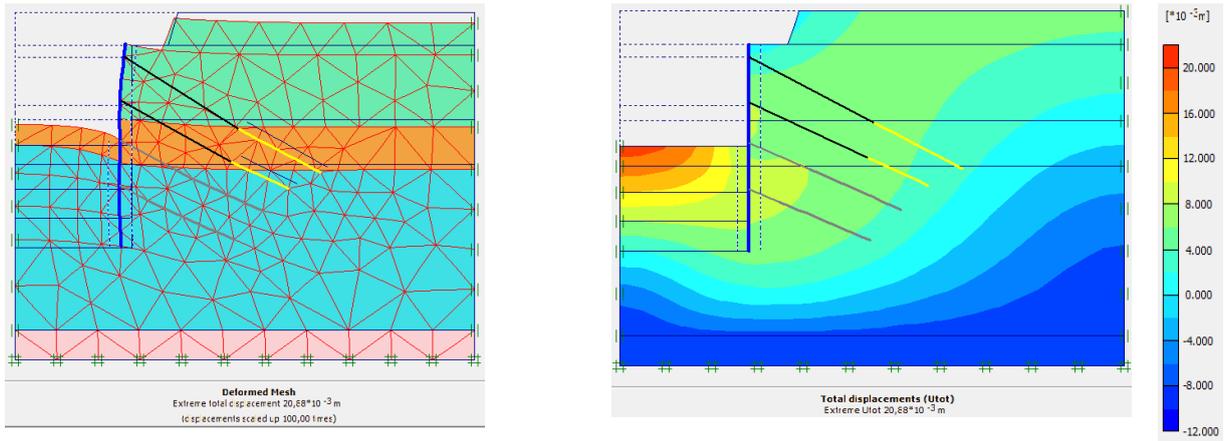


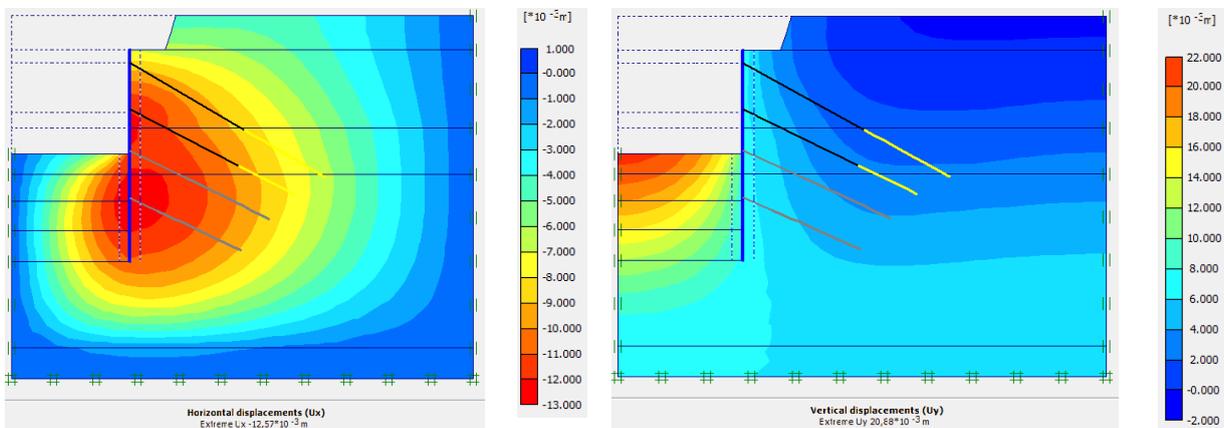
Figure.IV.26 : Déplacement de la paroi moulée

IV.4.1.8. Résultats de la phase 06 :



**a** : Maillage déformé  
 $20.88 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

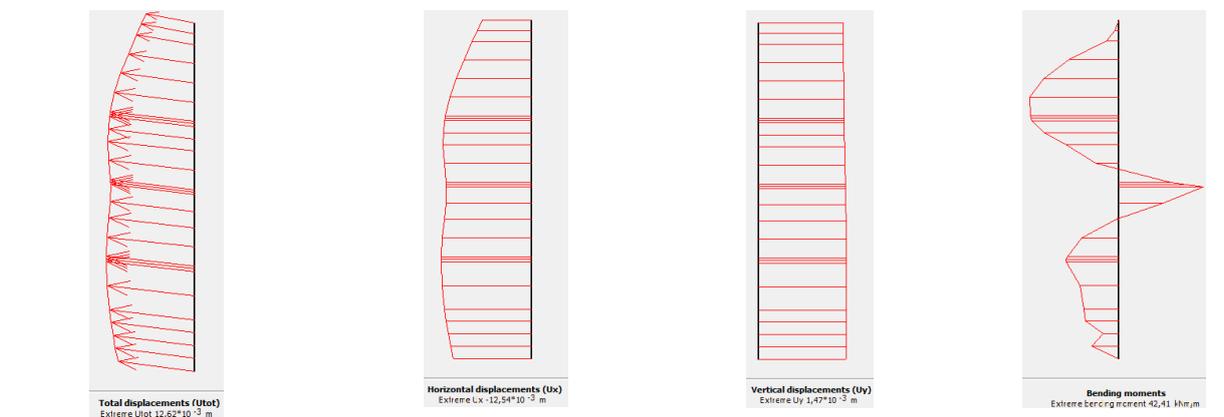
**b** : Déplacement total  
 $U_{\text{TOTAL}} = 20.88 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



**c** : Déplacement horizontal  
 $U_x = -12.57 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

**d** : Déplacement vertical  
 $U_y = 20.88 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

**Figure.IV.27** : Déplacement de sol



**a** : Déplacement total  
 $U_{\text{TOTAL}} = 12.62 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

**b** : Déplacement horizontal  
 $U_x = -12.54 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

**c** : Déplacement vertical  
 $U_y = 1.47 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

**d** : Moment fléchissant  
 $M = 42.41 \text{ Nm/m}$

**Figure.IV.28** : Déplacement de la paroi moulée

IV.4.1.9. Résultats de la phase 07 :

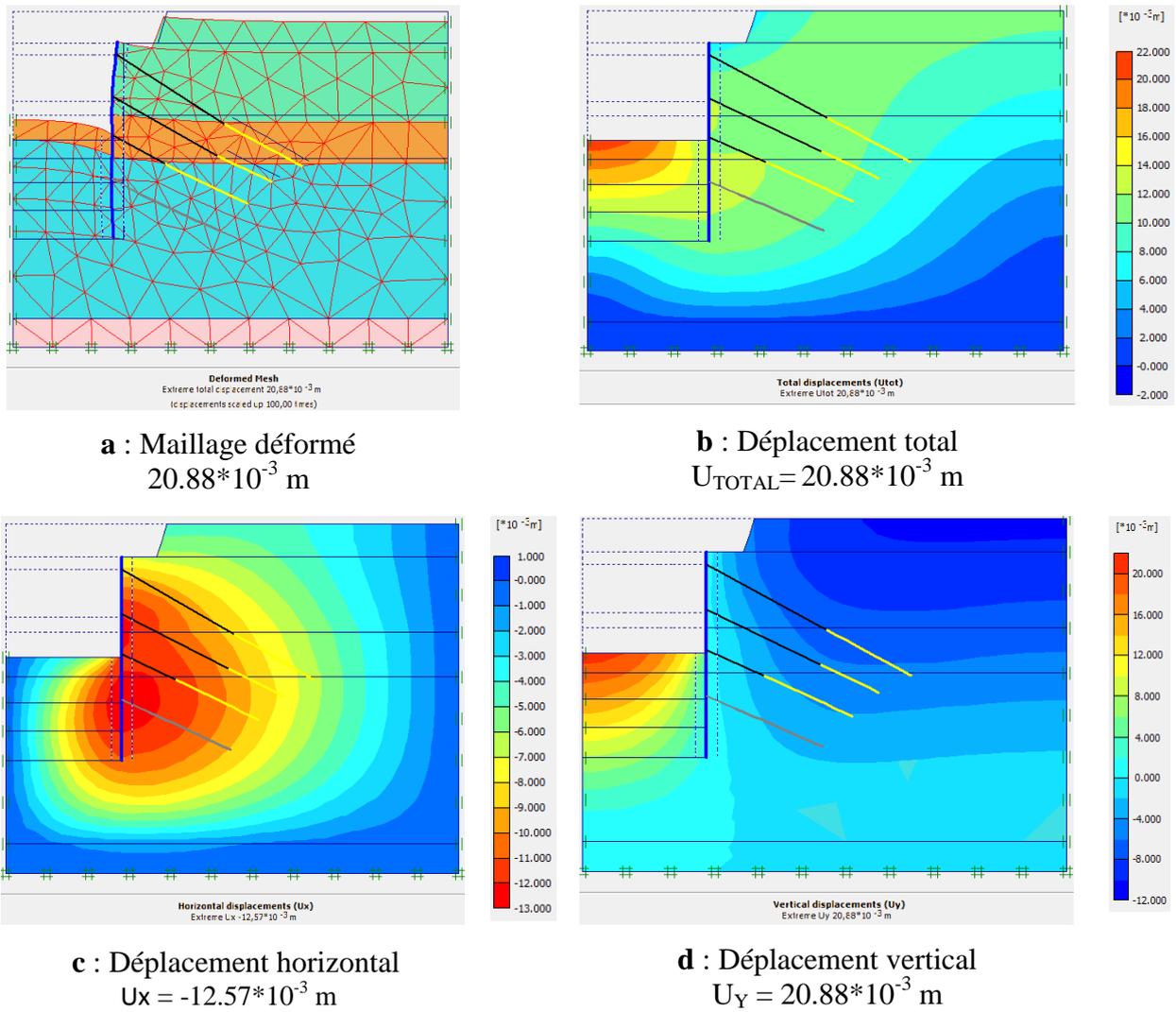


Figure.IV.29 : Déplacement de sol

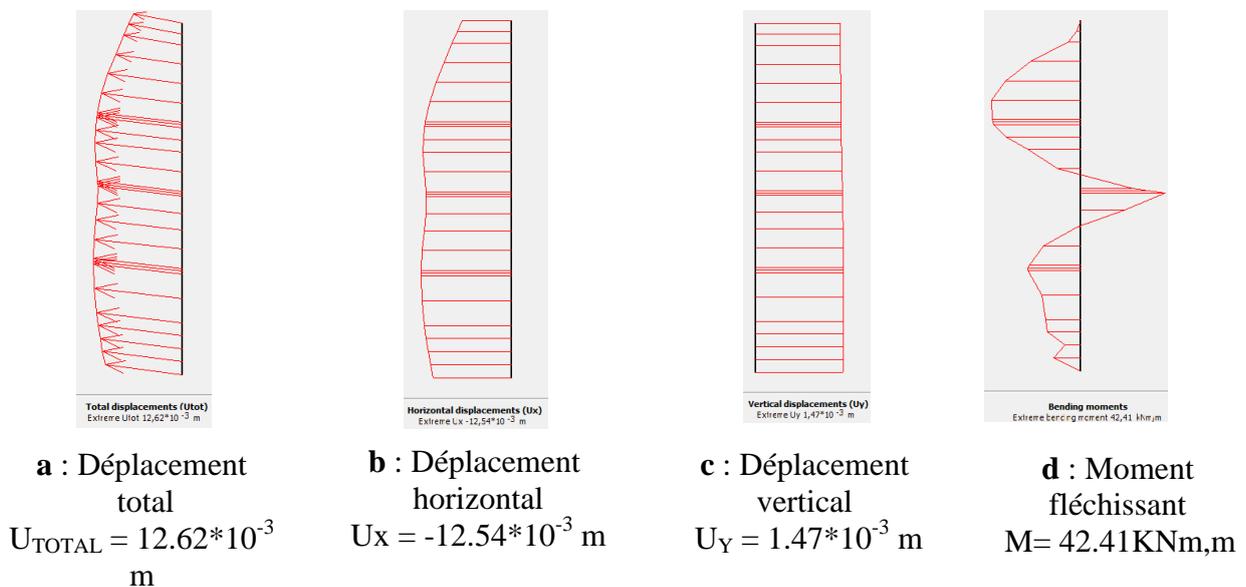
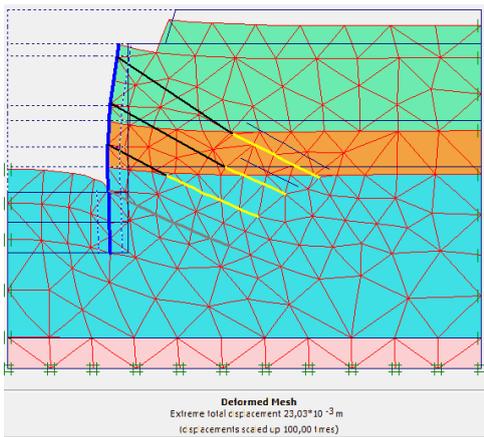
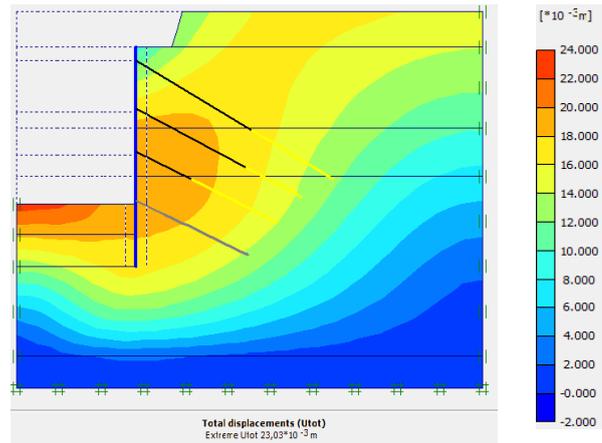


Figure.IV.30 : Déplacement de la paroi moulée

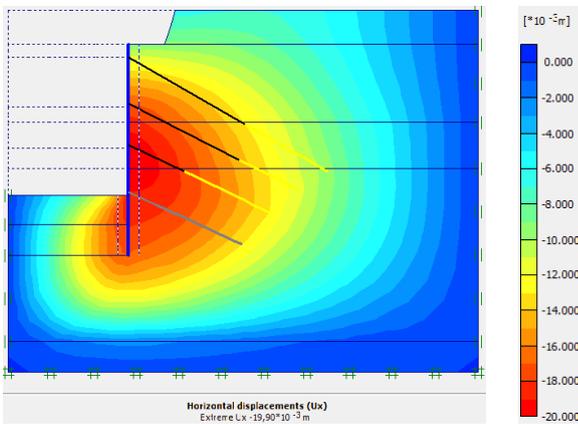
IV.4.1.10. Résultats de la phase 08 :



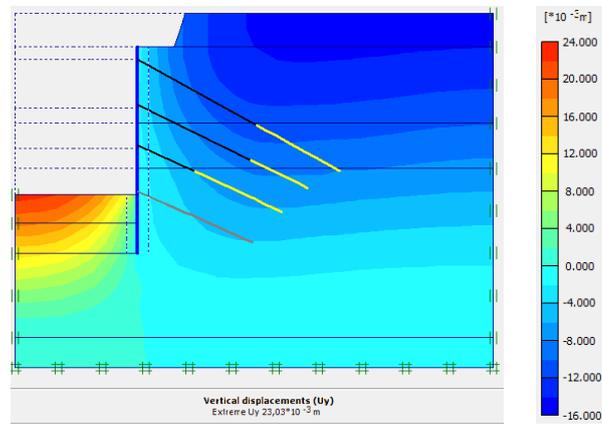
a : Maillage déformé  
 $23.03 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



b : Déplacement total  
 $U_{\text{TOTAL}} = 23.03 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

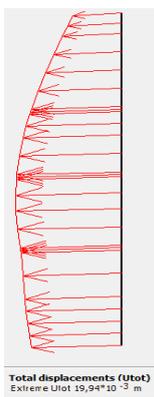


c : Déplacement horizontal  
 $U_x = -19.90 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

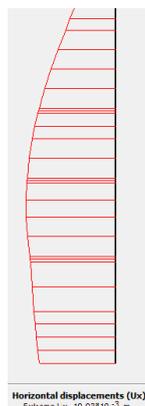


d : Déplacement vertical  
 $U_y = 23.03 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Figure.IV.31 : Déplacement de sol



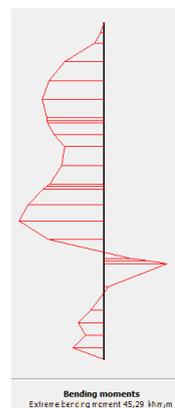
a : Déplacement total  
 $U_{\text{TOTAL}} = 19.94 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



b : Déplacement horizontal  
 $U_x = -19.93 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



c : Déplacement vertical  
 $U_y = -707.14 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



d : Moment fléchissant  
 $M = 45.29 \text{ Nm/m}$

Figure.IV.32 : Déplacement de la paroi moulée

IV.4.1.11. Résultats de la phase 09 :

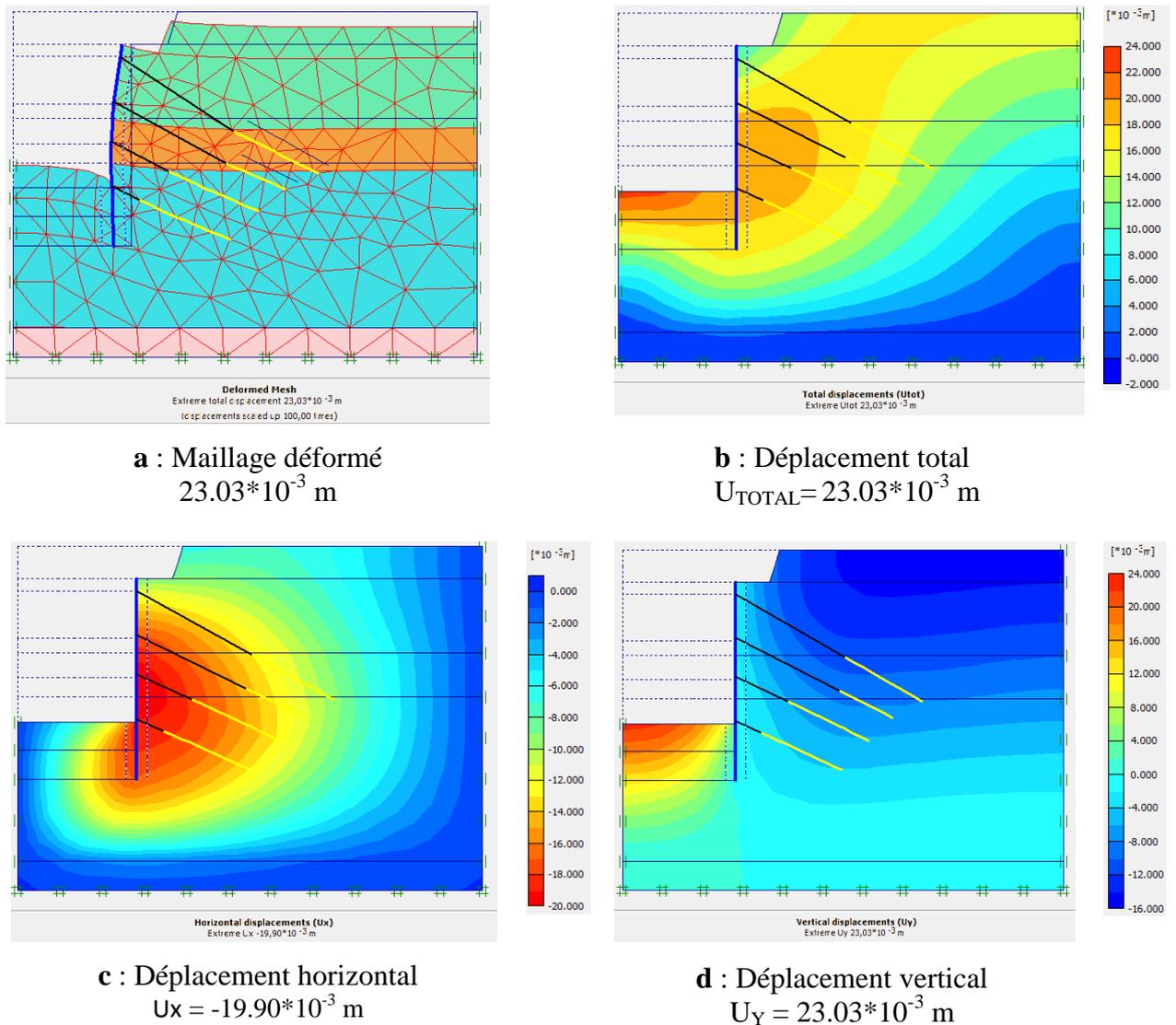


Figure.IV.33 : Déplacement de sol

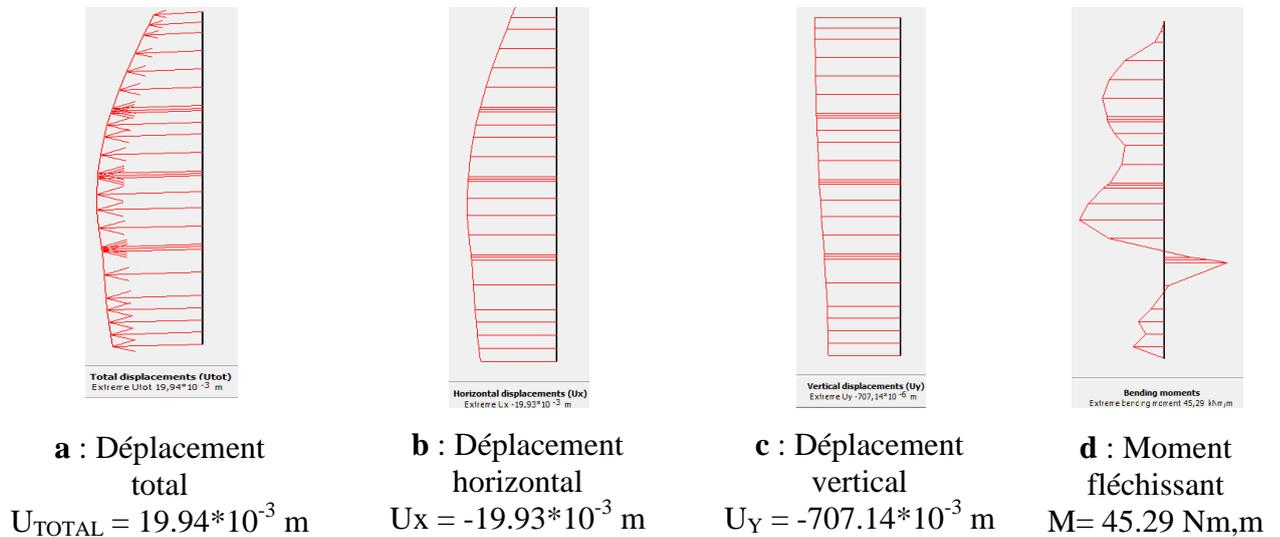


Figure.IV.34 : Déplacement de la paroi moulée

IV.4.1.12. Résultats de la phase 10 :

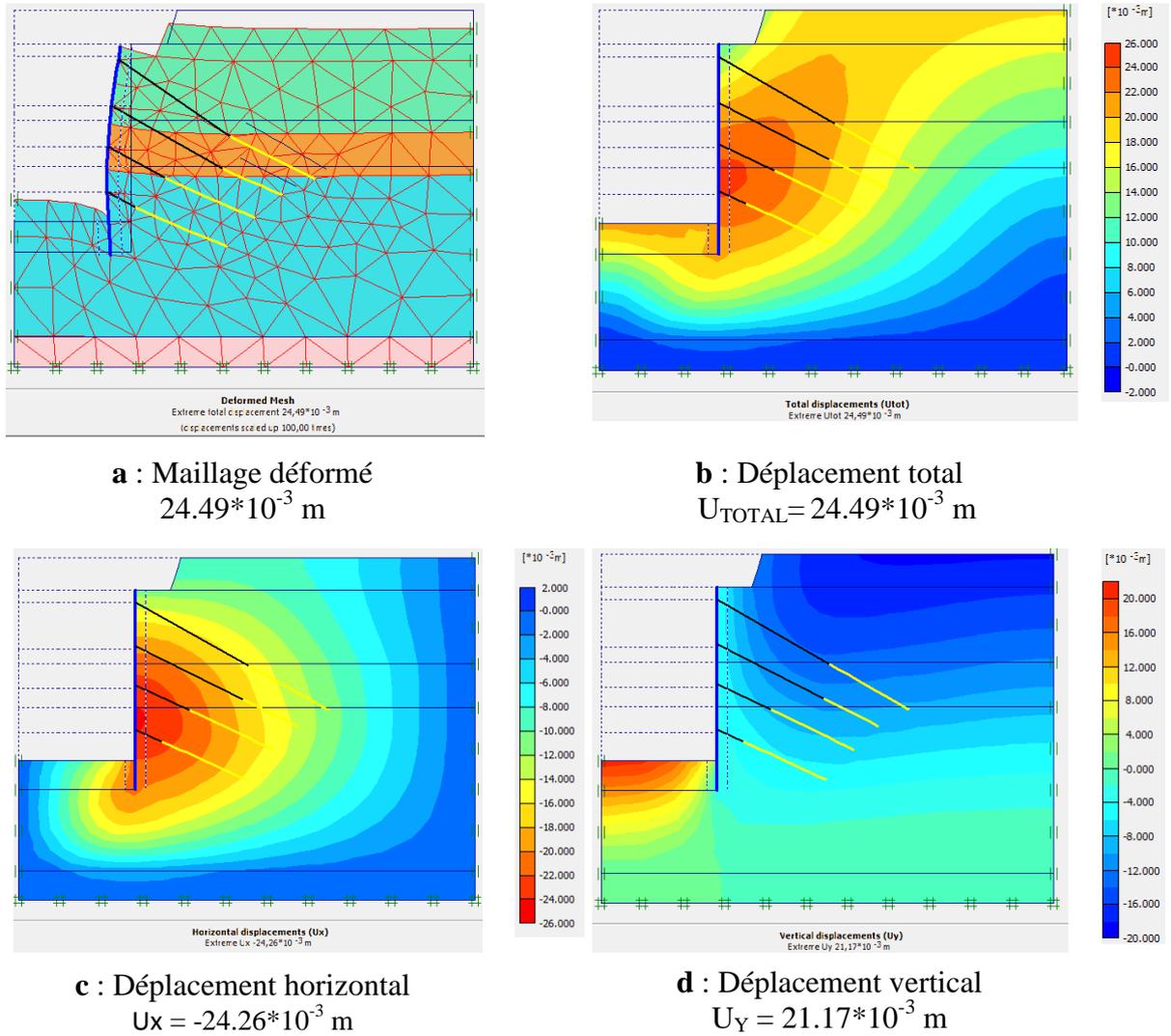


Figure.IV.35 : Déplacement de sol

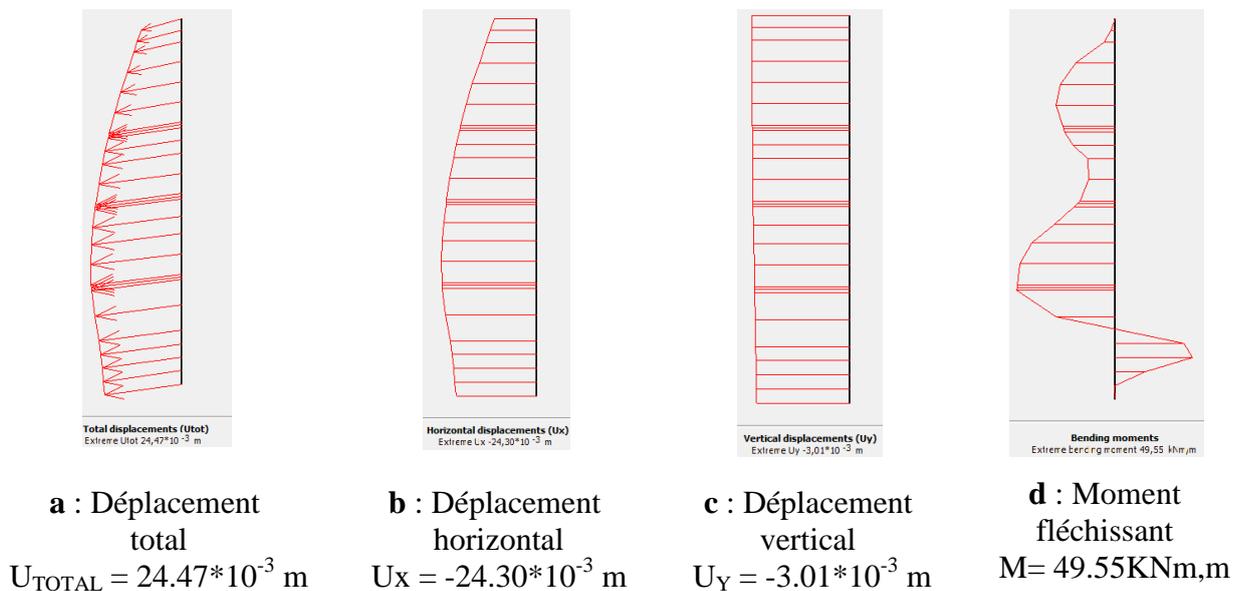
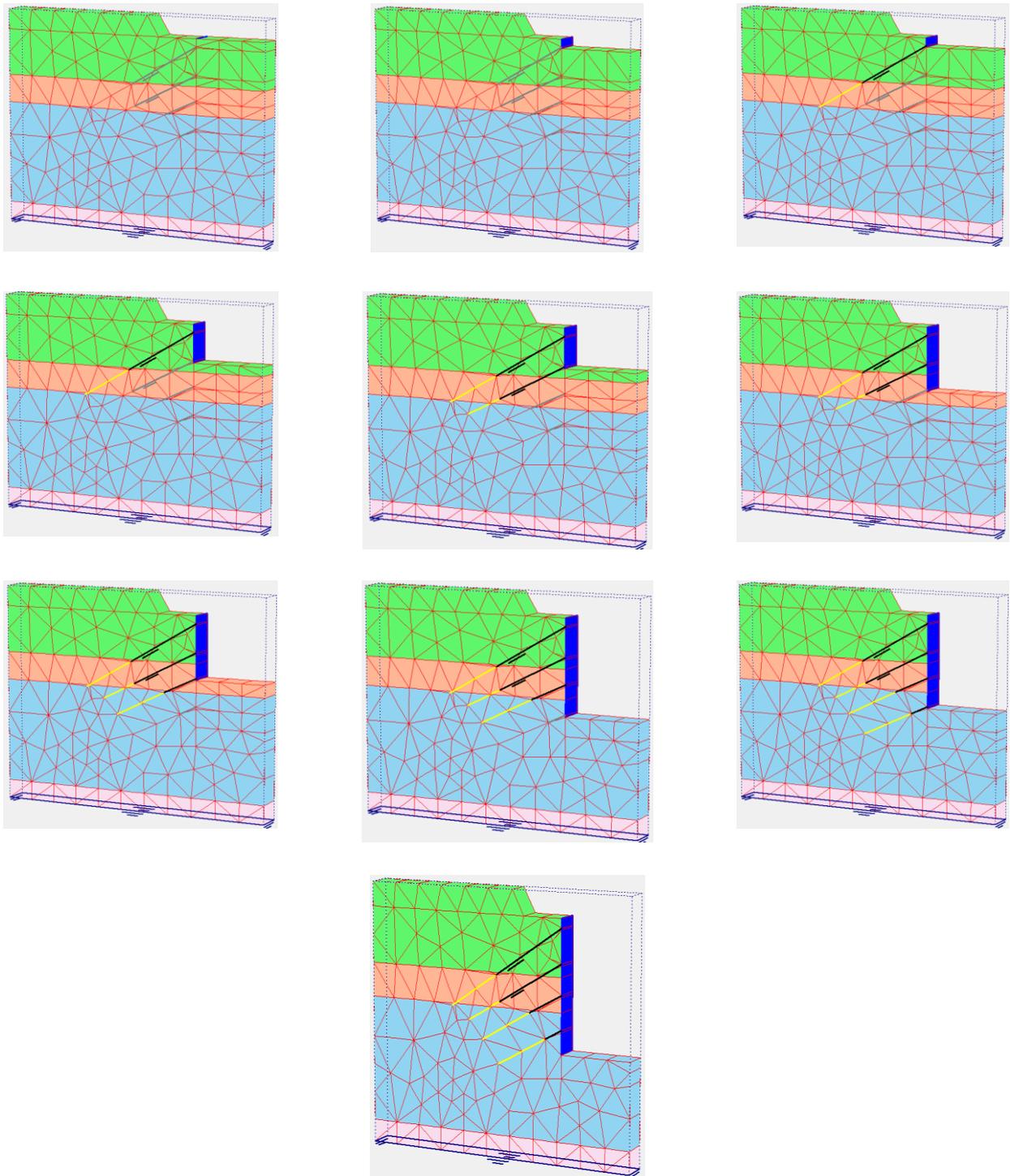


Figure.IV.36 : Déplacement de la paroi moulée

**IV.4.2. Calcul à l'aide de logiciel PLAXIS 3D Tunnel 1.2 :**

Dans cette partie on va faire une comparaison entre le PLAXIS 2D et 3D dans la dernière phases :

**IV.4.2.1. Les phases de calcul 3D:**

**Figure.IV. 37 :** Les 10 phases de calcul 3d

IV.4.2. 2. Résultats de la phase 10 :

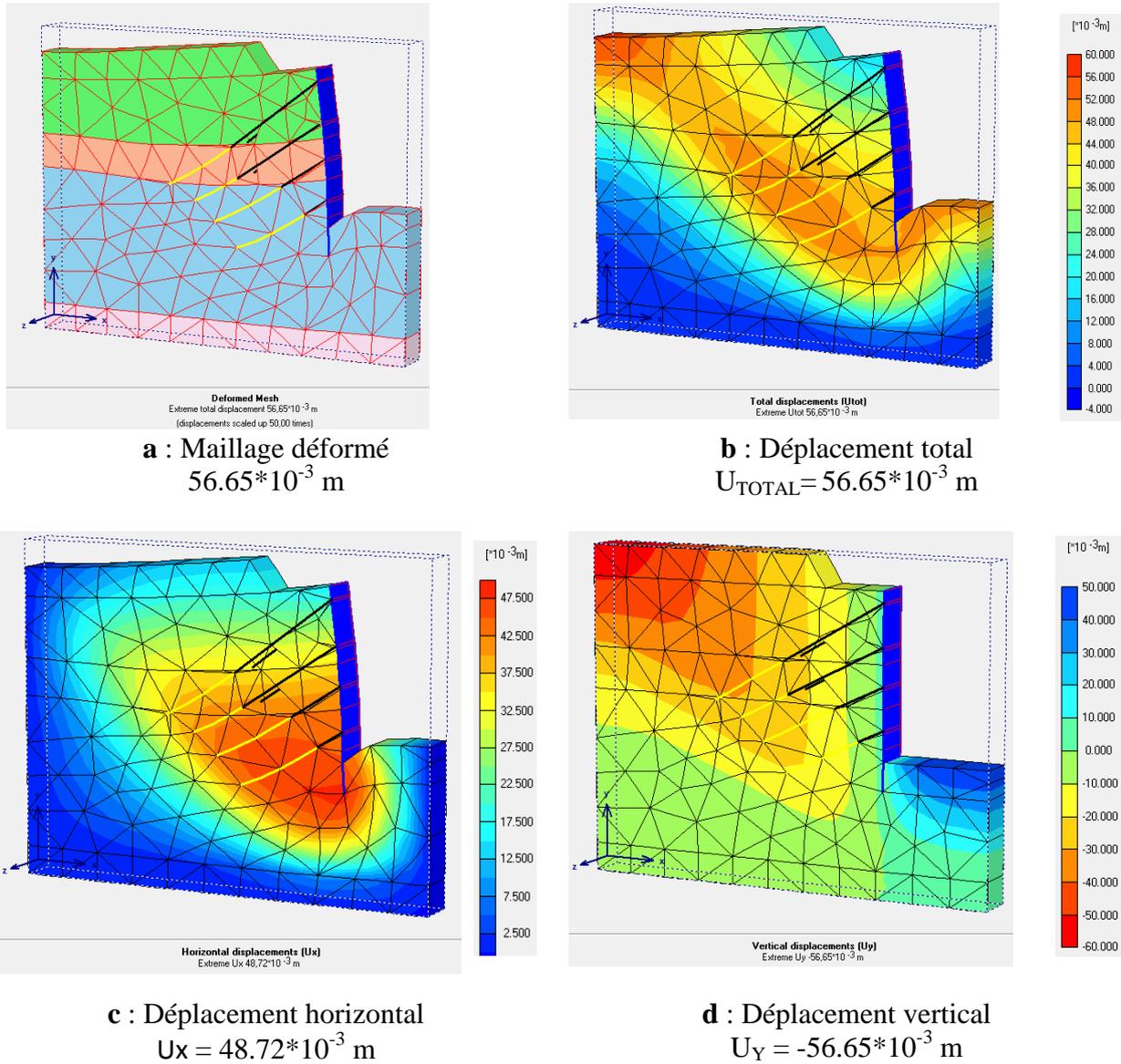


Figure.IV.38 : Déplacement de sol

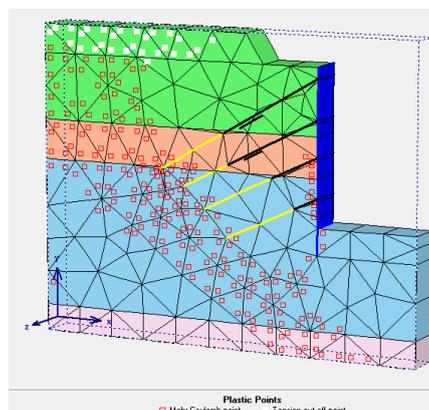


Figure.IV.39: Les points plastics

IV.4.2.3. Déplacement de la paroi moulée phase 10 :

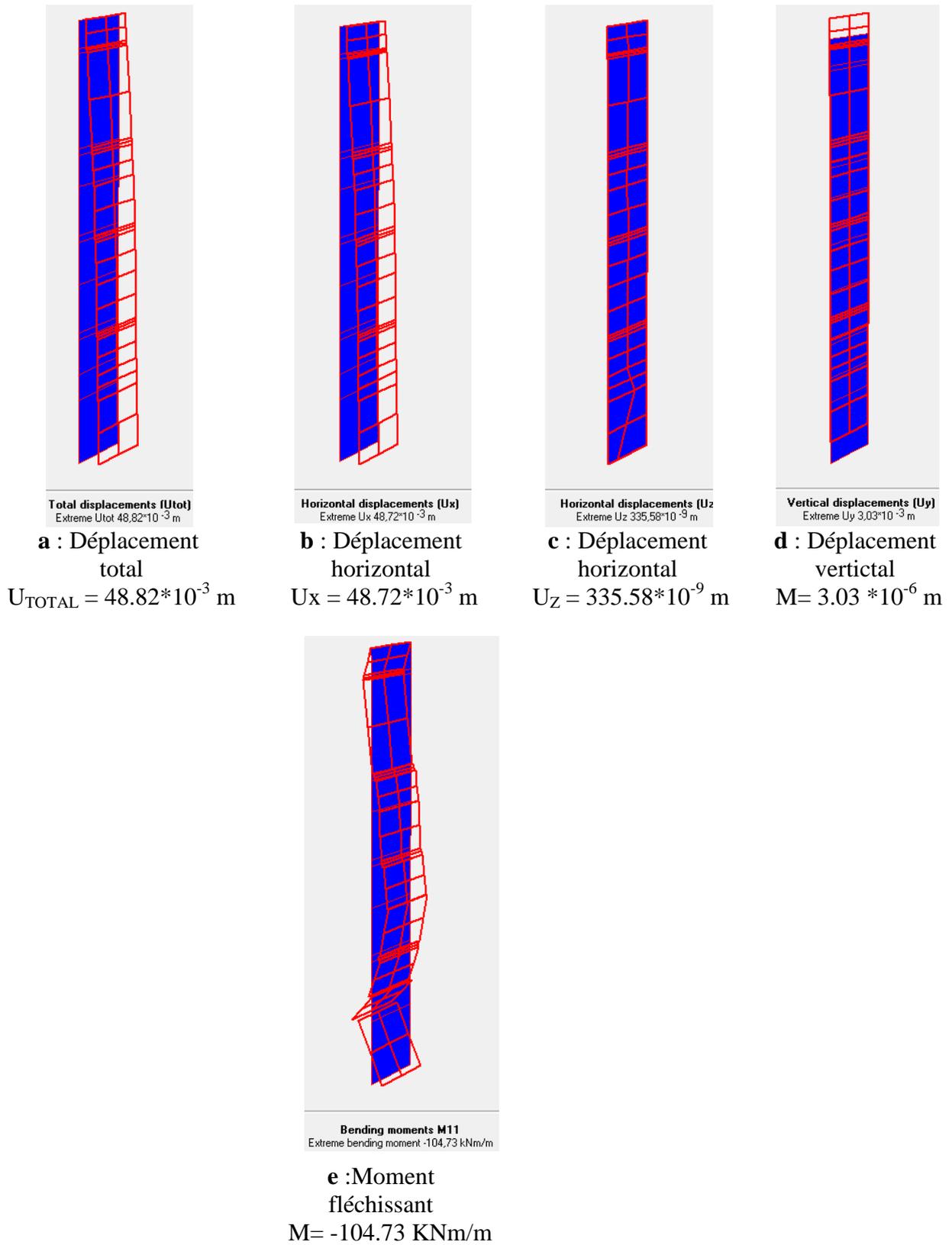


Figure.IV.40 : Déplacement de la paroi moulée phase 10

#### IV.4.3. Résumé des résultants de 10 phases 2D :

Une comparaison entre les résultats observés réellement de la paroi moulée et les déplacements calculés numériquement sont résumées dans les tableaux suivants :

##### IV.4.3.1. Déformation de maillage 2D:

**Tableau IV. 6:** Variation des déplacements de sol pendant les différentes phases 2d

Les phases	Maillage déformé (m)	Déplacement Total (m)	Déplacement horizontal (m)	Déplacement Vertical (m)
1	$9.76 \cdot 10^{-3}$	$9.76 \cdot 10^{-3}$ m	$-4.54 \cdot 10^{-3}$	$9.76 \cdot 10^{-3}$
2	$3.56 \cdot 10^{-3}$	$3.56 \cdot 10^{-3}$	$-1.65 \cdot 10^{-3}$	$3.56 \cdot 10^{-3}$
3	$3.56 \cdot 10^{-3}$	$3.56 \cdot 10^{-3}$	$1.65 \cdot 10^{-3}$	$3.56 \cdot 10^{-3}$
4	$14.56 \cdot 10^{-3}$	$14.56 \cdot 10^{-3}$	$-7.43 \cdot 10^{-3}$	$14.56 \cdot 10^{-3}$
5	$14.56 \cdot 10^{-3}$	$14.56 \cdot 10^{-3}$	$-7.43 \cdot 10^{-3}$	$14.56 \cdot 10^{-3}$
6	$20.88 \cdot 10^{-3}$	$20.88 \cdot 10^{-3}$	$-12.57 \cdot 10^{-3}$	$20.88 \cdot 10^{-3}$
7	$20.88 \cdot 10^{-3}$	$20.88 \cdot 10^{-3}$	$-12.57 \cdot 10^{-3}$	$20.88 \cdot 10^{-3}$
8	$23.03 \cdot 10^{-3}$	$23.03 \cdot 10^{-3}$	$-19.90 \cdot 10^{-3}$	$23.03 \cdot 10^{-3}$
9	$23.03 \cdot 10^{-3}$	$23.03 \cdot 10^{-3}$	$-19.90 \cdot 10^{-3}$	$23.03 \cdot 10^{-3}$
10	$24.49 \cdot 10^{-3}$	$24.49 \cdot 10^{-3}$	$-24.26 \cdot 10^{-3}$	$21.17 \cdot 10^{-3}$

##### IV.4.3.2. Déformation des esultan structuraux ( Paroi moulée ) 2d :

**Tableau IV.7:** Variation des déplacements de paroi pendant les différentes phases 2d

Les phases	Déplacement Total (m)	Déplacement horizontal (m)	Déplacement Vertical (m)	Moment fléchissant (Knm,m)
1	$4.53 \cdot 10^{-3}$	$-3.77 \cdot 10^{-3}$	$2.55 \cdot 10^{-3}$	10.95
2	$1.73 \cdot 10^{-3}$	$-1.65 \cdot 10^{-3}$	$506.00 \cdot 10^{-6}$	12.75
3	$1.73 \cdot 10^{-3}$	$-1.65 \cdot 10^{-3}$	$506.00 \cdot 10^{-6}$	-42.05
4	$7.63 \cdot 10^{-3}$	$-7.42 \cdot 10^{-3}$	$1.51 \cdot 10^{-3}$	57.27
5	$7.63 \cdot 10^{-3}$	$-7.42 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^{-3}$	57.27
6	$12.62 \cdot 10^{-3}$	$-12.54 \cdot 10^{-3}$	$1.47 \cdot 10^{-3}$	42.41
7	$12.62 \cdot 10^{-3}$	$-12.54 \cdot 10^{-3}$	$1.47 \cdot 10^{-3}$	42.41
8	$19.94 \cdot 10^{-3}$	$-19.93 \cdot 10^{-3}$	$-707.14 \cdot 10^{-3}$	45.29
9	$19.94 \cdot 10^{-3}$	$-19.93 \cdot 10^{-3}$	$-707.14 \cdot 10^{-3}$	45.29
10	$24.47 \cdot 10^{-3}$	$-24.30 \cdot 10^{-3}$	$-3.01 \cdot 10^{-3}$	49.55

##### IV.4.3.3. Résumé des résultants de la phase 10 3D:

###### IV.4.3.3.1. Déformation de maillage 3D:

**Tableau IV.8:** Variation des déplacements de sol pendant la phase 10 -3d

Les phases	Maillage déformé (m)	Déplacement Total (m)	Déplacement horizontal (m)	Déplacement Vertical (m)
10	$56.65 \cdot 10^{-3}$	$56.65 \cdot 10^{-3}$	$48.72 \cdot 10^{-3}$	$-56.65 \cdot 10^{-3}$

#### IV.4.3.3.2. Déformation des résultant structuraux ( Paroi moulée ) phase 10 -3D :

**Tableau IV.9:** Variation des déplacements de la paroi pendant la phase 10 -3d

Les phases	Déplacement Total (m)	Déplacement horizontal (m) $U_x$	Déplacement horizontal (m) $U_z$	Déplacement Vertical (m) $U_z$	Moment fléchissant (KNm,m)
10	$48.82 \cdot 10^{-3}$	$48.72 \cdot 10^{-3}$	$335.58 \cdot 10^{-9}$	$3.03 \cdot 10^{-6}$	-104.73

#### IV.4.3.3.3. Commentaire :

D'après les esultants de calculs, on remaque qu'il ya une augmentation de déplacement de paroi moulée à chaque phases d'excavation.

#### IV.4.4. les tensions d'encrages:

**Tableau IV.10:** comparaisons des tensions d'ancrages

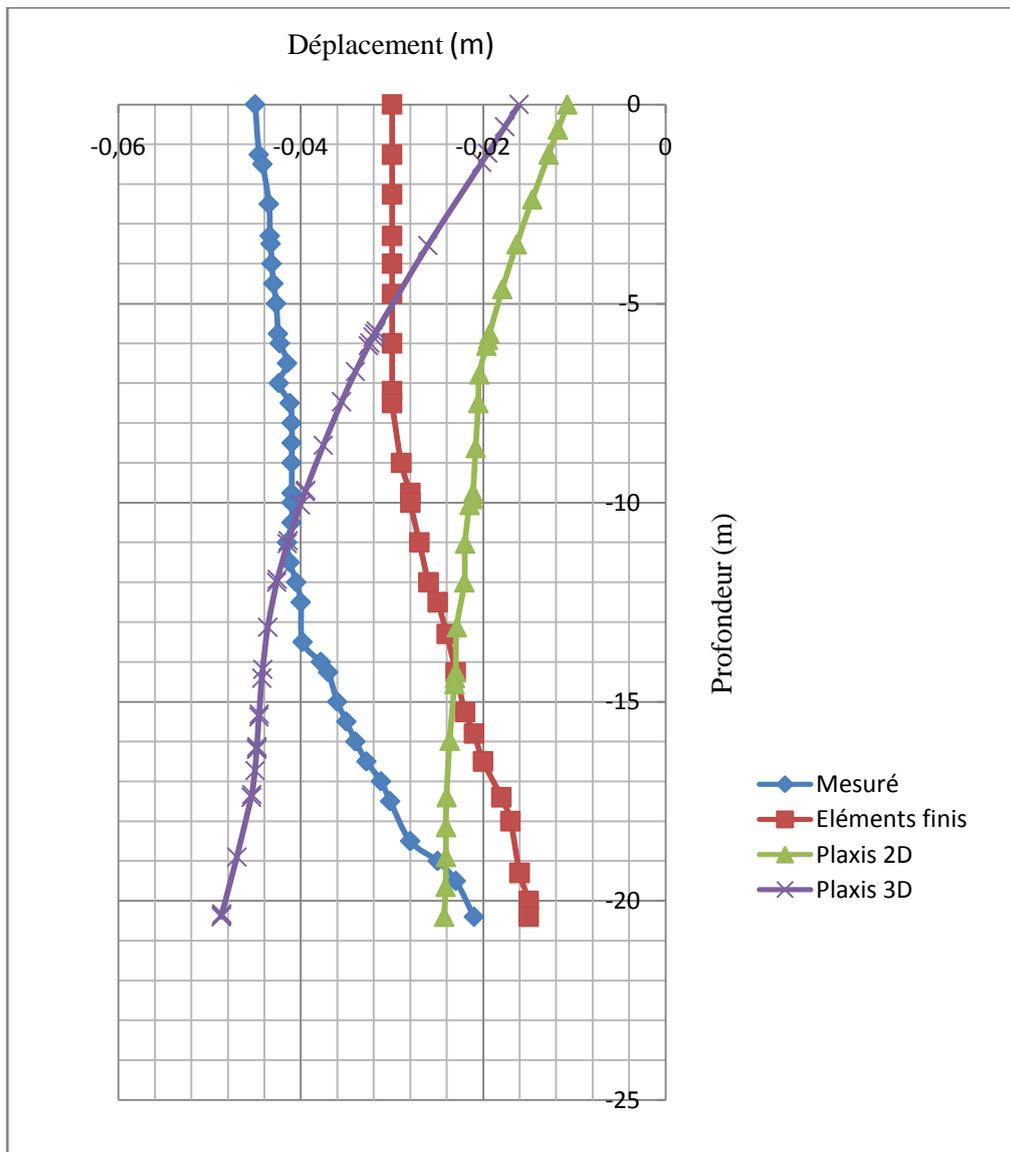
N° de Nappe	Longueur Libre (m)	Longueur de Scellement (m)	Tension de précontrainte théorique (kn)	Tension Finale (kn)			
				Mésurée	Eléments finis	Plaxis 2d	Plaxis 3d
1	13	9	366	375	359	362.4	350
2	12	6	611	700	691	612	620
3	6	9	840	770	804	815	810
4	3	9	1040	870	1010	1025	1021

#### IV.4.4.1. Commentaire:

D'après les résultats de calculs, on remaque que les tensions d'encrages plus satisfaisants et très proche que les résultats mesurés et calculés avec la méthode des éléments finis. qui nous indique que la modélisation numérique avec le code des éléments finis plaxis est conduit à trouver des bon résultats.

#### IV.4.5. Comparaison des résultats des calculs:

##### IV.4.5.1. Interprétation des courbes des déplacements de paroi:



**Figure.IV. 41:** Comparaison des résultats du calcul des déplacements de paroi avec les résultats expérimentaux et les résultats des éléments finis obtenus en dernière phase de travaux

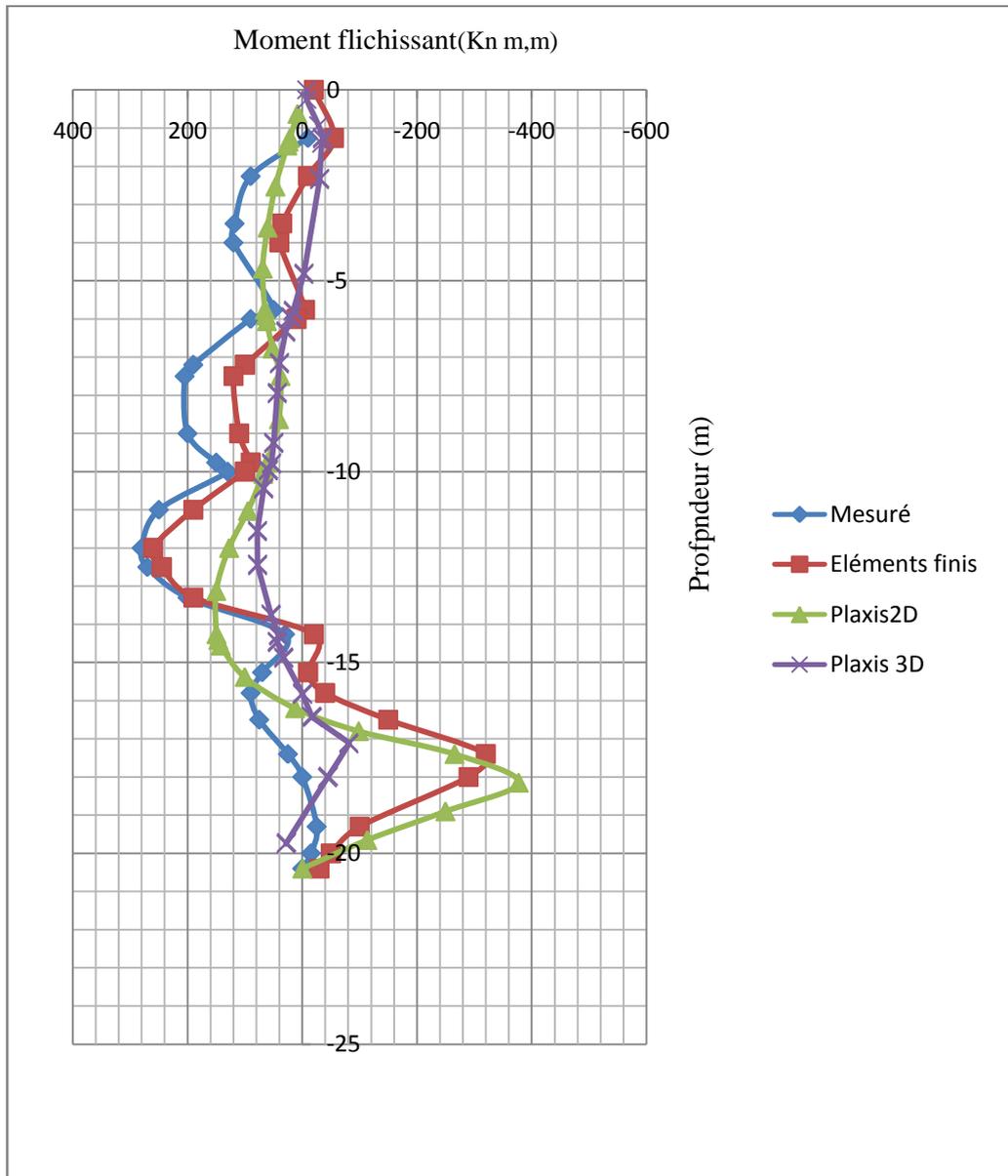
##### IV.4.5.2. Commentaire:

La comparaison des résultats obtenus montre que le modèle numérique proposé était capable de donner des prédictions du mode et de la magnitude du déplacement de la paroi proches de ceux observés réellement, la petite différence observée peut être attribuée à plusieurs facteurs liés aux simplifications utilisées et à la limitation du modèle numérique proposé.

##### IV.4.5.3. Remarque :

On remarque que la déformation de paroi augmente avec la profondeur.

#### IV.4.5.4. Interprétation des courbes des moments fléchissants:



**Figure.IV. 42:** Comparaison des résultats du calcul des moments fléchissants avec les résultats expérimentaux et les résultats des éléments finis obtenus en dernière phase de travaux

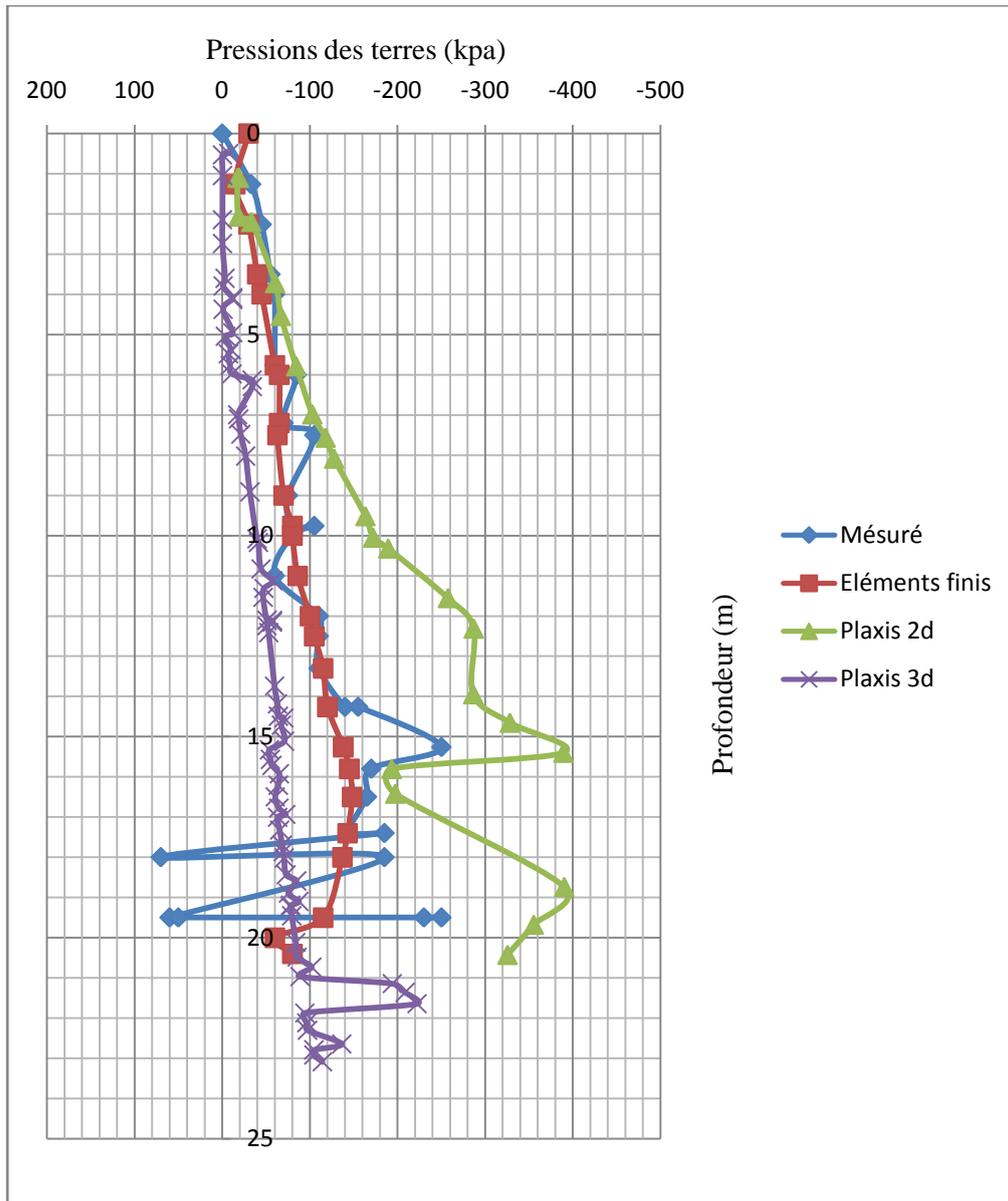
#### IV.4.5.5. Commentaire:

La comparaison des résultats obtenus montre que le modèle numérique donne des résultats très proches que les résultats mesurés et calculés avec la méthode des éléments finis .

#### IV.4.5. 6. Remarque :

On remarque que le moment fléchissant augmente avec la profondeur le moment le plus grand se trouve au pied de la paroi .

#### IV.4.5.7. Interprétation des courbes des pressions des terres:



**Figure.IV. 43:** Comparaison des résultats du calcul des des pressions des terres avec les résultats expérimentaux et les résultats des elements finis obtenus en dernière phase de travaux

#### IV.4.5.8. Commentaire :

La comparaison des résultats des pressions des terres obtenus montre que le modèle numérique proposé était capable de donner résultats proches de ceux observés réellement,

#### **IV.5.Conclusions**

Dans ce mémoire, nous avons effectué une modélisation numérique par le code des éléments finis Plaxis d'une paroi moulée ancrée par quatre nappes de tirants en faisant une coparaison montre la concordance des résultats obtenus et la validité des approches numériques pour appréhender les déformations d'une structure.

D'après les résultats obtenues et qui s'avèrent proches des résultats réels, les procédures numériques peuvent être acceptées et employées par les ingénieurs dans la pratique pour les calculs et le dimensionnement des ouvrages et aussi dans la recherche pour prévoir le comportement des ouvrages géotechniques.

---

*Chapitre V :*  
*Etude paramétrique*

---

**V.1. Introduction :**

Après l'étude de stabilisation d'une paroi moulée ancrée par quatre nappes de tirants on se propose dans l'étude paramétrique une étude de stabilité .

1-Analyse des efforts de surcharges (cummul d'effets)

2-types de charges

a- surchargement répartie en surface

b- surchargement répartie à la base

c- La charge horizontale

d- Effet dynamique

**V.2.L'influence de la surcharge des ouvrages en surface du sol sur le comportement de la paroi :**

Dans ce cas on va étudier l'influence du surchargement en surface de sol sur le comportement de la paroi, ce surchargement représente le pois des structures juxtaposé à la paroi.

V.2.1. Surcharge répartie en surface  $10 \text{ kn.m}^2$  :

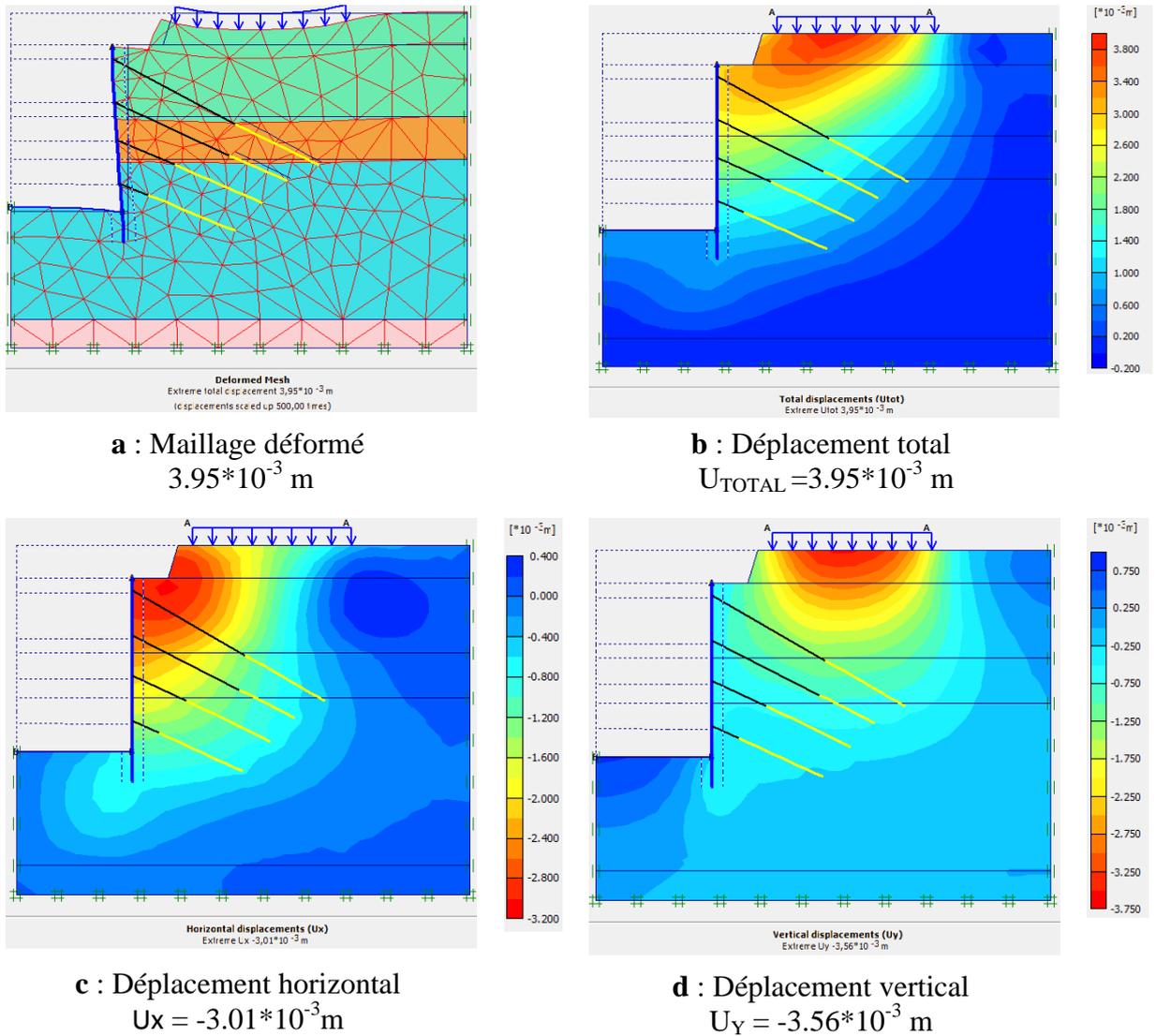


Figure.V.1 : Déplacement de sol

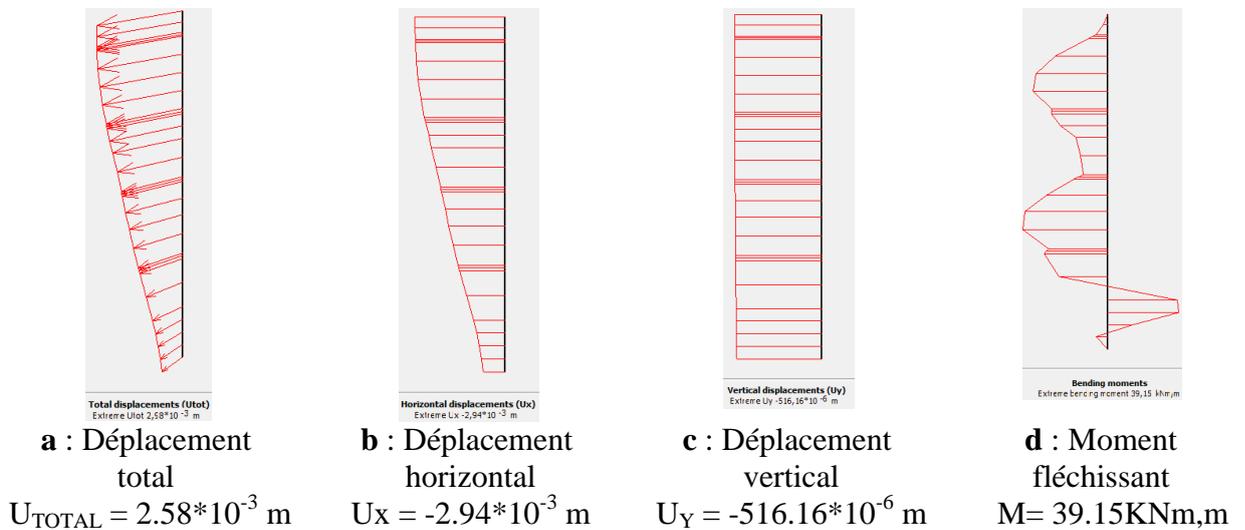


Figure.V.2 : Déplacement de la paroi moulée

V.2.2. Surcharge répartie en surface  $30 \text{ kn.m}^2$  :

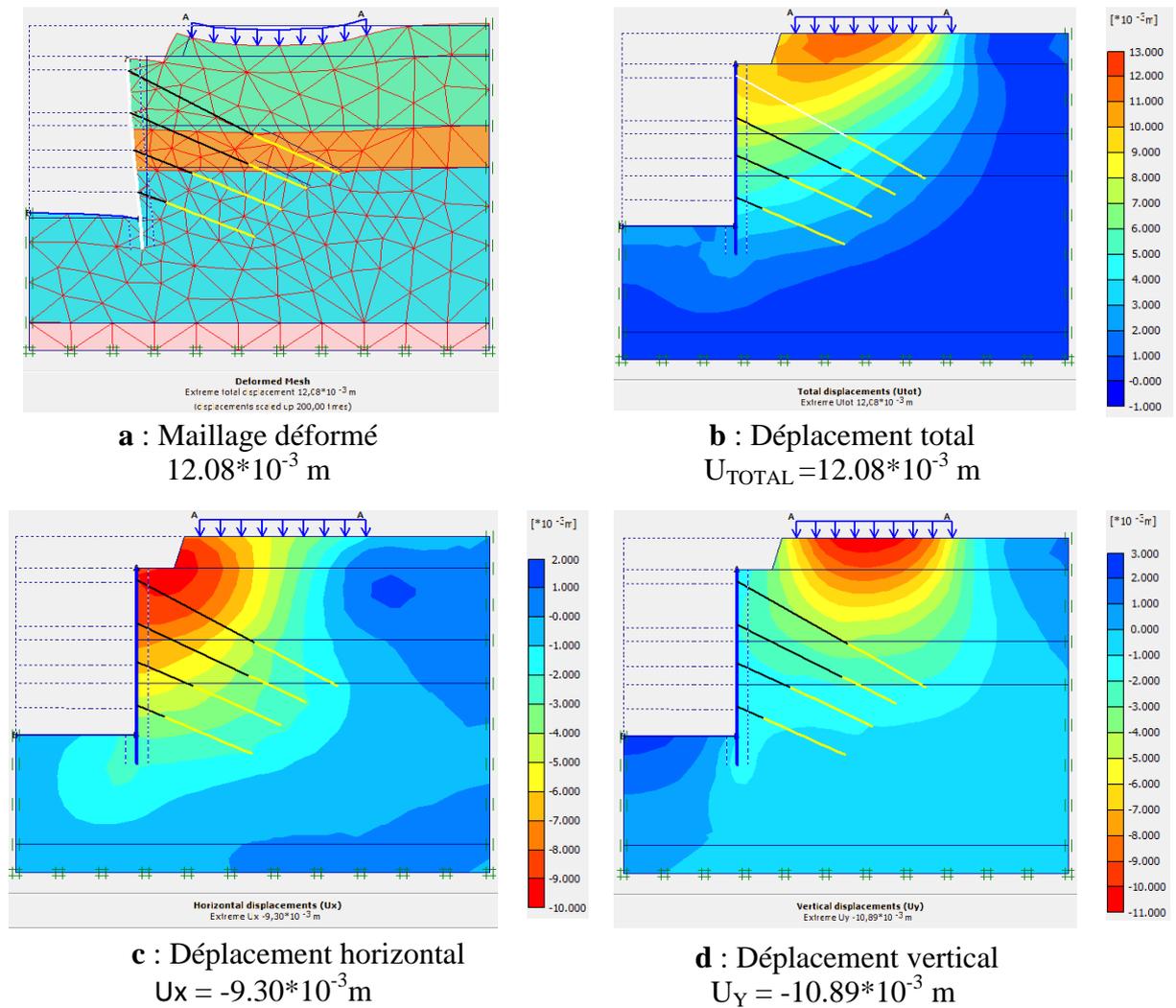


Figure.V.3 :Déplacement de sol

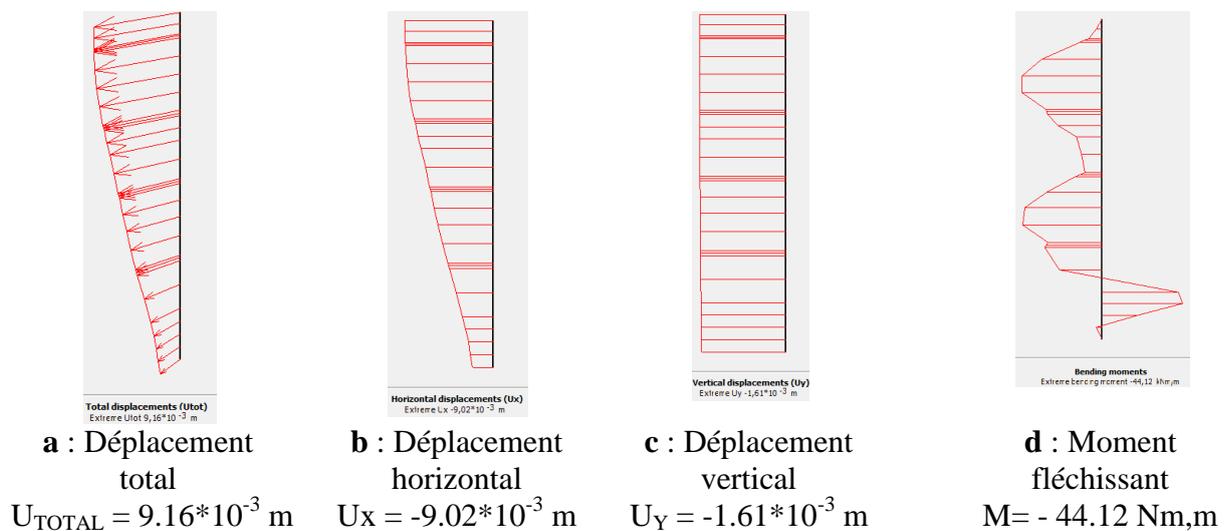


Figure.V.4 : Déplacement de la paroi moulée

V.2.3. Surcharge répartie en surface  $80 \text{ kn.m}^2$ :

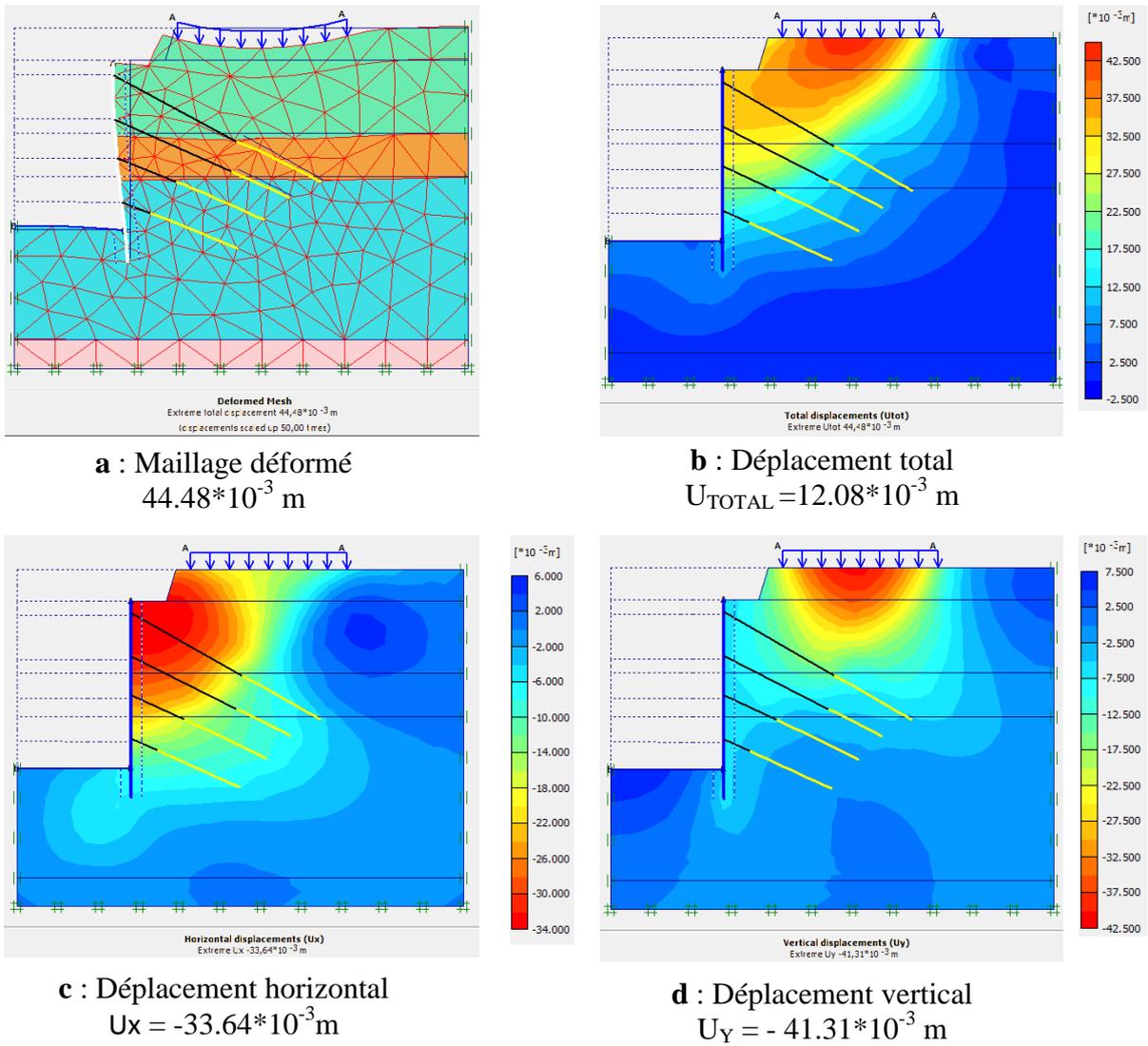


Figure.V.5 : Déplacement de sol

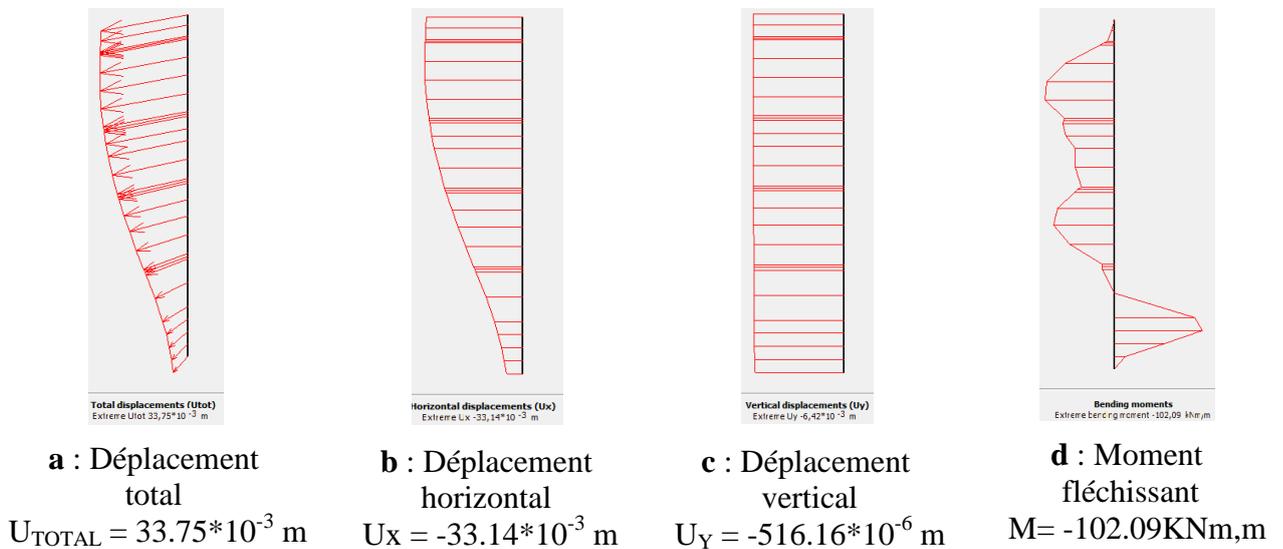


Figure.V.6 : Déplacement de la paroi moulée

V.2.4. Surcharge répartie en surface 86 kn.m<sup>2</sup> :

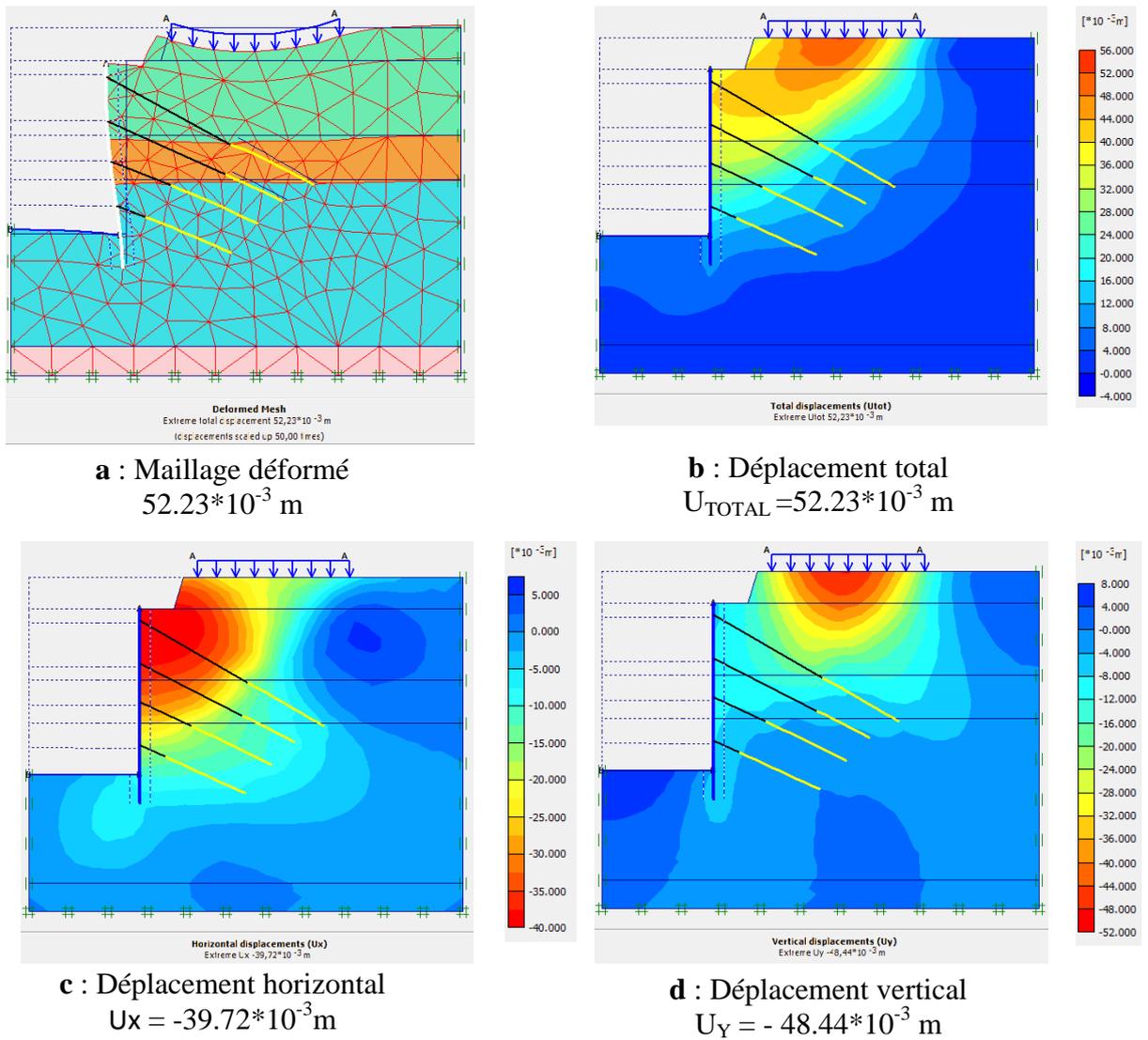


Figure.V.7 : Déplacement de sol

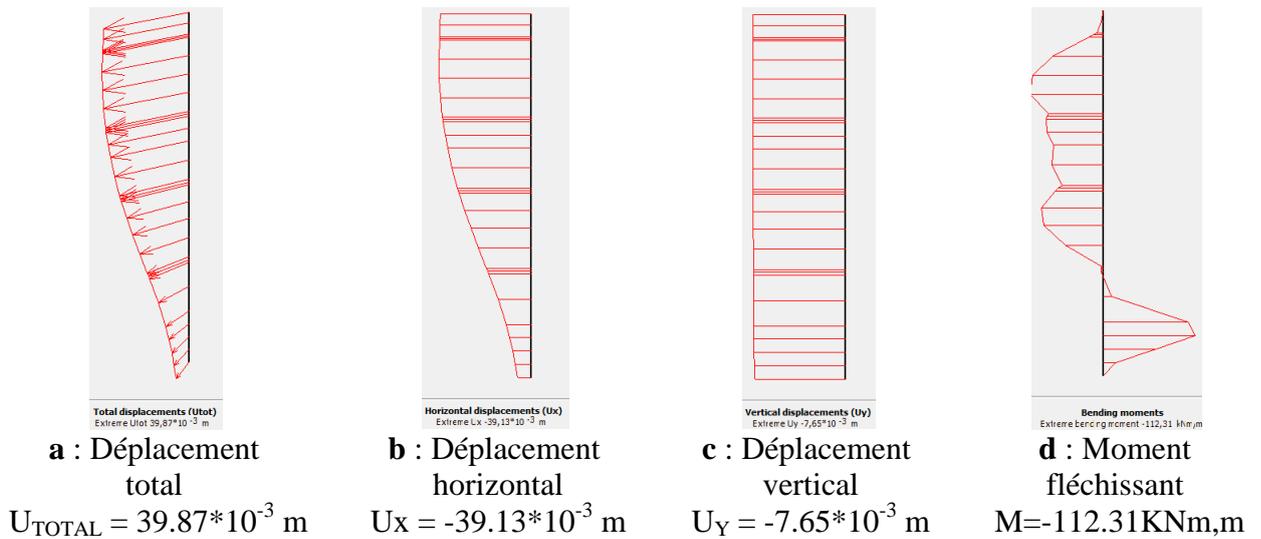


Figure.V.8 : Déplacement de la paroi moulée

V.2.5. Surcharge répartie à la base  $400 \text{ kn.m}^2$  :

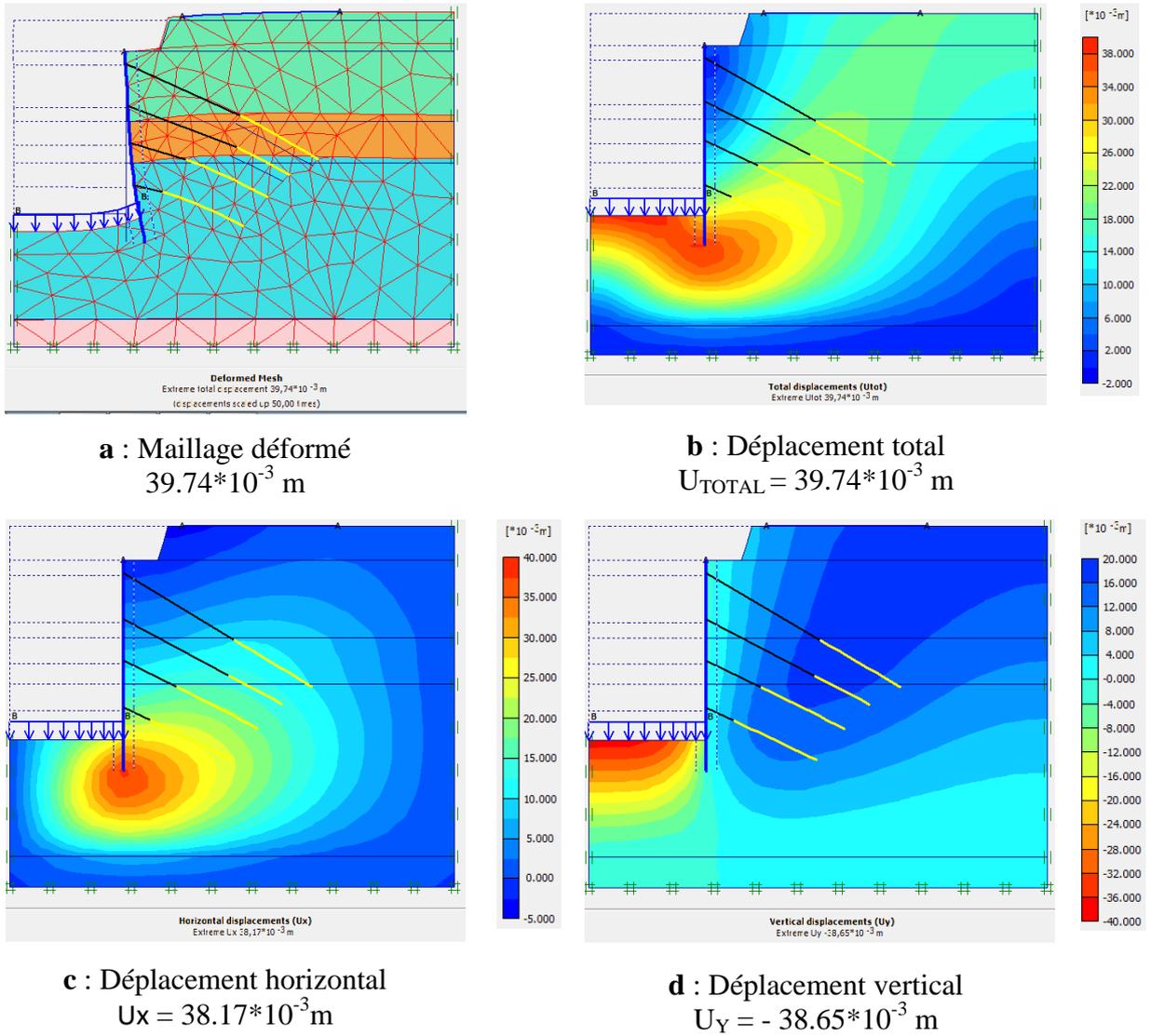


Figure.V.9 : Déplacement de sol

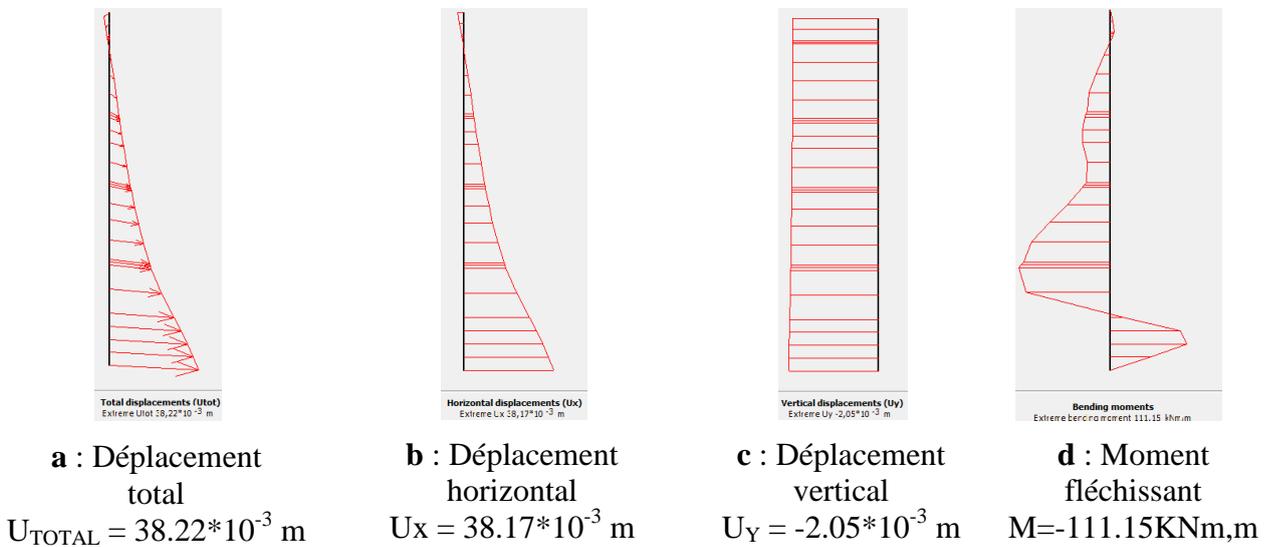
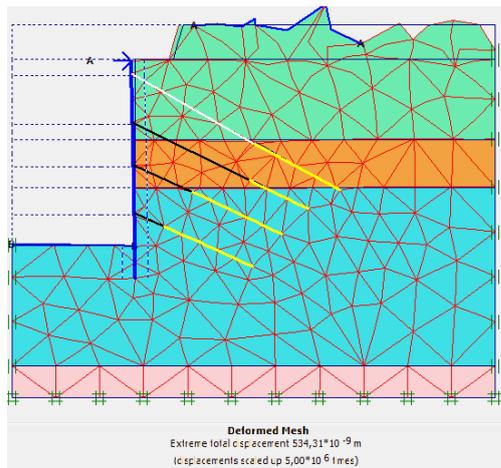
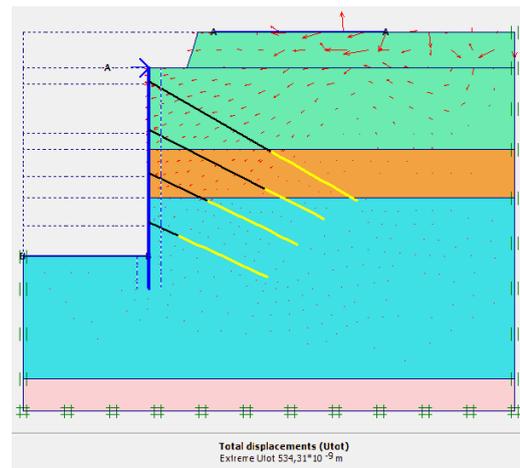


Figure.V.10 : Déplacement de la paroi moulée

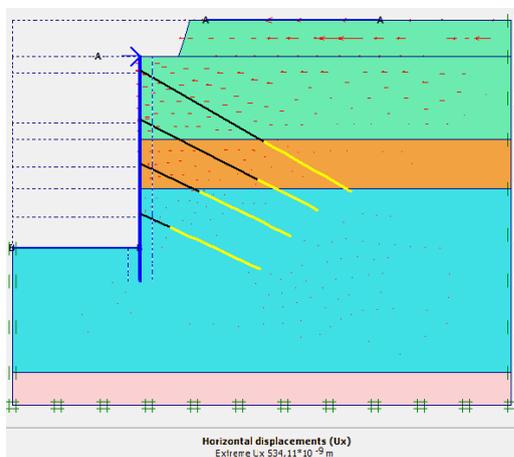
V.2.6. Charge horizontale 10 kn.m<sup>2</sup> :



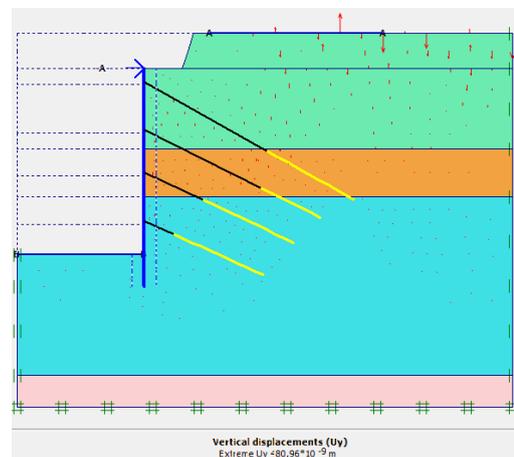
a : Maillage déformé  
534.31\*10<sup>-9</sup> m



b : Déplacement total  
U<sub>TOTAL</sub> = 534.31\*10<sup>-9</sup> m

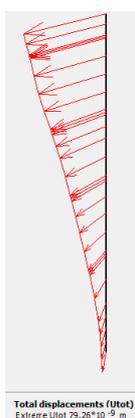


c : Déplacement horizontal  
U<sub>x</sub> = 534.11\*10<sup>-9</sup> m

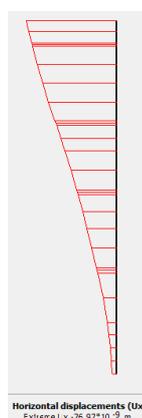


d : Déplacement vertical  
U<sub>y</sub> = 480.96\*10<sup>-9</sup> m

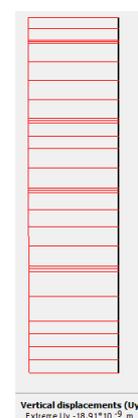
Figure.V.11 : Déplacement de sol



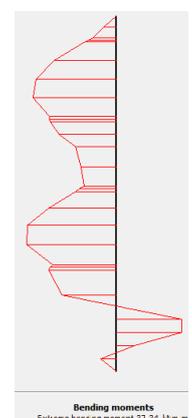
a : Déplacement total  
U<sub>TOTAL</sub> = 79.26\*10<sup>-9</sup> m



b : Déplacement horizontal  
U<sub>x</sub> = -76.97\*10<sup>-9</sup> m



c : Déplacement vertical  
U<sub>y</sub> = -18.91\*10<sup>-9</sup> m



d : Moment fléchissant  
M=37.34 KNm,m

Figure.V.12 : Déplacement de la paroi moulée

V.2.7. Les charges communes ( la dernière phase ) :

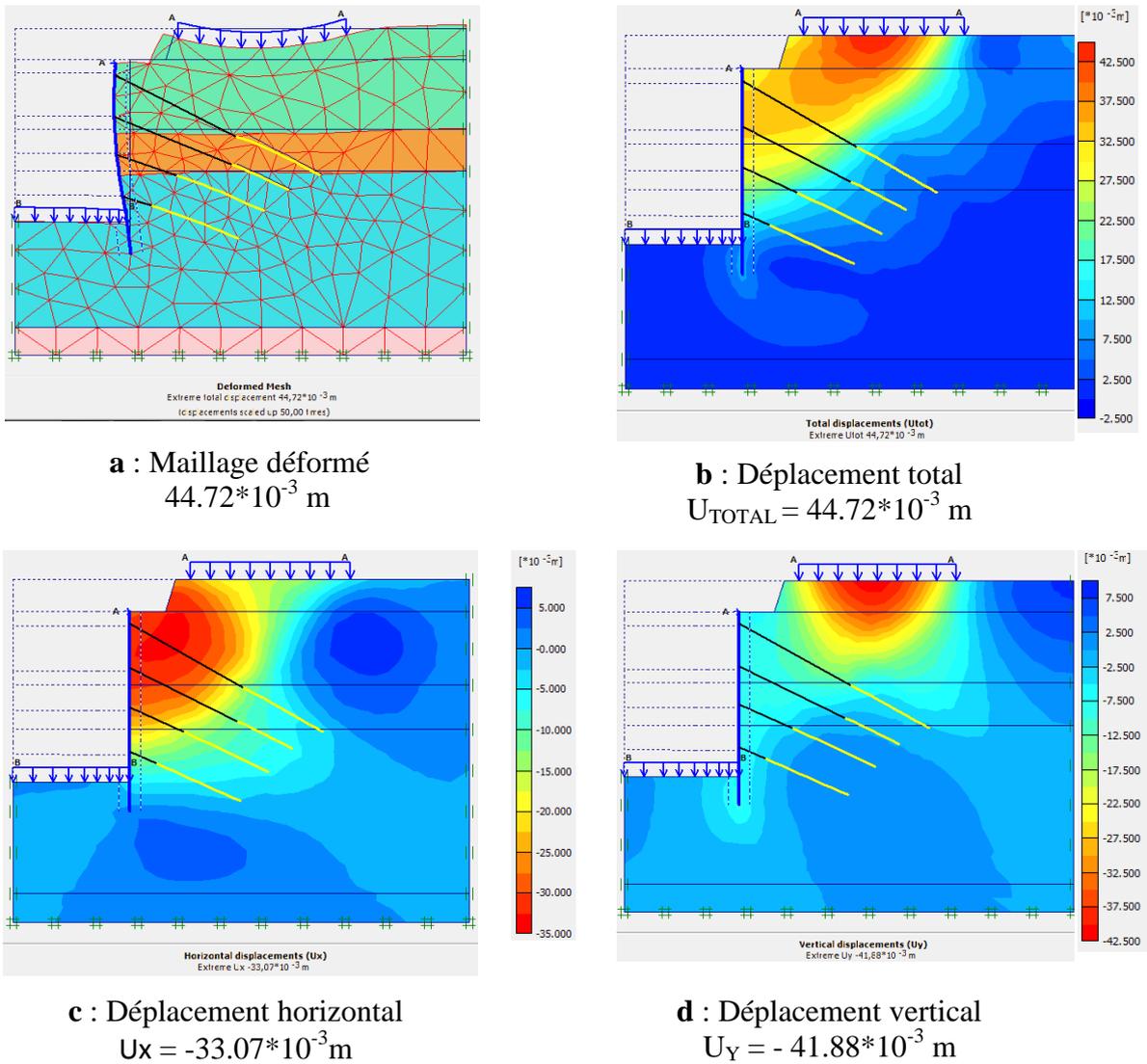


Figure.V.13 :Déplacement de sol

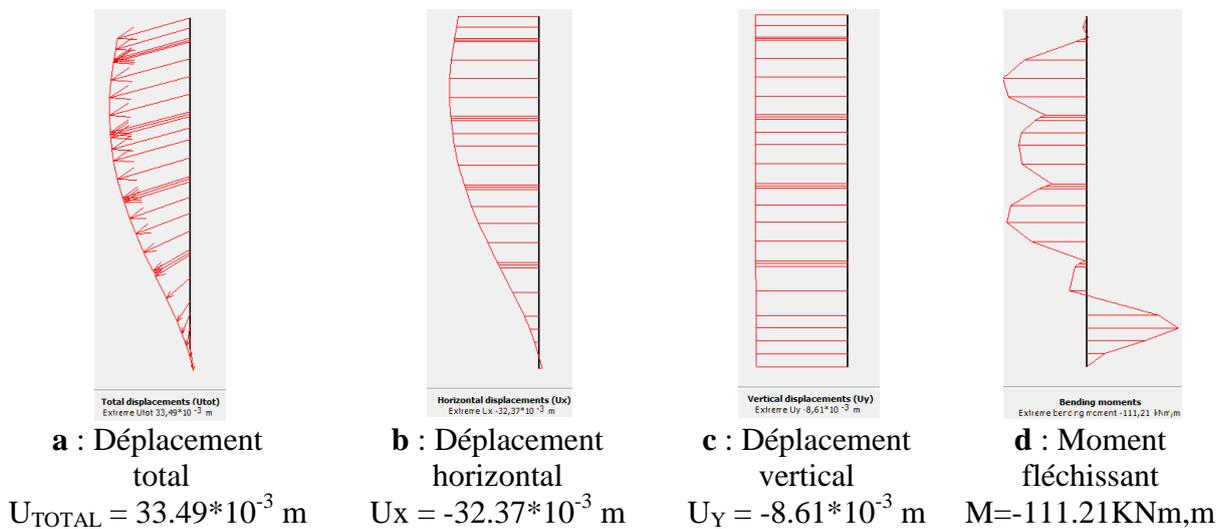


Figure.V.14 : Déplacement de la paroi moulée

V.2.8. Effet dynamique (une effort dynamique 25 kn.m<sup>2</sup>):

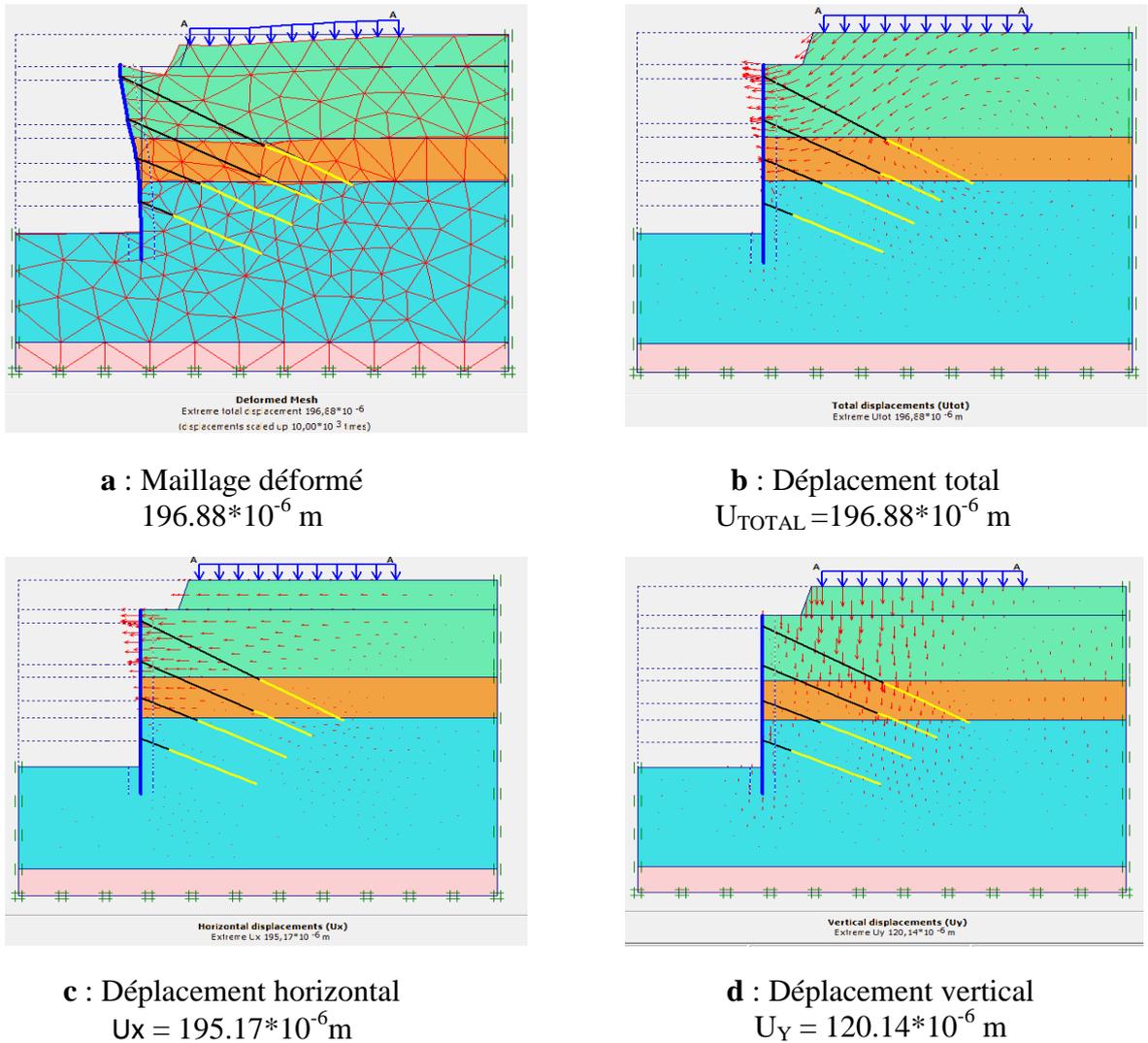


Figure.V.15 :Déplacement de sol

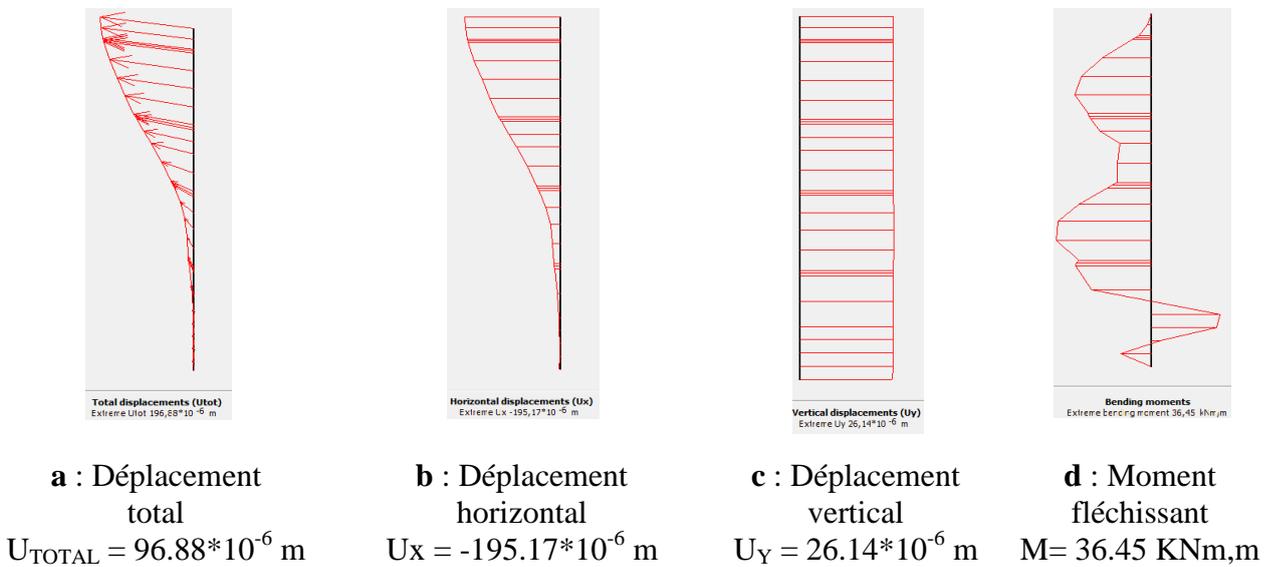
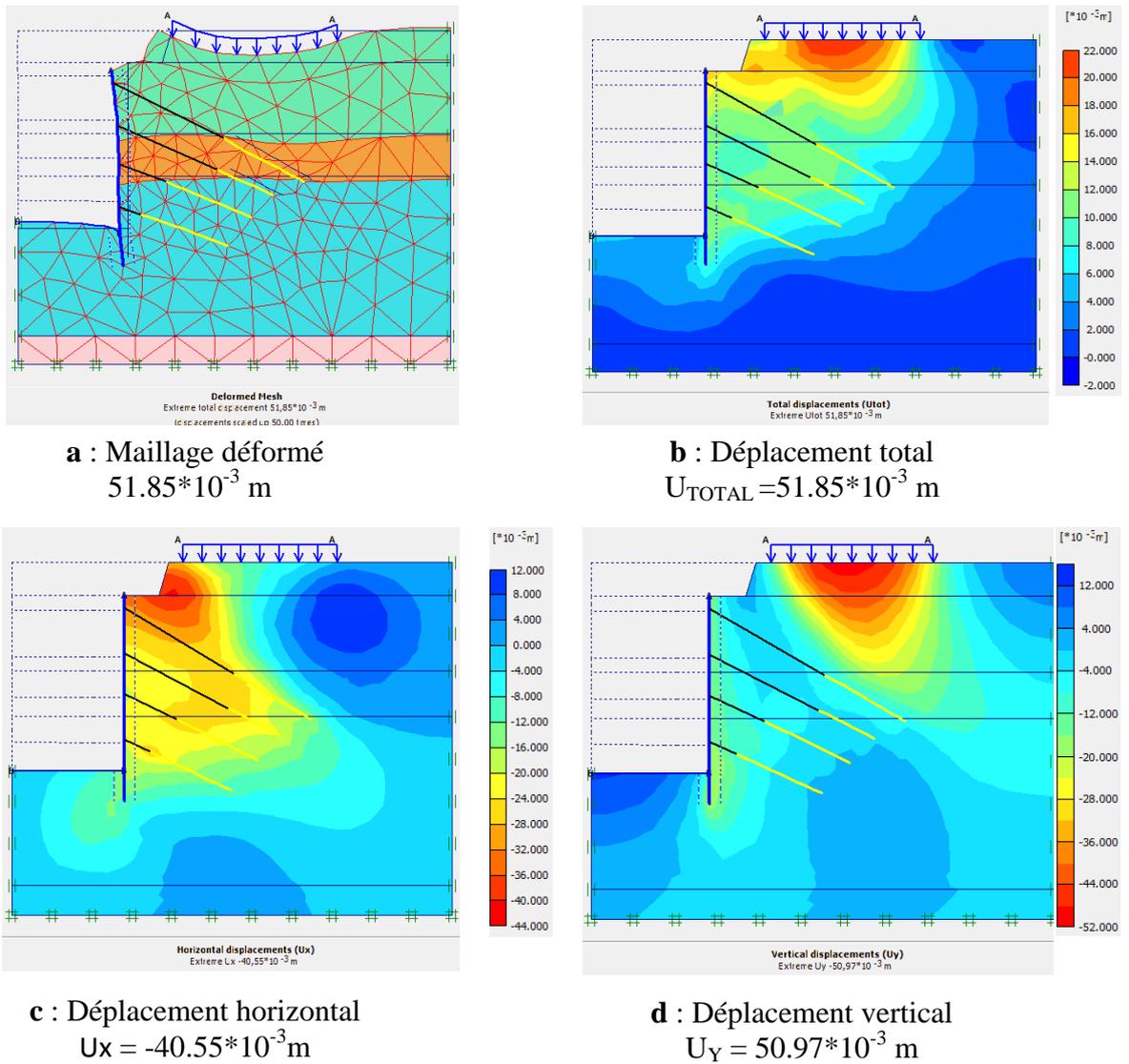
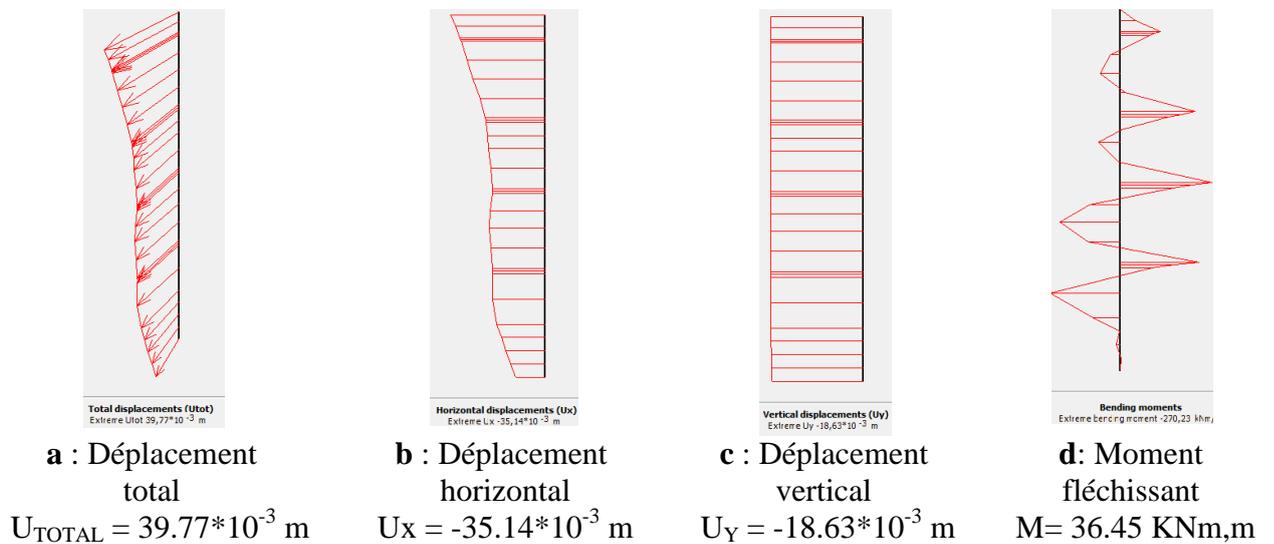


Figure.V.16 : Déplacement de la paroi moulée

**V.2.9. Effet dynamique ( Pour une effort dynamique  $125 \text{ kn.m}^2$  ):**



**Figure.V.17 :Déplacement de sol**



**Figure.V.18 : Déplacement de la paroi moulée**

## V.2.10. Les tensions d'encrages:

Tableau.V.1 : tensions d'encrages de surcharge répartie en surface.

N° de Nappe	Longueur Libre (m)	Longueur de Scellement (m)	Tension de précontrainte théorique (kn)	Surcharge répartie en surface			
				10 kn.m <sup>2</sup>	30 kn.m <sup>2</sup>	80 kn.m <sup>2</sup>	86 kn.m <sup>2</sup>
				Tension finale (kn)			
1	13	9	366	315	329	332.4	300
2	12	6	611	704	641	617	625
3	6	9	840	777	808	835	822
4	3	9	1040	911	1008	1035	1027

Tableau .V. 2 : tensions d'encrages de surcharge répartie à la base

N° de Nappe	Longueur Libre (m)	Longueur de Scellement (m)	Tension de précontrainte théorique (kn)	Surcharge répartie à la base 400 kn.m <sup>2</sup>
				Tension finale (kn)
1	13	9	366	345
2	12	6	611	707
3	6	9	840	777
4	3	9	1040	977

Tableau .V. 3 : tensions d'encrages de charge horizontale

N° de Nappe	Longueur Libre (m)	Longueur de Scellement (m)	Tension de précontrainte théorique (kn)	charge horizontale 10 kn.m <sup>2</sup>
				Tension finale (kn)
1	13	9	366	365
2	12	6	611	713
3	6	9	840	832
4	3	9	1040	970

**Tableau.V.4** : tensions d'encrages de charge dynamique

N° de Nappe	Longueur Libre (m)	Longueur de Scellement (m)	Tension de précontrainte théorique (kn)	charge dynamique	
				25 kn.m <sup>2</sup>	125 kn.m <sup>2</sup>
				Tension finale (kn)	
1	13	9	366	322	355
2	12	6	611	592	599
3	6	9	840	799	811
4	3	9	1040	970	1024

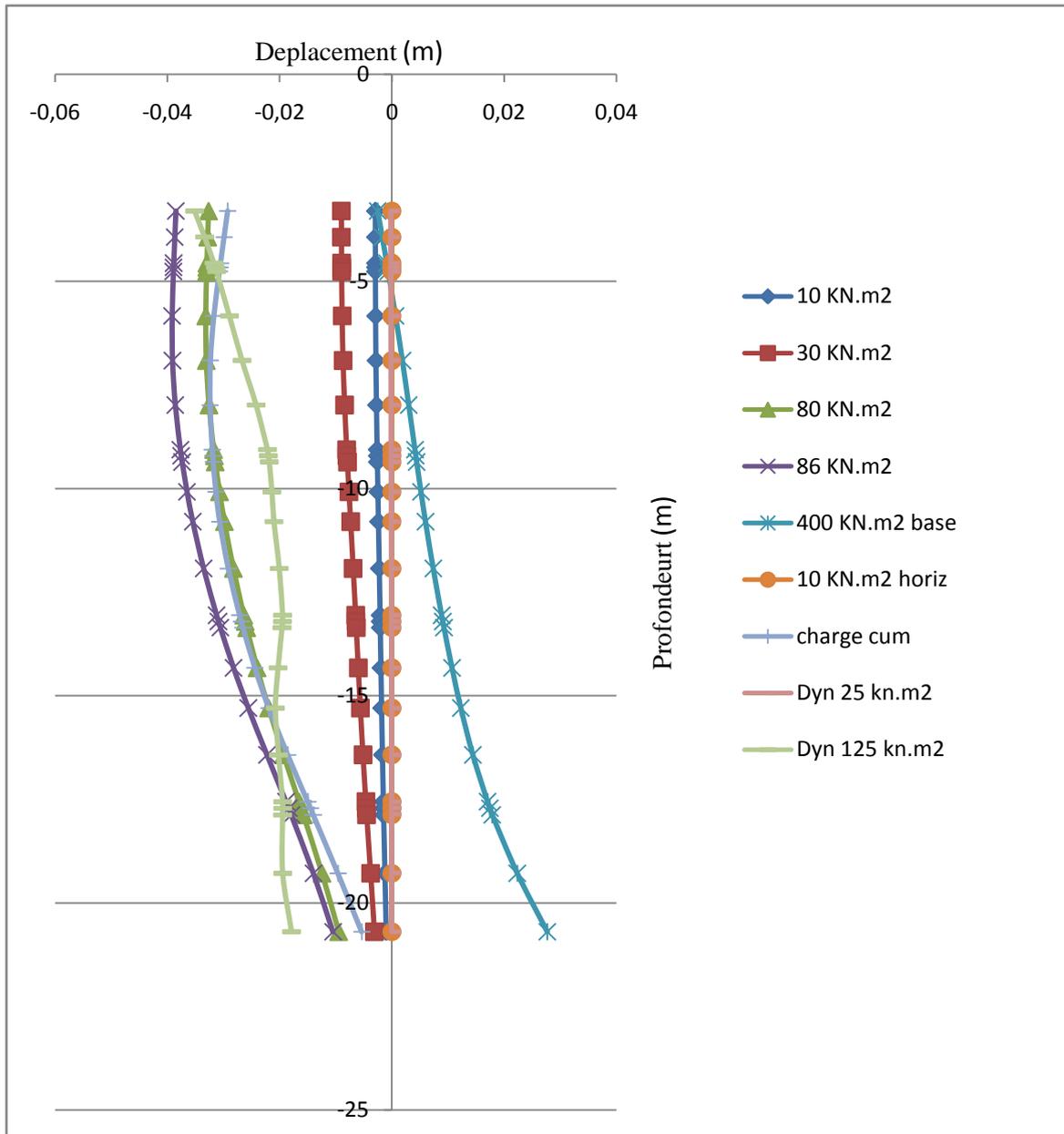
**V.2.11. Déformation de maillage:****Tableau.V.5:** Variation des déplacements de sol sous Surcharge , charge et charge dynamique

Surcharge Kn.m <sup>2</sup>	Maillage déformé (m)	Déplacement Total (m)	Déplacement horizontal (m)	Déplacement Vertical (m)
10	12.08*10 <sup>-3</sup>	12.08*10 <sup>-3</sup>	-9.30*10 <sup>-3</sup>	-10.89*10 <sup>-3</sup>
80	44.48*10 <sup>-3</sup>	12.08*10 <sup>-3</sup>	-33.64*10 <sup>-3</sup>	- 41.31*10 <sup>-3</sup>
86	52.23*10 <sup>-3</sup>	52.23*10 <sup>-3</sup>	-39.72*10 <sup>-3</sup>	- 48.44*10 <sup>-3</sup>
400 à la base	39.74*10 <sup>-3</sup>	39.74*10 <sup>-3</sup>	38.17*10 <sup>-3</sup>	- 38.65*10 <sup>-3</sup>
10 horizontale	534.31*10 <sup>-9</sup>	534.31*10 <sup>-9</sup>	534.11*10 <sup>-9</sup>	480.96*10 <sup>-9</sup>
Charges cummul	44.72*10 <sup>-3</sup>	44.72*10 <sup>-3</sup>	-33.07*10 <sup>-3</sup>	- 41.88*10 <sup>-3</sup>
Dynamique 25	196.88*10 <sup>-6</sup>	196.88*10 <sup>-6</sup>	195.17*10 <sup>-6</sup>	120.14*10 <sup>-6</sup>
Dynamique 125	51.85*10 <sup>-3</sup>	51.85*10 <sup>-3</sup>	-40.55*10 <sup>-3</sup>	50.97*10 <sup>-3</sup>

**V.2.12. Déformation des éléments structuraux ( Paroi moulée ) :****Tableau.V.6:** Variation des déplacements de la paroi sous charge dynamique

Déplacement Total (m)	Déplacement horizontal (m)	Déplacement Vertical (m)	Moment fléchissant (Knm,m)
9.16*10 <sup>-3</sup>	-9.02*10 <sup>-3</sup>	-1.61*10 <sup>-3</sup>	- 44.12
33.75*10 <sup>-3</sup>	-33.14*10 <sup>-3</sup>	-516.16*10 <sup>-6</sup>	-102.09
39.87*10 <sup>-3</sup>	-39.13*10 <sup>-3</sup>	-7.65*10 <sup>-3</sup>	112.31
38.22*10 <sup>-3</sup>	38.17*10 <sup>-3</sup>	-2.05*10 <sup>-3</sup>	-111.15
79.26*10 <sup>-9</sup>	-76.97*10 <sup>-9</sup>	-18.91*10 <sup>-9</sup>	37.34
33.49*10 <sup>-3</sup>	-32.37*10 <sup>-3</sup>	-8.61*10 <sup>-3</sup>	-111.21
196.88*10 <sup>-6</sup>	-3.97*10 <sup>-3</sup>	2.41*10 <sup>-3</sup>	15.96
39.77*10 <sup>-3</sup>	-35.14*10	-18.63*10 <sup>-3</sup>	36.45

**V.2.13. Interprétation des courbes des déplacements de paroi moulée :**



**Figure .V.19 :** Comparaison des résultats du calcul des déplacements de paroi moulée avec les résultats expérimentaux et les résultats des éléments finis obtenus en dernière phase de travaux

**V.2.14.commentaire:**

D’après l’étude paramétrique et pour que la paroi reste stable et ne dépasse pas un déplacement 2/1000 de sa profondeur il faut que :

La surcharge répartie en surface max = 86 kn.m<sup>2</sup>

La surcharge répartie à la base max = 400 kn.m<sup>2</sup>

La charge horizontale max = 10 kn.m<sup>2</sup>

L’effet dynamique max = 125 kn.m<sup>2</sup>

**V.3. Conclusion:**

La comparaison des résultats obtenus par l'étude paramétrique avec le modèle numérique proposé donne des bon résultat par aport au résultats réels donc, les procédures numériques peuvent être acceptées et employées par les ingénieurs dans la pratique pour les calculs.

---

*Chapitre VI :*  
*Conclusion générale*

---

**VI. 1. Conclusion générale:**

Les calculs numériques en éléments finis réalisés à travers le logiciel PLAXIS ont permis la modélisation numérique des ouvrages géotechniques, ainsi le modèle numérique proposé dans ce travail a donné de bons résultats concernant le mode et la magnitude du déplacement de la paroi moulée.

On a établi un calcul de référence pour un modèle donné: ce calcul a donné des résultats proches des mesurés.

Donc la modélisation numérique est l'une de plusieurs méthodes utilisées pour l'étude des ouvrages de soutènement et permet d'analyser la stabilité, la déformation et l'influence de plusieurs paramètres (du sol, du renforcement et de l'interface sol/renforcement...etc) en tout point du modèle dans un temps raisonnable.

---

***Chapitre VII :***  
***Bibliographie***

---

**VII .1. Bibliographie:**

- [1] ARIBI A , “ *Etude numérique d’un parois moulée avec tirant d’ancrage :analyse paramétrique*”, memoire master , université badji mokhtar annaba , 2019.
- [2] CHAFFAI . K ,KAHOUL. A, “*Calcul des ecrans de soutènement ancrés*”, Mémoire de Master , l’Université 08 Mai 1945 de Guelma ,2017.
- [3] LCPC , “*Ouvrages de soutènement Recommandations pour l’inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des parois moulées et préfabriquées*” ,Guide technique, Juillet 2003.
- [4] SAADI Riadh , “*Modélisation numérique d’une paroi de soutènement en zone urbaines (paramètres caractéristiques d’interaction)*”, Mémoire de Magister, Université e hadj lakhder Batna.
- [5] Centre scientifique et technique de la construction directives pour l’application de l’Eurocode 7 en Belgique.Partie 1:“*dimensionnement géotechnique à l’état limite ultime de pieux sous charge axiale de compression. Bruxelles*”, CSTC, CSTC–Rapport n° 12, 2009.
- [6] CHACHOUI ALI , “*Contrôle des mouvements de terrain pour une paroi moulée ancrée a plusieurs niveaux durant une excavation profonde*”, memoire master , Université 08 Mai 1945 Guelma.
- [7] Louis.L. Michel.B, “*les tirants d’ancrage*”, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,paris.
- [8] A.Lahmadi , “ *contribution a l’étude numérique du comportement d’une paroi moulée tirantée*”,11p : 3-14p année 2016.
- [9] H. Josseaume, Laboratoire Central des Ponts et Chaussees ,R.Stenne, Entreprise S.I.F.Bachy, “*étude expérimentale d’une paroi moulée ancrée par quatre nappes de Tirants*” .