

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed Draia ADRAR

Faculté Des Sciences et de Technologie  
Département Des Sciences et Technologie



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :

**Master En Génie Civil**

**Option : Constructions civiles et industrielles**

**Présenté Par :**

**BENBAHOU WAHIBA**

**THEME**

# **Etude de la corrosion des rideaux de palplanches.**

**Soutenu Le 01/06/2016 Devant Un Membre De Jury Composé De :**

Mr. ABBOU MOHAMED

Univ-A.D Adrar Président

Dr. SEMCHA ABDELAZIZ

Univ-A.D Adrar Examineur

Mr. BALEGH BENAMAR

Univ-A.D Adrar Encadreur

Année Universitaire 2015-2016

# Remerciement

Je remercie tout d'abord dieu tout puissant ;

Au terme de sujet , je souhaite remercier Mr. *Balegh Benamar* ,Mr.Abbou ,MR.Semcha enseignants à l'université d'ADRAR faculté des sciences et de la technologie examinateur de mon projet, pour m'avoir guidée, conseillé, encouragé, supporté (surtout durant la rédaction ).

Ma profonde gratitude à tous les enseignants du département des sciences de la technologie.

Je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leurs encouragements, leur soutien et leur aide précieuses . Et plus particulièrement mes parents, et mes frères.

Enfin, j'exprime mes respectueuses reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé de loin pour la réalisation de ce projet d' étude, ainsi que les personnes que j'ai rencontrées lors de ce sujet et qui ont tout fait pour que cette période me soit à la fois utile, formatrice et agréable.

# Dédicace

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu Tout Puissant  
Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie  
Du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant  
La gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce modeste travail :

**Ma très chère mère, pour son amour, affection et compréhension, que dieu  
me la garde**

**Mon père, pour sa patience, son encouragement et son sacrifice pour l'aide  
précieuse durant mes vingt Cinq ans d'existence, que dieu le protège.**

Je dédie à mes belles sœurs : **Djamila et halima.**

Ma belle sœur : **fatima.**

Mes frères **Mohamed et son marie Mebrka ; Abdel hamid ; Yassin; Ousama et  
Radouan et son marie malika**

Mes cousins : **Aicha; Rabiaa; Chimaa et Arije**

Ma tante **Djamila**

Ma tante **Safia et ses enfants malak, houda et rahaf**

Ma tante **Mabrouka, Mebrka, Fadila et ses enfants**

Ma tante **OM ELKHIR, Samira et Saida**

A tous ma famille **BENBAHOU.AKIDI.LAKHAL.MAKHTARI**

À mes benume « **LAKHAL SOMIA** »

À mes amis : **Amina. ZINEB . DJAMILA.MAHBOUBA. WAFIA.HADJER.LILA**

**HOURIA..FATIHA.OM ELKHIR**

MA professeur **Balegh Benamar**

À tous mes professeurs et ma promotion de génie civil **2015-2016**

إن الذين نحبهم ونعزهم مكانتهم ليست بين الأسطر والصفحات، لأن مقامهم أجل وأعلى فالقلب سكناهم والذكرى نذكرهم،  
والقلب لن ينساهم.

**BEN BAHOU WAHIBA**

# Table de matière

---

Liste de figure.....	I
Liste de tableaux.....	II
Résumé.....	III
Liste des indices.....	IV
Introduction générale.....	1

## Chapitre 1 : Généralité sur les rideaux de palplanches

1.1.	Introduction.....	3
1.2.	Définition.....	3
1.3.	Types de palplanches.....	4
1.3.1.	selon la géométrie et la forme.....	4
1.3.1.1	Palplanches en porte faux.....	4
1.3.1.1.1.	Palplanches métalliques.....	4
1.4.	Serrures.....	11
1.4.1.	Les différents types de raccordement.....	12
1.4.2.	Différents types de profilés.....	13
1.4.3.	Application des profilés.....	13
1.5.	Les éléments de rigidification.....	14
1.5.1.	Liernes.....	14
1.5.2.	Poutre de couronnement.....	15
1.5.3.	Les appuis.....	15
1.5.3.1.	Principaux types de tirants passifs.....	16
1.5.3.2.	Tirants actifs.....	17
1.5.4.	Les boutons.....	18
1.6.	Domaine d'application.....	18
1.6.1.	Palplanches en acier.....	18
1.7.	Mise en œuvre des palplanches.....	23
1.7.1.	Battage.....	23
1.7.2.	Vibro fonçage.....	25
1.7.3.	Mise en place par presse hydraulique.....	27
1.8.	Enclenchement d'un rideau de palplanches.....	28
1.9.	L'arrachage des palplanches.....	29
1.10.	Recepape des palplanches.....	29
1.11.	Principaux étanchements des palplanches.....	29
1.11.1.	Etanchement vertical.....	29
1.11.2.	Etanchement horizontal.....	32

## Chapitre 2 : Calcul de rideau de palplanche en génie civil et travaux publique

2.1.	Introduction.....	33
2.2.	La palplanche dans le sol.....	33
2.3.	Etats limites de rupture selon L'Eurocode.....	35
2.4.	Définition de la poussée et de la butée.....	36
2.5.	Stabilité d'un écran de soutènement.....	38
2.5.1.	Stabilité externe.....	38
2.5.1.1.	Rideau ancré et simplement buté en pied.....	38
2.5.1.2.	Rideau non ancré en tête et encastré en pied.....	40

---

## Table de matière

---

2.5.1.3.	Mur encasté en pied et ancré en tête.....	42
2.5.1.3.1.	Hypothèses.....	42
2.5.1.3.2.	Levée de l'indétermination.....	43
2.5.1.4.	Théorie du coefficient de réaction du sol.....	44
2.5.1.4.1.	Contexte.....	44
2.5.1.4.2.	Hypothèses.....	44
2.5.2.	Stabilité interne d'un écran de soutènement.....	45
2.5.2.1.	Vérification du moment dans la palplanche.....	45
2.5.2.2.	Vérification des déformations.....	46
2.6.	Méthodes classiques de calcul des blocs d'ancrage.....	46
2.6.1.	L'évaluation de l'effort d'ancrage $T_u$ .....	46
2.6.2.	L'hypothèse de calcul.....	47
2.6.3.	La résistance ultime du bloc d'ancrage.....	47
2.7.	Ancrages doubles.....	50
2.8.	Choix des coefficients de poussée et de butée.....	50
2.9.	Le comportement d'un rideau de palplanches.....	51
2.9.1.	La nature du sol.....	51
2.9.2.	Les effets de l'eau.....	53
2.9.3.	Le type de l'écran.....	53
2.9.4.	La hauteur libre de l'écran.....	54
2.9.5.	La fiche de l'écran.....	54
2.9.6.	L'installation de l'écran.....	55
2.9.7.	Systèmes d'appuis.....	55
2.9.8.	Autres facteurs.....	56
2.10.	Le rapport des déformations horizontales et verticales.....	58
2.10.1.	Les types de profils.....	58
2.11.	Estimation des tassements.....	59
2.11.1.	Théorème de Clough et O'Rourke (1990).....	59
2.11.2.	Théorème de Hsieh et Ou (1998).....	60
2.12.	Renard hydraulique.....	62
2.13.	Effet de barrage d'un rideau de palplanches.....	63
2.14.	Conclusion.....	64

### Chapitre 3 : La corrosion des rideaux de palplanches

3.1.	Introduction.....	65
3.2.	Notion de corrosion.....	66
3.3.	Les types de corrosion.....	66
3.3.1.	La corrosion localisée par piqures.....	66
3.3.2.	La corrosion localisée par cavernes.....	67
3.3.3.	La corrosion généralisée ou uniforme.....	68
3.3.4.	La corrosion galvanique ou de contact.....	68
3.3.5.	La corrosion inter granulaire.....	70
3.3.6.	La corrosion sous contrainte.....	70
3.3.7.	La corrosion par courants vagabonds.....	71
3.4.	Corrosion des palplanches.....	71
3.4.1.	Données expérimentales sur la corrosion des métaux dans le sol..	71
3.4.2.	Phénomène de la corrosion électrochimique sur les métaux.....	72
3.4.3.	Principe de la protection par galvanisation.....	73
3.4.4.	Les étapes de la corrosion de rideau de palplanche en acier	

---

## Table de matière

---

	galvanisé.....	73
3.5.	Les facteurs de la corrosion.....	74
3.6.	Facteurs influençant la corrosion.....	75
3.6.1.	Nature de l'armature.....	75
3.6.2.	Influence des ions.....	77
3.6.3.	L'eau Même en très faible quantité.....	78
3.7.	La température du sol.....	79
3.7.1.	La résistivité.....	79
3.7.2.	Prise en compte couplée du pH et de la teneur en eau.....	81
3.7.3.	Nature du sol.....	82
3.7.4.	Etablissement d'un degré d'agressivité.....	82
3.8.	Effet mécanique de la corrosion des palplanches.....	82
3.8.1.	Répartition de la corrosion.....	82
3.9.	Essais de corrosion.....	84
3.9.1.	Préparation de la solution simulée de sol .....	84
3.9.2.	prélèvement d'échantillon de sol.....	85
3.9.3.	Inhibiteur de corrosion.....	85
3.9.4.	Méthodes d'étude de la corrosion.....	87
3.9.5.	Expérimentation électrochimique.....	87
3.10.	Durabilité.....	89
3.11.	Conclusions.....	91

### Chapitre 4 : Modélisation d'un rideau de palplanche

4.1.	Introduction	92
4.2.	Calcul de rideau de palplanche	92
4.3.	Durabilité de rideau de palplanche	93
4.3.1.	Graphe des caractéristiques géométriques de rideau de palplanche corrodé.....	95
4.4.	Procédure de modélisation numérique par le logiciel COMSOL.....	96
4.4.1.	Définition de logiciel.....	96
4.4.2.	Conception d'un modèle.....	97
4.4.3.	Choix du matériau.....	97
4.4.4.	Mécanique des solides.....	99
4.4.5.	Les charges.....	102
4.4.6.	Choix d'un maillage.....	102
4.4.7.	Etude et configurations du solveur.....	103
4.4.8.	Résultats obtenues .....	103
4.4.8.1.	Déplacements totales.....	104
4.4.8.2.	Région Plastique .....	105
4.4.8.3.	Déflexion de mur rideau de palplanche .....	106
4.4.8.4.	Surface de déformation .....	107
4.4.8.5.	Contraintes de Von Mises dans le rideau de palplanche.....	108
	Conclusion générale	109
	Références bibliographiques	111

---

**Chapitre 1 :Généralité sur les rideaux de palplanches**

<b>Fig. 1.1.</b>	Les palplanches à module.....	4
<b>Fig.1.2.</b>	Les palplanches plates.....	4
<b>Fig. 1.3.</b>	Palplanches Laminées à Chaud.....	5
<b>Fig. 1.4.</b>	Palplanches laminées à froid.....	5
<b>Fig. 1.5.</b>	Les palplanches raccords et les palplanches pliées.....	6
<b>Fig. 1.6.</b>	Types de raccords.....	6
<b>Fig. 1.7.</b>	Gabions circulaires avec des palplanches raccords à 35°.....	7
<b>Fig. 1.8.</b>	Gabions circulaires avec 1 arc.....	7
<b>Fig. 1.9.</b>	Gabions circulaires avec 2 arcs.....	7
<b>Fig. 1.10.</b>	Gabions cloisonnés avec des palplanches raccords à 120°.....	7
<b>Fig. 1.11.</b>	Gabion cloisonné.....	7
<b>Fig. 1.12.</b>	Gabions en palplanches.....	8
<b>Fig.1.13.</b>	Rideaux mixtes (HZ/AZ).....	9
<b>Fig. 1.14.</b>	Assemblage des éléments de la structure.....	9
<b>Fig. 1.15.</b>	Combinaisons des éléments de la structure.....	10
<b>Fig .1.16.</b>	utilisation des rideau de palplanche dans un projet de pont A Adrar (charouine).....	11
<b>Fig. 1.17.</b>	Serrure à la jonction de deux palplanches.....	11
<b>Fig. 1.18.</b>	Différents types de raccordements.....	12
<b>Fig. 1.19.</b>	Raccordement Omega.....	12
<b>Fig. 1.20.</b>	Serrure des différents profilés.....	13
<b>Fig. 1.21.</b>	Jointure de plusieurs palplanches.....	13
<b>Fig. 1.22.</b>	Exemple d'application des profilés.....	14
<b>Fig. 1.23.</b>	La disposition des liernes dans un rideau de palplanches.....	15
<b>Fig. 1.24.</b>	Schéma général d'un rideau de palplanches ancré en tête.....	16
<b>Fig. 1.25.</b>	Attaches articulées.....	17
<b>Fig. 1.26.</b>	Attaches ordinaires.....	17

## Liste de figure

---

<b>Fig. 1.27.</b>	n tirant attaché à un écran de soutènement.....	17
<b>Fig. 1.28.</b>	Détail de raccordement du profilé HZ.....	18
<b>Fig. 1.29.</b>	La lumière de raccordement.....	18
<b>Fig. 1.30.</b>	tiellement fiché dans le sol.....	19
<b>Fig. 1.31.</b>	Quai permettant l'accostage de superpétroliers.....	20
<b>Fig. 1.32.</b>	L'utilisation des palplanches pour une écluse.....	20
<b>Fig. 1.33.</b>	Renforcement d'une digue anti crue.....	20
<b>Fig. 1.34.</b>	L'utilisation des palplanches comme batardeaux en rivière.....	21
<b>Fig. 1.35.</b>	Deûle à Lambersart (Nord de la France).....	21
<b>Fig. 1.36.</b>	Terrassement dans le batardeau.....	21
<b>Fig. 1.37.</b>	Fouilles en présence de nappe. ....	21
<b>Fig. 1.38.</b>	Chantier d'un barrage en travaux.....	22
<b>Fig. 1.39.</b>	Pose de canalisations . ....	22
<b>Fig. 1.40.</b>	En site industriel encombre . ....	22
<b>Fig. 1.41.</b>	Le grand barrage de Mont Saint Michel en France.....	22
<b>Fig. 1.42.</b>	Chantier d'une reconstruction d'un pont en utilisant des palplanches métalliques.....	23
<b>Fig. 1.43.</b>	Principe de fonctionnement du marteau hydraulique (brochure IHC).....	24
<b>Fig. 1.44.</b>	Chantier de battage.....	25
<b>Fig. 1.45.</b>	Principe mécanique du vibreur.....	26
<b>Fig. 1.46.</b>	Principe de fonctionnement d'un vibreur (brochure ICE).....	26
<b>Fig. 1.47.</b>	Un guide de contrôle.....	27
<b>Fig. 1.48.</b>	Perforage avant fonçage.....	27
<b>Fig. 1.49.</b>	Principe de la presse hydraulique.....	27
<b>Fig. 1.50.</b>	La presse hydraulique.....	28
<b>Fig. 1.51.</b>	Enclencheur automatique.....	28

---

## Liste de figure

---

<b>Fig. 1.52.</b>	Remplissage des serrures enclenchées avec un produit hydrocarboné.....	29
<b>Fig. 1.53.</b>	Illustration de la mise en œuvre du produit hydro gonflant.....	30
<b>Fig. 1.54.</b>	Etanchement avec la soudure.....	30
<b>Fig. 1.55.</b>	Etanchement avec combinaison bentonite ciment.....	30
<b>Fig. 1.56.</b>	Illustration de la réparation des défauts d'étanchement dans les serrures.....	31
<b>Fig. 1.57.</b>	Installation d'un système de drainage.....	31
<b>Fig. 1.58.</b>	t horizontal dans le cas d'un tunnel ou une structure enterrée.....	32
<b>Chapitre 2 : Calcul de rideau de palplanche en génie civil et travaux publique</b>		
<b>Fig. 2.1.</b>	Modèle : a) rideau sans tirant d'ancrage..... b) rideau ancré dans le sol.	33
<b>Fig. 2.2.</b>	Palplanche ancrée dans le sol.....	34
<b>Fig. 2.3.</b>	Rideau de palplanches soumis à une distribution de pression normale $p(z)$ .....	35
<b>Fig. 2.4.</b>	Modes de rupture d'un rideau de palplanche.....	36
<b>Fig. 2.5.</b>	Principe de la poussée et de la butée.....	37
<b>Fig. 2.6.</b>	Mécanisme de rupture d'un écran simplement butée.....	38
<b>Fig. 2.7.</b>	Rideau ancré en tête simplement buté en pied.....	38
<b>Fig. 2.8.</b>	Cas de la présence d'eau.....	40
<b>Fig. 2.9.</b>	Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête.....	40
<b>Fig. 2.10.</b>	Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré.....	41
<b>Fig. 2.11.</b>	Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile.....	41
<b>Fig. 2.12.</b>	Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements dans l'écran de soutènement.....	42
<b>Fig. 2.13.</b>	Distribution idéalisée de la pression des terres.....	43
<b>Fig. 2.14.</b>	Résolution par la méthode de la poutre équivalente.....	44
<b>Fig. 2.15.</b>	Incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et le développement d'un effet de voûte.....	45
<b>Fig. 2.16.</b>	L'ensemble rideau et tirant d'ancrage.....	47

---

## Liste de figure

---

<b>Fig. 2.17.</b>	Résistance ultime de l'ancrage.....	47
<b>Fig. 2.18.</b>	Emplacement des ancrages.....	48
<b>Fig. 2.19.</b>	Détermination de la résistance d'un bloc d'ancrage.....	48
<b>Fig. 2.20.</b>	La disposition des blocs d'ancrages dans le massif du sol.....	49
<b>Fig. 2.21.</b>	Parties de terrain associées à un rideau de palplanches.....	52
<b>Fig. 2.22.</b>	Diagramme pour estimation des déplacements vis à vis du soulèvement de fond de fouille pour des écrans butonnés dans l'argile.....	54
<b>Fig. 2.23.</b>	Comportement d'un rideau ancré en tête soumis à une force horizontale croissante .....	57
<b>Fig. 2.24.</b>	Cas d'un rideau avec frottement.....	57
<b>Fig. 2.25.</b>	Profil de tassement de type convexe en tympan.....	58
<b>Fig. 2.26.</b>	Profil de tassement de type concave.....	59
<b>Fig. 2.27.</b>	Interaction sol structure de type convexe en tympan.....	59
<b>Fig. 2.28.</b>	Interaction sol structure de type concave.....	60
<b>Fig. 2.29.</b>	Méthode de détermination des tassements de type convexe.....	60
<b>Fig.2.30.</b>	La déformée d'un rideau de palplanches.....	61
<b>Fig. 2.31</b>	Méthode de détermination des tassements de type concave.....	62
<b>Fig. 2.32.</b>	Méthode des gradients hydrauliques moyens.....	62
<b>Fig. 2.33.</b>	Effet de barrage d'un rideau de palplanches.....	64

### **Chapitre 3 :La corrosion de rideaux de palplanche**

<b>Fig. 3.1.</b>	Propagation d'une piqûre en milieu chloruré.....	67
<b>Fig. 3.2.</b>	Corrosion caverneuse dans un milieu chloruré.....	67
<b>Fig. 3.3.</b>	Pile due à l'hétérogénéité du métal.....	72
<b>Fig. 3.4.</b>	Pile due à l'aération.....	72
<b>Fig. 3.5.</b>	Pile simple « Fe-Zn » [16] .....	73

---

## Liste de figure

---

<b>Fig. 3.6.</b>	Protection cathodique par zinc[14].....	74
<b>Fig. 3.7.</b>	Formation d'une piqûre dans un métal recouvert d'une couche passivant.....	76
<b>Fig. 3.8.</b>	Développement de la piqûre dans l'acier galvanisé [18].....	77
<b>Fig. 3.9.</b>	Effet de la teneur en eau sur la résistivité du sol [11] .....	78
<b>Fig. 3.10.</b>	Température sur la résistivité du sol [11].....	79
<b>Fig. 3.11.</b>	Perte de masse par unité de surface en fonction de la résistivité renforcements en acier galvanisé) [17].....	80
<b>Fig. 3.12.</b>	Perte de masse par unité de surface des renforcements en fonction de la résistivité (acier au carbone non revêtu) [17].....	80
<b>Fig. 3.13.</b>	Nomographe pour l'estimation de la vitesse de corrosion de l'acier[13].....	81
<b>Fig. 3.14.</b>	Les aspects d'un solide métallique corrodé [24].....	83
<b>Fig. 3.15.</b>	a) Balance analytique b) préparation de la solution simulée de sol .....	84
<b>Fig. 3.16.</b>	Dispositif d'essai de corrosion.....	88
<b>Fig 3.17.</b>	Les différents Zones de corrosion dans le rideau de palplanche.....	90

## Chapitre 4 :Modélisation d'un rideaux de palplanche

<b>Fig .4.1.</b>	Fenêtre des données de logiciel durabilité.....	93
<b>Fig .4.2.</b>	Fenêtre des résultats de logiciel durabilité.....	93
<b>Fig .4.3.</b>	Module de section réduit.....	95
<b>Fig .4.4.</b>	Moment d' inertie réduit .....	95
<b>Fig.4.5.</b>	Section réduit.....	95
<b>Fig.4.6.</b>	moment capacité réduit.....	96
<b>Fig .4.7.</b>	Conception d'un modèle.....	97
<b>Fig . 4.8.</b>	Choix du matériau.....	98
<b>Fig .4.9.</b>	Rideau de palplanche.....	98

---

---

## Liste de figure

---

<b>Fig .4.10.</b>	Mechanique des solides.....	99
<b>Fig.4.11.</b>	Condition Initiales et condition aux limites .....	100
<b>Fig. 4.12.</b>	Libre.....	100
<b>Fig. 4.13.</b>	Symmetrie.....	100
<b>Fig .4.14.</b>	Limite fixé (encastrement).....	101
<b>Fig.4.15.</b>	Appui simple.....	101
<b>Fig. 4.16.</b>	Limite déplacement.....	101
<b>Fig.4.17.</b>	Les surcharge.....	102
<b>Fig.4.18.</b>	Les contraintes horizontales de poussées.....	102
<b>Fig. 4.19.</b>	Choix de maillage.....	102
<b>Fig.4.20.</b>	Déplacements totales.....	104
<b>Fig.4.21.</b>	Région plastique .....	105
<b>Fig.4.22.</b>	Déflexion de mur rideau de palplanche.....	106
<b>Fig.4.23.</b>	Surface de tassement.....	107
<b>Fig.4.24.</b>	Contraintes de Von Mises dans le rideau de palplanche.....	108

---

**Liste de tableaux**

<b>Tableau.3.1.</b>	Série galvanique, obtenu dans l'eau de mer à 25°C.....	69
<b>Tableau.3.2.</b>	Quelques exemples de couples matériau-milieu sensibles à la corrosion sous contraint.....	71
<b>Tableau.3.3.</b>	Les facteurs de la corrosion.....	75
<b>Tableau 3.4.</b>	composition chimique de la solution simulée de sol algérien (g /l).....	84
<b>Tableau 3.5.</b>	Perte d'épaisseur [mm] due à la corrosion pour les rideaux de palplanches en acier dans le sol et eau [25] .....	86
<b>Tableau 4.1.</b>	Tableau des données et paramètres .....	97
<b>Tableau 4.2.</b>	Tableau des paramètres du sol.....	98
<b>Tableau 4.3.</b>	Tableau des paramètres du rideau de palplanche.....	99
<b>Tableau 4.4.</b>	Tableau des propriétés issues du matériau.....	99
<b>Tableau 4.5.</b>	Propriétés issues du matériau.....	99

## Liste des indices

---

$\sigma$  : Contrainte effective .

$c$  : Cohésion .

$h$  : Profondeur .

$\varphi$  : Angle de frottement interne .

$\varphi'$  : Angle de frottement remanié .

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau .

$\gamma$  : Poids spécifique du sol hors d'eau .

$\gamma'$  : Poids spécifique déjaugé .

$\rho$  : la masse volumique .

$t$  : temps .

$\mathbf{u}$  : Le vecteur vitesse .

$\mathbf{x}$  : Le vecteur position .

$\mathbf{P}$  : Chargement appliqué .

$\mathbf{A}$  : Surface .

$\mathbf{Ax}$  : Surface au vent du navire.

$\mathbf{V}$  : vitesse.

$\sigma_z$  : Contrainte verticale .

$\mathbf{r}, \mathbf{z}$  : Respectivement coordonnée horizontale et verticale.

$\tau_{r,z}$  : Contrainte de cisaillement .

$\lambda$  : Paramètre d'écrouissage.

$\nu$  : Coefficient de Poisson .

$\mathbf{E}$  : Module de Young .

$\mathbf{G}$  : Module de cisaillement .

## Liste des indices

---

**K** : Module volumétrique ou de compressibilité .

**Q** : Chargement ponctuel .

**q** : Charge uniforme .

**Tu** : Force ultime de l'ancrage.

$\gamma$  : Poids volumique du sol.

**h** : Hauteur du bloc d'ancrage.

**b** : Largeur du bloc d'ancrage.

**Pp et Pa** : Butée et poussée des terres par unité de longueur du bloc.

**Kp et Ka** : Coefficients de butée et de poussée respectivement.

$P_0'$  : La pression effective à mi-hauteur de l'ancrage.

**M** : Coefficient correcteur pour tenir compte de l'effet tridimensionnel de la résistance passive.

$d_{hor}$  : L'espace horizontal des appuis

$\delta h_{max}$  : Déplacement horizontal maximal

$\delta v_{max}$  : Tassement maximal à la surface

**hi** : Espacement verticale des appuis.

**N** : Nombre de lit d'appui

$\Delta$  : Laplacien .

**K** : Coefficient sans dimension .

$W_0$ : Facteur d'influence .

$\epsilon e$  : Déformation élastique .

$\epsilon p$ : Déformation plastique .

$\Sigma$  : Surface des voilures .

## Liste des indices

---

$\sigma_e$  : est la limite élastique de l'acier .

$M_{\max}$  : le moment maximal.

$\sigma_x$  : contraint de l'acier exercée.

$\sigma_a$  : contraint limite d'acier.

$M$  : moment de flexion.

$N$  : l'effort tranchent.

$e$  : déformation maximum de rideau.

$w_x$  : module élastique de section de rideaux.

$A$  : section de rideaux.

$S_f$  : coefficient de sécurité.

$F_y$  : limite de élasticité de l'acier.

## Liste des indices

---

## Liste des indices

---

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'Algérie qui est sur la cote de la mer méditerranée et qui représente 1% des eaux de la planète assure le passage de 30% du fret et qui contient des reliefs de terrain accidentés soit au grande Sahara ou le nord, c'est dire l'importance des projets d'infrastructures de prendre en charge les coté d'économie et durabilité, de le moderniser, et d'améliorer ses performances. [1]

Les désordres observés sur les rideaux de palplanches métalliques des infrastructures soit portuaires, fluviales et en bordure de mer ou soutènement des sols sont principalement occasionnés par la corrosion qui se manifeste différemment sur les parties métalliques en fonction des zones d'exposition (agressivité du sol, éclaboussures, marnage, immersion ou en fiche). D'une manière générale, le calcul de la durée de vie d'une structure métallique en site aquatique prend en compte une perte d'épaisseur due à la corrosion uniforme de l'ordre de 0,1 mm/an, or des vitesses de corrosion localisées de l'ordre du cm/an ont été enregistrées sur certains sites [2]. Les zones réputées être le siège de ces dégradations méritent une attention particulière et une protection bien adaptée au milieu et aux conditions de fonctionnement de la structure.

Pour cela on s'est intéressé par l'étude d'un rideau de palplanche métallique. Cette étude était consacrée pour le comportement du sol en contact avec les palplanches sous l'effet de corrosion et la poussée des terre-pleins de ce site.

Nous avons entrepris un travail de simulation du comportement du sol sous ouvrage en palplanches métalliques par vérification de la durabilité « Durability » et par un logiciel de calcul « Comsol », spécialisé dans les problèmes de la géotechnique. Ce travail constitue une contribution à l'étude de la corrosion des rideaux de palplanches.

Pour mener à terme ce travail, nous avons réalisé une bonne partie bibliographique, riche en informations et qui comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre contient toutes les généralités sur les rideaux de palplanche, les différents types, les capacités, l'importance de ces ouvrages dans le monde et en Algérie.

## Introduction générale

---

Le deuxième chapitre est consacré au calcul de rideau de palplanches en génie civil et travaux publics ; soit comme utilisation provisoire de soutènement ou comme rideau étanche avec des exemples concrets pour chaque cas, soit comme utilisation définitive pour renforcer une structure existante.

Le troisième chapitre est la corrosion des rideaux de palplanches dans le sol, atmosphère et en contact avec l'eau .

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation d'un rideau de palplanches avec les codes de calcul «Durability » ainsi «Comsol » qui est basé sur la méthode des différences finies, qui est une méthode explicite utilisant un schéma itératif pour la résolution des équations de mouvement pour chaque élément basées sur les valeurs des sollicitations des éléments voisins. Le choix de cette méthode est motivé par la simplicité de son applicabilité pour les problèmes géotechniques. Notre exemple modélisé avec ce logiciel est basé sur l'étude d'un rideau de palplanches simplement butée sans et sous l'effet de corrosion avec une sollicitation des efforts latérales en considérant la poussée et la butée, et une charge répartie sur ce sol. A la fin de ce chapitre on donne les résultats de calcul avec les interprétations explicatives.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale donnant une synthèse de notre recherche.

## 1.1 Introduction :

La nécessité de chercher de nouvelles techniques de réalisation des ouvrages et l'augmentation du taux des dégâts des structures sous l'influence de plusieurs paramètres ont poussé les ingénieurs et les chercheurs à utiliser des modes efficaces, utiles et économiques de construction, tels que les palplanches, qui ont trouvé une vaste utilisation dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

## 1.2. Définition :

Une palplanche (composé de pal et planche) est un pieu conçu pour être battu en terre en s'enclenchant aux pieux voisins par l'intermédiaire de nervures latérales appelées serrures. Les palplanches permettent de constituer un mur de soutènement, un batardeau, une palée ou un écran imperméable. Les rideaux qu'elles constituent sont assimilables à des murs ou des parois supportant la poussée des terres en place, ou des remblais et des dénivelés d'eau. On distingue :

- Les palplanches à module ou à inertie.
- Les palplanches plates.

Les premières se comportent comme des poutres verticales, mobilisant la butée au niveau de leur encastrement dans le sol et supportant les poussées dues aux dénivellations de terrain et d'eau (palplanches Larsens). Les secondes permettent de réaliser des enveloppes cylindriques fermées, contenant des matériaux dont les poussées engendrent des tractions importantes dans les joints, ces derniers sont, de ce fait, conçus pour résister à des efforts.

La palplanche est une « pièce en métal de section spéciale, permettant de l'emboîter à une autre et généralement utilisée à la constitution de parois étanches en terrains meubles, aquifères ou immergés. » Dans le langage courant, la palplanche est souvent définie comme un « profilé métallique » De plus, il ne faut pas confondre « palplanche » et « rideau de palplanche » qui désigne l'ensemble structurel formé par les palplanches assemblées entre elles.

Cette partie vise à faire la distinction entre les différents types de palplanches afin qu'aucune possibilité ne soit écartée de notre synthèse.

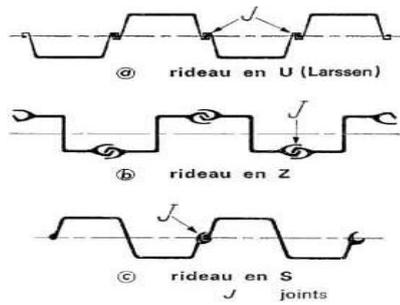


Fig. 1.1. Les palplanches à module

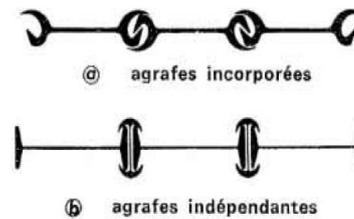


Fig. 1.2. Les palplanches plates

### 1.3: Les différents types de palplanche :

#### 1.3.1 : selon la géométrie et la forme :

On trouve : Palplanches en porte à faux Palplanches avec étais ou ancrage.

**1.3.1.1: Palplanches en porte à faux :** Les palplanches peuvent être construites en plusieurs types de matériaux (métal, acier, aluminium, bois, béton armé, glass en fibre, vinyle, PVC etc.).

- Le choix de matériaux dépend des conditions de terrain et d'autres facteurs.

##### 1.3.1.1.1. Palplanches métalliques:

###### • Définition:

Une palplanche métallique est une barre d'acier dont la section épouse généralement la forme d'un "U". Que l'on plante dans le sol et qui s'emboîte avec les barres voisines grâce à des nervures latérales. À partir des cloisons étanches ainsi formées, on bâtit des digues, ou encore un mur de soutènement pour conforter une berge naturelle ou un quai.

###### • Caractéristiques :

Le poids au mètre linéaire varie selon le profil, de 20 à plus de 120 Kg et l'épaisseur de 5 à plus de 20 mm (chiffres indicatifs). La longueur livrée varie de 1 à plus de 30 mètres. Les principaux types de palplanches métalliques à module en forme de U, Z, caisson et de palplanches plates avec agrafes incorporées ou indépendantes. À quelques nuances de dimensionnement près, tous ces types de palplanches sont produits par les fabricants mondiaux, mais la forme et les performances des joints restent une de leurs principales particularités.

- **Types de palplanches métalliques**

Les palplanches métalliques sont obtenues par laminage à chaud ou profilage à froid :  
(en U, Z, caisson)

- **Palplanches Laminées à Chaud**



**Fig. 1.3.** Palplanches Laminées à Chaud

- **Palplanches Laminées à Froid**



**Fig. 1.4.** Palplanches laminées à froid.

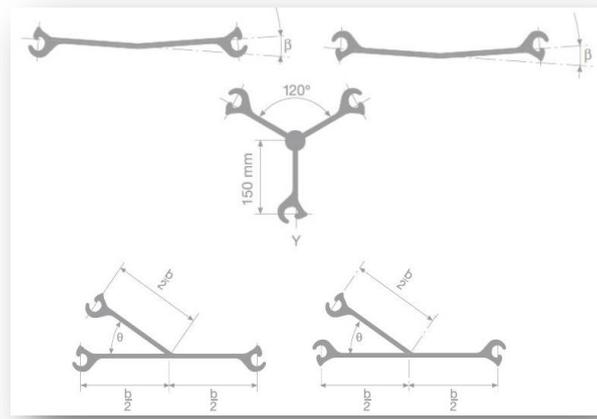
Les palplanches profilées à froid présentent quelques avantages:

- Epaisseur constante sur tout le pourtour du profil, 3 à 9mm.
- Grande largeur utile et manutention et le temps d'installation réduit
- Pliage pour réalisation d'angle
- Application dans les serrures de produits d'étanchéité
- Transmission des efforts tranchants dans l'axe neutre
- Revêtement et traitement anti corrosion

- **Palplanches plates AS500**

Elles sont destinées à la réalisation des cellules cylindriques retenant un massif de remblai. La stabilité des gabions ainsi constitués est assurée par leur poids propre. Les palplanches plates sont principalement utilisées dans le cas de l'horizon rocheux est très proche de la surface ainsi que dans les constructions où l'ancrage est difficile,

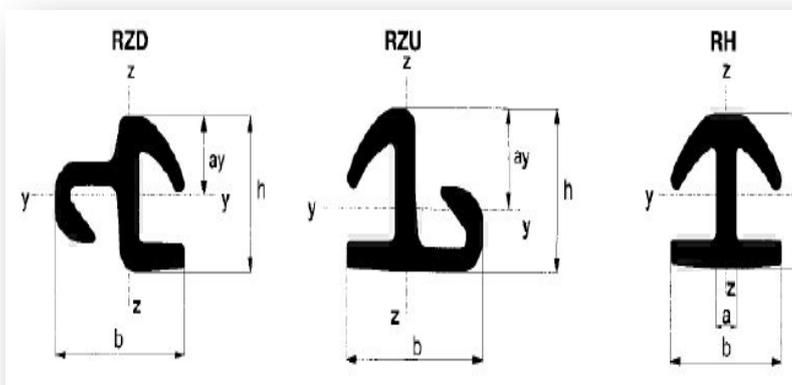
voire impossible. En fonction des caractéristiques du projet et des particularités de site, elles sont assemblées à des gabions circulaires ou en gabionnades cloisonnées. Les efforts qui se développent dans les palplanches sont essentiellement des efforts de traction horizontaux, ce qui nécessite des serrures présentant une résistance suffisante pour reprendre l'effort horizontal de l'âme.



**Fig. 1.5.** Les palplanches raccords et les palplanches pliées

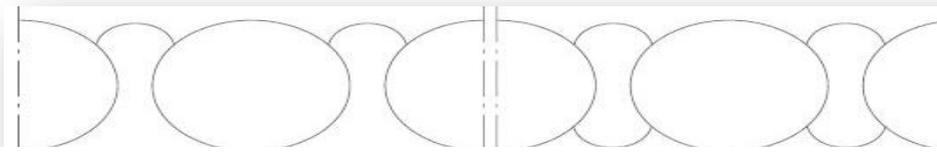
La vérification de la résistance des palplanches nécessite de prendre en considération à la fois de la plastification de l'âme et le dégrafage des serrures. Nous pouvons fournir les palplanches raccords nécessaires à l'assemblage des gabions entre eux. Lorsque l'angle de débattement dépasse  $4,5^\circ$  ( $4^\circ$  si  $L > 20\text{m}$ ), il est possible d'employer les palplanches pliées pour réaliser des ouvrages de faible rayon.

- **Raccords**



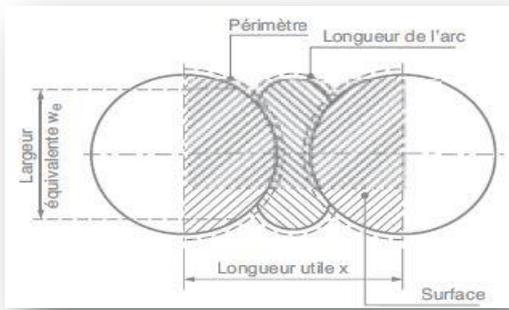
**Fig. 1.6.** Types de raccords

- **Gabion en palplanches :**

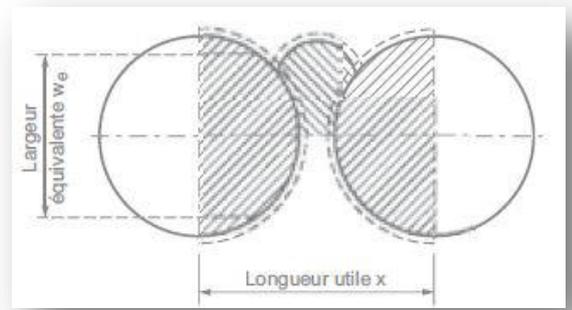


**Fig. 1.7.** Gabions circulaires avec des palplanches raccords à 35°

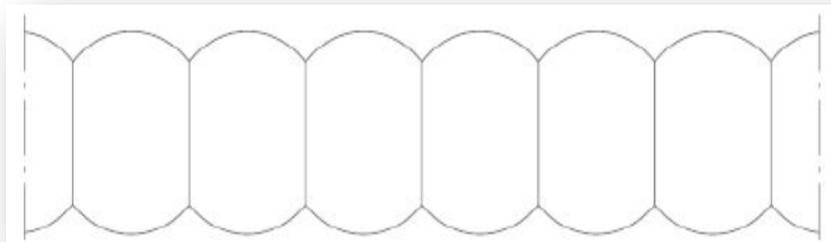
La largeur équivalente  $We = \text{surface intérieure d'une cellule} + \text{surface délimitée X}$   
 (1ou2) arc(s) longueur utile du système  $x$



**Fig. 1.8.** Gabions circulaires avec 1 arc



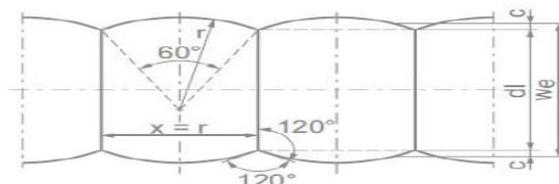
**Fig. 1.9.** Gabions circulaires avec 2 arcs



**Fig. 1.10.** Gabions cloisonnés avec des palplanches raccords à 120°

La largeur équivalente  $We$

$$We = \text{largeur de la cloison (dl)} + 2C$$



**Fig. 1.11.** Gabion cloisonné



**Fig. 1.12.**Gabions en palplanches

### **Rideaux mixtes (HZ/AZ)**

Le rideau HZ est un rideau mixte constitué :

- D'éléments principaux profilés HZ utilisés comme éléments porteurs
- De palplanches doubles AZ utilisées comme éléments intercalaires.

L'assemblage systématique de ces éléments de base permet une multitude de combinaisons. Du point de vue de la stabilité, les éléments principaux remplissent deux fonctions :

- Celle d'éléments de soutènement, reprenant à la fois les efforts horizontaux exercés par le sol et par la pression hydrostatique.
- Celle de pieux reprenant les efforts verticaux de la superstructure.

Les palplanches intermédiaires remplissent quand à elles uniquement une fonction de soutènement et de redistribution des efforts. Elles peuvent être plus courtes que les éléments principaux de rideaux. Selon la combinaison et la nuance d'acier retenues, le rideau HZ peut reprendre en toute sécurité des moments fléchissant allant jusqu'à 9000KNm/ml. Ce chiffre donne une indication quand à l'éventail des applications pratiques du système HZ, application qui se caractérise par des efforts supérieurs à ce que des palplanches courantes peuvent supporter. Les palplanches prennent la forme d'un arc de cercle à mesure que la pression augmente, se comportant alors comme une membrane (tension). Ceci conduit à une augmentation de la rigidité de la structure.



Fig.1.13. Rideaux mixtes (HZ/AZ)

Eléments simples (HZ)

Possibilité d'assemblage.

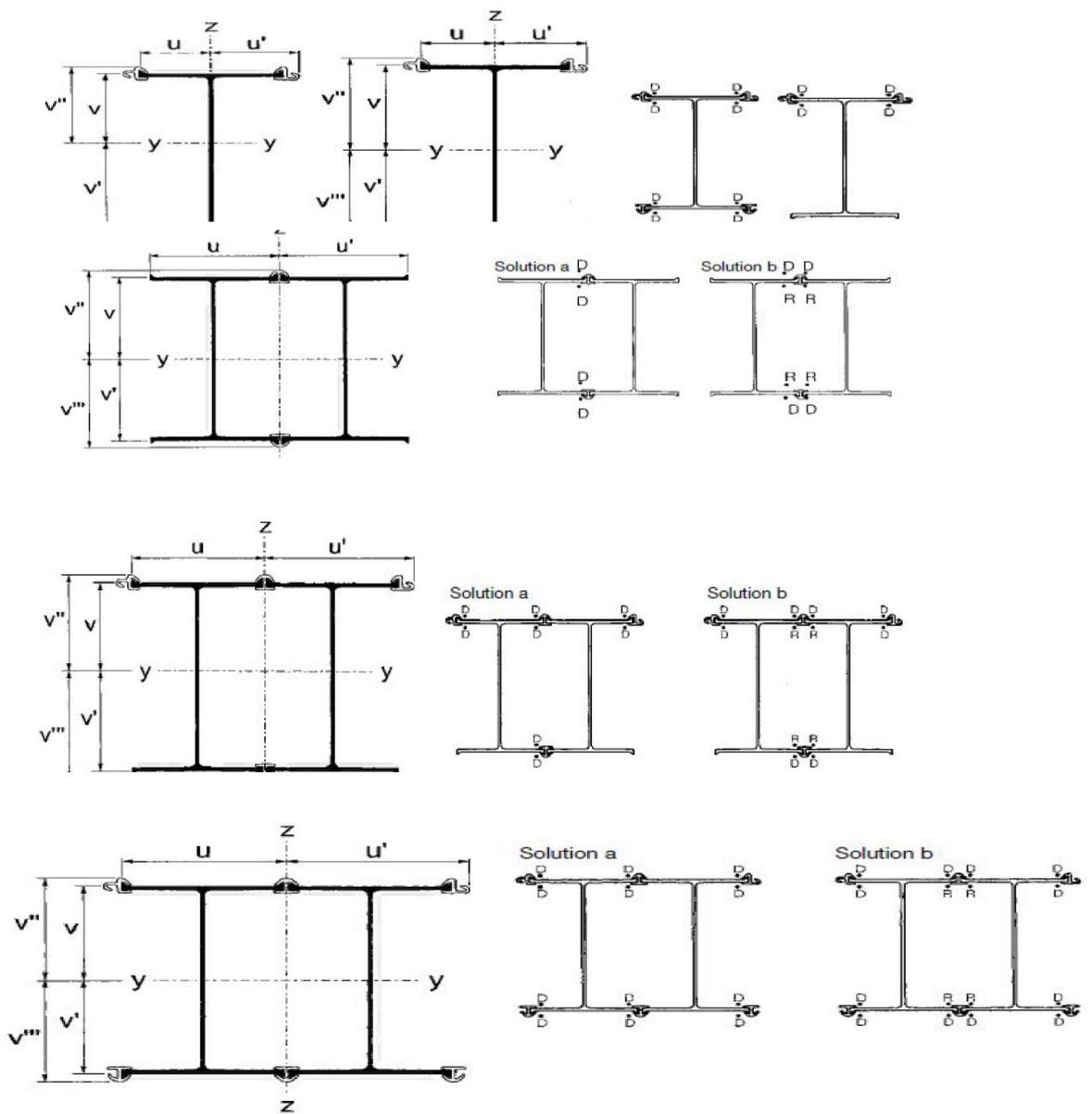
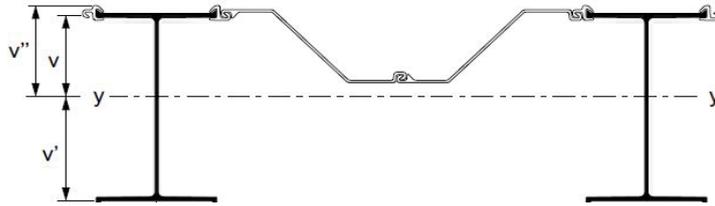


Fig. 1.14. Assemblage des éléments de la structure

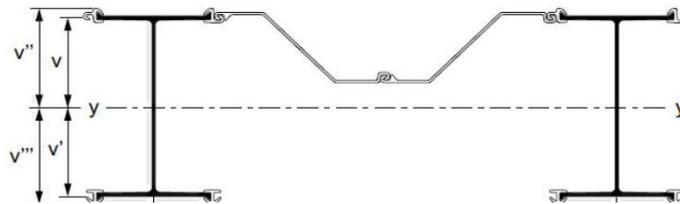
**Combinaisons :**

On distingue les combinaisons ci après:

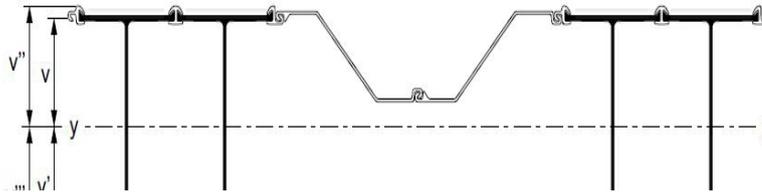
**12/AZ 13**



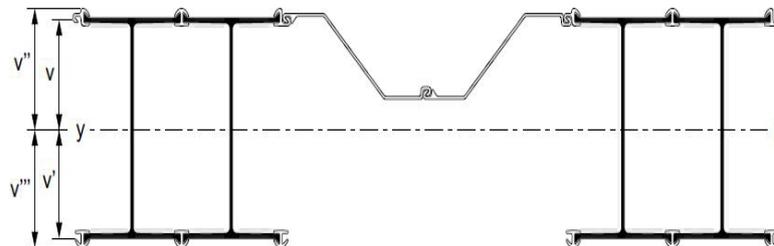
**14/AZ 13**



**24/AZ 13**



**26/AZ 13**



**Fig. 1.15.** Combinaisons des éléments de la structure



**Fig .1.16.** utilisation des rideaux de palplanche dans un projet de pont à région de charouine à Adrar

#### 1.4. Les serrures :

Une innovation majeure a été apportée avec l'intégration aux profilés, dès leurs formages, de " serrures " permettant de les assembler en rideaux continus en les enclenchant les uns aux autres sans avoir recours à des profilés de raccord. Les premiers profilés possédant de telles serrures apparurent aux Etats Unis vers 1910.



**Fig. 1.17.**Serrure à la jonction de deux palplanches.

Les serrures ont initialement été réalisées en rapportant des éléments secondaires aux profilés principaux, la liaison étant obtenue par rivetage. Dans un deuxième temps la

mise au point des procédés de fabrication permet d'usiner la serrure directement à partir du profilé principal.

#### 1.4.1. Les différents types de raccordement

Les palplanches en acier vont par contre connaître un développement important. Initialement, elles ne différaient pas des profilés métalliques utilisés à d'autres fins et notamment en construction métallique. Il s'agissait de profilés en I ou en U assemblés de sorte à constituer des écrans continus, le raccord étant constitué d'un profilé en I dont les ailes avaient préalablement été recourbées. L'utilisation de telles palplanches restera marginale.

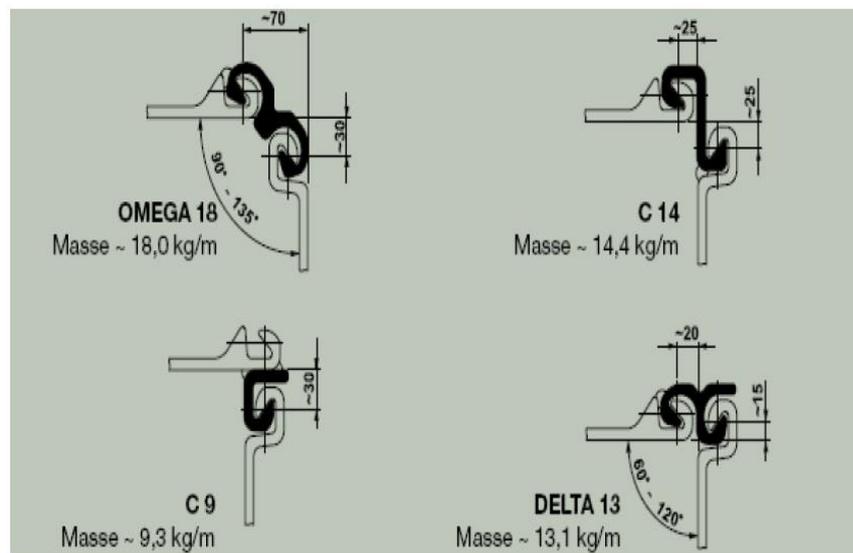


Fig. 1.18. Différents types de raccords



Fig. 1.19. Raccordement Omega.

### 1.4.2. Différents types de profilés :

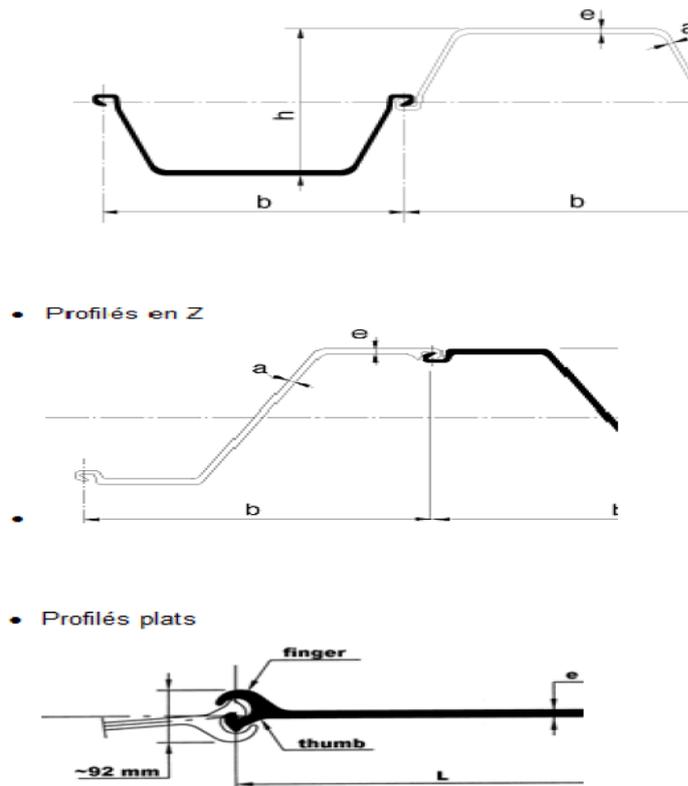


Fig. 1.20. Serrure des différents profilés

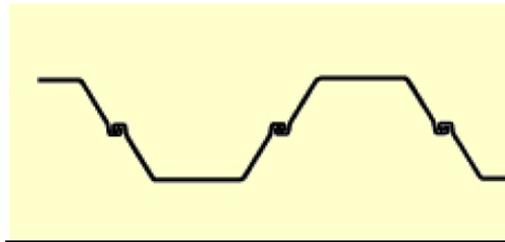


Fig. 1.21. Jointure de plusieurs palplanches.

### 1.4.3. Application des profilés :

Les profilés en Z et en U sont utilisés pour supporter des charges de flexion. Les profilés plats sont utilisés pour supporter des charges de traction. Les profilés en Z et en U peuvent être employés indépendamment ou combinés avec des pieux tubulaires ou des pieux HP pour les cloisons combinées.



**Fig. 1.22.**Exemple d'application des profilés.

- Mais aussi : pieux tubulaires (utilisés en combinaison avec des profilés en Z ou en U dans la cloison combinée.
- Et les pieux HP, ou pieux de fondation. Egalement possible en combinaison avec des profilés en Z ou en U.

Le tableau 1.1 ci dessous donne quelques indications sur les caractéristiques de différents profils de palplanches de type courant :

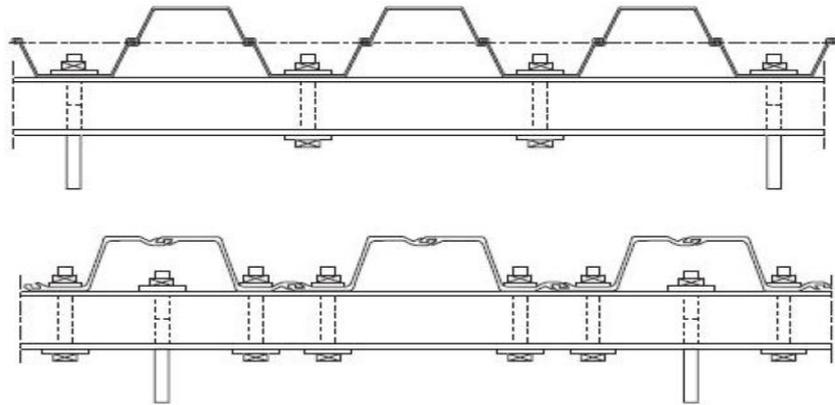
**Tableau1.1 : Caractéristiques des palplanches.**

Type de palplanche	Hauteur (m)	Poids de 1m <sup>2</sup> de paroi (kg).	Module de résistance par mètre de paroi (cm <sup>3</sup> )
Larssen I	Jusqu'à 15	100	500
Larssen III	Jusqu'à 24,7	155	1360
Larssen IV	Jusqu'à 31	187	2040
Larssen V	Jusqu'à 34,4	238	2960

## 1.5. Les éléments de rigidification :

### 1.5.1. Liernes :

La rigidité longitudinale de l'écran est assurée en disposant des liernes, profilés métalliques I ou U, horizontalement, le long du rideau de palplanches. Ces liernes sont disposés régulièrement sur la hauteur de l'écran, auquel elles sont souvent fixées par boulonnage. Elles sont en principe disposées au droit des niveaux d'ancrage et servent d'appui aux têtes d'ancrage.



**Fig. 1.23.**La disposition des liernes dans un rideau de palplanches.

### 1.5.2. Poutre de couronnement :

Cette poutre assure plusieurs fonctions :

- Un élément de rigidification longitudinale de l'ouvrage ou chainage.
- Transmettre des efforts au rideau de palplanches.

Elle sert ainsi d'appui pour d'éventuel butons et constituer un élément architecturale de l'ouvrage.

### 1.5.3. Les appuis :

Les appuis de l'écran sont constituées par le sol en fiche et par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran. L'appui de la fiche provient de la capacité du sol à se mobiliser contre les déplacements du l'écran, mobilisation d'une butée dans le cas du mouvement de translation de l'écran, mobilisation d'une butée et contre butée, et donc d'un encastrement dans le cas d'une rotation en fiche de l'écran. Les caractéristiques des sols de fondation, ainsi que la rigidité de l'écran et la dimension de sa fiche, déterminent le fonctionnement de cet appui en fiche.

Ainsi que la rigidité du sol de fondation et de l'écran, ainsi que la hauteur de la fiche déterminent d'une part la raideur de l'appui en fiche et, d'autre part, le type de l'appui mobilisé, appui simple ou encastrement. La résistance au cisaillement de sol de fondation ainsi que la hauteur de la fiche déterminent pour leur part la valeur de l'appui mobilisable.

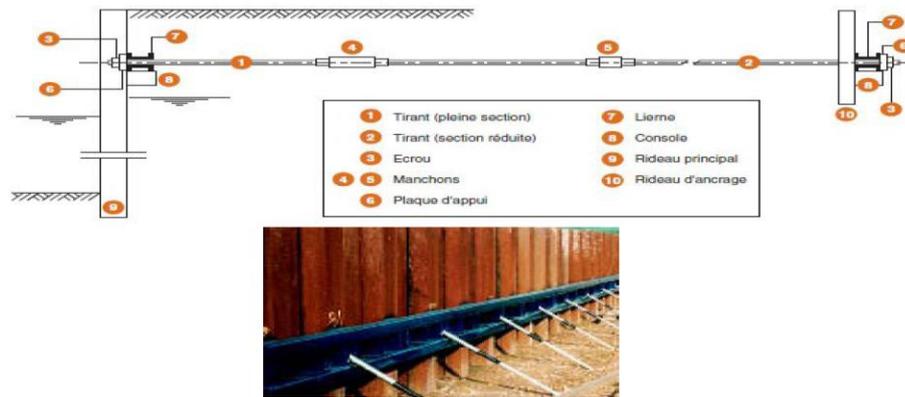


Fig. 1.24. Schéma général d'un rideau de palplanches ancré en tête.

### 1.5.3.1. Principaux types de tirants passifs :

#### A: Tirants de type remblayés

Ils sont constitués de ronds d'acier filetés, ou barres d'acier à haute adhérence.

##### A.1: Par type d'ancrage

- Tirants à ancrage par plaque.
- Tirants à ancrage par contre rideau.
- Tirants à ancrage par dalle de frottement.

##### A.2: Par type de blocage

- Dispositif de blocage articulé à double articulation ou à bride et œil.
- Dispositif de blocage non articulé plaque d'appui et écrou.

#### B: Tirants de type battu constitués de profilés métalliques, de tubes, de pieux H ou de palplanches

- Pieu battu injecté (armature tube métallique).
- Tirant battu injecté.
- Tirant à plaque pivotante de type Louis Ménard.

#### C: Tirants scellés ou forés

Ils sont constitués de ronds mis en oeuvre dans un forage et scellés au coulis

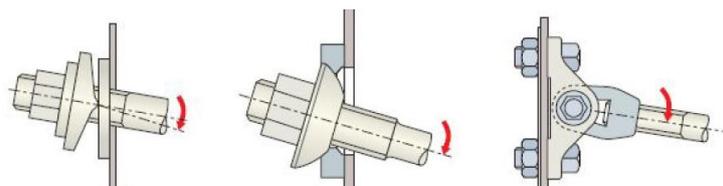
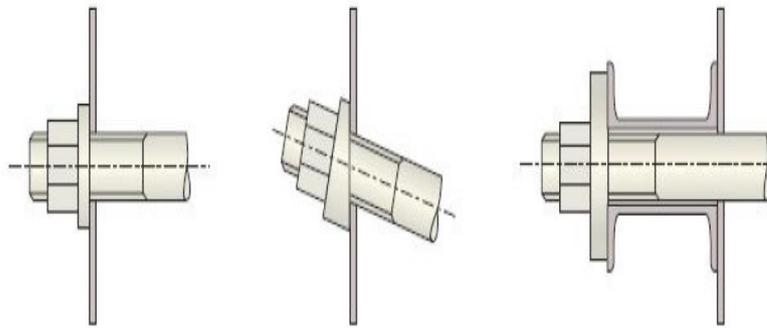


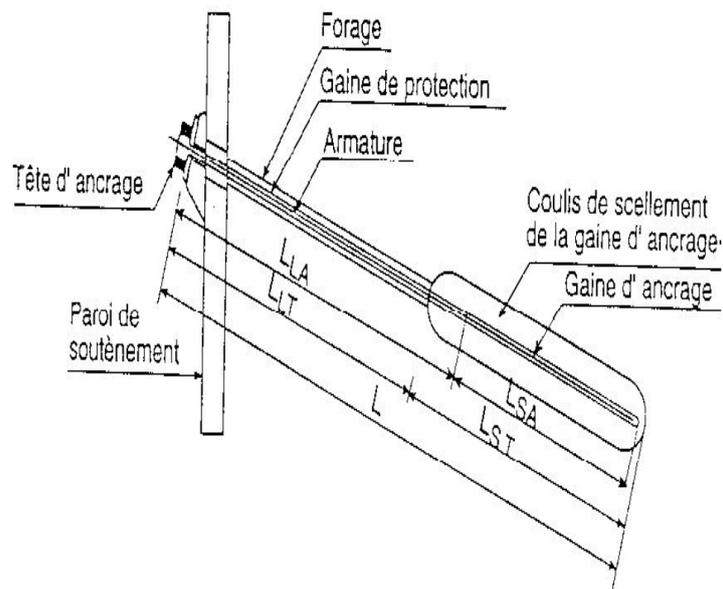
Fig. 1.25. Attaches articulées



**Fig. 1.26.** Attaches ordinaires

### 1.5.3.2. Tirants actifs

Souvent appelés aussi tirants de précontrainte. Ils sont constitués d'une armature en acier de précontrainte à haute résistance. La partie supérieure de l'armature non scellée au terrain est protégée par une gaine plastique.



**Fig. 1.27.** Schéma d'un tirant attaché à un écran de soutènement.

**Remarque :** le rideau HZ peut être ancré au moyen de tirants inclinés ou injectés. Les profilés HZ peuvent être fournis percés dans les lumières de raccordement pour les ancrages. Les dimensions h et b varient en fonction du diamètre de tirant.

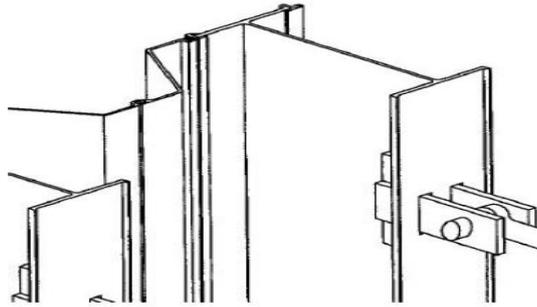


Fig. 1.28. Détail de raccordement du profilé HZ

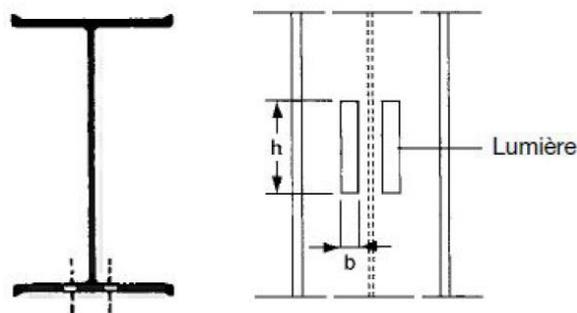


Fig. 1.29. La lumière de raccordement.

#### 1.5.4. Les butons :

Ils sont constitués en béton armé ou de profilés métalliques prenant appui sur deux structures construites en vis à vis, comme cela peut être le cas pour les soutènements de tranchées ouvertes ou couvertes.

### 1.6. Domaine d'application :

#### 1.6.1. Palplanches en acier :

La limite d'emploi est essentiellement liée d'une part à leur mode de mise en œuvre et, d'autre part, à leurs caractéristiques dimensionnelles et mécaniques, Les palplanches métalliques sont particulièrement bien adaptées pour la réalisation d'ouvrages de soutènement et d'étanchement en site aquatique tel que :

systèmes de protection contre les risques de crue et dans l'aménagement de berges.

- Dans les nouvelles digues, ils peuvent remplir les fonctions d'étanchéité, de soutènement et de stabilisation.

- Ils ont également largement employés pour les puits de fondation (blindage de fouille) tant sur la terre ferme que dans l'eau, les batardeaux ainsi que les constructions souterraines en général.
- Ils sont également utilisés pour renforcer des digues existantes, là où des problèmes de place ou d'emprise se posent, par exemple dans les zones portuaires ou en site urbain.
- Les profilés de palplanche sont employés pour la réalisation de constructions de soutènement telles que les murs de quai maritime ou fluvial, travaux portuaires, écluses, estacades de guidage et protections des berges de rivières et de canaux navigables, quais d'accostages (construire un quai permettant l'accostage de superpétroliers).
- Sont utilisés aussi comme coffrage perdu : pendant la réalisation des piles du pont, travaux des constructions des barrages, et la déviation d'une route.
- Les rideaux de palplanches peuvent constituer des ouvrages provisoires ou définitifs. Leur caractéristique essentielle est que le soutènement ainsi formé est souple et étanche, pour aboutir à remplir cette fonction plusieurs essais ont été faits au niveau du joint de la palplanche ce qui nécessite une méthode spécifique de dimensionnement.

**Exemples d'utilisation des palplanches en acier :**

- palplanche en soutènement routier



**Fig. 1.30.** Rideau partiellement fiché dans le sol.

- Quais d'accostage



**Fig. 1.31.**Quai permettant l'accostage de superpétroliers.

- Construction d'une écluse.



**Fig. 1.32.** L'utilisation des palplanches pour une écluse.

- Soutènement des talus.



**Fig. 1.33.** Renforcement d'une digue anti crue.

- Batardeaux en rivière.



**Fig. 1.34.** L'utilisation des palplanches comme batardeaux en rivière.

- Protection des berges en palplanches.

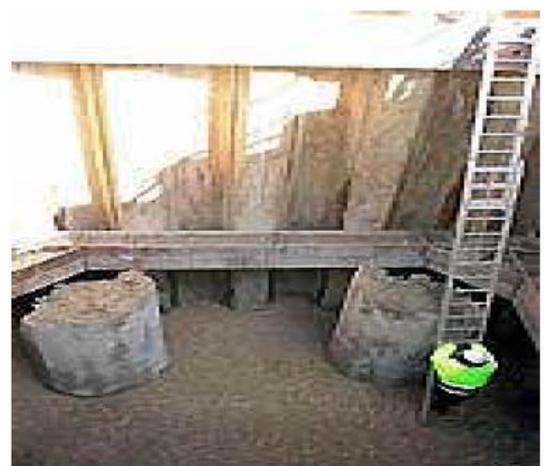


**Fig. 1.35.** Deûle à Lambersart (Nord de la France).

- Cas de présence de la nappe.



**Fig. 1.36.** Terrassement dans le batardeau



**Fig. 1.37.** Fouilles en présence de nappe.

- Construction d'un nouveau barrage.



**Fig. 1.38.**Chantier d'un barrage en travaux

- Utilisations provisoires.



**Fig. 1.39.**Pose de canalisations .



**Fig. 1.40.**En site industriel encombre

- La réhabilitation du barrage.



**Fig. 1.41.**Le grand barrage de Mont Saint Michel en France.

- Reconstruction d'un pont ferroviaire



**Fig. 1.42.** Chantier d'une reconstruction d'un pont en utilisant des palplanches métalliques.

## 1.7. Mise en œuvre des palplanches :

La mise en œuvre des palplanches verticalement dans le sol se fait généralement par battage, vibrage ou par presse hydraulique.

### 1.7.1. Battage :

#### A. Principe du marteau hydraulique :

Pour les marteaux hydrauliques, un cycle d'opération débute par la levée de la masse frappante monobloc. La soupape P positionnée sur le circuit de pression est ouverte et la soupape R placée dans le circuit de retour est fermée. Une fois que la course de levage pré réglée, en fonction de l'énergie souhaitée, est atteinte alors le fonctionnement des soupapes s'inverse. La masse est alors libérée. Après l'impact, le cycle se répète automatiquement. La masse frappante est guidée en haut et en bas. Grâce au gaz pressurisé, le marteau peut fonctionner sous toutes les inclinaisons, même horizontalement. A chaque impact, la masse frappante percute une enclume. Elle est la pièce maîtresse, pour le transfert de l'énergie, du casque de battage qui a différentes formes en fonction du type de palplanche à mettre en fiche.

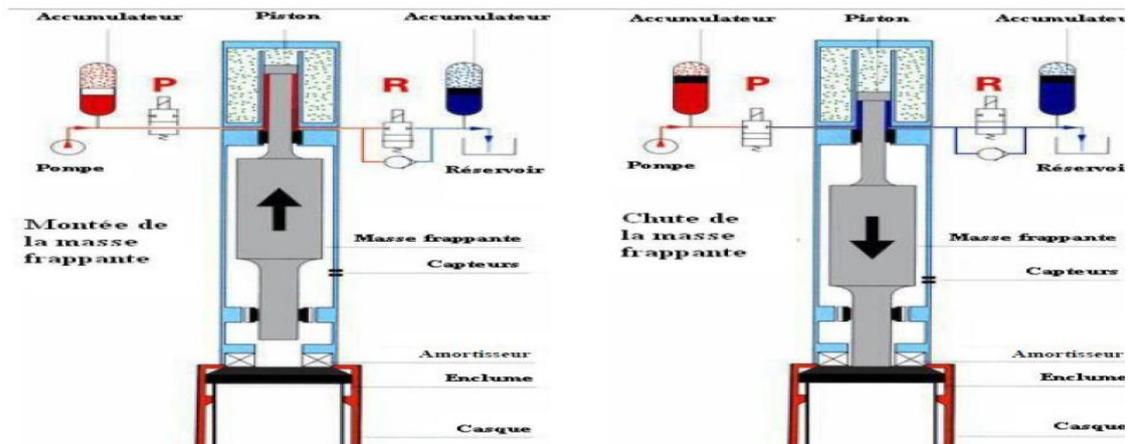


Fig. 1.43. Principe de fonctionnement du marteau hydraulique (brochure IHC).

## B. Matériels :

Le fonçage par battage d'un élément rigide dans le sol nécessite l'utilisation d'un mouton et d'un système de guidage.

### B.1. Systèmes de guidage :

Le mouton venant se poser sur l'élément à foncer, il est indispensable d'utiliser un système de guidage. Il se fait principalement suivant deux méthodes (le mât de battage ou le guide de battage).

#### B.1.1. Mât de battage :

En mode guidé sur mât, le porteur hydraulique (engin de chantier) est équipé d'un mât de guidage sur lequel coulisse le mouton dans un système de rails : le mouton est solidaire du mât. Le positionnement et le contrôle de la verticalité ou de l'inclinaison sont grandement facilités. Ce mode est le plus adapté à la mise en oeuvre d'éléments inclinés.

#### B.1.2. Guide de battage :

En mode pendulaire, le mouton est suspendu au câble d'une grue à flèche. Avant de positionner le mouton sur l'élément à battre, il est nécessaire de le maintenir dans un guide de fonçage à la différence de la méthode précédente.

#### B.1.3. Moutons ou marteaux :

Le choix du système de battage approprié est essentiel pour foncer convenablement les palplanches et parvenir à la cote souhaitée en toute sécurité. Les différents types de moutons utilisables pour le fonçage par battage sont :

- les moutons à chute libre.
- les moutons diesel.

- les moutons hydrauliques à double effet.
- les trépideurs ou les moutons à double effet à l'air comprimé et à frappes rapides.



**Fig. 1.44.**Chantier de battage.

### 1.7.2. Vibor fonçage :

#### A. Principe :

Les vibrations générées par le vibreur puis transmises au sol par l'intermédiaire du profilé permettent l'enfoncement de celui-ci si l'énergie est suffisante pour vaincre la résistance du sol. Le profilé s'enfonce alors sous son propre poids et celui du vibreur avec des vitesses de pénétration pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres par minute.

La vibration est générée par des balourds de masse  $m$  ou masses excentriques, en nombre pair, tournant à la même vitesse, mais en sens opposés, de sorte que les composantes horizontales ( $F_h$ ) de la force centrifuge ( $F_c$ ) s'annulent. La résultante est une force verticale ( $F_v$ ) d'intensité sinusoïdale. Actuellement, les masses excentriques sont entraînées par des moteurs hydrauliques, alimentés par une centrale à débit variable. La motorisation hydraulique présente de nombreux avantages tels qu'un bon rapport poids et la puissance, une grande souplesse d'utilisation avec des performances élevées et des possibilités de réglage de la vitesse de rotation et donc de la fréquence des masses excentriques. Selon le vibreur hydraulique, les masses excentriques tournent à des vitesses comprises entre 1200 et 3000 t/mn, soit des fréquences de 20 à 50 Hz.

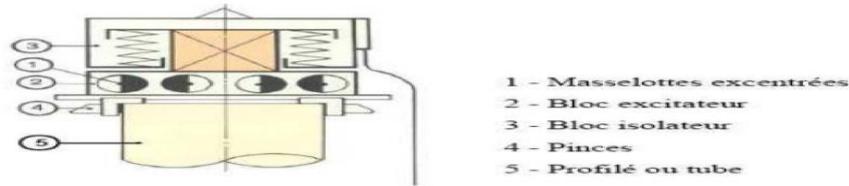


Fig. 1.45. Principe mécanique du vibreur.

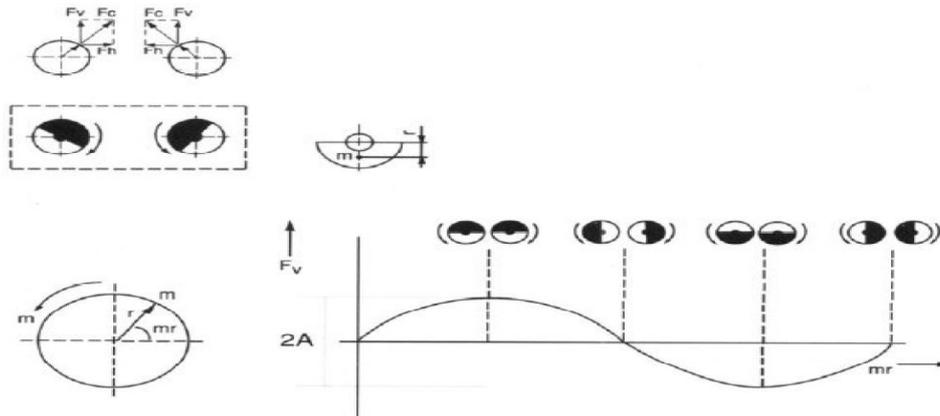


Fig. 1.46. Principe de fonctionnement d'un vibreur (brochure ICE).

### B. Matériels :

- **1 ou 2 grues** mobiles qui auront pour rôles : manutention des palplanches, guides, mise en place du vibreur sur les palplanches, mise en place des guides et tréteaux pour les palplanches.

- **1 vibreur hydraulique** : les vibreurs sont alimentés par un groupe hydraulique, il est constitué d'un boîtier vibrant, d'un étrier de suspension, d'un casque, et d'une masse statique. Il existe 2 types de vibreur : Vibreur à moment fixe adapté pour les palplanches et les profilés de grandes dimensions en conditions difficiles. Vibreur à moment d'excentricité qui fonctionne avec un déphasage des masses excentriques, lors des phases de démarrage et d'arrêt, il peut être piloté par un ordinateur pour permettre de contrôler l'excentricité. Les vibreurs et les marteaux hydrauliques peuvent être utilisés aussi bien en site terrestre, à l'air libre, qu'en site aquatique sous l'eau.

- **guides** : ils permettent de caler les palplanches avant et pendant leur enfoncement. Ils mesurent généralement une dizaine de mètres.

• **Types de Mise en Fiche :**

- Pelle Mécanique pour sol sableux, terre marécageuse ou vaseuse.
- Vibrofonçage pour sol moyen de type Limon, Sable, Grave.
- Marteau permettant la pénétration dans les sols durs de type Marne.
- Brise Roche avec guide ou palplanche acier jumelé dans des sols difficiles.



**Fig. 1.47.**Un guide de contrôle

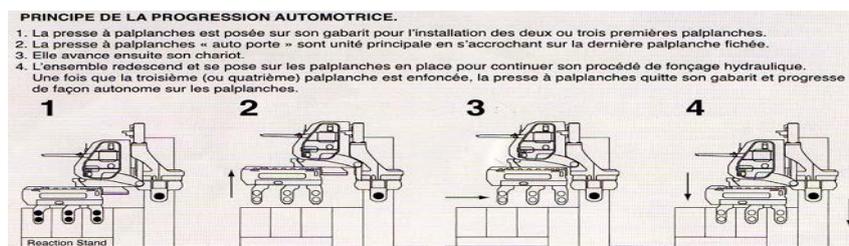


**Fig. 1.48.**Perforage avant fonçage

### 1.7.3. Mise en place par presse hydraulique

#### A. Principe :

Ce système est plus lent que les systèmes de vibrofonçage et battage. Il peut rencontrer quelques difficultés dans les terrains durs. Les trois premières palplanches doivent être mises en place grâce à un gabarit conçu spécialement pour la presse. Ensuite cette presse s'auto porte de palplanche en palplanche et assure sa stabilité en s'accrochant sur les trois dernières palplanches mises en place. En s'appuyant sur les trois dernières palplanches par des mouvements répétitifs, la presse enfonce la totalité de la palplanche. Le procédé pour l'extraction des palplanches est identique que la mise en place, la presse soulève par étapes les palplanches les unes après les autres. Son avantage est : Peu de nuisances sonores et pas de vibration.



**Fig. 1.49.**Principe de la presse hydraulique.

**B. Matériels :**

On distingue les engins suivants : presse hydraulique, groupe électrogène, pelle à câble ou grue et une pelle hydraulique.



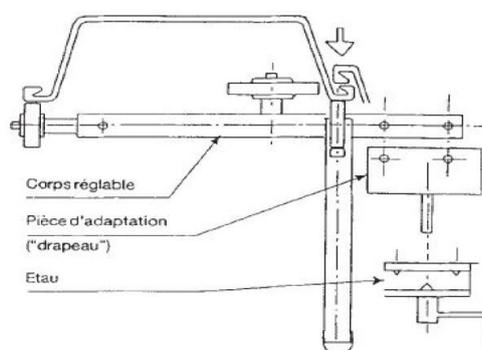
**Fig. 1.50.**La presse hydraulique

**1.8. Enclenchement d'un rideau de palplanches :**

Cette opération consiste à enclencher la palplanche à mettre en oeuvre, dans la serrure de celle déjà fichée. L'emboîtement a un triple but :

- Fournir un guidage au cours de l'enfoncement.
- Solidariser les palplanches, afin de réaliser un rideau contenu offrant une résistance plus grande à la flexion.
- Réaliser l'étanchéité du rideau.

L'enclenchement des profilés présentant des risques importants, notamment de chutes de hauteur et de heurts, il est conseillé d'utiliser un enclencheur, système simple pouvant s'adapter sur différents profils par changement de drapeau. Il permet l'enclenchement des palplanches à distance.



**Fig. 1.51.** Enclencheur automatique.

### 1.9. L'arrachage des palplanches :

Les palplanches mises en oeuvre pour des ouvrages provisoires doivent être le plus souvent arrachées en fin de chantier. Cette opération doit être effectuée à l'aide des appareils spécifiquement conçus et adaptés, associant les effets de traction et de vibration. La traction doit être réalisée dans l'axe du profilé pour limiter l'effet du à l'élimination brutale de l'effort résistant.

### 1.10. Reçepage des palplanches :

Le reçepage consiste à découper la tête des profilés de manière à les aligner à la hauteur voulue. Tout reçepage supérieur à 20cm doit faire l'objet d'un examen des relevées d'enfoncement afin de vérifier que la fiche prévue a été atteinte. Les opérations d'oxycoupage doivent être réalisées par une personne qualifiée L'élément à couper doit être maintenu par l'engin de levage jusqu'à sa découpe complète. Afin qu'il ne se balance pas, il convient d'assurer sa stabilité par des points d'attache.

### 1.11. Principaux étanchements des palplanches :

On distingue deux types d'étanchement :

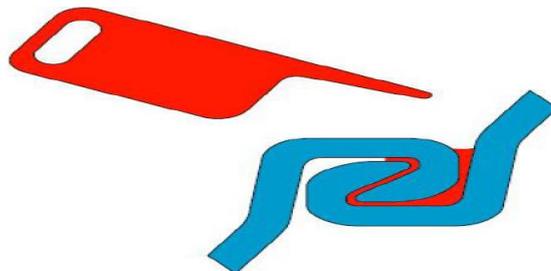
#### 1.11.1. Etanchement vertical

Il consiste principalement à rendre étanche les serrures des palplanches, plusieurs systèmes d'étanchement possibles dépendant de degré d'étanchéité souhaité.

##### a. Produit hydrocarboné mis en oeuvre à chaud

**a. 1. Conditions d'application** Le comportement de ce produit lors de sa mise en oeuvre sous certaines conditions est résumé ci après :

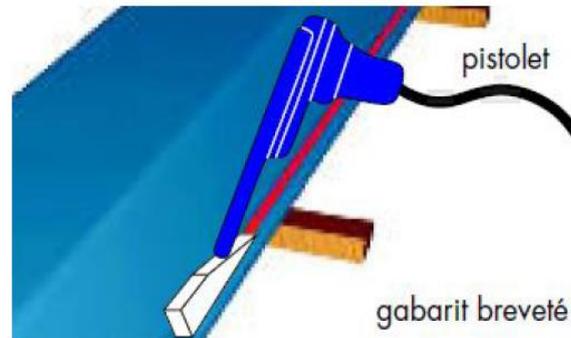
- application sur métal -10°C à +70°C.
- durcissement sous pluie.
- séchage sous UV.



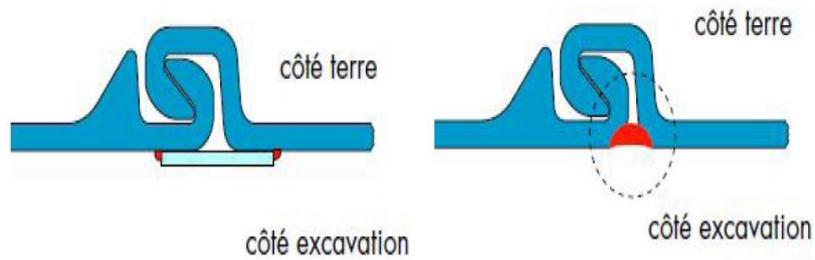
**Fig. 1.52.** Remplissage des serrures enclenchées avec un produit hydrocarboné.

**b. Produit hydro gonflant mis en oeuvre à froid :****b.1. Conditions d'application :**

- application sur métal humide.
- polymérisation sous UV.



**Fig. 1.53.** Illustration de la mise en oeuvre du produit hydro gonflant.

**c. Soudure :**

**Fig. 1.54.** Etanchement avec la soudure.

**d. Rideau de palplanches combiné avec une paroi bentonite ciment :**

**Fig. 1.55.** Etanchement avec combinaison bentonite ciment.

### e. Réparation des défauts d'étanchement dans les serrures :

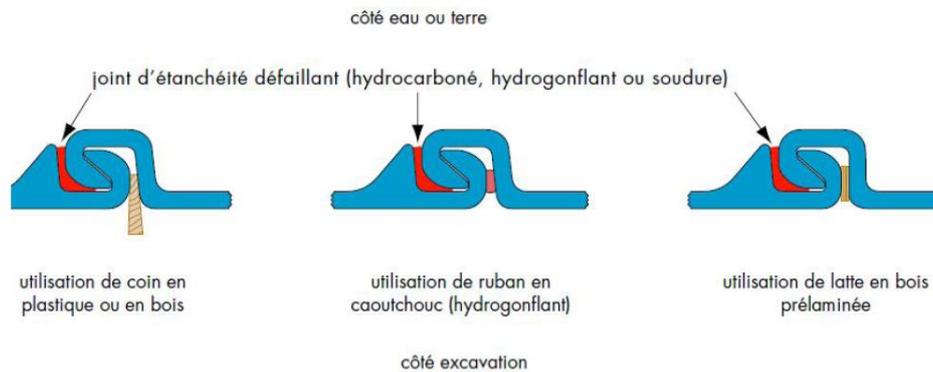


Fig. 1.56. Illustration de la réparation des défauts d'étanchement dans les serrures.

### f. Etanchement par installation d'un système de drainage :

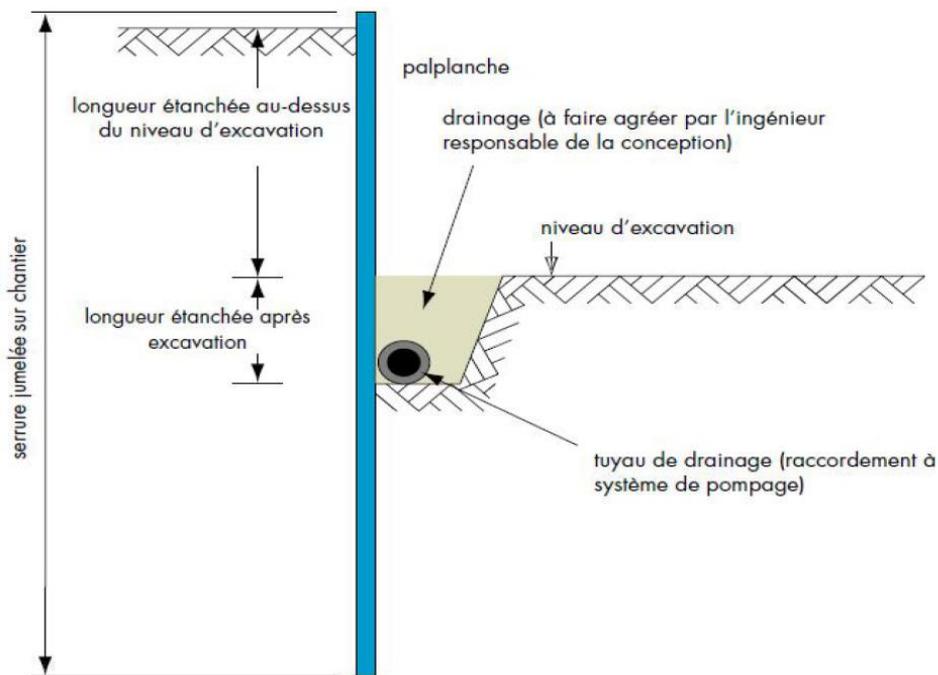


Fig. 1.57. Installation d'un système de drainage.

### g. Etanchement avec Arcoseal :

L'application d'Arcoseal se fait généralement en usine mais elle reste tout à fait possible à l'air libre sur le chantier dès lors que l'on veille scrupuleusement à protéger les serrures de la pluie et de l'humidité avant l'application. Porté à une température de 115 °C à 135 °C (un brassage continu est nécessaire), le joint d'étanchéité est versé dans les serrures en respectant les plans d'exécution et en tenant compte du sens de

progression du fonçage et de la position des serrures par rapport à la pression hydrostatique. La serrure munie d'Arcoseal devra toujours être placée à l'avancement.

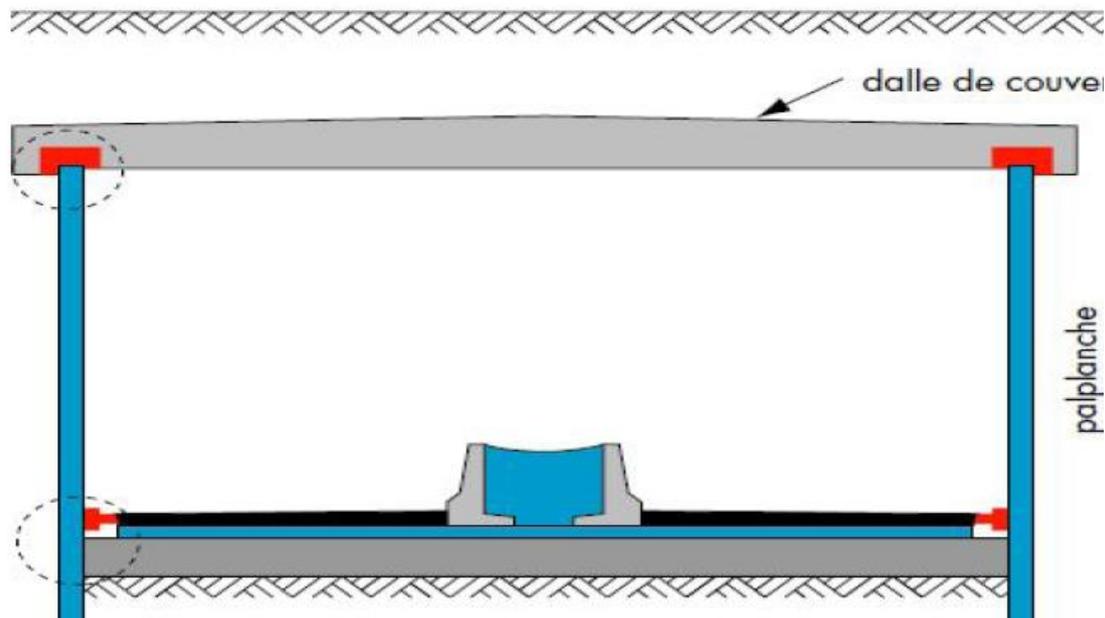
#### **h. Etanchement avec wadit :**

Nous recommandons d'utiliser ce produit en le réchauffant à l'huile thermique et réglé par un thermostat. Cela permet généralement d'éviter toute surchauffe locale de la masse de scellement. Lorsque des serrures de rideau de palplanches sont scellées avec wadit, les palplanches doivent absolument être logées à l'horizontale. Il faut surveiller en tout cas que les pièces en acier soient propres, sèches et sans graisse, sinon la masse de scellement ne pourra pas adhérer à l'acier. Si l'acier est neuf, il faut éliminer la peau de laminage collée sur la surface (elle est composée aussi de graisses et d'huiles).

#### **1.11.2. Etanchement horizontal :**

Il concerne la jonction étanche entre la paroi de la palplanche et un élément d'ouvrage horizontal. On distingue généralement deux types d'étanchement :

##### **A: L'étanchéité avec la dalle de couverture**

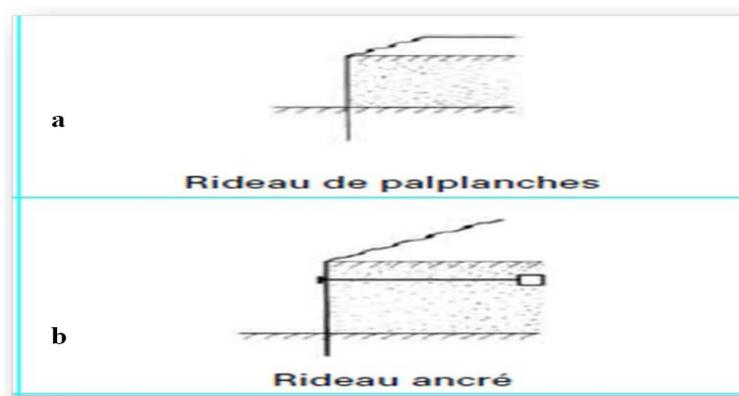


**Fig. 1.58.** Etanchement horizontal dans le cas d'un tunnel ou une structure enterrée.

## 2.1.Introduction :

Afin de comprendre l'interaction sol-structure et le comportement d'un écran de soutènement en contact avec le massif du sol, on commence par une présentation des schémas de rupture éventuelle exigés par [2]. On passe ensuite aux méthodes de calcul couramment utilisées pour la stabilité externe. L'exposé de ces méthodes est indispensable pour bien illustrer leur fonctionnement ainsi que les notions de poussée et de butée.

## 2.2.La palplanche dans le sol :



**Fig. 2.1.**Modèle : a) rideau sans tirant d'ancrage  
b) rideau ancré dans le sol.

Les rideaux plans sont destinés à supporter des efforts tels que :

- la poussée hydrostatique.
- La poussée des terres avec charges fixes ou mobiles sur le terre-plein .
- les charges verticales directes.

On pourrait comparer un rideau à une poutre verticale. Le but du calcul est de déterminer la longueur des palplanches utilisées, ainsi que de vérifier les déformations et donner les valeurs maximales des réactions d'attache ou d'appui.

Les forces appliquées au rideau comportent en particulier des poussées et des butées dues au terrain. Ces efforts ne sont connus que pour des équilibres limites de rupture du sol dans certaines conditions.

Dans les exemples qui vont suivre, on pourra apercevoir que les méthodes de calcul de stabilité des rideaux de palplanches comportent une marge de sécurité.

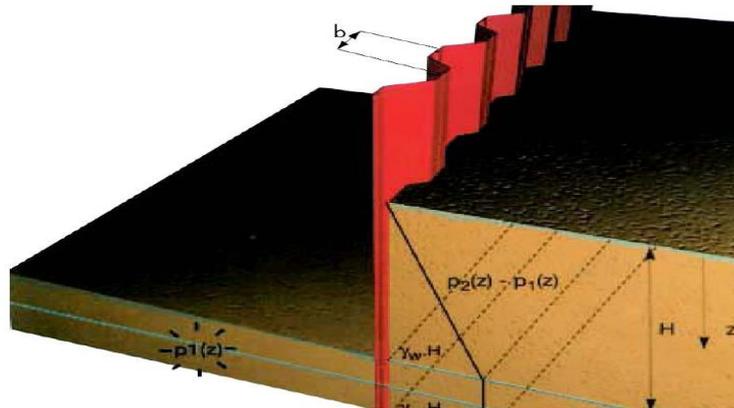


Fig. 2.2. Palplanche ancrée dans le sol.

On distingue deux parties :

-**partie 1 (partie soutènement)** : on a uniquement la poussé du sol :

$$p(z) = k(y) \cdot \delta = k(y) \cdot \gamma z \quad (2.1)$$

coefficient de proportionnalité en fonction de la déformée (y)

-**partie 2 (partie fiche)**:

$$P(z) = k(y) \cdot \gamma (Z-H) - k(-y) \cdot \gamma \cdot (Z-H) \quad (2.2)$$

$$k_a (\text{poussée}) < k(y) < k_p (\text{butée})$$

-L'équilibre de la poutre : Si

E : module d'élasticité de l'acier de la palplanche.

I : moment d'inertie de la palplanche. L'équilibre de la palplanche (poutre) peut s'écrire:

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dz^4} + P(z) = 0 \quad (2.3)$$

La résolution de cette équation de 4<sup>eme</sup> degré donne comme solution y(z) ; (flexion de la palplanche). La résolution nécessite de connaître la fonction k(y) et les conditions aux limites (f). Ce problème ne peut être résolu que par approximation successives. [1]. De plus les méthodes utilisées sont basées sur des hypothèses simplificatrices déduites de l'observation expérimentale. Les méthodes de calcul des écrans de soutènements sont de trois types : méthode aux états limites, méthode aux coefficients de réactions et méthode des éléments finis.

- **méthode aux états limites :**

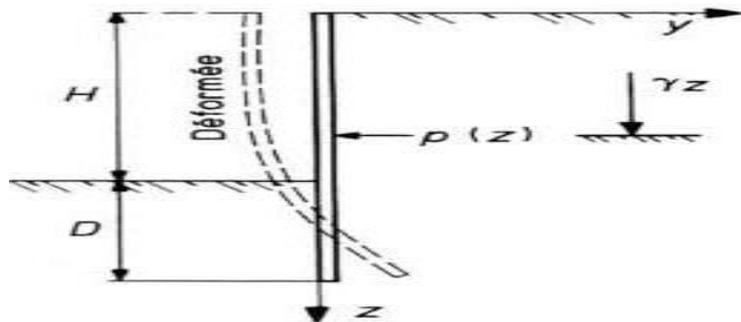
Sans interaction avec la structure, le sol est considéré à l'état d'équilibre limite (méthodes aux états limites). Elles ont une solution analytique dans les cas simples. Elles supposent que la pression normale p(z) apportée par le sol est proportionnelle à

la contrainte normale verticale, quant à elle, égale au poids des terres, avec un coefficient  $K$  ne dépendant que du déplacement  $y(z)$  du rideau au niveau considéré :

**Pour  $z \leq H$  :  $P(z) = K(y)\gamma z$ .....(2.4)**

**Pour  $z \geq H$  :  $P(z) = K(y)\gamma z - K(-y)\gamma(z-H)$ .....(2.5)**

La valeur du coefficient  $K(y)$  est comprise entre celle du coefficient de poussée  $K_a$  et celle du coefficient de butée  $K_p$ .



**Fig. 2.3.**Rideau de palplanches soumis à une distribution de pression normale  $p(z)$ .

- **Méthode aux coefficients de réactions :**

En interaction avec la structure et les tirants ou butons, le sol est modélisé à l'interface du sol et de l'écran par des ressorts et des patins (méthodes aux coefficients de réaction). Cette méthode nécessite l'emploi d'un logiciel adéquat.

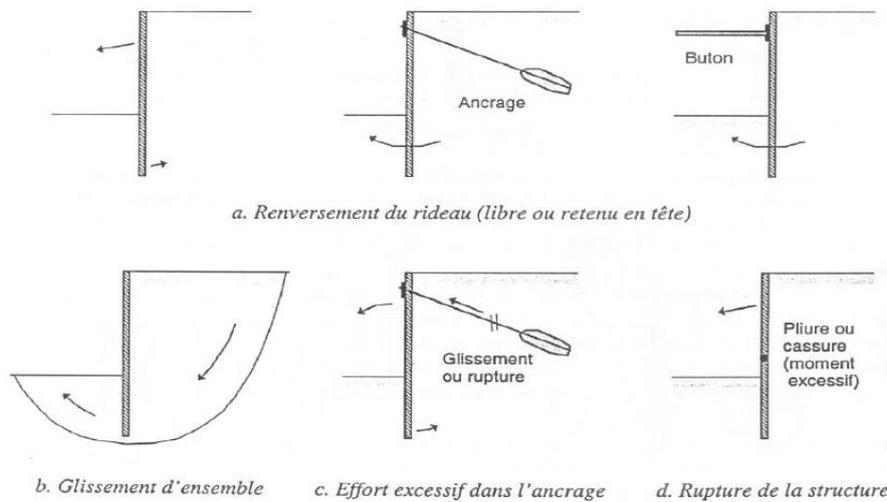
- **La méthode des éléments finis :**

Cette méthode, souvent utilisée dans le cadre de recherches appliquées, est actuellement en cours de développement pour les études courantes grâce au développement de logiciels de calcul destinés aux ingénieurs et à la puissance des micros ordinateurs. Citons toutes ces méthodes concernant l'interaction avec le sol, on doit aussi savoir les facteurs influant sur le comportement d'un rideau de palplanches.

### **2.3. Etats limites de rupture selon L'Eurocode :**

[2] exige la vérification d'une liste d'états limites pour la réalisation des écrans de soutènements. La conception du rideau de palplanches se fait en considérant quatre modes majeurs de rupture que sont :

- 1 : Le renversement du rideau, celui ci pivote sous la pression des terres.
- 2 : Le glissement d'ensemble, une partie du massif incluant la paroi connaît un large mouvement.
- 3 : La destruction de l'ancrage, il peut être arraché ou avoir la tête brisée.
- 4 : La rupture de la structure, les palplanches plient et une rotule plastique apparaît.



**Fig. 2.4.**Modes de rupture d'un rideau de palplanche

Les phénomènes 1 et 2 peuvent être évités en calculant la longueur minimale de fiche du rideau.

L'arrachage 3 peut être écarté par un dimensionnement adapté du tirant.

La rupture interne 4 est exclue en vérifiant que le moment de flexion et l'effort tranchant dans la paroi restent inférieurs aux valeurs admissibles par les palplanches.

## **2.4.Définition de la poussée et de la butée :**

Imaginons qu'un écran soit encastré à la surface d'un massif de sable. Si l'on procède à un remblayage par dépôt successif de couches horizontales minces d'un côté du mur, tout en appliquant une résultante  $F_0$  du côté opposé de façon à empêcher tout déplacement, on exerce à la fin du remplissage une force  $F$  horizontale appelée poussée au repos. Si on réalise une translation horizontale de l'écran, deux cas sont possibles :

**A: Butée**

D'une part le déplacement est imposé vers l'intérieur du remblai à droite, la force  $F$  croît jusqu'à une valeur maximale  $F_p$  qui correspond à la mobilisation totale de la butée.

**B: Poussée**

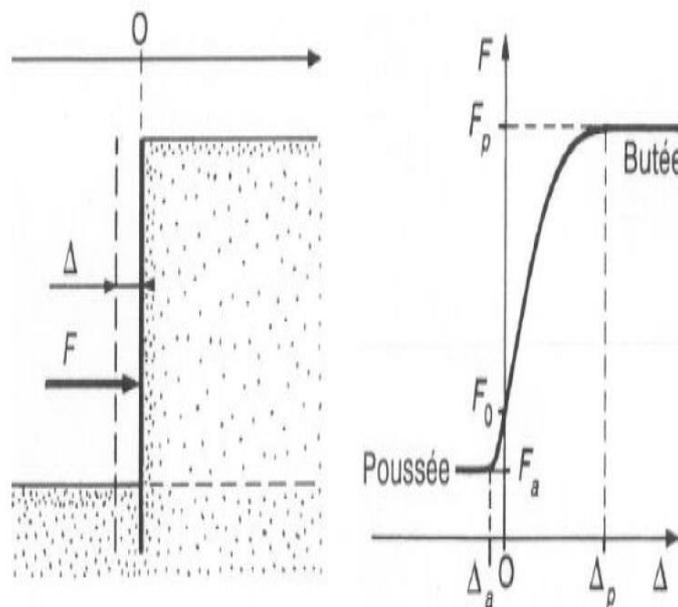
D'autre part, partant d'une situation initiale identique, le déplacement se fait en éloignant du remblai, alors  $F$  décroît jusqu'à une valeur  $F_a$  inférieure à  $F_0$  et qui traduit l'établissement de l'état de poussée.

On notera en particulier que le déplacement  $\Delta_p$  nécessaire à la mobilisation totale de l'état de butée est beaucoup plus important que celui  $\Delta_a$  causant la situation de poussée. Si  $H$  est la hauteur hors fiche du mur, on admettra les ordres de grandeur suivants:

$$\Delta_p \approx H / 100 \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\Delta_a \approx H / 1000 \dots\dots\dots(2.7)$$

Dans ces deux cas extrêmes, on parle de poussée et butée limites correspondant à la rupture du massif de sol [1].



**Fig. 2.5.**Principe de la poussée et de la butée.

## 2.5. Stabilité d'un écran de soutènement :

### 2.5.1. Stabilité externe :

#### 2.5.1.1. Rideau ancré et simplement buté en pied :

Un rideau ancré en tête est dit simplement buté en pied lorsque sa fiche est suffisamment faible pour permettre une rotation du rideau autour de son point d'ancrage et un déplacement du pied mobilisant la butée maximale. Chaque face ne supporte que des contraintes de butée ou des contraintes de poussée, il n'y a pas de contre butée. Le moment maximal se produit le plus souvent vers le bas de la partie libre de la palplanche [1].

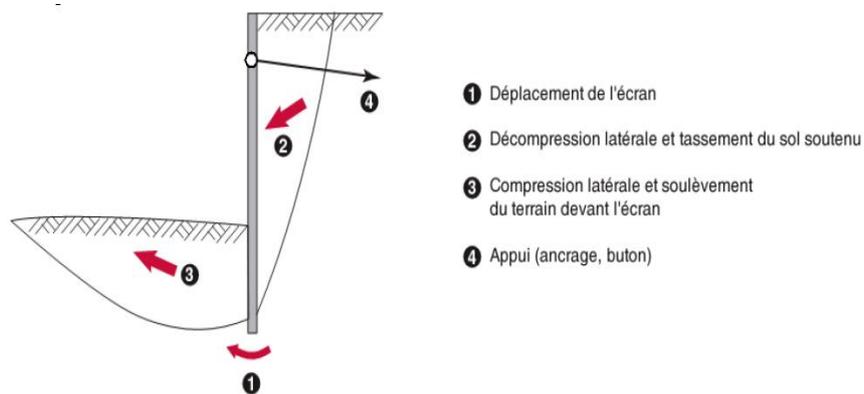


Fig. 2.6. Mécanisme de rupture d'un écran simplement buté.

Le diagramme des efforts exercés sur le rideau, dans le cas d'un sable, est représenté sur la figure suivante. Les inconnues à déterminer sont la fiche

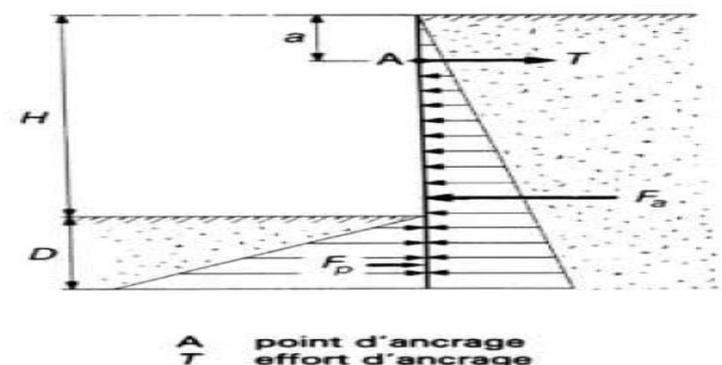


Fig. 2.7. Rideau ancré en tête simplement buté en pied.

D et l'effort d'ancrage T. L'équilibre statique du rideau fournit les deux équations nécessaires au dimensionnement.

**A: Moment résultant nul au point d'ancrage A**

$$F_a \left[ \frac{2}{3} (H + D) - a \right] = F_p \left[ \frac{2}{3} D + H - a \right] \dots\dots\dots(2.8)$$

Avec :

F<sub>a</sub> : force de poussée exercée sur la face amont du rideau

F<sub>p</sub> : force de butée sur la face avale, le coefficient 2/3 étant dû à la répartition triangulaire des pressions

**B: Résultante horizontale nulle**

$$T = F_a - F_p \dots\dots\dots(2.9)$$

Le problème est statiquement déterminé, l'équation en moment est un polynôme de 3 degré en D avec une seule racine réelle positive. L'équilibre horizontal des efforts permet ensuite le calcul de la force T à appliquer au tirant. La butée du terrain est la seule force qui empêche le rideau de pivoter autour du point d'attache du tirant d'ancrage. Il est indispensable d'introduire un coefficient de sécurité. Pour cela, on divise par deux les coefficients de butée déduits dans des tables. Il est également de pratique courante, de ne pas utiliser de coefficient de sécurité dans le calcul, mais de multiplier la fiche par la racine de deux. On double bien la valeur de la butée, mais on augmente légèrement la poussée, si bien que le coefficient de sécurité correspondant à la nouvelle fiche est inférieur à 2. Dans ce cas, on doit multiplier la fiche par 1.7 au lieu de 1.41 pour retrouver le coefficient de sécurité égal à 2.

**A: Cas de la présence d'eau**

Nous avons jusqu'ici supposé implicitement que le matériau était sec. Dans le cas où de l'eau est présente dans le massif, le calcul doit la prendre en compte. La stabilité de l'ouvrage se calcule alors en incluant les efforts dus à l'eau et calculés séparément, comme indiqué sur la figure suivante. S'il y a écoulement d'eau dans le massif, il faudra commencer par résoudre le problème hydraulique [3].

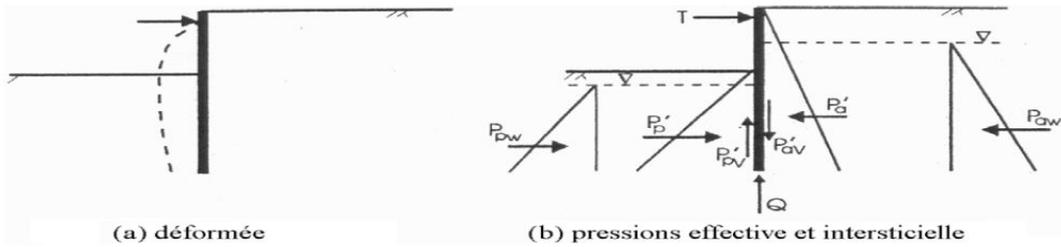


Fig. 2.8.Cas de la présence d'eau.

**2.5.1.2: Rideau non ancré en tête et encastré en pied :**

Un rideau non ancré, battu dans un sol pulvérulent, subit une rotation autour d'un point O situé dans sa partie en fiche. La fig.2.9 ci après montre les déplacements du rideau et les efforts normaux correspondants.

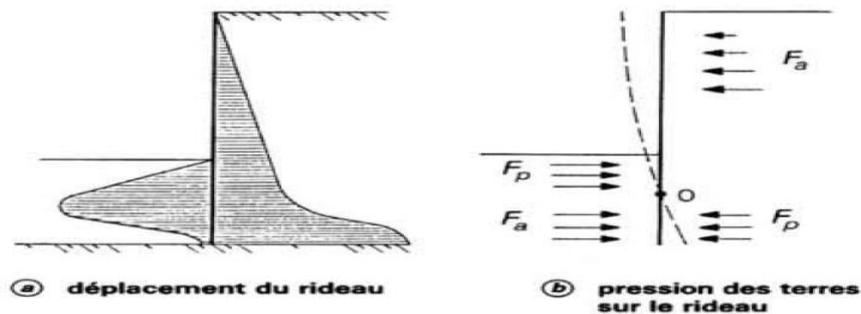


Fig. 2.9.Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête

Le calcul peut se faire par la méthode de Rankine, à partir des hypothèses simplificatrices suivantes :

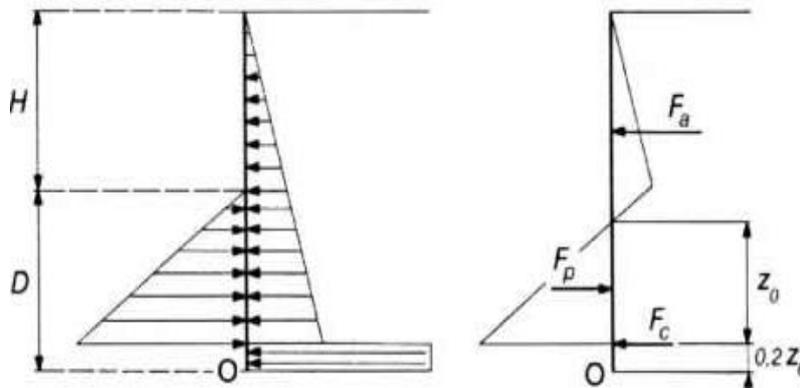
- Le sol des deux côtés du rideau, au-dessus du point de rotation O, est en état d'équilibre limite.
- Les efforts de contre butée sont équivalents à une force horizontale  $F_c$  appliquée au niveau du centre de rotation O.
- On prend généralement une hauteur de contre butée égale à 20 % de la hauteur de butée  $z_0$ .
- Dans ce cas les inconnues du problème sont la hauteur de butée  $z$  La force de contre butée  $F_c$  s'obtient en écrivant qu'en projection horizontale la résultante générale des forces s'exerçant sur le rideau est nulle, soit :  $F_c = F_p - F_a$  et la force de contre butée  $F_c$ . La valeur de  $z_0$  est déterminée en écrivant l'équilibre des moments autour du point O, ce qui donne une équation du troisième degré

en  $z_0$ , analogue à celle donnant la valeur de la fiche D dans le cas où le rideau est simplement buté en pied. La fiche du rideau a alors pour expression:

$$D = H/K^2 p \cdot 1 + Z_0 + 0.2Z_0 - 1 \dots \dots \dots (2.10)$$

La force de contre butée  $F_c$  s'obtient en écrivant qu'en projection horizontale la résultante générale des forces s'exerçant sur le rideau est nulle, soit :

$$F_c = F_p - F_a \dots \dots \dots (2.11)$$

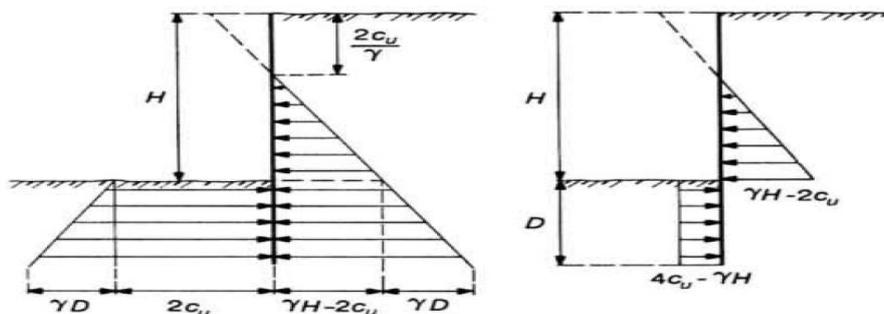


**Fig. 2.10.** Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré

Il est alors possible de déterminer la valeur maximale du moment fléchissant dans le rideau à partir du diagramme des pressions, et de choisir un type de palplanche d'inertie convenable.

**Cas des rideaux fichés dans l'argile :**

Les rideaux fichés dans l'argile et supportant un remblai de sol pulvérulent, ou les rideaux foncés entièrement dans de l'argile, se calculent par des méthodes tout à fait analogues. Il faut cependant noter que, pour l'argile, le calcul doit être fait à la fois à court terme ( $c_u, \phi_u = 0$ ) et à long terme ( $c', \phi'$ ). Ainsi, l'étude d'un rideau battu dans une argile est plus complexe que celle d'un rideau battu dans un sable, puisqu'il faut tenir compte de l'évolution dans le temps du comportement de l'argile.



**Fig. 2.11.** Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile.

L'équilibre des poussées et des butées s'exerçant sur un rideau non ancré dans une argile n'est possible que si l'on a l'inégalité :

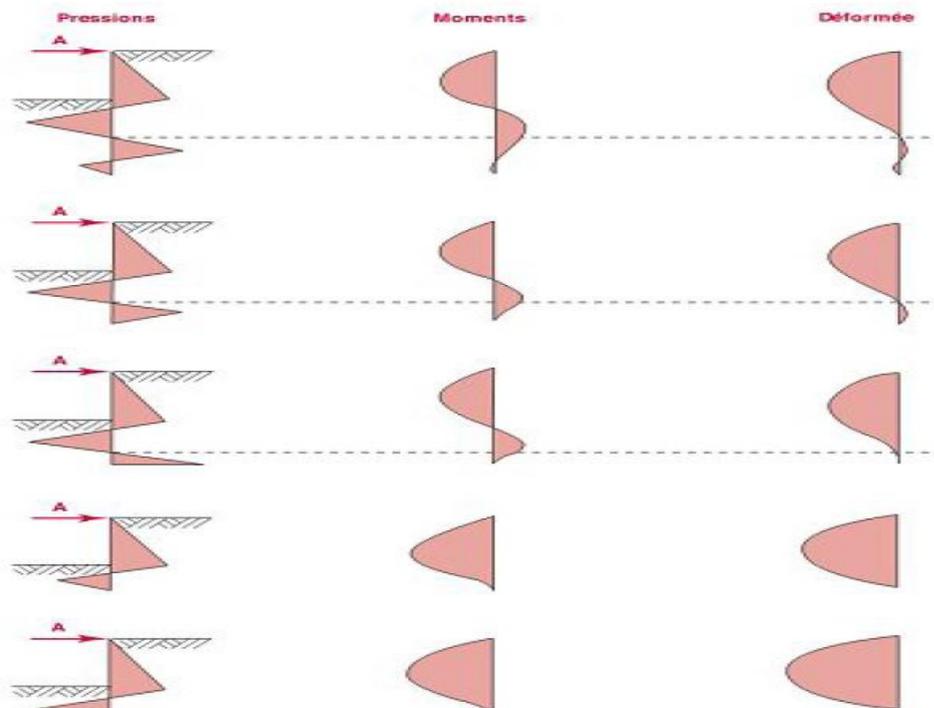
$$C_u \geq \gamma H/4 \dots \dots \dots (2.12)$$

**2.5.1.3. Mur encastré en pied et ancré en tête :**

**2.5.1.3.1. Hypothèses :**

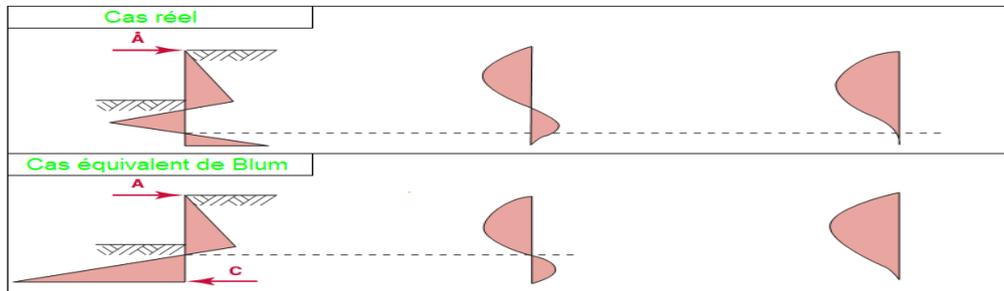
analyse l'effet de l'allongement de la fiche sur la répartition de la pression des terres, du moment et du déplacement de l'écran [3]. Il observe que:

- les ouvrages courts ( $H < 3m$ ) sont simplement butés dans le sol.
- L'allongement de la fiche entraîne l'apparition d'un moment dit d'encastrement, et la fiche est alors encastrée dans le sol.
- Un très grand allongement de la fiche ne produit pas d'augmentation significative de l'encastrement et que la longueur optimale d'encastrement est celle pour laquelle la tangente à la déformée en pied passe par le point d'ancrage.
- La déformée d'un rideau diminue en profondeur, et le moment maximal est celui qui se trouve vers le milieu de la palplanche. Il faut s'assurer que le moment au point d'ancrage n'a pas une valeur plus forte.



**Fig. 2.12.** Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements dans l'écran de soutènement.

Blum propose ensuite afin de simplifier le calcul de représenter les efforts de contrebutée par une force localisée passant par le centre de rotation, avec une majoration de la fiche  $f_0$  comme représenté dans la figure suivante:



**Fig. 2.13.**Distribution idéalisée de la pression des terres.

Le problème ainsi posé possède 3 inconnues, la force d'ancrage T, la longueur de la fiche  $f_0$  et la résultante de contre butée R [3].

#### **2.5.1.3.2. Levée de l'indétermination :**

La résolution des trois inconnues requiert une troisième équation. Pour lever l'indétermination, Blum fait appel à la flexibilité de l'écran théorie des poutres équivalentes et propose deux solutions :

##### **A: Première approche**

Il estime que la longueur de fiche optimale est celle qui permet d'obtenir une tangente à la déformée en pied passant par l'ancrage. On intègre cette condition en calculant la déformée selon la théorie de la résistance des matériaux. Ce travail est fastidieux (méthode de la ligne élastique).

##### **B: Deuxième approche**

Il est fournie par Blum qui remarque que dans le rideau, les points de moment nul, inflexion de la déformée et de pression des terres nulle, inflexion du moment sont voisins, donc il propose de les confondre. On peut alors couper l'écran en deux poutres isostatiques sur appui simple au niveau de ce point, et résoudre le problème [3].

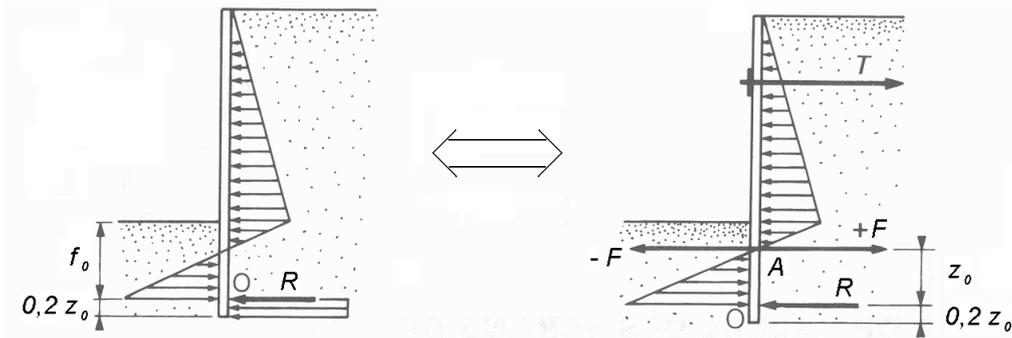


Fig. 2.14 .Résolution par la méthode de la poutre équivalente.

On commence par calculer la profondeur du point de pression des terres nulle. En pratique, lorsque  $\varphi$  est compris entre  $25^\circ$  et  $30^\circ$  on peut admettre  $a=0.1H$ . L'équilibre de la poutre supérieure donne les valeurs de  $T$  et  $F$ , déduire par la suite les valeurs de  $R$  et  $z_0$  avec celui de la poutre inférieure.

#### 2.5.1.4.Théorie du coefficient de réaction du sol :

##### 2.5.1.4.1.Contexte :

La technique de Blum ne prend pas en compte la raideur du sol et considère l'état limite de poussée ou de butée dans tout le massif. De plus, la chronologie de la construction est ignorée. Or l'interaction sol structure s'est révélée être un paramètre déterminant pour la compréhension du fonctionnement des écrans de soutènement. La méthode du coefficient de réaction du sol a pu, parallèlement au développement de la puissance de calcul, corriger ces écueils.

##### 2.5.1.4.2.Hypothèses :

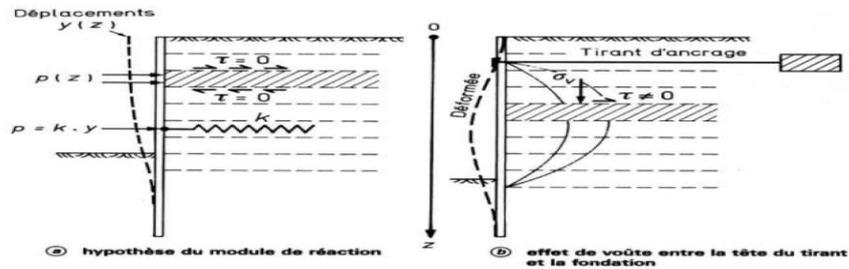
Afin de prendre en compte la rigidité du mur, celui ci est assimilé à une poutre verticale plantée dans le sol, de module  $E$  et d'inertie  $I$ . Dans la phase élastique la relation entre la pression des terres  $\sigma_h$  et le déplacement latéral  $\Delta$  a pour expression:

$$\sigma_h = k_0 \gamma z + k \Delta \dots\dots\dots(2.13)$$

Avec:  $K_0$ : Coefficient de pression latérale des terres au repos ( $\approx 1 - \sin \varphi$  dans les sables).

$K$ : Coefficient de réaction en ( $\text{kN/m}^3$ ). Le massif de sol est considéré comme étant composé de minces couches glissant les unes sur les autres, c'est à dire qu'il ne

reprend pas d'efforts de cisaillement. Cette hypothèse revient à considérer que les plans horizontaux sont des plans principaux, et que les directions principales des contraintes sont verticale et horizontale. Il est évident que ce n'est pas là qu'une approximation de la réalité, et d'autant plus inexacte que les déplacements de l'écran et du sol s'éloignent d'une translation horizontale.



**Fig. 2.15.**Incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et le développement d'un effet de voûte.

La pression des terres  $\sigma$  Outre les sécurités classiques vis à vis d'une rupture de l'ouvrage par renversement ou grand glissement, la méthode consiste à vérifier que les déformations du rideau restent en tout point admissibles, c'est à dire que la contrainte maximale dans une palplanche ne dépasse pas le niveau de contrainte admissible pour l'acier, soit:  $\sigma_h$  qui s'applique sur l'écran est fonction du déplacement latéral de celui-ci [4].

### **2.5.2. Stabilité interne d'un écran de soutènement :**

La particularité des rideaux de palplanches est qu'ils agissent comme des murs flexibles. Une fois calculée la longueur de la fiche, il faut s'assurer que la paroi soumise à la pression des terres ne va pas se déformer de façon excessive et plier. Il faut donc vérifier d'une part que le moment maximal reste admissible et d'autre part que la flèche est acceptable.

#### **2.5.2.1. Vérification du moment dans la palplanche :**

Sous un moment excessif, une palplanche peut plier. On prendra donc toujours soin de vérifier que le moment maximum est admissible en calculant celui ci grâce à la résistance des matériaux. La palplanche est représentée par une poutre élastique dont les caractéristiques géométriques sont données par les fabricants. Le moment de flexion dans l'écran est obtenu par intégration de l'équation de la résistance des matériaux:

$$\frac{d^2M}{dz^2} = -\sigma_h \dots\dots\dots(2.14)$$

Outre les sécurités classiques vis à vis d'une rupture de l'ouvrage par renversement ou grand glissement, la méthode consiste à vérifier que les déformations du rideau restent en tout point admissibles, c'est à dire que la contrainte maximale dans une palplanche ne dépasse pas le niveau de contrainte admissible pour l'acier, soit:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{\frac{2I}{b}} \leq \sigma_a \dots\dots\dots(2.15)$$

En assimilant la palplanche à une poutre dont la section a pour inertie I, pour épaisseur b, et dans laquelle le moment maximal est  $M_{\max}$ . D'où  $\sigma_e$  est la limite élastique de l'acier.

**2.5.2.2. Vérification des déformations**

$$\sigma_a = \frac{2}{3} \sigma_e \dots\dots\dots(2.16)$$

Les niveaux des déplacements maximaux sont conditionnés par le contexte de réalisation de l'ouvrage, un site urbain exigera par exemple des déplacements très faibles. Au vu des conditions retenues, un calcul de la déformée de la poutre au moyen de la théorie de la résistance des matériaux permettra de comparer les déplacements calculés à la consigne. On procédera par intégration de l'équation :

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \frac{-M}{EI} \dots\dots\dots(2.17)$$

**2.6. Méthodes classiques de calcul des blocs d'ancrage :**

**2.6.1.L'évaluation de l'effort d'ancrage Tu :**

Il est fonction des coefficients de poussée et de butée, ainsi que les caractéristiques géométriques des blocs d'ancrage. Lorsque les différents blocs d'ancrage ne forment pas un rideau continu, l'équilibre n'est plus bidimensionnel, on ne peut donc pas utiliser les schémas classiques.

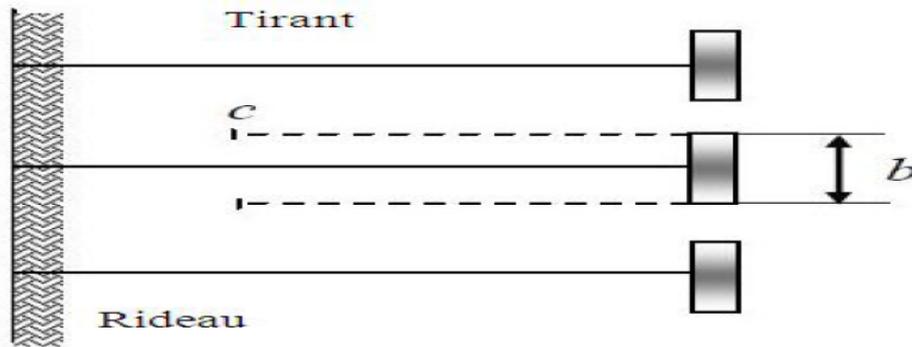


Fig. 2.16. L'ensemble rideau et tirant d'ancrage.

### 2.6.2. L'hypothèse de calcul :

La plus simple consiste à supposer que l'effort d'ancrage transmis par le tirant, est équilibré par la résultante des efforts qui se manifestent de part et d'autre du bloc. Nous pouvons en première approximation, prendre en compte le frottement qui agit sur les deux surfaces triangulaires verticales  $cfg$  passant par les extrémités du bloc (Costet et Sanglerat).

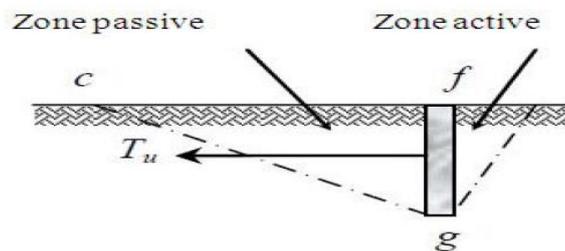


Fig. 2.17. Résistance ultime de l'ancrage.

### 2.6.3. La résistance ultime du bloc d'ancrage :

Elle est essentiellement due à la pression passive du sol en aval, elle dépend de son emplacement dans le massif soutenu, la figure ci après montre les trois cas rencontrés :

- L'ancrage est sans aucune résistance, s'il est situé à l'intérieur du prisme de rupture (zone active)  $abc$ , puisqu'il se déplace avec le sol.
- La résistance passive de l'ancrage est fortement diminuée, s'il est placé près de la ligne de rupture.

- Pour une mobilisation totale de la résistance passive du bloc d'ancrage, ce dernier doit être placé dans la zone def, la zone passive est située entièrement en dehors de la zone active abc.

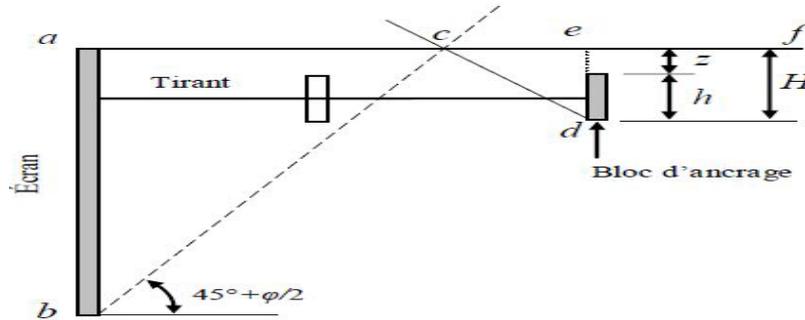


Fig. 2.18. Emplacement des ancrages.

Dans la littérature on trouve plusieurs méthodes de calcul approchées de la résistance d'ancrage, nous pouvons citer les deux suivantes :

#### A: Méthode de Teng

La figure suivante montre un bloc d'ancrage de largeur  $b$  soumis à une force de traction  $T_u$ . Des expériences ont montré qu'au moment de la rupture, il se produit un soulèvement du sol dans une surface de longueur supérieure à celle de l'ancrage. La méthode de Teng est basée sur des équations simples, pour la détermination de la résistance ultime du bloc d'ancrage situé près ou à la surface libre du sol. La résistance ultime est la somme de deux termes, dont le premier représente la résultante de la poussée et de la butée appliquées de part et d'autre du bloc d'ancrage, le deuxième donne la résistance au glissement le long des plans verticaux passant par les deux extrémités latérales. La surface  $c''ec'$  présentée sur la figure suivante est l'une des surfaces concernée par le frottement latérale.

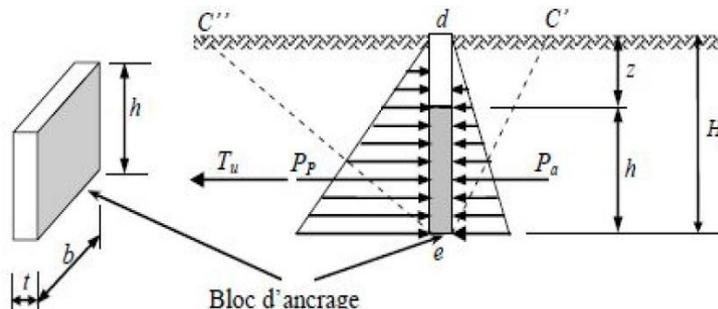


Fig. 2.19. Détermination de la résistance d'un bloc d'ancrage.

Dans un sol pulvérulent, la résistance ultime d'un ancrage court faiblement enterré ( $H/h < 2$ ) est donnée par l'expression suivante:

$$T_u = -b(P_p - P_a) + \frac{1}{3} K_o \gamma (\sqrt{K_p} + \sqrt{K_a}) H^x \tan \phi \dots\dots\dots(2.18)$$

D'après Teng la résistance à la rupture d'un ancrage profond ( $H/h > 2$ ) est approximativement égale à la résistance au poinçonnement d'une semelle dont la base serait située à mi hauteur de l'ancrage [5]. Avec

$T_u$  : Force ultime de l'ancrage.  $\gamma$  : Poids volumique du sol.

$h$  : Hauteur du bloc d'ancrage.  $b$  : Largeur du bloc d'ancrage.

$P_p$  et  $P_a$  : Butée et poussée des terres par unité de longueur du bloc.

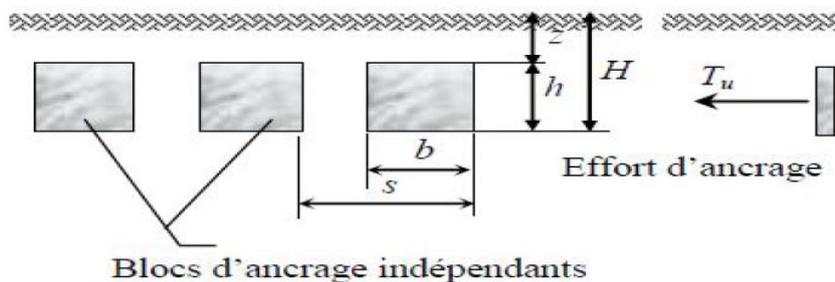
$K_p$  et  $K_a$  : Coefficients de butée et de poussée respectivement.

$K_o$  : Coefficient de poussée au repos pris égal à 0.4 pour le calcul de l'ancrage.

$H$  : profondeur de l'arête inférieure du bloc d'ancrage jusqu'à la surface.

**B: Méthode d'Ovesen Brinch Hansen**

Brinch Hansen a proposé une méthode pour corriger les résultats de la pression passive tridimensionnelle, cette méthode est basée sur les résultats des essais d'Ovesen.



**Fig. 2.20.**La disposition des blocs d'ancrages dans le massif du sol.

L'expression proposée pour le calcul de la résistance ultime de l'ancrage a la forme suivante:

$$T_U = M \cdot (K_p - K_a) P_0' \cdot bh \dots \dots \dots (2.19)$$

. Avec  $P_0'$  : La pression effective à mi-hauteur de l'ancrage.

M : Coefficient correcteur pour tenir compte de l'effet tridimensionnel de la résistance passive. et

$$M = 1 + (K_p - K_a)^{0.67} \times \left[ 1.1 \times E^4 + \frac{1.6 \times B}{1 + 5 \frac{b}{h}} + 0.4 (K_p - K_a) \frac{E^2 \times B^2}{1 + 0.05 \frac{b}{h}} \right] \dots \dots \dots (2.20)$$

$$B = 1 - (b/s)^2 \dots \dots \dots (2.21)$$

$$E = 1 - h / (z+h) \dots \dots \dots (2.22)$$

**2.7. Ancrages doubles :**

Pour diminuer les moments fléchissant dans les palplanches, on doit placer les ancrages aussi bas que possible. Il faut alors éviter le déversement de la partie supérieure du rideau, on obtient ce résultat grâce à une deuxième ligne de tirants attachés en tête de rideau. Pour calculer ce nouvel ancrage on admet généralement qu'il doit pouvoir équilibrer le tiers de la poussée qui s'exerce sur la partie du rideau située au dessus de l'ancrage principal. Lorsqu'il est nécessaire de prévoir deux lignes de tirants superposés, il est indispensable de les fixer sur la même plaque d'ancrage, afin d'éviter les déplacements des deux plaques d'ancrage qui peuvent être différents à cause de l'hétérogénéité du terrain.

**2.8. Choix des coefficients de poussée et de butée :**

Les coefficients de poussée et de butée dépendent d'un certain nombre de paramètres. Parmi ceux ci l'obliquité  $\delta$  de la contrainte sur le rideau. Le choix de  $\delta$ , en butée surtout, a une influence sur les résultats de calcul. Quelques rares auteurs prennent en même temps  $\delta = + \varphi$  pour la poussée et  $\delta = -\varphi$  pour la butée. Certains bureaux d'études adoptent pour la butée  $\delta = -0.7\varphi$ , Verdeyen propose même de choisir une obliquité telle que :

$$K_p = 2 \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \dots \dots \dots (2.23)$$

Mais en général, la plupart des auteurs préconisent d'adopter  $\delta = 0$  pour la butée, c'est à dire de ne compter que sur la butée qui peut développer un équilibre de Rankine. Il est possible de prendre une valeur supérieure de 30% à 50% à celle de l'équilibre de Rankine pour les calculs correspondant à la période d'exécution de l'ouvrage ou lorsque l'ouvrage définitif ne doit pas rester en charge plus de quelques mois. Le choix de  $\delta$  en poussée a moins d'influence, les valeurs couramment utilisées sont 0 et  $2/3\phi$ . Dans les milieux pulvérulents, il faut néanmoins être prudent lorsque le rideau ne peut se déplacer en tête. Dans ce cas il est judicieux de majorer la poussée de 50%.

## **2.9. Le comportement d'un rideau de palplanches :**

### **2.9.1. La nature du sol :**

Le type de sol, la stratification, les caractéristiques anisotropes du matériau et l'état de contraintes in situ sont des facteurs importants dans le comportement d'un écran de soutènement. Pour des raisons de simplification et d'efficacité, les approches empiriques ne peuvent pas tenir compte de détail de ces paramètres, mais se contentent généralement de caractériser le type de sol prédominant.

#### **A. Influence des types de sols sur les tassements**

La première approche détaillée de la question de déformation des tassements est celle de [1] sur les rideaux de palplanches butonnés et ancrés. Afin de faire une bonne classification des zones il faut introduire un indice de stabilité  $N_b$  et le facteur de portance  $N_c$  pour calculer le coefficient de sécurité vis à vis du soulèvement et le déplacement de rideau sous les actions de différentes poussées exercées. On distingue :

**Zone I :** l'utilisation de rideau de palplanches dans les sables, les argiles molles à raides et l'enfoncement se fait par un système de battage en moindre vibrations sur l'environnement tel que  $\delta_v/H \leq 1\%$ .

**Zone II :** dans les argiles très molles à molles, la couche d'argile ayant une extension limitée par une couche d'argile plus raide tel que  $N_b \leq N_c$ .

**Zone III :** dans les argiles très molles à molles, la couche d'argile molle ayant une grande épaisseur sous le niveau de fond de fouille tel que  $\delta_v/H > 2\%$  et  $N_b > N_c$ . Avec

$$N_b = \gamma H / C_u \dots \dots \dots (2.24)$$

tel que  $C_u$  : La cohésion non drainé  $\gamma$  : Poids volumique du sol  $H$  : La profondeur atteinte dans le sol. D'après [1] on a la classification suivante :

Les sols cohérents de consistance très molle à molle :  $C_u \leq 75$  KPa

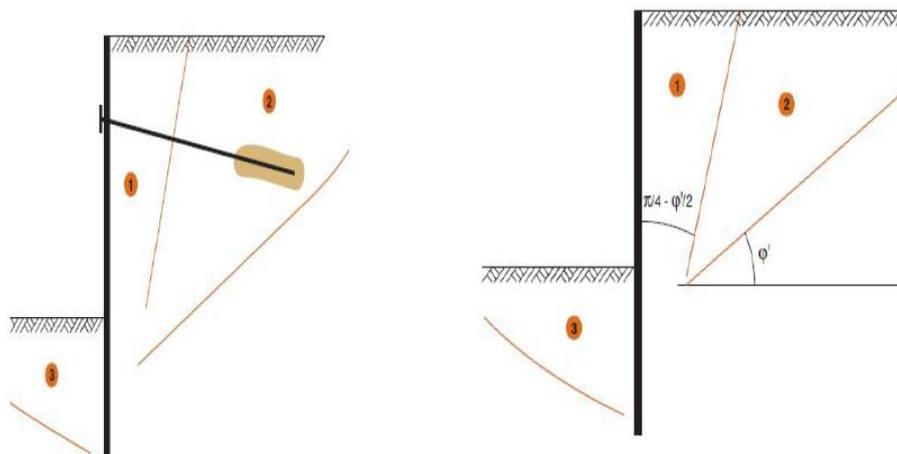
Les sols cohérents de consistance plutôt raide :  $C_u > 75$  KPa.

**B. Identification des parties environnant l'écran de soutènement** On distingue :

**Partie 1** : Le prisme de terrain est directement soutenu ou prisme de poussée, ce prisme de terrain, qui se trouve généralement à l'état d'équilibre limite de poussée, s'étend sur une largeur voisine de la moitié de la hauteur totale de l'écran.

**Partie 2** : La zone de terrain qui se trouve confinée entre ce prisme de poussée et le talus d'éboulement naturel du matériau, cette zone peut s'étendre jusqu'à une distance égale à trois fois la hauteur soutenue.

**Partie 3** : Prisme de terrain se trouve devant l'écran et participant à la réaction d'appui en fiche, ce prisme aussi appelé prisme de butée s'étend sur une largeur à 3 à 5 fois la hauteur en fiche.



**Fig. 2.21.**Parties de terrain associées à un rideau de palplanches

Dans le cas des ouvrages ancrés, le terrain mobilisé devant le massif d'ancrage est étroitement associé à l'ouvrage et il en est de même du terrain situé immédiatement derrière l'ancrage, les dimensions de ce massif de sol sont liées à la longueur des ancrages, mais aussi à la profondeur à laquelle se trouve le massif d'ancrage. De façon conventionnelle, et par extension d'une disposition adoptée pour les ouvrages

sur versants, elle est définie comme la zone s'étendant de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois fois sa hauteur libre [1].

**2.9.2. Les effets de l'eau :**

Les effets de l'eau peuvent se manifester de deux façons :

- Pour les écrans encastrés dans une couche quasi imperméable et interceptant les arrivées d'eau, c'est principalement la pression de l'eau derrière l'écran qui est en jeu.
- Si le pied de l'écran s'arrête dans une couche perméable, l'écoulement d'eau qui s'établit autour de pied a des effets multiples. En amont, il augmente les contraintes effectives et provoque une consolidation des terrains. En aval ce mouvement de l'eau diminue les efforts résistants de la butée et donc la capacité d'appui par le sol et peut être à l'origine d'instabilités hydrauliques (boulance, renard).

**2.9.3. Le type de l'écran :**

Les trois facteurs profondeur, sol et écran sont très fortement liés et le comportement de l'écran est souvent exprimé graphiquement en fonction de ces trois paramètres. Pour les rideaux avec des butons ou appuis la référence à la flexibilité est souvent remplacée par celle de rigidité qui prend en compte du produit EI de l'écran. Outre la rigidité en flexion de l'écran EI, souvent employée par son logarithme :

$$K1 = \ln EI \dots \dots \dots (2.25)$$

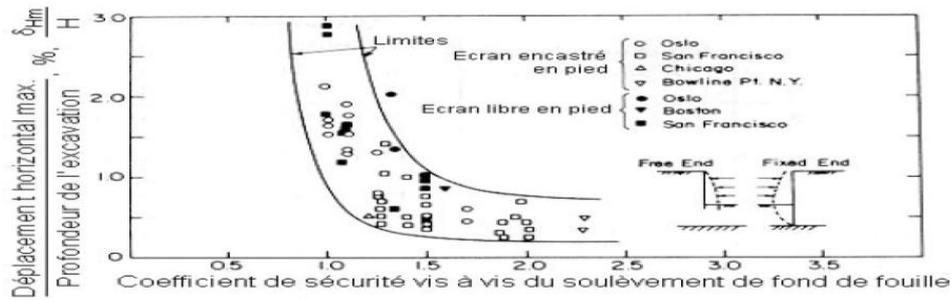
L'expression proposée par [6] pour tenir compte de la profondeur H de la fouille est donnée par la formule suivante :

$$K2 = Lg(H^4/EI) \dots \dots \dots (2.26)$$

La relation qui tient compte de la distance moyenne entre appuis est présentée comme suit :

$$K3 = \frac{EI}{y_w (h_{moy})^4} \dots \dots \dots (2.27)$$

Le premier diagramme mettant une relation les déplacements de l'écran avec le coefficient de sécurité vis à vis de soulèvement de fond de fouille pour les écrans butonnés dans des sols argileux a été proposé par [1].



**Fig. 2.22.** Diagramme pour estimation des déplacements vis à vis du soulèvement de fond de fouille pour des écrans butonnés dans l'argile.

D'après le diagramme, tant que le facteur de sécurité  $F_s$  est supérieur à 1.4 à 1.5, les déplacements latéraux de l'ouvrage restent faisables, de l'ordre de 0.5% de la profondeur de la fiche. Par contre si  $F_s$  est inférieur à 1.5% les déplacements latéraux deviennent importants. En ce qui concerne les tassements du sol soutenu, on observe que leur amplitude est généralement comprise entre 50% à 100% de l'amplitude des déplacements latéraux de l'écran de soutènement.

#### 2.9.4. La hauteur libre de l'écran :

Elle décrit d'une part la profondeur de la fouille devant l'écran, mais aussi le niveau d'un éventuel remblai en arrière par rapport au fond de la fouille devant l'écran. Le terrassement devant l'écran enlève une partie de l'appui de l'écran sur le sol. La différence des sollicitations exercées par le sol de part et d'autre de l'écran augmente avec l'avancement des travaux. Cette différence est compensée par des éléments d'appui artificiels, mais la mobilisation de ces appuis nécessite un certain déplacement. Le déchargement devant l'écran entraîne les déplacements horizontaux importants pour un rideau simplement buté.

#### 2.9.5. La fiche de l'écran :

La profondeur de l'encastrement dans le terrain joue un rôle important vis à vis de la stabilité de l'ouvrage. Plus la fiche est profonde, plus les coefficients de sécurité vis à vis de défaut de la fiche et d'instabilité est importante.

soulignent l'importance de la fiche, principalement parce que, dans des conditions de terrain relativement mauvaises, un encastrement profond dans des sols rigides peut réduire nettement les déformations d'un soutènement.

**2.9.6. L'installation de l'écran :**

Les vibrations causées par l'installation des palplanches peuvent donner lieu à des tassements assez importants autour de l'écran. Donc l'installation peut avoir une influence plus ou moins importante sur l'état des contraintes dans le terrain.

**2.9.7. Systèmes d'appuis :**

**A: Le type d'appuis**

Les déformations sont élevées principalement pour les systèmes butonnés que pour les systèmes ancrés, les tassements dans les systèmes ancrés peuvent être dus aux scellements des tirants. Une injection très importante ou la perte de coulis peut entraîner un soulèvement du terrain au dessus de la zone de scellement. Une longueur insuffisante de tirant peut causer ou toute la zone ancrée commence à se déplacer plus au moins en bloc. Cela pratiquement difficile à maîtriser dans les argiles sur consolidées mais une analyse plus précise montre que les rideaux de palplanches sont pratiquement les seuls à se déplacer de plus de 1% .

**B: L'espace horizontal et vertical entre appuis**

L'espace horizontal et vertical entre appuis joue un rôle très important dans le comportement de rideau de palplanches avec tirants et butons, puisque il décrit l'allure de la déformée de la partie libre de l'écran sous l'action appliquée. Si on introduit des facteurs décrivant, d'une part, la densité d'appuis  $F_n$  : Le nombre de lits d'appuis  $\Delta H$ : La profondeur de la fouille  $F_D$  et d'autre part l'intensité  $F_I$  des appuis .

$$F_D = \frac{n}{\Delta H \cdot d_{hor}} \quad [L/m^2] \quad \dots\dots\dots(2.28)$$

$$F_I = \frac{EA}{L} F_D \quad [KPa/m] \quad \dots\dots\dots(2.29)$$

On a :  $n$  : Le nombre de lits d'appuis

$d_{hor}$  : L'espace horizontal des appuis

$E$  : Le module de d'Young

$A$  : La section de la surface d'appuis

$L$  : La longueur de scellement de l'appui considéré

### **C: L'utilisation de bermes**

Une berme est une masse de sol laissée en place devant l'écran lors d'un terrassement, par exemple en dessous du lit inférieur d'appuis. Le poids d'une berme augmente les contraintes devant l'écran et peut réduire les déplacements latéraux de 50% pendant qu'elle est en place. Ainsi les déplacements finaux seront également réduits. Même pour l'utilisation de bermes pour des conditions non drainées à court terme augmente plus efficacement la stabilité d'un écran de soutènement que la prolongation de la fiche [1].

#### **2.9.8. Autres facteurs :**

##### **a. L'effet de temps**

Cet effet concerne surtout les sols fins cohérents, pour lesquels la consolidation entraîne une augmentation des déplacements avec le temps. Le comportement à long terme d'un écran est assez difficile à suivre pour des raisons multiples, généralement les instrumentations auscultées manuellement ne sont plus accessibles après la fin des travaux. L'utilisation d'une instrumentation entièrement automatique n'est pas encore très répandue, notamment en raison de coûts non négligeables [1].

##### **b. la reconnaissance des sols**

Les facteurs cités sont des paramètres influençant de façon directe le comportement d'un écran soutènement. En ce qui concerne les caractéristiques du sol, il est également intéressant de caractériser l'étude de reconnaissance des sols à l'origine de ces paramètres.

##### **c. Température**

Trois modes d'influence de la température peuvent être distingués :

**Cas1** : rideau avec butons en profilés d'acier, la température joue un rôle important vis à vis des efforts dans les butons. L'intensité de cette influence dépend de la nature et de la géométrie de butonnage. Bien évidemment, des butons en bois ont un autre comportement que de butons en acier. Pour ces derniers une simple peinture blanche avec de la chaux peut réduire l'influence du soleil de moitié .

**Cas2** : l'écran lui même peut être sensible au rayonnement du soleil. Des parties à l'ombre peuvent avoir un comportement différent de celui des parties ensoleillées. Plus généralement, on peut aussi observer un effet saisonnier.

**Cas3** : on peut signaler l'importance des déformations hygrothermiques de béton, par exemple le refroidissement et le retrait d'une poutre de couronnement .

**d. Influence d'une force horizontale croissante sur un rideau de palplanches**

Pour de faibles valeurs de  $F$ , la réaction du sol est proportionnelle aux déplacements du rideau et le sol se comporte comme un matériau élastique (fig. a). A partir d'une valeur  $F_2$  de  $F$ , la réaction du sol se réduit à une butée et à une contre butée. Tant que  $F$  reste inférieur à la valeur  $F_3$ , il n'y a pas de déplacement du pied du rideau (fig. b). Lorsque  $F$  atteint la valeur  $F_3$ , le pied du rideau se déplace vers l'amont, ce qui mobilise la contre butée maximale. Le moment d'encastrement est alors maximal, on dit qu'il y a encastrement complet dans le sol (fig. c). Lorsque  $F$  continue à croître, la butée augmente, tandis que la contre butée diminue, le rideau est dit partiellement.

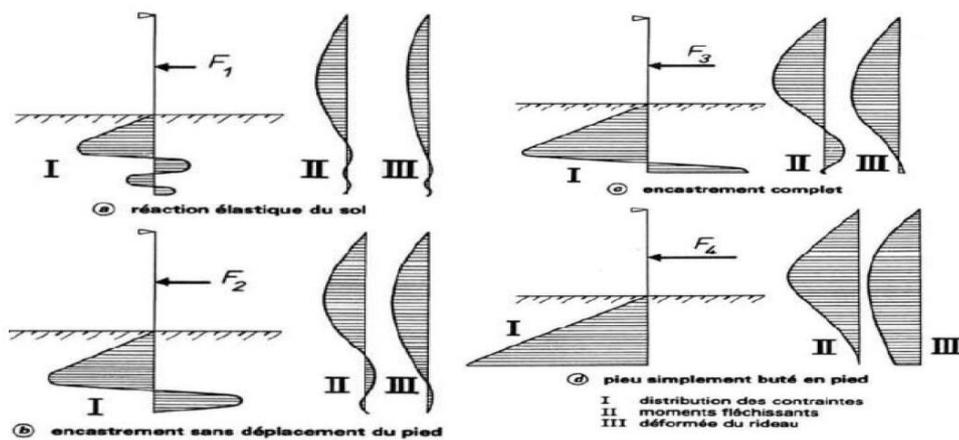


Fig. 2.23. Comportement d'un rideau ancré en tête soumis à une force horizontale croissante.

**e. Influence du frottement :** Si on étudie l'influence du frottement  $\phi$  sur le rideau de palplanche, on observe une inclinaison des efforts de poussée et de butée :

**En poussée** Le sol a tendance à descendre, la force est inclinée vers le bas  $\sigma$

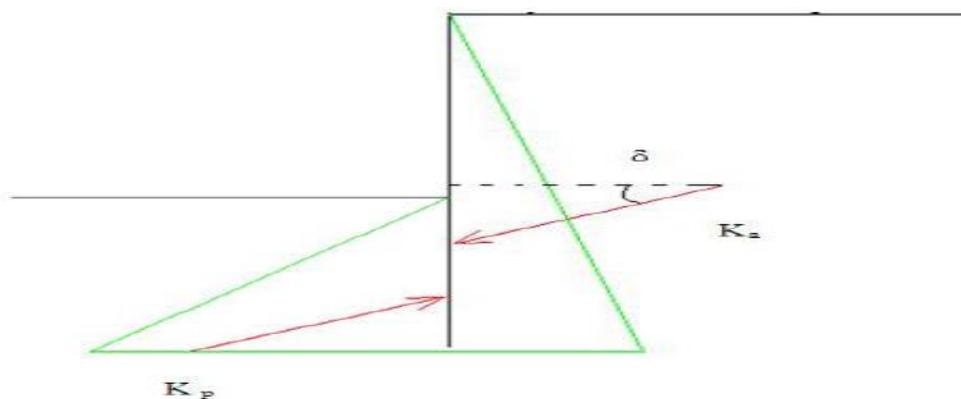


Fig. 2.24. Cas d'un rideau avec frottement

Lors de la projection des efforts pour écrire l'équilibre en moment, l'angle étant le même en poussée et en butée, un facteur en  $\cos\phi$  affecte les poussées des terres. Pour l'écriture de l'équilibre en force dans la contrebutée, seuls les coefficients de poussée et de butée sont affectés par l'angle  $\phi$ . En pratique, on prend souvent l'hypothèse  $\delta_h = K_a \sigma_v \cos \delta_a$ . En butée Le sol est poussé vers le haut, la force est inclinée vers le haut

$$\sigma_h = K_p \sigma_v \cos \delta_p \quad a = 0 \quad \dots\dots\dots(2.30)$$

et

$$\delta_p = -\phi \quad \dots\dots\dots(2.31)$$

Ceci n'affecte que peu les efforts structurels observés. Empiriquement, l'influence du frottement du rideau se révèle donc faible, un calcul sur un cas pratique permettant de s'en convaincre.

**2.10. Le rapport des déformations horizontales et verticales :**

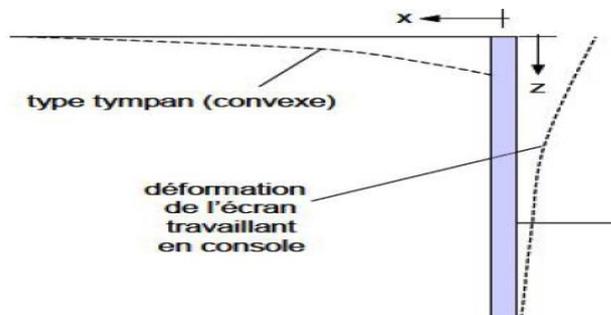
On peut distinguer deux profils de déformations de sol et de l'écran de soutènement, le profil convexe en tympan et le profil concave :

**2.10.1. Les types de profils :**

**A. Le profil convexe en tympan**

La forme convexe s'établit dans le cas où l'essentiel de la déformation de l'écran se développe lors de la première phase des travaux, pour tous les écrans travaillant en console, c'est à dire la partie fiche de la palplanche est importante.

L'augmentation de la déformation reste relativement petite pendant les phases suivantes. La déformée de rideau de palplanches diminue avec la profondeur et s'annule en fiche.



**Fig. 2.25.** Profil de tassement de type convexe en tympan.

## B .le profil concave

Si les déformations sont limitées en tête de rideau au moyen d'un appui tel que le tirant d'ancrage, la poutre de couronnement, le buton. Elles se manifestent plutôt dans sa partie inférieure lors de l'avancement des travaux, le profil des tassements tend à prendre une forme concave.

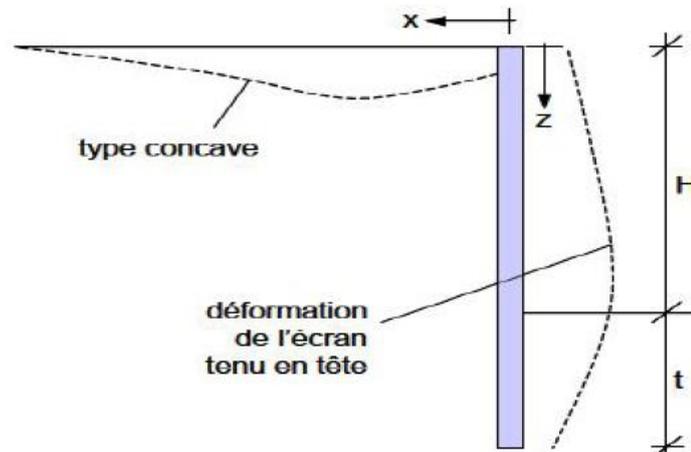


Fig. 2.26.Profil de tassement de type concave.

## 2.11. Estimation des tassements :

### 2.11.1.Théorème de Clough et O'Rourke (1990):

On distingue deux types de profils:

**A. Le profil triangulaire** Le profil de tassement est associé à l'utilisation de rideau de palplanches dans les sables et les argiles raides. Le tassement maximal se produit à proximité de l'écran et décroît progressivement à mesure que l'on s'éloigne, il s'annule à une distance égale à deux fois la profondeur de l'excavation dans le cas des sables et trois fois dans le cas des argiles raides.

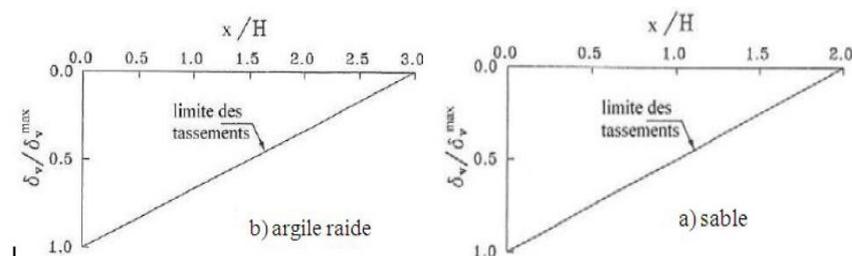
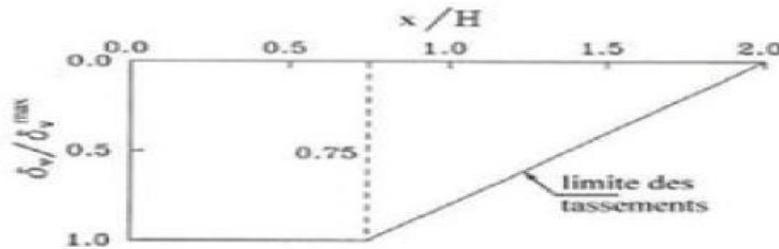


Fig. 2.27.Interaction sol structure de type convexe en tympan.

**B .Le profil trapézoïdal**

Il est associé à l’emploi de rideau de palplanches dans les argiles molles. Le profil de tassement est constant à sa valeur maximale sur une distance égale aux trois quarts de la profondeur de l’écran et diminue ensuite progressivement, pour atteindre une valeur nulle à une distance égale à environ deux fois la profondeur de soutènement.



c) argile molle à moyenne

Fig. 2.28. Interaction sol structure de type concave.

**2.11.2. Théorème de Hsieh et Ou (1998)**

Le tassement de type convexe est décrit en fonction de la racine carrée  $x / H$  par deux lignes droites (a-b) et (b-c). La distance d’influence du tassement peut prendre aussi en compte d’une zone principale avec le tassement maximal et une zone secondaire, moins influencé par le comportement de l’écran.

Pour  $\frac{x}{H} \leq 2$      $\sigma_v = (-0.636 \sqrt{\frac{x}{H}} + 1) \sigma_v^{\max}$  .....(2.32)

Pour  $2 < \frac{x}{H} \leq 4$      $\sigma_v = (-0.171 \sqrt{\frac{x}{H}} + 0.342) \sigma_v^{\max}$  .....(2.33)

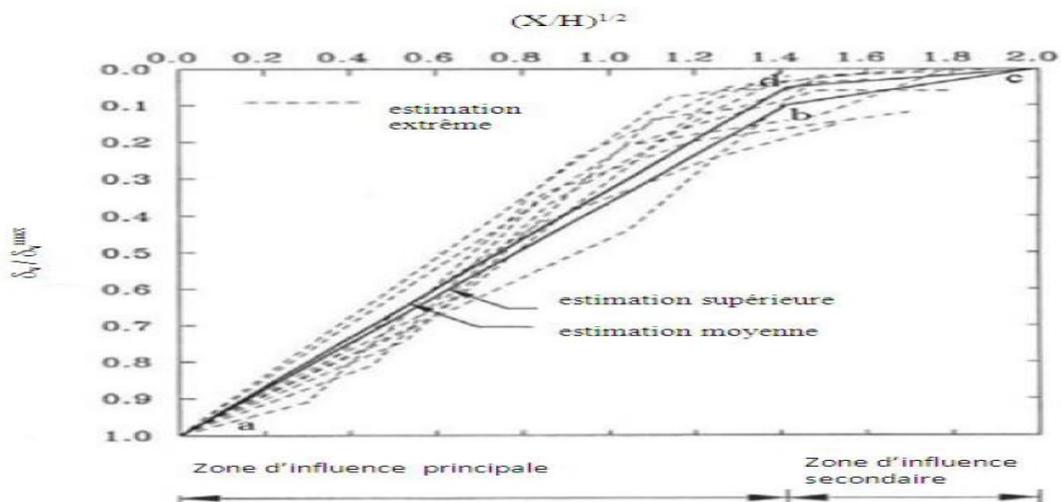
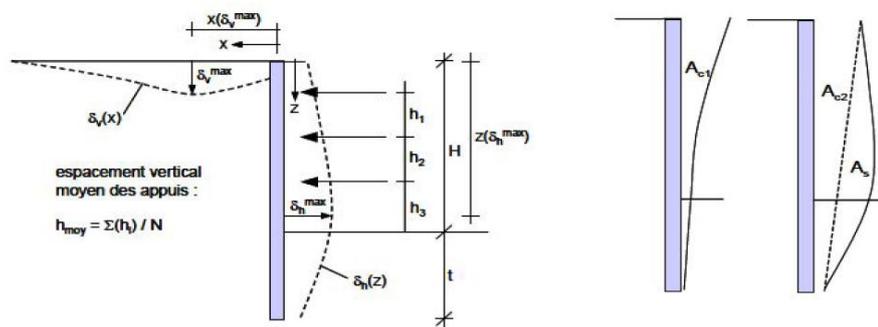


Fig. 2.29.Méthode de détermination des tassements de type convexe

La méthode de Hsieh et Ou [1] est de type semi empirique car elle s'appuie sur trois hypothèses fondamentales :

- Calculer les déformations horizontales par la méthode des éléments finis ou la méthode du coefficient de réaction car les méthodes empiriques ne donnent pas d'information sur la forme de la déformation.
- Le rapport entre le déplacement maximal horizontal et vertical doit appartenir à l'intervalle  $\delta_v^{\max} = 0.25 \delta_h^{\max}$  avec une limite supérieure de  $\delta_v^{\max} = \delta_h^{\max}$ .
- Le profil des tassements peut être déterminé en tenant compte de la forme des déplacements horizontaux, Hsieh et Ou proposent le type concave pour  $A_s > 1.6A_c$  et le type convexe pour  $A_s \leq 1.6A_c$ .

La fig2.30 suivante présente pour les deux modes de déformation des sols, une définition de la surface A des zones influencées par les déplacements horizontaux. La surface  $A_c$  est déterminée comme le maximum des deux composantes possibles  $A_{c1}$  et  $A_{c2}$ , c'est à dire que :  $A_c = \max (A_{c1} \text{ et } A_{c2})$ .



**Fig.2.30.** La déformée d'un rideau de palplanches

Tel que :

H : La profondeur finale de la fouille

$\delta_h^{\max}$  : Déplacement horizontal maximal

t : La fiche de l'écran

$\delta_v^{\max}$  : Tassement maximal à la surface

$h_i$  : Espacement verticale des appuis

N : Nombre de lit d'appui

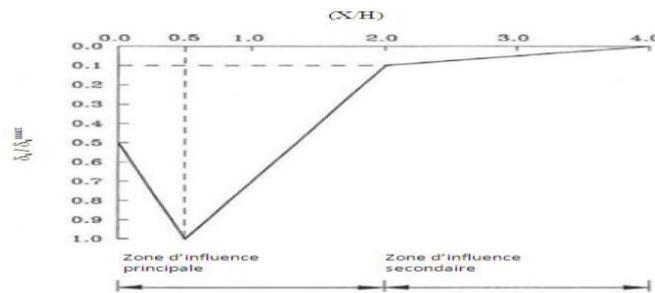


Fig. 2.31. Méthode de détermination des tassements de type concave.

## 2.12. Renard hydraulique :

Lorsqu'une dénivellation de la nappe existe de part et d'autre du rideau, une circulation hydraulique peut se produire qui a pour effet de modifier les conditions de pression interstitielle, et donc les efforts de poussée butée totaux. Le calcul des pressions hydrauliques montre qu'elles ont pour effet d'augmenter la poussée et de diminuer la butée par rapport au cas hydrostatique. Par conséquent, cette modification ne va pas dans le sens de la sécurité et doit être intégrée au modèle. Pour cela, on peut supposer que: Le gradient hydraulique varie linéairement sur la face amont et sur la face avale du mur. Mandel a établi dans ce cas que si le substratum est rejeté à une profondeur infinie, le rapport des pertes de charges peut être estimé en prenant le référentiel de charge en C.

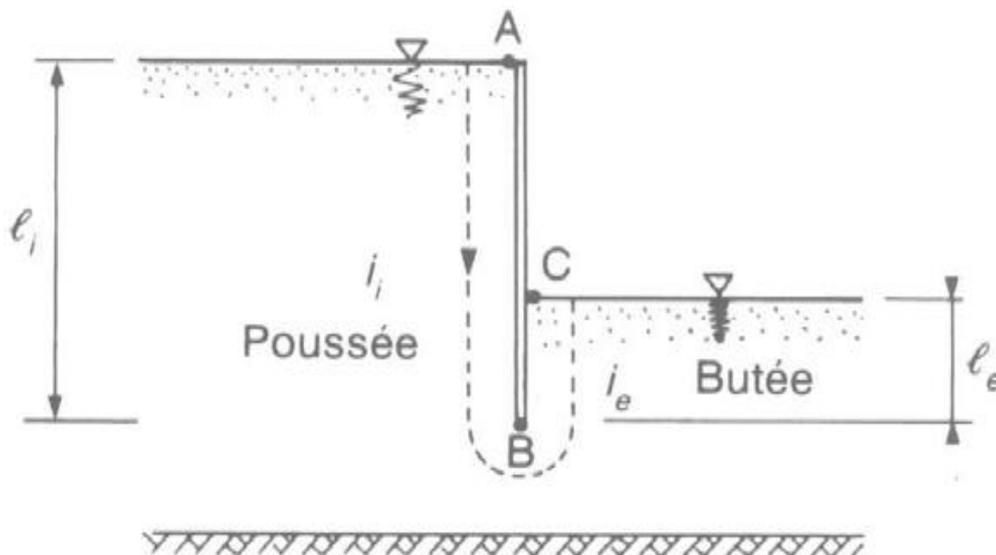


Fig. 2.32. Méthode des gradients hydrauliques moyens.

On a :

$$\rho = \frac{h_B - h_C}{h_A - h_C} = \frac{h_B}{h_A} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{li}{le}}} \dots \dots \dots (2.34)$$

Tel que :

$\rho$  : Le rapport entre les charges hydrauliques en tête et en pied de rideau de palplanches Les définitions des gradients hydrauliques  $i_i$  et  $i_e$  permettent alors d'écrire :

$$i_i = h_A \frac{1 - \rho}{li} \dots \dots \dots (2.35)$$

$$i_e = h_A \frac{\rho}{li} \dots \dots \dots (2.36)$$

Du coté de la poussée :

$$u = \gamma_w (1 - i_i) z_i \text{ et } \sigma'_{ha} = K_a [\gamma - \gamma_w (1 - i_i)] z$$

Du coté de la butée :

$$u = \gamma_w (1 + i_e) z_e \text{ et } \sigma'_{hp} = K_p [\gamma - \gamma_w (1 + i_e)] z_e$$

**2.13 .Effet de barrage d'un rideau de palplanches :**

L'étanchéité d'un écran permet d'éviter le transport de matériaux à travers l'ouvrage et donc la perte de particules fines au sein du massif soutenu. Par contre elle peut provoquer un effet de barrage lorsque la nappe est en écoulement. C'est notamment le cas des ouvrages sur pente. Mais aussi des ouvrages de rive compte tenu des échanges naturels entre les berges et le canal ou la rivière. Cet effet de barrage conduit généralement à une remontée de la nappe derrière l'écran et à une baisse en aval de l'écran et concentration de l'écoulement sous le pied de l'écran. De telles modifications du niveau de la nappe, si elles ne sont pas prévues dans le dimensionnement, peuvent être à l'origine de désordres significatifs. A l'opposé lorsque, le rideau de palplanches soutient une excavation dont le fond est drainé, en présence d'un radier drainant par exemple, la nappe peut se trouver rabattue derrière le rideau de palplanches.

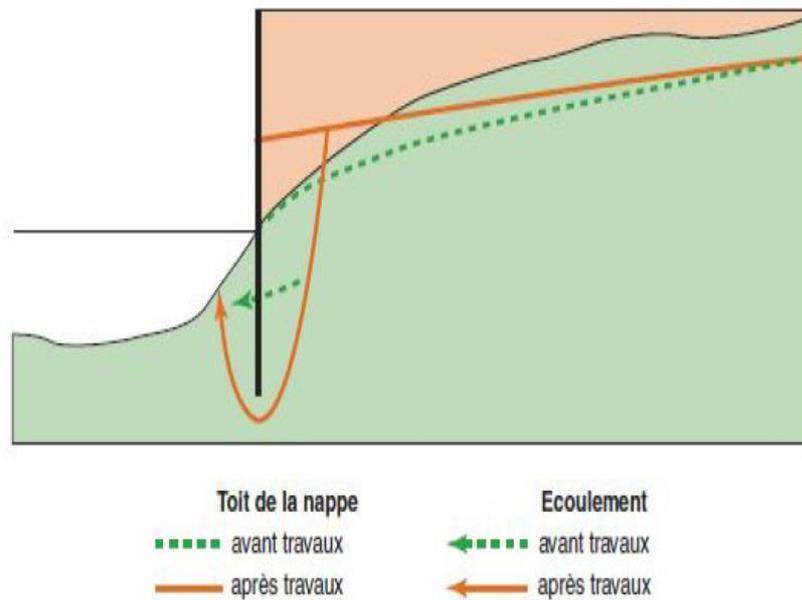


Fig. 2.33.Effet de barrage d'un rideau de palplanches.

## 2.14. Conclusion :

Au terme de ce chapitre, on conclut que l'utilisation des méthodes classiques se basent sur les différentes hypothèses, et quelles restent insuffisantes pour la simulation d'un problème géotechnique. Chacune de ces hypothèses peut avoir une influence importante sur les résultats, car les contraintes et les déformations du soutènement dépendent surtout du mode de construction adopté. Bien que les conditions de calcul soient plus faciles, cette hypothèse correspond rarement à la réalité.

### 3.1. Introduction :

Le problème de la corrosion des armatures s'est révélé assez tôt dans le cas d'armatures en inox ou en alliage léger.

Ces matériaux sont abandonnés depuis maintenant longtemps. Il se pose aussi pour les armatures en acier. Cela a justifié en France diverses investigations et concerne essentiellement des ouvrages construits antérieurement à ([7], [8], [9], [10]). Notre sujet de recherche est l'influence de la corrosion sur le comportement mécanique des ouvrages en terre armée. Cette influence peut être examinée sur plusieurs plans :

d'un point de vue scientifique, la compréhension du comportement d'un ouvrage soumis à la corrosion suppose la connaissance des phénomènes physiques et chimiques mis en jeu, et une étape de traduction de ces phénomènes dans le domaine mécanique à l'échelle de l'ouvrage ;

- de manière plus pratique, la prise en compte de la corrosion des armatures a un impact sur :

- Le dimensionnement des ouvrages
- Les dispositions constructives
- Le suivi de l'ouvrage
- Le déclenchement de procédures de suivi renforcé ou de réparation.

De plus, les préoccupations des gestionnaires d'ouvrages conduisent à considérer plusieurs stades dans l'évolution d'un ouvrage :

- Ouvrage en service normal
- Ouvrages en service présentant des caractéristiques dégradées
- Mode de ruine.

Par rapport au comportement normal des ouvrages, on sera donc amené à envisager des situations particulièrement pénalisantes en termes de vitesse de corrosion ou d'âge de l'ouvrage.

Pour pallier ce problème, après l'échec des métaux passivables (inox et alliage léger), la solution retenue a été la galvanisation. D'autres méthodes ont aussi été envisagées pour assurer la durée de service des structures en acier, comme la protection par un revêtement empêchant les agents agressifs de parvenir à la surface du métal (peinture, revêtements organiques ou minéraux - appelés protections passives), ou le recours à une surépaisseur de métal qui est alors sacrifiée aux phénomènes de corrosion.

D'autres techniques de protection (dites protections actives), utilisées seules ou en complément d'une protection passive, consistent à modifier la nature même des réactions

chimiques d'oxydation ou leur cinétique. Il s'agit de la protection cathodique de l'acier soit par courant imposé, soit par anode sacrificielle. La galvanisation peut aussi être considérée Comme une anode sacrificielle répartie.

Ces techniques sont mises en œuvre généralement pour des structures immergées ou enterrées, où il est impossible d'intervenir pour effectuer des opérations d'entretien.

### **3.2. Notion de corrosion :**

La corrosion peut définie de plusieurs manières :

- a) Destruction ou détérioration des matériaux à travers l'interaction d'un environnement agressif.
- b) Destruction des matériaux par des moyens non mécaniques.
- c) Retour des métaux et alliages à leur état naturel de minerais (état le plus stable).
- d) La corrosion est définie, comme une «interaction physicochimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique dont ils font partie. Cette interaction est généralement de nature électrochimique ».

Quelle que soit la définition adoptée, le résultat est le même : il conduit à la réparation, soit au remplacement de la structure endommagée.

On voit donc que le terme corrosion est beaucoup plus général que celui de rouille qui est réservé exclusivement à la corrosion du fer et des aciers peu alliés, corrosion qui se traduit surtout par la formation d'oxyde ferrique.

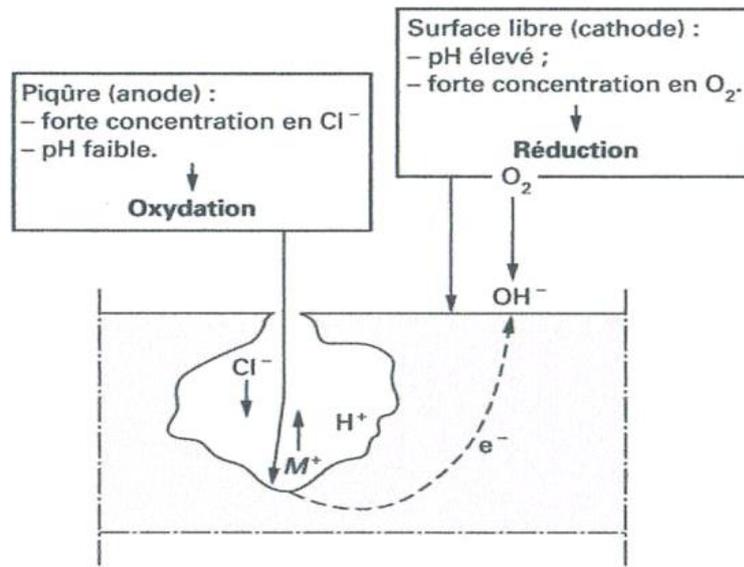
### **3.3. Les types de corrosion :**

Il existe différents types de corrosion

#### **3.3.1. La corrosion localisée par piqûres :**

C'est une forme de corrosion localisée produite par certains anions, notamment les halogènes et plus particulièrement les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre. Elle intervient sur le point faible d'une surface (joints de grains, inclusions de sulfures, ségrégations, précipitations,...) en présence d'un milieu agressif.

Elle se manifeste par la formation de petites cavités (piqûres), alors que la surface passive reste intacte. La propagation d'une « piquûre » peut aller jusqu'à la perforation totale de la pièce métallique (**Fig. 3.1**) .

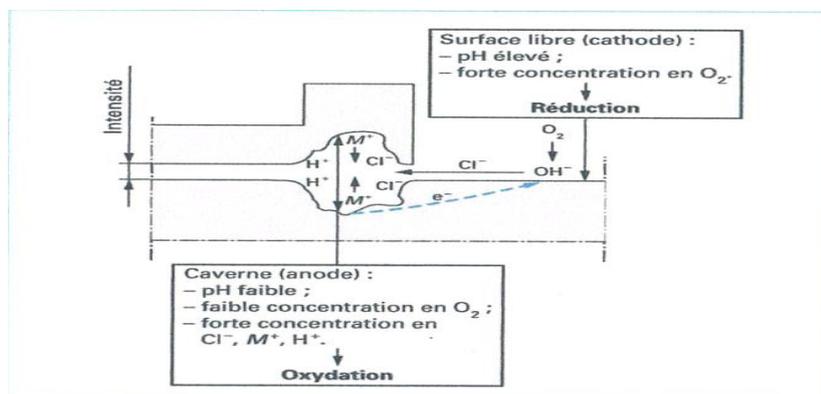


**Fig. 3.1.** Propagation d'une piquûre en milieu chloruré

### 3.3.2 .La corrosion localisée par cavernes :

Comme son nom l'indique, ce mode de corrosion prend naissance dans des cavernes ou des crevasses ou des espaces confinés dus à la conception des pièces ou des assemblages, ou à la présence de dépôts se formant durant l'utilisation.

Elle se produit dans des zones de rétention des solutions agressives contenant des ions chlorures. En fait, il s'agit d'une piquûre qui va croître rapidement du fait que la solution corrosive en contact avec l'inox s'acidifie au cours du processus de corrosion. Ceci peut alors conduire à la formation de trous assez dommageables qu'on appelle encore cavernes.



**Fig. 3.2.** Corrosion caverneuse dans un milieu chloruré

**3.3.3. La corrosion généralisée ou uniforme :**

C'est la forme la plus classique. C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Cette attaque est observée, par exemple, sur les métaux exposés aux milieux acides. La corrosion uniforme constitue la dissolution quasi uniforme de tous les points constitutifs de la surface d'un matériau qui sont attaqués sensiblement à la même vitesse par le milieu corrosif. Les surfaces anodiques et cathodiques se déplacent en contact avec l'agent agressif. Elle se traduit par une diminution d'épaisseur par unité de temps ou par perte en poids par unité de surface, et par unité de temps. La corrosion uniforme se rencontre le plus fréquemment lorsque l'alliage métallique est en contact avec des acides tels que : l'acide sulfurique, l'acide nitrique, l'acide phosphorique, etc.

Tout l'art de la lutte contre la corrosion sera de choisir un couple alliage métallique-solution de manière à ce que la nuance retenue se trouve à l'état passif dans le milieu considéré. Compte tenu de la grande variété des nuances, les aciers inoxydables sont, en général, capables de résoudre ce problème.

**3.3.4. La corrosion galvanique ou de contact :**

Appelée aussi corrosion bimétallique, Elle se produit quand deux métaux de nature différente sont en contact avec la formation d'une pile galvanique.

Le métal ayant le potentiel de corrosion le plus négatif subit une corrosion accélérée par l'autre métal, le métal le moins noble qui va se corroder.

Lors d'un couplage ou liaison électrique entre deux alliages métalliques différents, il s'établit un courant électrique entre eux.

Ce phénomène est la conséquence directe de leur différence de potentiel.

*Le tableau 3.1* présente une classification des métaux et de quelques alliages en fonction de leur potentiel de dissolution dans l'eau de mer (les métaux sont classés ici par ordre croissant d'activité).

**Tableau.3.1.**Série galvanique, obtenu dans l'eau de mer à 25°C

Matériau protégé (cathodique ou plus noble)	
	Platine
	Or
	Graphite
	Hastelloy C
	Acier inoxydable
	Titane
	Argent
	Inconel base 600
	Nickel
	Alliages de cuivre
	Etain
	Bronze
	Laiton
	Cuivre
	Plomb
	Fer
	Acier bas carbone
	Alliages d'aluminium, série 2000
	Cadmium
	Aluminium, séries 1000
	Alliages d'aluminium, séries 5000, 3000, 6000
	Acier galvanisé
	Zinc
	Magnésium et alliages de magnésium
Matériau corrodé (anodique ou moins noble)	

$E_{CORR}$

La vitesse de corrosion est fonction de la surface des deux électrodes formées. Plus la surface de la cathode est grande par rapport à l'anode plus la corrosion est rapide ; c'est pourquoi il est dangereux de réaliser des assemblages avec des matériaux moins nobles que la structure. Si de tels assemblages doivent être faits, les éléments doivent être isolés électriquement.

La loi de Faraday donne [9]:

Perte de métal en g=

$A$  : masse atomique en grammes

$I$ : courant en Ampères

$t$ : temps en secondes

$n$ : valence du métal

$F$ : nombre de Faraday=96493.

### **3.3.5. La corrosion inter granulaire :**

C'est une autre forme de corrosion localisée s'attaquant aux joints de grains, rendant la structure mécaniquement fragile.

Elle se rencontre quand des carbures de chrome se forment lors d'un traitement thermique (de soudage par exemple). Leur formation s'accompagne de zones déchromées et c'est dans ces zones que la corrosion peut se propager sous forme de fissures.

Les joints de grains séparent des grains d'orientation cristallographique différente et constituent, de ce fait, des sites favorables à la précipitation de carbures, de phases intermétalliques ou à la ségrégation d'éléments solutés. Le cas le plus fréquent de corrosion inter granulaire est celui d'un alliage dit «sensibilisé». Le phénomène de sensibilisation consiste en la précipitation, aux joints de grains, de composés riches en chrome (carbures de chrome).

### **3.3.6. La corrosion sous contrainte :**

La corrosion sous contrainte se présente sous la forme de fissures inter granulaires et transgranulaires. Les premières semblent suivre le contour des limites de grains, tandis que les secondes semblent s'étendre indifféremment des limites de grains. Ces deux types de fissure peuvent se trouver dans un même alliage, en fonction de l'environnement et de la structure métallique.

Les fissures sont habituellement perpendiculaires aux contraintes et possèdent une branche unique ou plusieurs branches suivant la composition du milieu ainsi que la composition et la structure du métal.

La corrosion sous contrainte correspond à l'attaque d'un milieu corrosif sur un matériau sous contraintes. Ces contraintes proviennent de deux sources, soit les charges appliquées et les contraintes résiduelles engendrées par les soudures et le travail à froid.

L'attaque du milieu ne se fait pas uniformément sur toute la surface, mais elle apparaît par une rupture ou par une cassure du métal.

**Tableau.3.2.** Quelques exemples de couples matériau-milieu sensibles à la corrosion sous contrainte

Matériau	Milieu
Aciers au carbone	Milieus caustiques, carbonates-bicarbonates, nitrates, phosphates...
Aciers inoxydables austénitiques	Milieus chlorurés, milieux caustiques(T>80°C)
Alliages base nickel	Eau à haute température avec H dissous (>250°C)
Alliages cuivreux	Solutions ammoniacales
Alliages d'aluminium	Chlorures
Alliages de titane	Chlorures en milieu alcoolique
Alliages de zirconium	Acide nitrique

### 3.3.7. La corrosion par courants vagabonds :

Ce mode de corrosion se rencontre sur des canalisations en inox près des ouvrages ferroviaires, mais aussi dans les villes avec les installations de tramways. Les fuites de courants électriques sont responsables d'une corrosion spécifique.

## 3.4. Corrosion des palplanches :

### 3.4.1. Données expérimentales sur la corrosion des métaux dans le sol :

dans le sol Au début du XXe siècle, le NBS (National Bureau of Standards) a mené, aux Etats-Unis, des études sur la corrosion de pièces en acier enterrées. Les informations, collectées sur 45 ans (1910-1955) ont porté sur 333 types de matériaux enterrés dans 128 sites différents (dont certains non utilisés en terre armée : boues, tourbes...). Les essais ont permis à Romanoff, l'auteur de l'étude, de montrer que la perte par corrosion est plus importante dans les cinq premières années après enfouissement, puis qu'elle diminuait jusqu'à une valeur quasiment constante. Il a proposé une relation empirique pour calculer la perte par face P (en  $\mu\text{m}$ ) en fonction du temps T en années ([11]; [12]):

$$P = A \cdot T^n \dots\dots\dots (3.1)$$

où A est une constante caractéristique du site, et n une constante toujours inférieure à 1, ce qui traduit le ralentissement de la perte au cours du temps. Le caractère électrolytique était clairement énoncé par Romanoff [13] « Pour que la corrosion électrochimique se produise, il doit y avoir une différence de potentiel entre deux points qui sont raccordés

électriquement et plongés dans un électrolyte. Chaque fois que ces conditions sont remplies, un petit courant circule de la zone anodique à travers l'électrolyte vers la cathode, et ensuite le circuit se ferme à travers le métal, et le domaine de l'anode est celui qui a le potentiel le plus négatif, et qui est la zone qui se corrode par la perte d'ions métalliques dans l'électrolyte. La zone de la cathode est à l'abri de la corrosion en raison de la déposition d'hydrogène ou d'autres ions qui transportent le courant ». L'étude de [11] ne rassemble que quelques données sur l'aluminium et ses alliages après environ 10 années. Beaucoup d'échantillons étaient entièrement détruits. Plus près de nous, il faut citer les travaux motivés spécifiquement par le développement de la terre armée et notamment des essais en caisse réalisés par le LCPC [14]. Dans le cas de l'ouvrage expérimental en vraie grandeur étudié par [15], mentionné dans la section précédente, on peut signaler que la diminution d'épaisseur était conforme à la loi puissance proposée par Romanoff [11].

### 3.4.2. Phénomène de la corrosion électrochimique sur les métaux :

Il convient de rappeler quelques notions fondamentales. Les fig. 3.3 et 3.4 suivantes montrent que la corrosion des métaux dans un milieu aqueux est de nature électrochimique :

les réactions chimiques entre le métal et le milieu environnant (qui joue un rôle d'électrolyte) libèrent des électrons à l'endroit où le métal se corrode (qui joue un rôle d'anode). Ils circulent à l'intérieur du métal (courant électrique), atteignent des zones (cathode) où ils pourront être captés lors d'une autre réaction chimique avec le milieu. A la surface du métal, il se crée une multitude de micro-couples anode-cathode, causés par toute hétérogénéité macro ou microscopique de la structure du métal ou du milieu environnant.

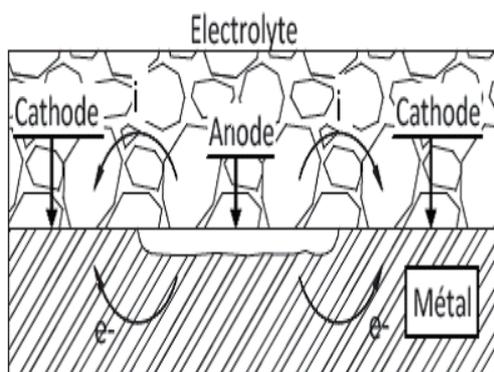


Fig. 3.3. Pile due à l'hétérogénéité du métal

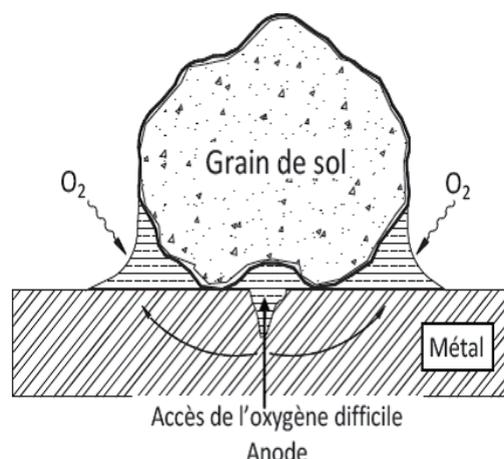
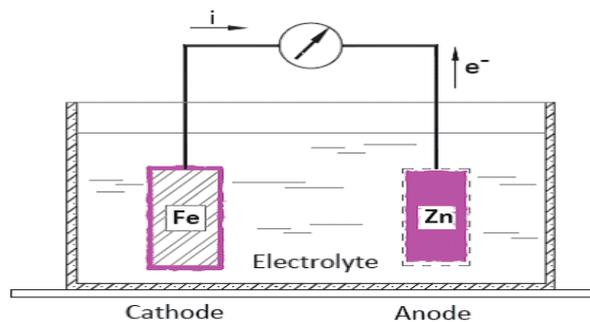


Fig. 3.4. Pile due à l'aération

différentielle en surface [14] Le taux de corrosion est proportionnel à l'intensité du courant électrique issu des surfaces anodiques, selon la loi de Faraday de l'électrolyse.

### 3.4.3. Principe de la protection par galvanisation :

Une grandeur caractérise l'aptitude d'un métal à s'oxyder : il s'agit de la différence de potentiel qui s'établit entre ce métal et l'électrolyte. Dans le cas du fer, cette différence est négative (typiquement  $-0.15V$ ). Pour les métaux nobles elle est positive. Le zinc est nettement plus électro-négatif que le fer ( $-0.5V$ ), de sorte que si on associe par un contact direct ou une liaison électrique un morceau de zinc et un morceau de fer et qu'on les plonge dans l'eau (Fig.3.5), on crée une pile électrique dont la force électromotrice (de l'ordre de  $0.35V$ ) est suffisante pour modifier profondément les réactions chimiques à la surface des éléments



**Fig. 3.5.**Pile simple « Fe-Zn » [16]

Le fer constitue la cathode de la pile et se trouve ainsi protégé contre toute corrosion. Ce phénomène décrit le mécanisme de la protection cathodique du fer, par anode sacrificielle en zinc.

### 3.4.4. Les étapes de la corrosion de rideau de palplanche en acier galvanisé :

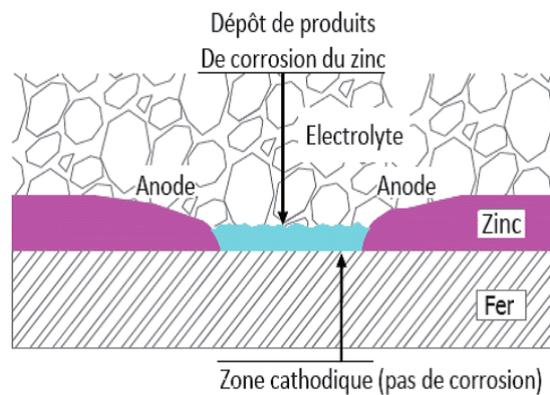
Dans le sol humide, qui constitue un électrolyte, la situation est similaire (voir la Fig 3.6).Les expériences montrent que le comportement d'une armature en acier galvanisé peut se résumer comme suit :

dans un premier temps, seul le zinc est au contact du sol. Il constitue un revêtement parfaitement étanche et adhérent. L'acier reste donc totalement protégé.

Les réactions d'oxydation du zinc forment lentement des produits de corrosion qui restent à la surface de l'armature et cimentent les grains du sol.

L'électrolyte se modifie et la vitesse des réactions diminue ; par endroits, le zinc aura disparu totalement en tant que métal et l'acier sera mis à nu.

Du fait de la protection cathodique, le fer sera protégé par le zinc adjacent et ne subira pas de corrosion tant qu'il reste du zinc métal à proximité. La couche de sol autour de l'armature continue à s'enrichir en composés du zinc (hydroxydes, oxychlorures, carbonates, etc....) et forme une gangue adhérente. Ensuite, l'acier commence sa dissolution dans un environnement très différent du sol de départ, constitué par la gangue précédemment décrite. La vitesse de la corrosion est alors beaucoup plus faible que celle que subirait l'acier s'il n'avait pas été galvanisé. Au cours du temps cette vitesse de corrosion continuera à se ralentir. Bien entendu, la durée de chaque phase dépend de l'agressivité du milieu.



**Fig. 3.6.** Protection cathodique par zinc [14]

La théorie de la corrosion électrochimique est simple : la corrosion se produit à travers la perte d'ions métalliques à un point ou aux zones d'anode. Toutefois, la corrélation de cette théorie avec le risque de corrosion des métaux enterrés est compliquée et difficile, en raison des nombreux facteurs qui, seuls ou combinés, influent sur le courant électrochimique. Ces facteurs déterminent non seulement la vitesse à laquelle se produit la corrosion, mais encore le genre de corrosion

### 3.5. Les facteurs de la corrosion :

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

- Facteurs définissant les modes d'attaque,
- Facteurs métallurgiques,
- Facteurs définissant les conditions d'emploi,
- Facteurs dépendant du temps.

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau 3.3

**Tableau.3.3.** Les facteurs de la corrosion

<b>Facteurs définissant les modes d'attaque</b>	<b>Facteurs métallurgiques</b>	<b>Facteurs définissant les conditions d'emploi</b>	<b>Facteurs dépendant du temps</b>
-Concentration du réactif -Teneur en oxygène -PH du milieu -Addition d'inhibiteurs -Température -Pression	-Composition de l'alliage -Procédé d'élaboration -Impuretés -Traitement thermiques -Addition protectrices	-Etat de surface -Forme des pièces sollicitations mécaniques -Emploi d'inhibiteurs -Procédés d'assemblage	-Vieillessement -Tensions mécaniques -Température -Modification des revêtements protecteurs.

### 3.6. Facteurs influençant la corrosion :

#### 3.6.1. Nature de l'armature :

Examinons rapidement le comportement de quelques matériaux susceptibles de constituer des armatures de terre armée.

##### a) Acier doux

Ces métaux se corrodent par dissolution homogène dans le cas d'un sol saturé en eau ou par attaque plus localisée due principalement au phénomène d'aération différentielle dans les autres cas (effet d'Evans). On constate que la formation des produits de corrosion modifie la localisation des micro-piles et tend à uniformiser le phénomène. Les zones attaquées sont larges et peu profondes, exemptes de fissures, et conduisent globalement à une perte d'épaisseur relativement uniforme de la surface métallique. Toutes les observations montrent que les produits de corrosion de l'acier forment, avec le sol, une gangue protectrice très adhérente et qui semble jouer un rôle déterminant dans la réduction de la vitesse de corrosion avec le temps d'exposition [19].

##### b) Acier galvanisé

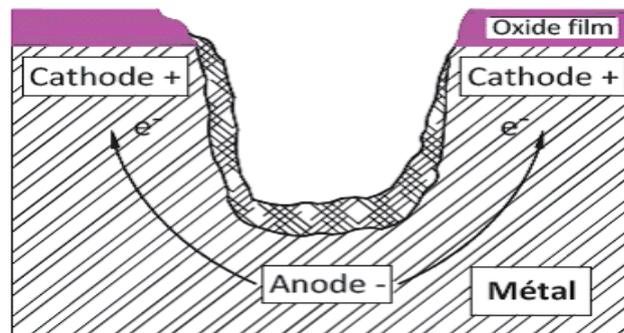
Dans ce matériau, on utilise le zinc comme écran de protection et, après disparition locale, il intervient par sa propriété de créer une pile électrochimique dans laquelle le fer est la cathode. Ce phénomène présente un intérêt considérable : le zinc joue le rôle d'anode sacrificielle et se

corrode en protégeant l'acier mis à nu, soit accidentellement, soit par le mécanisme même de la corrosion du revêtement. Suivant la conductivité de l'électrolyte, cet effet protecteur se fait sentir sur des distances plus ou moins importantes. De plus, les produits de corrosion du zinc, insolubles, recouvrent la zone de fer découverte et tendent à colmater ce défaut

Dans le cas de l'acier galvanisé, les produits de corrosion du zinc contribuent efficacement à la formation de la gangue protectrice, déjà évoquée à propos de l'acier, et prolongent ainsi l'action bénéfique du zinc même après sa complète disparition de la surface du métal [19].

### c) Métaux passivables

Ce sont typiquement les aciers inoxydables et les alliages d'aluminium. Ces métaux sont très réactifs vis-à-vis de l'oxygène. Lorsque les conditions sont favorables, ils se recouvrent spontanément d'un film d'oxydes protecteur et stable qui empêche toute attaque du métal de base. Cependant, lorsque cette couche protectrice est détruite localement, soit mécaniquement, soit chimiquement, et que les conditions ne sont pas favorables à sa reconstitution, la corrosion se développe par formation d'une pile où l'anode de faible dimension par rapport à la zone cathodique environnante est le siège d'un intense courant de corrosion conduisant à des perforations parfois très rapides (voir la Fig 3.7).



**Fig. 3.7.** Formation d'une piqûre dans un métal recouvert d'une couche passivante  
La présence dans le sol de certaines espèces chimiques spécifiques, notamment de chlorures, accroît la probabilité d'apparition de ces désordres. Ces métaux, qui présentent un grand intérêt dans les structures qui peuvent être examinées fréquemment, semblent à proscrire dans le cas d'ouvrages enterrés. En effet, s'ils peuvent théoriquement assurer une durée d'exploitation quasi illimitée à la plupart des ouvrages, ils peuvent conduire à des destructions très rapides, peu prévisibles.

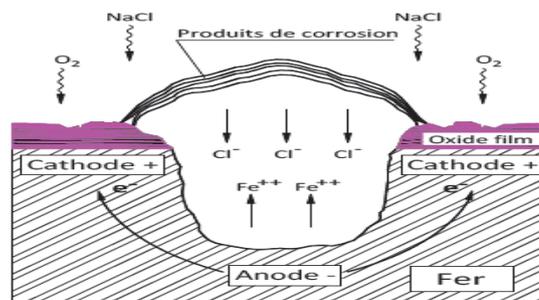
### 3.6.2. Influence des ions :

- Les sels solubles

La conductivité électrolytique globale d'une solution dépend des différents ions présents en solution et de leurs concentrations. La plupart des sels participent au processus de corrosion, sauf les carbonates. Les chlorures, les sulfates et les sulfites ont été identifiés comme les agents essentiels de l'accélération corrosive [17].

#### a) Chlorures

Les chlorures minéraux sont très solubles et c'est pour cela qu'on les obtient dans l'extrait aqueux. La Fig 3.8 illustre le processus de la corrosion en piqûre dans la zone contenant le chlorure de sodium (produit le plus souvent utilisé pour le déverglaçage des routes qui peut ensuite pénétrer la plate-forme) [18]. L'ion  $\text{Cl}^-$  facilite la corrosion métallique par formation des chlorures de métaux complexes et l'hydrolyse.



**Fig. 3.8.** Développement de la piqûre dans l'acier galvanisé [18]

#### b) Ion $\text{H}^+$ :

La concentration en ion  $\text{H}^+$ , mesurée par le pH, est un paramètre important du potentiel de corrosion des métaux dans le sol. Le pH mesure l'acidité d'une solution, une valeur de 7 représente la neutralité, les valeurs inférieures caractérisent un milieu acide, les valeurs supérieures un milieu basique. Les oxydes formés sur le métal sont insolubles et protecteurs dans un certain domaine de pH ; dans le cas du zinc, cette plage correspond à un pH variant de 5 à 12. En ce qui concerne l'acier, l'agressivité est d'autant plus faible que le pH est élevé [19]. Dans les remblais en terre armée, le pH varie généralement entre 6 et 9.

#### c) Sulfates

L'extraction et la détermination de la teneur en sulfates du sol est plus complexe que pour les chlorures. Les sulfates représentent seulement une fraction du soufre pouvant exister dans le sol. Les sulfates inorganiques peuvent être solubles dans l'eau (sulfate de sodium), peu

solubles (gypse) ou insolubles (jarosite). Le sulfate soluble n'est donc pas la totalité de sulfate contenu dans un sol, mais il peut être intéressant pour évaluer l'agressivité.

#### d) Sulfites

Les sulfites peuvent être la cause de sévères détériorations des armatures métalliques. Ils peuvent se rencontrer dans les sédiments marins, les strates de houille et le lignite. Ils sont rares dans les matériaux des remblais ([19] ; [17]).

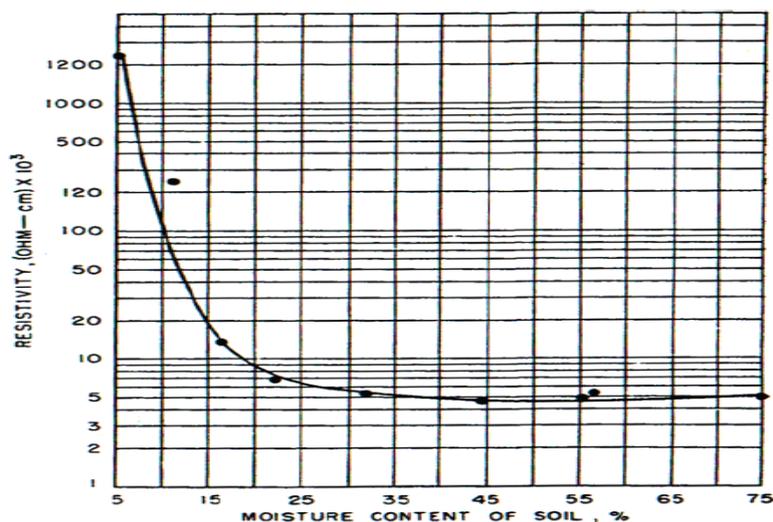
#### e) Oxygène

L'oxygène de l'air interstitiel se dissout dans l'eau et intervient en accélérant la corrosion, mais il favorise également la formation de produits de corrosion insolubles et protecteurs.

#### 3.6.3. L'eau Même en très faible quantité :

l'eau est l'agent indispensable du phénomène de corrosion. De façon générale, la vitesse de corrosion augmente avec la teneur en eau du sol. Cette eau possède une conductivité électrique d'autant plus élevée que la concentration totale en sels dissous est plus grande. La corrosion augmente avec cette conductivité [19].

L'effet de l'humidité sur la résistivité d'un sol argileux est montré dans la **Fig. 3.9.** Lorsque le sol est presque sec, sa résistivité est très élevée (et le potentiel de corrosion est donc faible). Toutefois, la résistivité décroît rapidement avec l'augmentation de la teneur en eau jusqu'à une certaine teneur en eau, et ensuite, une augmentation de l'humidité a peu ou pas d'effet sur la résistivité ([11] ; [13]).



**Fig. 3.9.** Effet de la teneur en eau sur la résistivité du sol [11]

### 3.7. La température du sol :

La Fig 3.10 montre l'effet de la température sur la résistivité d'un sol. Quand la température baisse vers le point de congélation, la résistivité augmente graduellement. Elle augmente très rapidement aux températures inférieures au point de congélation [11]. Une augmentation de la température dans le sol entraîne une diminution de la résistivité, favorable à la réaction corrosive. Toutefois, une augmentation de la température réduit la solubilité de l'oxygène, ce qui tend à réduire la vitesse de la réaction à la cathode. Le résultat net est que la température n'a pas un effet important sur la corrosion [20].

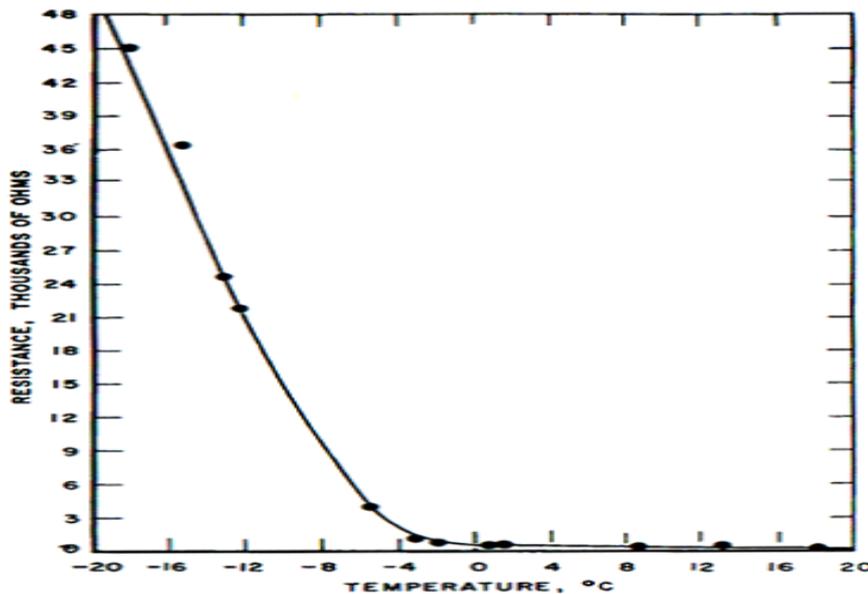


Fig. 3.10. Effet de la température sur la résistivité du sol [11]

#### 3.7.1. La résistivité :

La résistivité du sol (inverse de la conductivité) influence fortement la vitesse de corrosion [21]. Ceci s'explique par le mécanisme de corrosion décrit précédemment :

la perte de métal à l'anode est proportionnelle à l'intensité du courant qui circule entre les deux pôles de la pile, or celui-ci dépend de l'aptitude de l'électrolyte à conduire le courant.

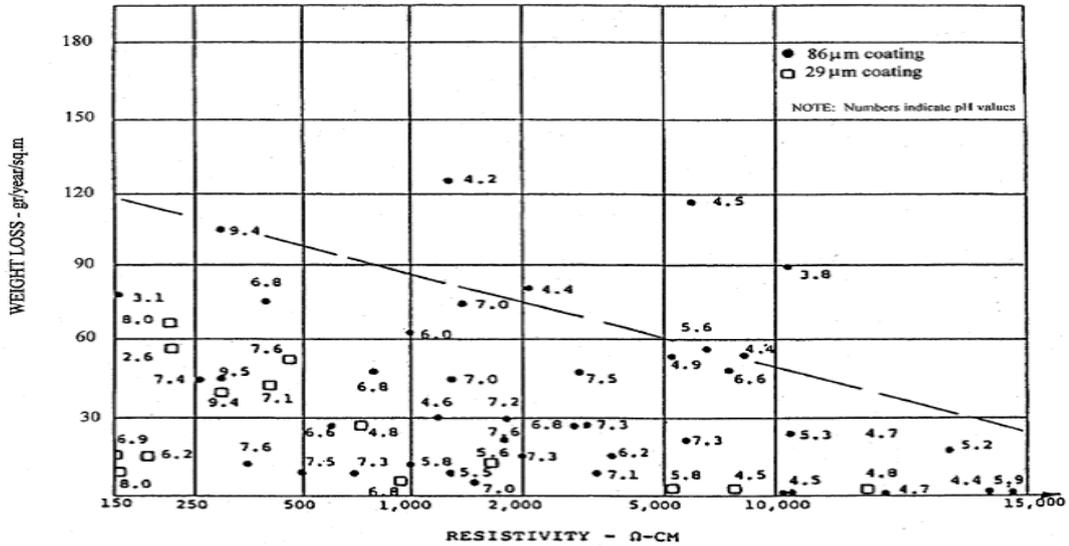
Le débit de la pile électrochimique est en quelque sorte réglé par la résistivité de l'électrolyte.

La résistivité du sol est donc un paramètre important pour apprécier l'agressivité d'un sol.

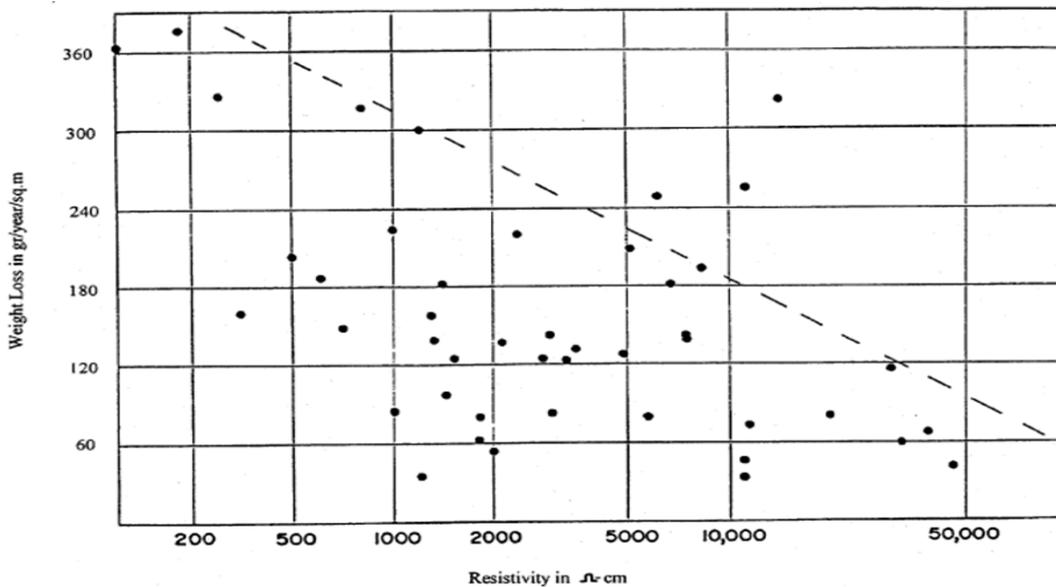
Elle dépend de la teneur du sol en sels solubles, de la teneur en eau et de la porosité du sol.

Elle présente un minimum à la saturation, cette valeur particulière servira de critère ([19] ; [17]). De manière globale, la corrosion augmente lorsque la résistivité diminue. De manière plus précise, si la résistivité est élevée, des attaques de corrosion localisées plutôt que générales peuvent se produire [17].

Les fig 3.11 et 3.12 présentent les valeurs de résistivité mesurées sur des ouvrages réels pour deux types de renforcements différents. On observe que pour des valeurs de résistivité faibles, les pertes de masse sont plus importantes, et cela, même si peu d'échantillons se situent en dessous de la limite de 1000  $\Omega \cdot \text{cm}$  (NF A05-252).



**Fig. 3.11.** Perte de masse par unité de surface en fonction de la résistivité renforcements en acier galvanisé) [17]



**Fig. 3.12.** Perte de masse par unité de surface des renforcements en fonction de la résistivité (acier au carbone non revêtu) [17]

[22] Ils ont remarqué que la corrosion externe des tubes métalliques enterrés se produit rapidement quand la résistivité des sols environnants est inférieure ou égale à 2000  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Pour conclure, la résistivité fait partie des critères utilisés dans les différentes normes analyse

d'une base de données montre que la vitesse de corrosion est nettement plus corrélée avec la résistivité qu'avec la teneur en sel.

### 3.7.2. Prise en compte couplée du pH et de la teneur en eau :

En 1977, une étude du Transportation Research Laboratory (TRL - Angleterre) a porté sur la corrosivité des sols avec une attention particulière apportée à la terre armée. Elle a permis à King de tracer un nomographe (Fig 3.13) évaluant la perte de masse en  $\text{g/m}^2/\text{an}$  en connaissant le pH et la résistivité du sol. On trouve dans [13] des exemples d'utilisation :

- pour un pH de 6,5 et une résistivité de 200  $\Omega\cdot\text{cm}$ , la perte de poids est d'environ 1,3 oz/ft<sup>2</sup>/year (396.29  $\text{g/m}^2/\text{an}$ ) et la durée prévue pour atteindre la corrosion totale de l'épaisseur sacrifiée (1/8" soit 3.175mm) est d'environ 65 années .
- pour un pH égal à 7,5 et une résistivité de 200 ohm.cm, la perte de poids est d'environ 2,3 oz/ft<sup>2</sup>/year (701.129  $\text{g/m}^2/\text{an}$ ) et la durée prévue est d'environ 38 années.

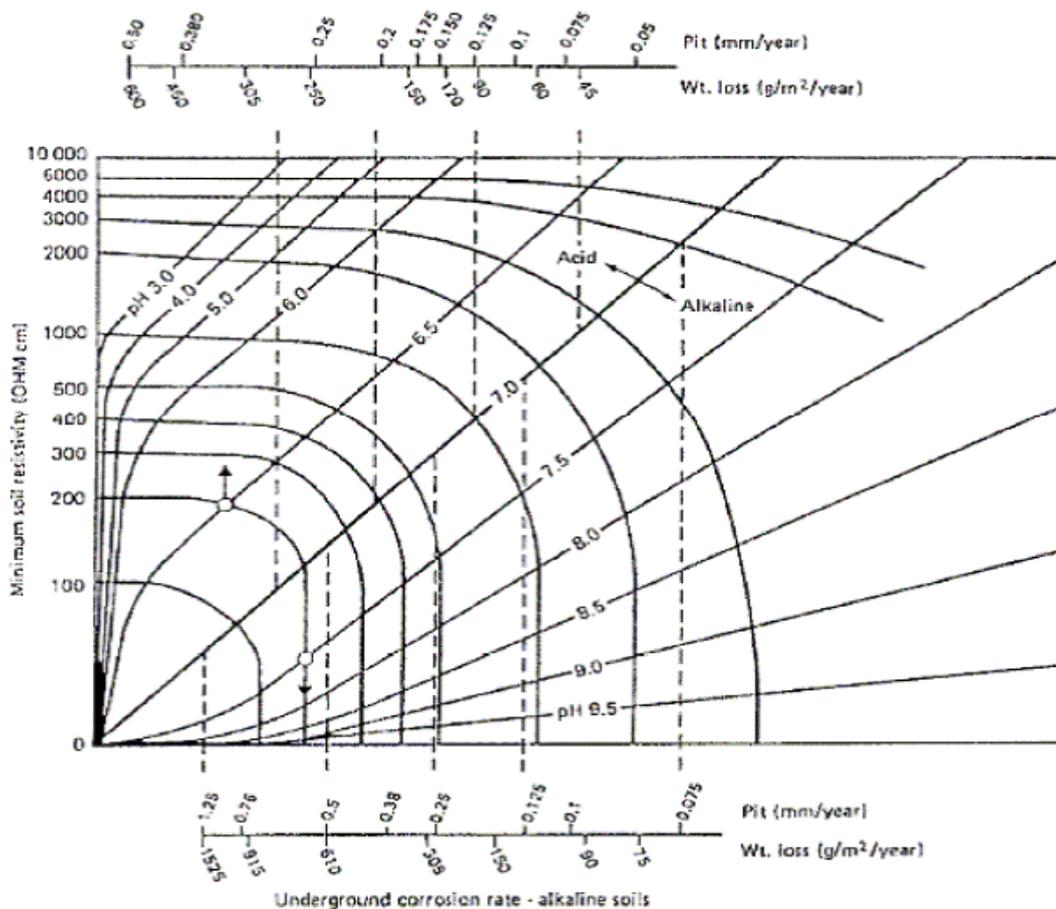


Fig. 3.13. Nomographe pour l'estimation de la vitesse de corrosion de l'acier[13]

### **3.7.3. Nature du sol :**

Les facteurs régissant la corrosion par les sols sont très complexes, car les sols sont des électrolytes particuliers dans lesquels interviennent non seulement les espèces chimiques présentes, mais également la structure physique des trois phases (solide, liquide et gazeuse) qui la composent [23].

De l'étude des conditions dans lesquels des problèmes de corrosion se sont produits, les spécialistes ont pu déduire plusieurs règles générales concernant les paramètres qui régissent la corrosion dans les sols :

La corrosion est très lente dans les sols neutres, bien drainés, ayant une résistivité élevée, tels que les sables ou les graviers. Il n'apparaît alors qu'une corrosion superficielle même sur de longues périodes ;

Les sols acides, les sols lourds, mal drainés, les sols de basse résistivité provoquent une corrosion plus rapide ;

Dans les sols anaérobies, les bactéries réductrices des sulfates peuvent accélérer les processus d'attaque.

En outre, la corrosion dépend également de la nature et de la granularité des grains de sol.

D'une façon générale, les matériaux drainants sont moins corrosifs que les matériaux fins comme les argiles qui conservent mieux l'humidité et à fortiori les sels agressifs présents dans l'eau. Le nombre élevé de paramètres agissant sur la corrosion rend difficile l'étude et la détermination précise du phénomène, d'autant plus que ces paramètres varient au cours de la vie de l'ouvrage, de l'année, voire même de la journée.

### **3.7.4. Etablissement d'un degré d'agressivité :**

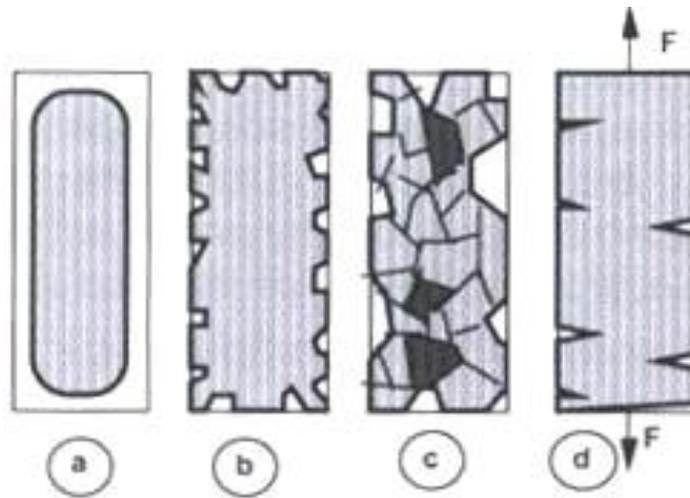
L'analyse de la base de données recueillie par le montre qu'il est difficile d'établir un lien entre la vitesse de corrosion et les diverses données physicochimiques que l'on peut mesurer. Les deux principaux constats sont la grande dispersion des résultats et la multiplicité des facteurs intervenant dans la corrosion. Pour prendre en compte cette multiplicité de facteurs intervenant dans les phénomènes les diverses normes ont cherché à bâtir un indice d'agressivité composite .

## **3.8. Effet mécanique de la corrosion des palplanches :**

### **3.8.1. Répartition de la corrosion :**

Les principaux types de corrosion des armatures dans les ouvrages en terre armée peuvent être la corrosion uniforme, par piqûre (corrosion localisée; en anglais pitting corrosion), par

bactérie, sous contrainte et la corrosion fragile ([18] ; [24]) distingue également une dissolution généralisée (corrosion uniforme), une dissolution localisée ou sélective ou une fissuration, notamment lorsque le matériau métallique est fortement tendu (*Fig 3.14*).



**Fig. 3.14.** Les aspects d'un solide métallique corrodé [24]

*a) dissolution généralisée b) corrosion par piqûre*

*c) dissolution sélective d'un alliage d) fissuration par corrosion sous contrainte*

**a) Corrosion uniforme (corrosion généralisée)**

La corrosion uniforme de la surface des armatures est causée par la réaction électrochimique se produisant sur l'ensemble de la surface du métal par l'effet de micropiles [18]. Quand il y a une corrosion uniforme de la surface, la perte du métal peut être estimée.

**b) Corrosion par piqûre**

La corrosion par piqûre du métal est le résultat d'une intense attaque localisée dans un électrolyte. Elle est l'une des formes les plus destructrices de la corrosion. Sa vitesse et sa localisation sont imprévisibles. Ce mode de corrosion se produit en absence de tensions, mais celles-ci l'accélèrent. La réduction de la section à l'endroit le plus corrodé, va conduire à une rupture ductile de l'armature. Les fissurations par corrosion sous contrainte peuvent sembler similaires à des piqûres, mais elles provoquent une rupture fragile. La corrosion par piqûre est le type de corrosion qui se produit sur une armature galvanisée.

Il est clair que selon le degré d'homogénéité de la corrosion, la même perte de masse totale conduit à des conséquences différentes du point de vue mécanique.

Nous allons, pour examiner le lien entre corrosion et dégradation des propriétés mécaniques, nous appuyer sur la littérature existante et aussi sur l'exploitation d'une base de données

établie par le réseau technique de l'équipement (Cete de l'Est, LRPC de Strasbourg) et la société Profractal.

### 3.9. Essais de corrosion :

#### 3.9.1. Préparation de la solution simulée de sol :

Nous avons reconstitué la composition de sol en une solution simulée de sol appelé solution simulée de sol (tableau 3.4 )

**Tableau 3.4** . composition chimique de la solution simulée de sol algérien (g /l)

Composant	CaSO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaHCO <sub>3</sub>
Concentration(g /L)	2,00	29,04	1,82	22,69	37,48	0,16

Conductivité=65.5ms/cm

PH=8.8

Pour les mesures gravimétrique on a utilisé une balance analytique avec une précision

de 10<sup>-6</sup>,cet appareil a été soigneusement étalonné et nettoyé avant chaque mesure.

Il est à remarquer que les plus importantes proportions dans cette composition ionique sont celle du clore et du SO<sub>4</sub><sup>-</sup>.



a)



b)

**Fig. 3.15.** a) Balance analytique b) préparation de la solution simulée de sol

### 3.9.2. Prélèvement d'échantillon ,de sol :

L'échantillon a été prélevé soigneusement d'un site où un pipeline était enterré à 1.5m de la surface de la terre.

- **Mode de prélèvement**

Le prélèvement des échantillons a été effectué avec le plus grand soin afin d'éviter toute erreur pouvant provenir de la contamination ou de la pollution par des produits étrangers ,les échantillons ont été mis dans des sacs noirs. Les échantillons prélevés sont représentatifs de la masse de sol algérien .

- **Echantillonnage**

La prise d'échantillon est variable d'une part suivant l'importance du lot de matières à échantillonner et variable d'une part suivant son homogénéité. La préparation de l'échantillon prélevé va subir toute une série d'opérations pour obtenir un échantillon représentatif où s'effectueront tous les essais de laboratoire .L'échantillon prélevé a subi l'opération de tamisage sur tamis vibreur avec un calibrage granulométrique de 4mm après broyage de manière à rendre la matière la plus fine possible pour les essais de laboratoire .

Les échantillons vont subir ensuite une opération de filtrage avec de l'eau distillée afin d'avoir une solution filtrée représentative de sol pour éliminer toutes traces des éléments organiques qui peuvent infecter nos résultats.

### 3.9.3. Inhibiteur de corrosion :

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui , ajout à faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu. Il n'existe pas de mode d'action unique des inhibiteurs de corrosion .un même composé aura d'ailleurs souvent un mécanisme d'action qui sera fonction du système de corrosion (métal +solution) en présence duquel il se trouvera .Nous établirons d'abord quelques généralités sur le comportement des inhibiteurs, qui seront étayées par quelques exemples ponctuels, puis nous examinerons plus en détail les grandes classes d'inhibiteurs.

Quel que soit le mécanisme exact par lequel chaque inhibiteur agit dans les conditions dans lesquelles il est placé , il existe un certain nombre de considérations de base valables pour tous les inhibiteurs

**Tableau 3.5** . Perte d'épaisseur [mm] due à la corrosion pour les rideaux de palplanches en acier dans le sol et eau [25]

<b>Durée de vie</b>					
	5Années	25 Années	50Années	75Années	100Années
Atmosphère	0,05	0,25	0,50	0,75	1,00
Sols naturels non perturbés	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Sols naturels pollués et sols industriels	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Sols naturels agressifs (marais, tourbières, de la tourbe ...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Non-compacté et non agressif fils <sup>B</sup> (argile, schiste, de sable, de limon ...)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Fills <sup>B</sup> ashes non compactées et agressifs	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75
Eau					
Eau douce commune (rivière, canal maritime, ...) dans la zone d'attaque élevé (ligne d'eau)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Eau douce très polluée (eaux usées, effluents industriels, ...) dans la zone d'attaque élevé (ligne d'eau)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
L'eau de mer dans le climat tempéré dans la zone d'attaque élevé (zones à faible eau et les éclaboussures)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
L'eau de mer dans le climat tempéré dans la zone immergée ou d'une zone de marée	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50

**Notes:**

Les taux de corrosion dans les remplissages compactés sont plus faibles que dans les régions non compactées. En remplissages compactées les chiffres du tableau devrait être divisé par deux.

Le taux de corrosion le plus élevé se trouve généralement dans la zone d'accueil ou au niveau bas de l'eau dans les eaux de marée. Cependant, dans la plupart des cas, les contraintes de flexion les plus élevées se produisent dans la zone d'immersion permanente.

Les valeurs indiquées pour les 5 à 25 ans sont basées sur des mesures, tandis que les autres valeurs sont extrapolée

### 3.9.4. Méthodes d'étude de la corrosion :

Il existe plusieurs méthodes de la corrosion

Gravimétrie qui est une méthode très vieille de mesure directe

Méthodes électrochimiques stationnaires (courbes de polarisation)

Méthodes électrochimiques transitoires parmi lesquelles mesures d'impédance électrochimique

La méthode thermométrique basée sur la variation de la température avec de la température avec de la période de la dissolution du métal a été développée par Mylius et a été développée par Shams El-Din . Ces techniques sont des méthodes d'évaluation de la Uniforme . [26]

### 3.9.5. Expérimentation électrochimique :

- **Mesure du potentiel E :**

Les voltmètres ayant par nature deux bornes métallique, la mesure directe du potentiel métal-solution n'est évidemment pas possible. Néanmoins, on peut quand même mesurer des variations de E, ce que représente en pratique le seul véritable besoin. Une électrode en équilibre thermodynamique avec son milieu immédiat représente en effet un système immuable, et dont le potentiel propre  $E_R$  est en pratique peu sensible à la faible perturbation d'un courant de mesure . De telles électrodes peuvent alors être utilisées comme référence . On mesure ainsi conventionnellement E-R, en lieu et place de E, et on l'exprime en « volts par rapport à » (VR).

Pour cela , on utilise plus particulièrement quelques systèmes bien définis :

L'électrode à hydrogène « normale » (EHN) ou électrode à hydrogène « standard » (EHS), universelle ( $E_R=0$  par convention ), mais particulièrement peu pratique (platine platiné, sous 1 atm H<sub>2</sub>)

L'électrode au calomel saturé (ECS), très pratique en milieu chloruré de laboratoire (Hg dans HgCl<sub>2</sub> saturé, suivi d'un 2<sup>e</sup> compartiment en KCl saturé ( $E_R=0,25$  VEHN)

L'électrode Ag /AgCl, très robuste en milieu marin ( $E_R=0,25$  VEHN dans l'eau de mer )

L'électrode Cu/CuSO<sub>4</sub>, en milieu sulfurique ou sensible au chlorure ( $E_R \gg 0,30$  VEHN)

En général , chacun utilise toujours la même électrode dans les mêmes études, et les problèmes de conversion sont peu fréquents . [26]

- **Mesure du courant i :**

Pour les mêmes raisons que pour la mesure du potentiel, tout courant imposé nécessite une électrode auxiliaire (le platine est particulièrement pratique pour cela, mais tout conducteur métallique in corrodable convient) . On mesure alors i directement sur le circuit électrique extérieur reliant les deux électrodes. [26]

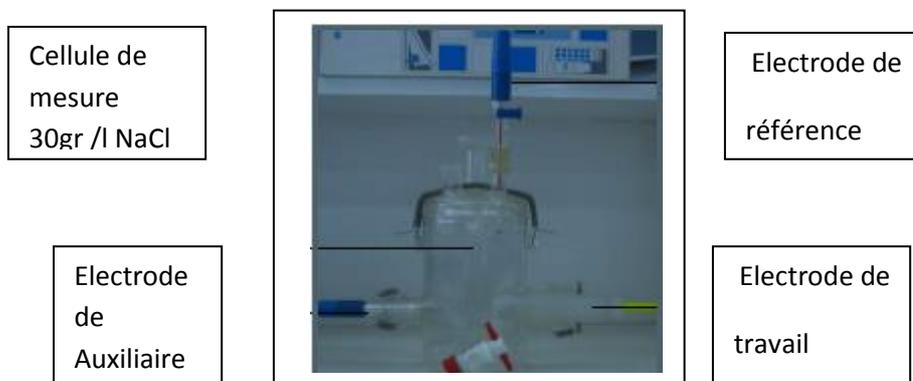
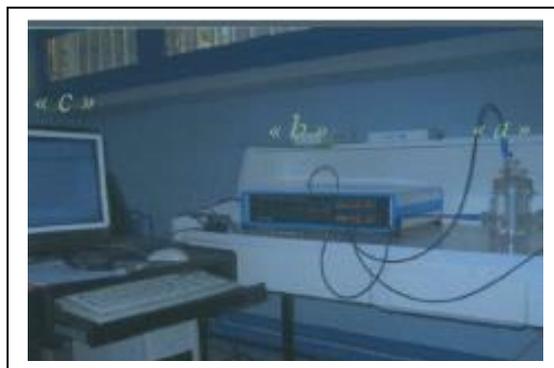
- **Méthodes électrochimiques stationnaires :**

Contrairement aux méthodes précédentes , cette méthode donne des vitesses instantanées.

**Mode opératoire :**

Les surfaces des échantillons des aciers X-52 et X-42 ont préalablement découpés sous forme de disques exposant une surface de 1Cm<sup>2</sup> ils ont ensuite fait l'objet d'un traitement préliminaire de surface par polissage au papier émeris suivi d'un polissage de finition.

Les mesures électrochimique de polarisation potentiodynamique ont été effectuées en cellule électrochimique en verre conventionnelle à trois électrode : contre électrode en platine, électrode de référence en calomel saturée (ECS) ; les échantillons en acier X-60 ont été employé comme électrode de travail. La cellule est isolée de l'extérieur. Les mesures électrochimiques ont été effectuées au moyen d'équipement potentiostat –galvanostat PGP201. Un logiciel d'analyse de corrosion (Volta Master 4 free) permet de suivre et d'enregistrer les courbes de polarisation. (fig 3.16) Pour les essais à différentes température , la modification et l'ajustement de la température est effectuée à l'aide d'une plaque chauffante et un thermomètre. [26]



**Fig. 3.16.**Dispositif d'essai de corrosion.

### 3.10. Durabilité :

La durabilité permet de simplifier le choix en tôle d'acier section de rideau de palplanche en tenant compte la durabilité de l'acier dans un environnement différent et la durée de vie de la structure . Il est un outil simple très utile dans le cas où la conception est basée sur la méthode «conception des contraintes admissible [28]

Un logiciel «Durabilité» a été développé par les ingénieurs civils pour les ingénieurs civils. L'objectif principal de l'ingénieur de conception est de choisir la solution la plus rentable en tenant compte de tous les aspects qui a une influence sur la sécurité de la structure d'acier au cours de sa durée de vie. [28]

La conception de la structure sera principalement influencée par les conditions du sol, la géométrie de la structure et des combinaisons de charges qui seront appliquées à la structure. Lors de la conception, les principaux paramètres nécessaires pour le choix d'un mur de palplanches sont:

- Moment de flexion
- Charge de compression
- Déviation (dépend de la section sélectionnée)

Peut-être besoin d'autres paramètres à prendre en considération dans certains cas (par exemple, une longueur de flambage en cas de contraintes de compression élevées, ...).

L'agrément de conduite, en particulier dans les sols compacts, peut être un paramètre important supplémentaire dans le choix de la section.

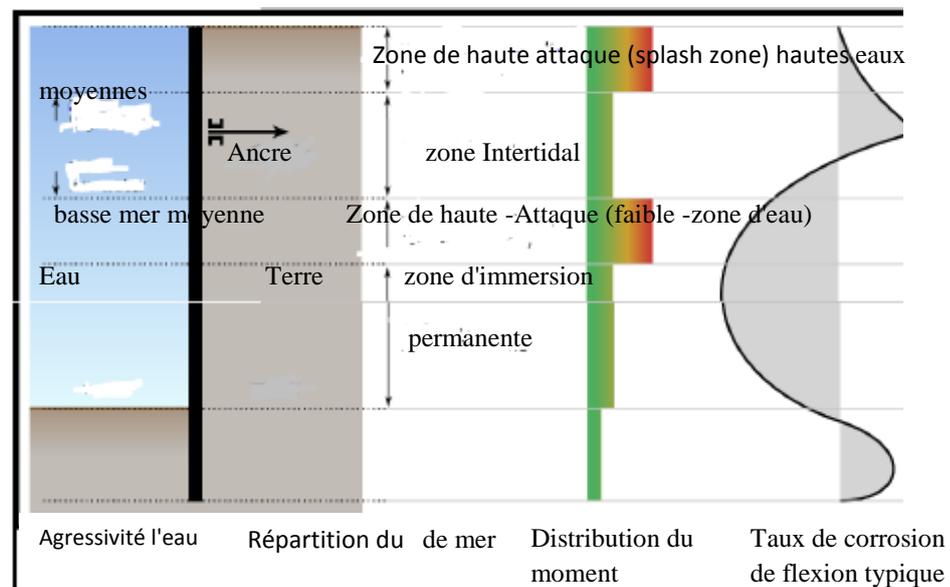
Le logiciel «Durabilité» a plusieurs options qui simplifieront le choix de la section de palplanches.

Ce pendant, elle est limitée à de type Z «régulier» laminé à chaud palplanches et U type.

Conception pour la durabilité

- Epaisseur sacrificiel
- Corrosion acier résistant
- A690 Mariner acier ASTM
- A588 Weathering acier ASTM
- Des revêtements protecteurs
- Enduire Tar Epoxy (CTE)
- Fusion Bond époxy pour tuyau (FBE)

- Systèmes Multi-Coat
- galvanisation
- Métallisation
- Vaporisateur Zinc thermique
- Vaporisateur aluminium thermique
- La protection cathodique
- Higher Yield Steel



**Fig 3.17.** Les différents Zones de corrosion dans le rideau de palplanche

### 3.11. Conclusions :

La question du risque de corrosion des rideaux de palplanches s'est posée naturellement dès le début de la construction des ouvrages de soutènement renforcés par des inclusions métalliques et a été la motivation de nombreuses études.

Pour faire face à des situations avec des risques de corrosions particulièrement élevés, on s'est tourné pendant un temps vers l'utilisation de métaux passivables (acier inoxydable ou alliage d'aluminium) : ces méthodes ont été rapidement abandonnées.

La solution retenue désormais est l'acier galvanisé. La galvanisation assure une protection de l'acier pendant un temps et ensuite une corrosion plus uniforme et donc beaucoup moins défavorable. L'amélioration du procédé de galvanisation et de l'épaisseur moyenne déposée, ainsi que d'autres précautions ont nettement amélioré .

Les matériaux de remblai font l'objet de spécifications ; le calcul d'un degré d'agressivité est proposé dans les différentes normes ; ce calcul intègre divers éléments et permet d'évaluer la vitesse de corrosion et donc de dimensionner les ouvrages pour prendre en compte la durée de vie demandée.

Par ailleurs, diverses mesures de suivi des ouvrages sont mises en place : pose d'armature témoin, inspections. Mais ces mesures sont coûteuses, et ne sont pas toujours suffisantes face à l'hétérogénéité des phénomènes de corrosion et la rapidité des phénomènes de ruine.

#### 4.1. Introduction :

Ce chapitre présente un certain nombre d'études paramétriques visant à cerner l'influence de certains paramètres sur les résultats des simulations numériques. Nous utiliserons le scénario de corrosion (perte d'épaisseur de rideau de palplanche dues aux sol et action atmosphérique) et nous ferons varier le paramètre épaisseur

Dans tous les cas, la démarche consiste à évaluer la sensibilité vis-à-vis de ces paramètres des principales caractéristiques du comportement de l'ouvrage (déplacement du rideau de palplanche, déformations plastiques, tassement de surface, contrainte et déformations).

#### 4.2. Calcul de rideau de palplanche:

Le rideau palplanche étudié .C'est un rideau non ancré, battu dans un sol pulvérulent, subit une rotation autour d'un point O situé dans sa partie en fiche.

Le calcul est fait par la méthode de Rankine [27], à partir des hypothèses simplificatrices suivantes :

- le sol des deux côtés du rideau, au-dessus du point de rotation O, est en état d'équilibre limite ;
- les efforts de contre-butée sont équivalents à une force horizontale  $F_c$  appliquée au niveau du centre de rotation O.

On prend généralement une hauteur de contre-butée égale à 20 % de la hauteur de butée  $z_0$ .

Cela réduit les inconnues du problème au nombre de deux :

- $Z_0$  la hauteur de butée ( La fiche )
- la force de contre-butée  $F_c$ .

Elles peuvent alors être calculées par les équations de la statique traduisant l'équilibre du rideau.

La valeur de  $z_0$  est déterminée en écrivant l'équilibre des moments autour du point O, ce qui donne une équation (4.1) du troisième degré en  $Z_0$

$$2(K_p - K_a) Z_0^3 + (3(H - a) k_p - 3(2H - a)K_a)Z_0^2 - 6H(H - a)K_a Z_0 - H^2(2H - 3a)K_a = 0 \dots \dots \dots (4.1)$$

Après le calcul on a trouvé les résultats suivants:

$$Z_0 = 4,02 \text{ KN /m}^2$$

$$\text{Effort tranchant } N = -112,023 \text{ KN /m}^2$$

$$\text{Moment de flexion } M = 387,08 \text{ KN.m}$$

Coefficient de sécurité :

$$\sigma_x = \frac{M}{W_x} + \frac{N \cdot e}{W_x} + \frac{N}{A_x} \leq \sigma_a \text{ et } \sigma_a = \frac{F_y}{S_f} \dots \dots \dots (4.2)$$

4.3. Durabilité de rideau de palplanche :

Avant d'étudier l'état des contraintes, déformations et déplacements du modèle on a d'abord calculé la durabilité de ce rideau . Le logiciel Durabilité simplifie le choix d'une palplanche acier suivant la norme [25] .Après le calcul (faire entrer le moment et l'effort tranchant dans le logiciel de Durabilité), nous a donné les résultats suivants :

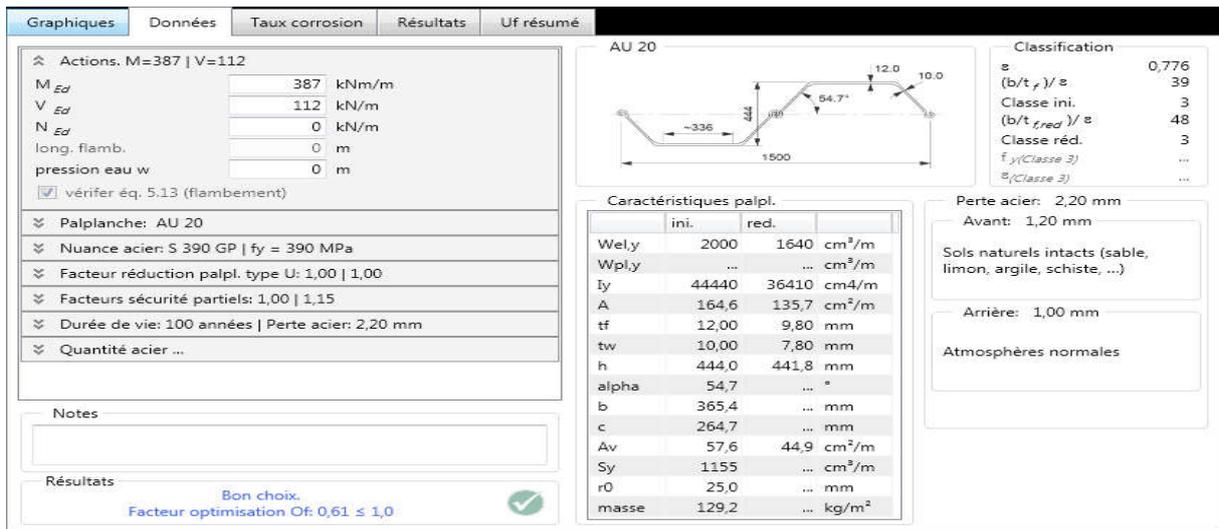


Fig.4.1. Fenêtre des données de logiciel durabilité



Fig.4.2. Fenêtre des résultats de logiciel durabilité

Type et forme du profilé :

AU 20

Module elastique W<sub>el,ini</sub> :

2000 cm<sup>3</sup>/m

Surface de l'acier A<sub>ini</sub> :

164,6 cm<sup>2</sup>/m

Module elastique reduit W<sub>el,red</sub> :

1640 cm<sup>3</sup>/m

Surface de l'acier reduit A<sub>red</sub> :

135,7 cm<sup>2</sup>/m

---

Moment d'inertie réduit $I_{red}$ :	36410 cm <sup>4</sup> /m
Epaisseur réduit ( flange ) $t_{f,red}$ :	9,80 mm
Epaisseur réduit ( web ) $t_{w,red}$ :	7,80 mm
Nuance de l'acier :	S 390 GP
Limite d'élasticité:	390 MPa
Moment de flexion M:	384,0 kNm/m
Effort tranchant N:	112,0 kN/m
Fleche f:	1,0 cm
Facteur de sécurité $S_{f,ini}$ :	1,94 $\geq$ 1.5
Facteur de sécurité $S_{f,red}$ :	1.54 $\geq$ 1.5
Poids:	129,2 kg/m <sup>2</sup>
Nombre de paires d'unité:	33
Longueur d'unité:	10,00 m
Longueur total de Rideau :	49,5 m
Notes :	
Durée de vie :	100 ans
Avant :	
Environnement :	Normal atmosphères
Perte d'épaisseur :	1,00 mm
Arriere :	
Environnement :	sol naturel sableux
Perte d'épaisseur :	1,20 mm
Perte d'épaisseur total:	2,20 mm

Donc le rideau de palplanche forme AU 20 d'épaisseur de 12 mm (voir les caractéristiques géométriques de Arcelometal ) peut résister jusqu'à 100 ans (supposant que les caractéristiques réelles du sol sont restées les même durant cette période )

### 4.3.1. Graphe des caractéristiques géométriques de rideau de palplanche corrodé :

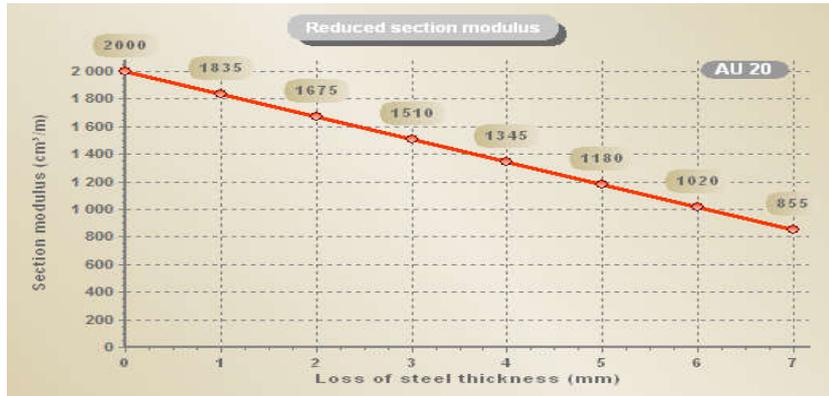


Fig .4.3. Module de section réduit

On constate que le module de section de 2000 à 855 cm<sup>2</sup>/m se diminue graduellement tandis que la perte d'épaisseur de rideau de palplanche augmente de 0 à 7mm durant toute la durée vie de palplanche (100 ans)



Fig. 4.4. Moment d'inertie réduit

On constate que le moment d'inertie réduit de 44440 à 18890 cm<sup>4</sup>/m se diminue graduellement tandis que la perte d'épaisseur de rideau de palplanche augmente de 0 à 7mm toute la durée vie de palplanche (100 ans)

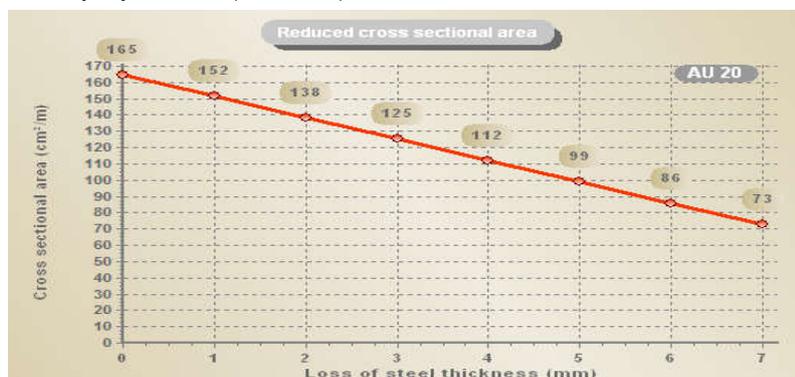
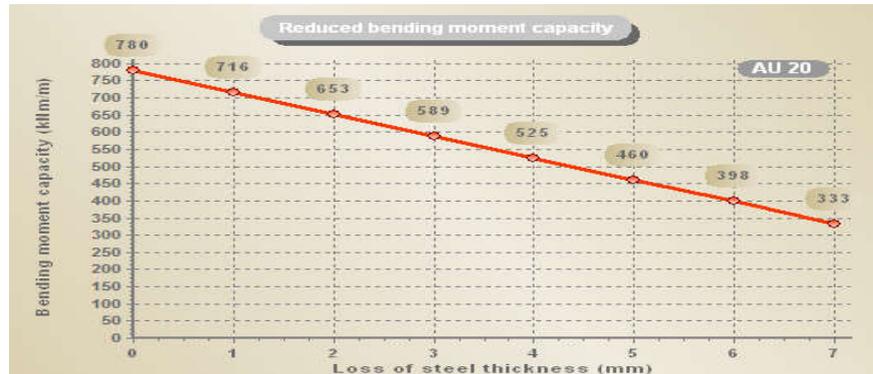


Fig.4.5. Surface d'acier réduite

On constate que la section réduit de 165 à 73cm<sup>2</sup>/m se diminue graduellement tandis que la perte d'épaisseur de rideau de palplanche augmente de 0 à 7mm toute la durée vie de palplanche (100 ans)



**Fig.4.6.** Moment capacité réduit

On constate que la capacité de moment de flexion réduit de 780 à 333cm<sup>2</sup>/m se diminue graduellement tandis que la perte d'épaisseur de rideau de palplanche augmente de 0 à 7mm toute la durée vie de palplanche (100 ans)

#### 4.4. Procédure de modélisation numérique par le logiciel COMSOL :

##### 4.4.1. Définition de logiciel

Le logiciel COMSOL , créé en 1986 par des étudiants de Germund Dahlquist, dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique au Institut royal de technologie à Stockholm en Suède. La première version de COMSOL Multiphysics est sortie en 1998.La version initiale (avant 2005) de COMSOL Multiphysics s'appelait FEMLAB (Finité Elément Modeling Laboratoire).

Pour mener notre étude par modalisation numérique, on a utilisé le logicielle numérique COMSOL, qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode d'éléments finis. Le logiciel «COMSOL » comprend plusieurs composantes telles que :

COMSOL/Professionnel, COMSOL/Multiphysics, COMSOL/Structural...etc. Chaque composante est destinée à l'un des domaines d'ingénierie, et son choix met automatiquement à la disposition de l'utilisateur les processus adéquats (type d'élément, conditions aux limites, tracés,...etc.). Dans notre analyse, on a utilisé les modules structural dans COMSOL/Multiphysics, qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique (contraintes et déplacement...). Il offre des outils puissants pour l'analyse en deux et trois dimensions, On trouve dans le manuel d'aide de «COMSOL» toutes les instructions qui permettent son exploitation à travers son interface utilisateur graphique "Graphical User Interface" ainsi que toute la documentation nécessaire. De nombreux processus de calcul sont disponibles dans ce code et chaque processus est une sorte d'ensemble de fonctions qui effectuent une tâche spécifique. Par exemple, dans le pré-processus général "Preprocessor ", on construit le modèle, le processus "Solution " dans lequel on applique les conditions initiales et aux limites. Le processus "PostProcessor " permet d'exploiter les résultats obtenus de différentes manières (Surface de distribution par couleur ,courbes, tableaux ...etc.) [29]

#### 4.4.2 Conception d'un modèle

**Tableau 4.1.** Tableau des données et paramètres :

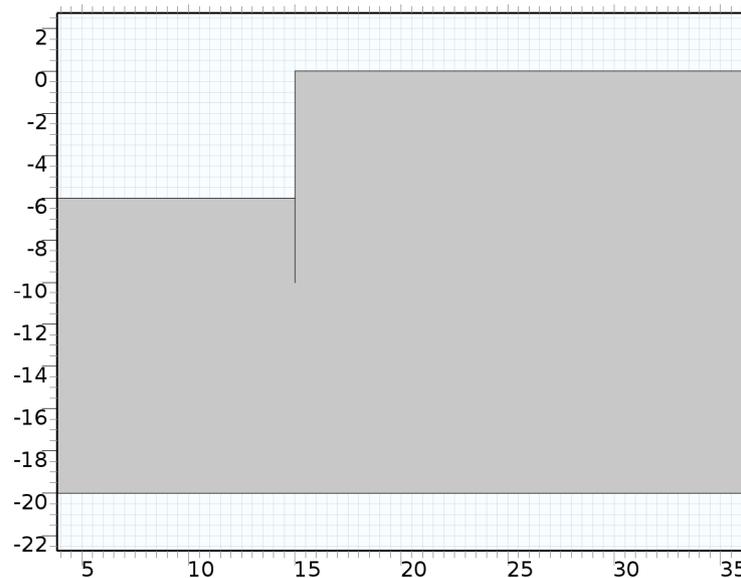
Nom	Expression	Valeur	Description
X_contraintes	-5e3[Pa]	-5000.0 Pa	in-situ contraintes, xx composant
Y_contraintes	-8e3[Pa]	-8000.0 Pa	in-situ contraintes, yy composant
Z_contraintes	-5e3[Pa]	-5000.0 Pa	in-situ contraintes, zz composant
U_max	-10[mm]	-0.010000 m	Déflexion de rideau admissible
Profondeur	6[m]	6.000 m	Profondeur (paramètre)

#### Couplage :

On utilise pour le couplage le type extrusion générale en zone de contacte rideau de paplanche et sol dont la force d'interface est 0.67.

#### Géométrie :

Concernant la géométrie est en mètre et on a utilisé des formes des rectangles puis on a Constitué l'assemblage de model .



**Fig .4.7.** Conception d'un modèle

#### 4.4.3 .Choix du matériau

Le Matériaux utilisés dans cette étude est l'acier dont les caractéristiques données dans le tableau .

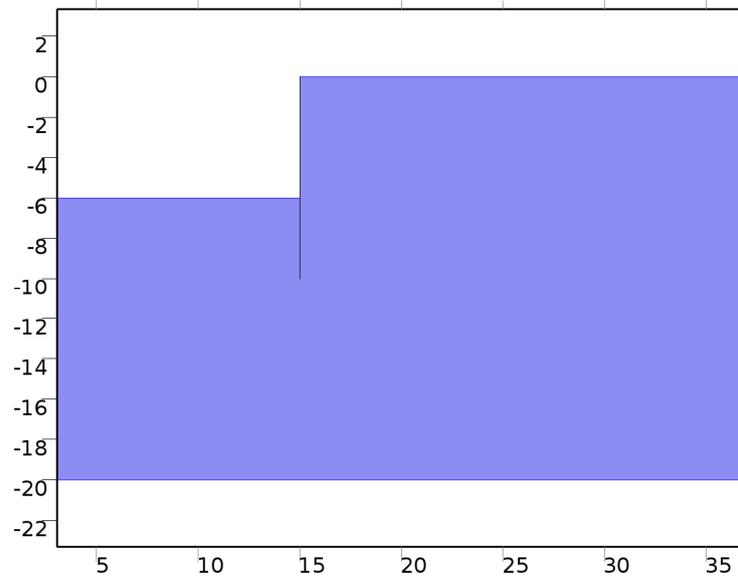


Fig . 4.8.Choix du matériau

Tableau 4.2. Tableau des paramètres du sol

Nom	Valeur	Unité
Module de Young	20e6	Pa
Coefficient de Poisson	0.3	1
Masse volumique	1900	kg/m <sup>3</sup>
Cohésion	0	Pa
Angle interne de frottement	35[deg]	Rad

Rideau de palplanche

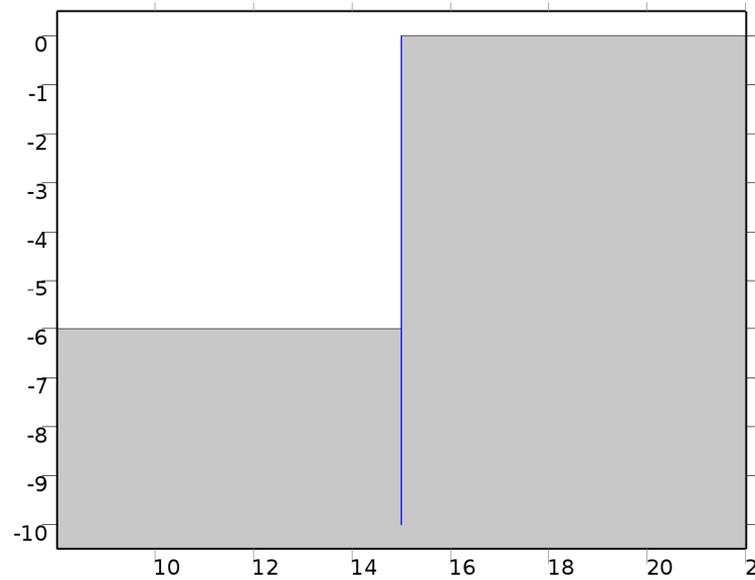


Fig .4.9. Rideau de palplanche

**Tableau 4.3.**Tableau des paramètres du rideau de palplanche

Nom	Valeur	Unité
Module de Young	210e9	Pa
Coefficient de Poisson	0.3	1
Masse volumique	7850	kg/m <sup>3</sup>
Conductivité de l'électrolyte	0.0001	S/m

#### 4.4.4 . Mécanique des solides

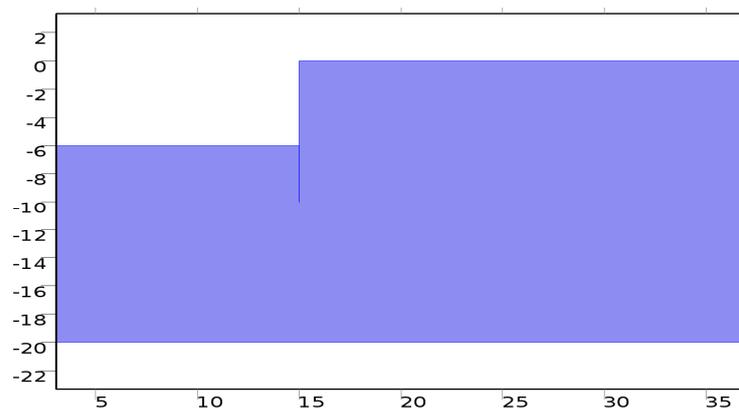
Le Comportement des matériaux (sols et de rideau de palplanche) est élastique linière

**Tableau 4.4.**Tableau des propriétés issues du matériau

Propriété	Matériau	Groupe de propriétés
Module de Young	Sol	Basique
Coefficient de Poisson	Sol	Basique
Masse volumique	Sol	Basique
Module de Young	Rideau de palplanche	Basique
Coefficient de Poisson	Rideau de palplanche	Basique
Masse volumique	Rideau de palplanche	Basique

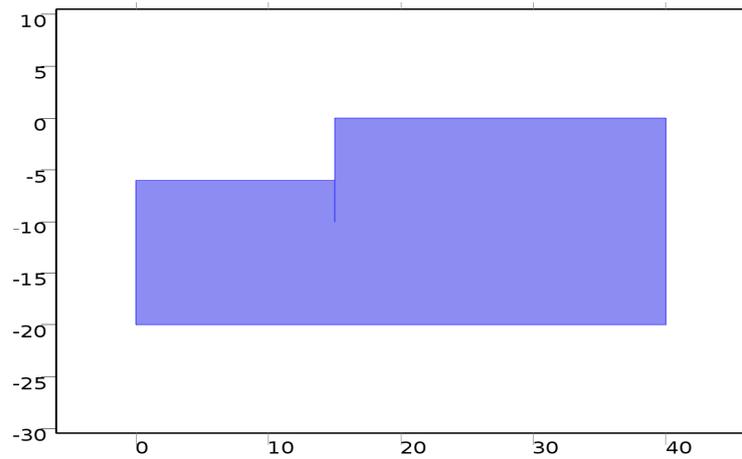
#### Plasticité du sol :

Le Critère de rupture du sol est de Mohr - Coulomb

**Fig .4.10.** Mécanique des solides**Tableau 4.5.**Propriétés issues du matériau

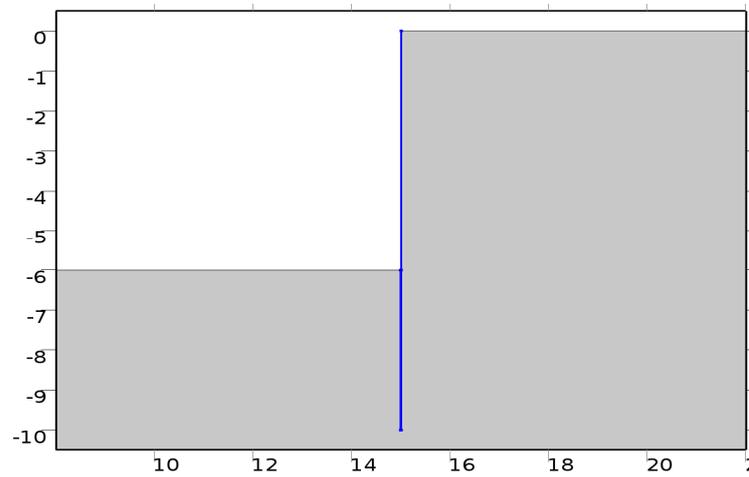
Propriété	Matériau	Groupe de propriétés
Cohésion	Sol	Mohr-Coulomb
Angle interne de frottement	Sol	Mohr-Coulomb

**Condition Initiales et condition aux limites :**



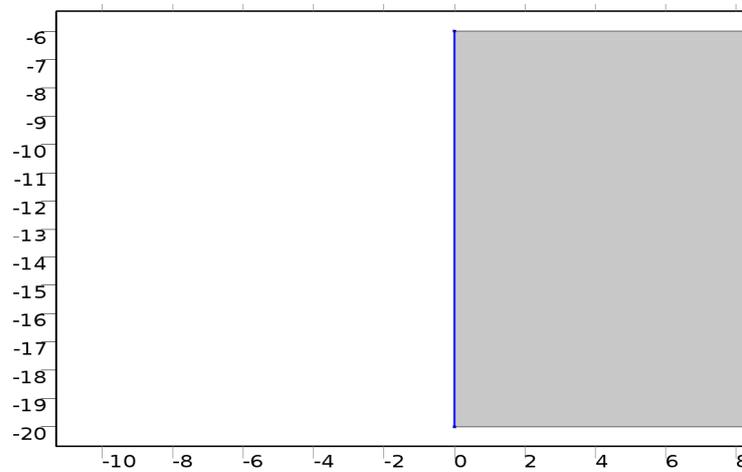
**Fig.4.11.** Condition Initiales et condition aux limites

**Libre**



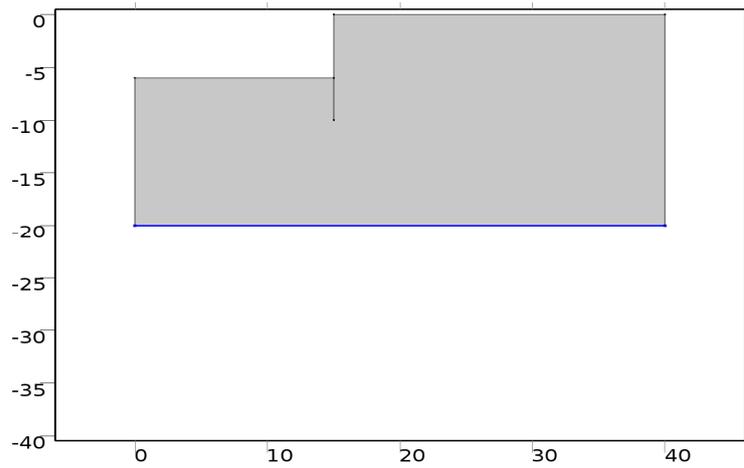
**Fig. 4.12.** Libre

**Symmetrie**



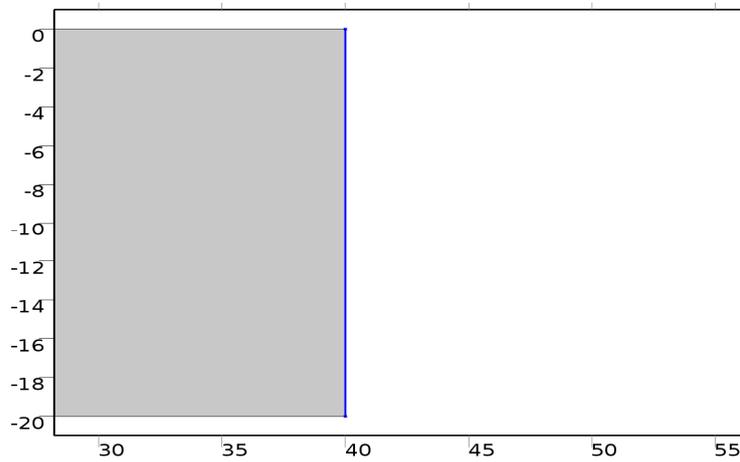
**Fig. 4.13.** Symmetrie

**Limite fixé (encastrement)**



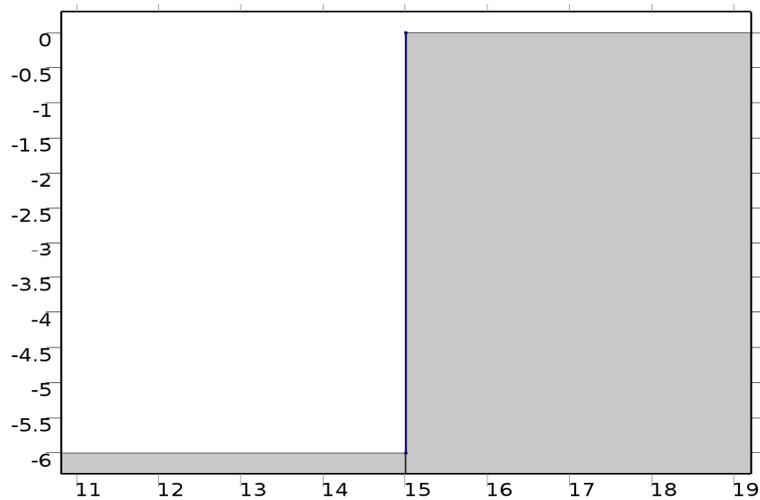
*Fig .4.14. Limite fixé (encastrement)*

**Appui simple**



**Fig.4.15. Appui simple**

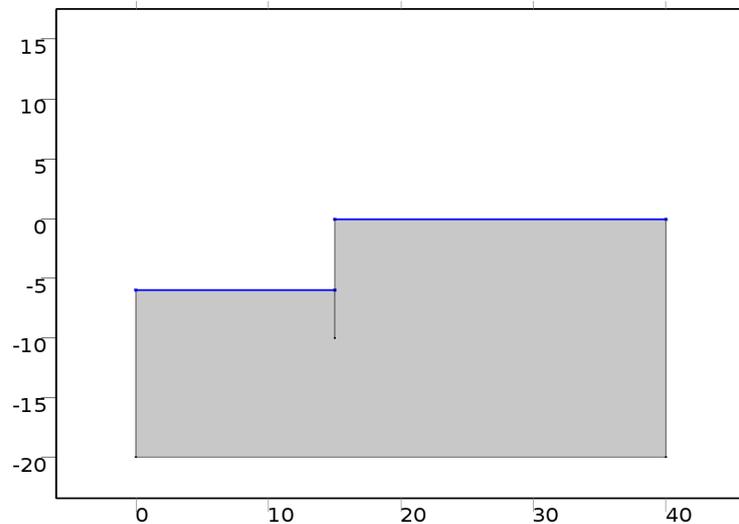
**Limite de déplacement**



**Fig. 4.16.Limite de déplacement**

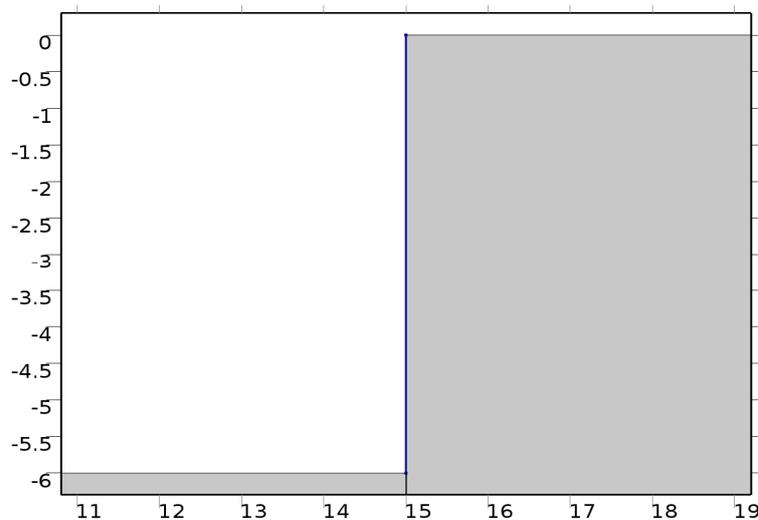
#### 4.4.5 .Les charges

Les surcharges sont appliquées horizontalement et directement sur le sol dans les parties actives et de butées comme il illustré dans la fig.4.17.



**Fig.4.17.** Les surcharge

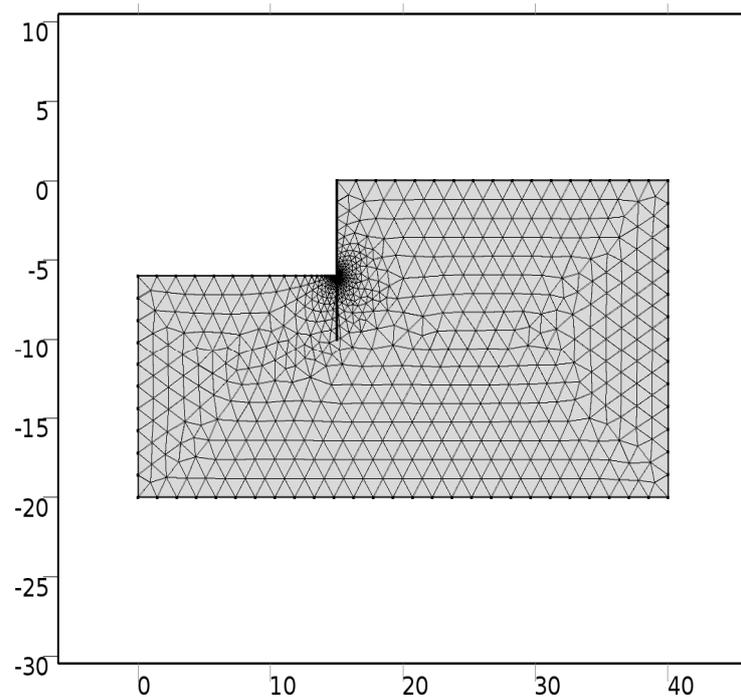
Les contraintes horizontales de poussées sont appliquées perpendiculaires au rideau de palplanches comme il illustré dans la fig.4.18.



**Fig.4.18.** Les contraintes horizontales de poussées

#### 4.4.6 Choix d'un maillage :

Notre logiciel comme tous les autres logiciels a ses propres outils de définition et de visualisation d'entités géométriques, il propose un algorithme pour générer plus ou moins automatiquement des maillages triangulaire libre dont la taille d'élément minimale et maximale est respectivement 0.027- 6.03 et facteur de courbure est 0.3 ainsi le taux de croissance maximum des éléments 1.3



**Fig. 4.19.**Choix de maillage

#### 4.4.7 Etude et configurations du solveur

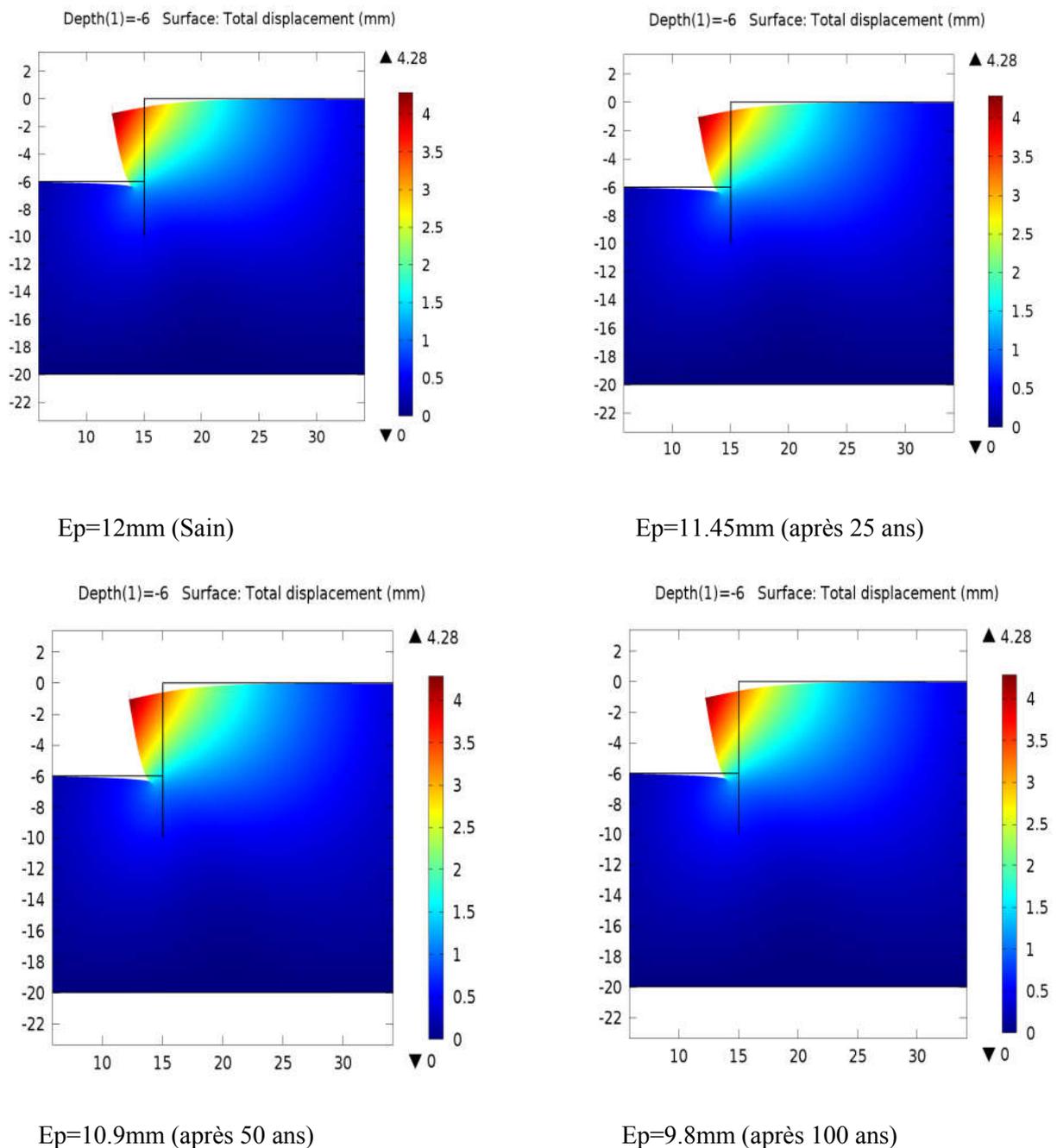
Cette étape permet de compiler les équations en utilisant l'étape d'étude stationnaire avec une tolérance relative de 0.1

#### 4.4.8 Résultats obtenues

On a effectué des modélisations de même model avec des épaisseurs de rideau de palplanche 12 mm (pas de corrosion), 11.45 mm, 10.9mm et 9.8mm (avec corrosion) en se basant sur les perte d'épaisseur recommandées des rideau de palplanches dues au corrosion en contacte d'une seul coté avec un sol naturel sableux et l'autre coté à l'atmosphère qui sont respectivement 0.3+0.25mm (après 25 ans), 0.6+0.5.mm (après 50 ans), 1.2+1mm (après 100 ans) sachant que la durée de vie de ce rideau est 100 ans selon [25].

## Présentation des scénarios étudiés

### 4.4.8.1 Déplacements totales



**Fig.4.20.** Déplacements totales

Les Fig4.20 montre les déplacements de 04 cas durant la période d'exploitation de rideau de palplanche . Ces déplacements atteignent des valeurs de 4.28 mm et ces valeurs restent les même si les caractéristiques du sol restent inchangeable durant la période de vie de rideau de palplanche.

4.4.8.2 Région Plastique :

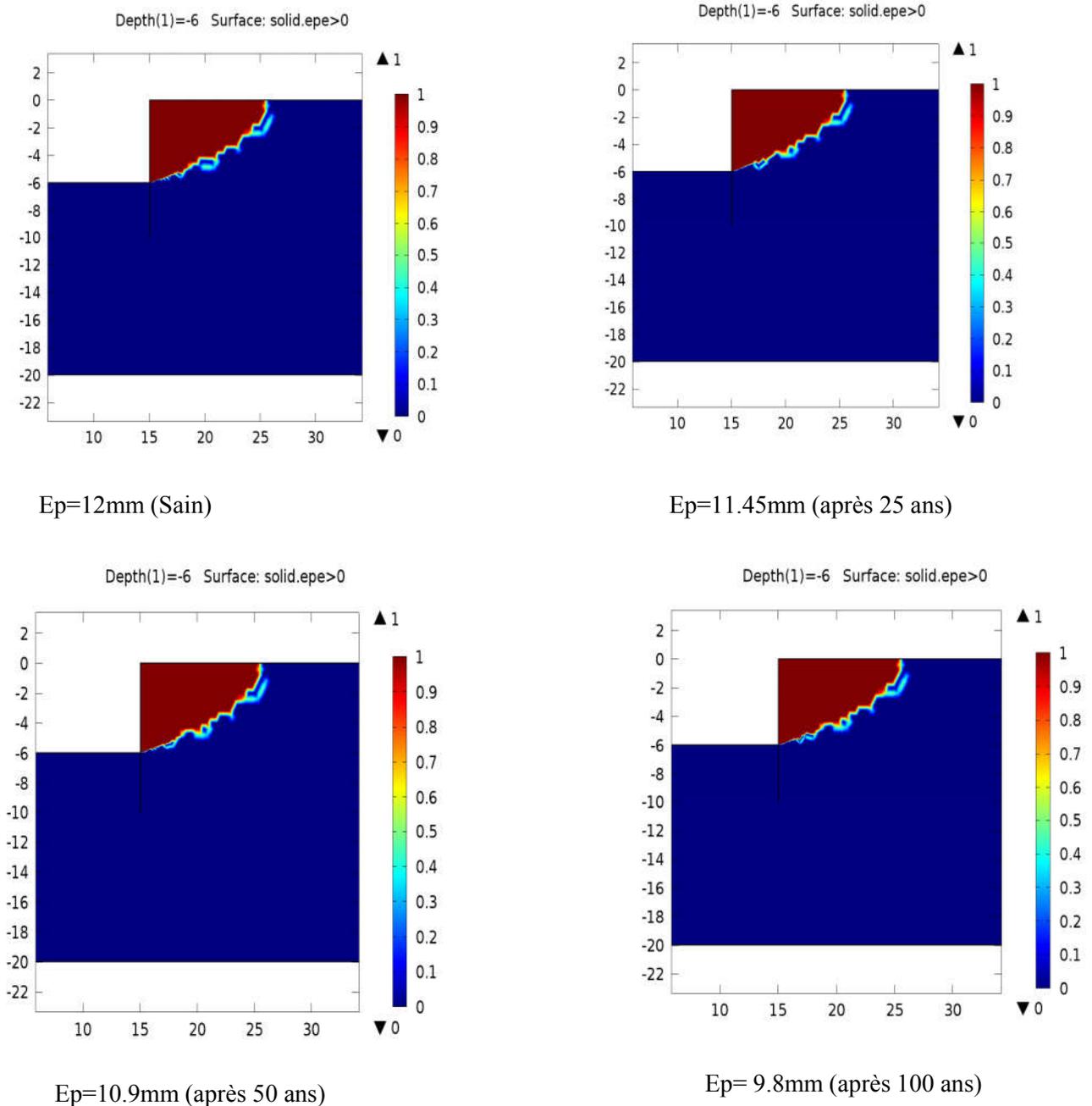
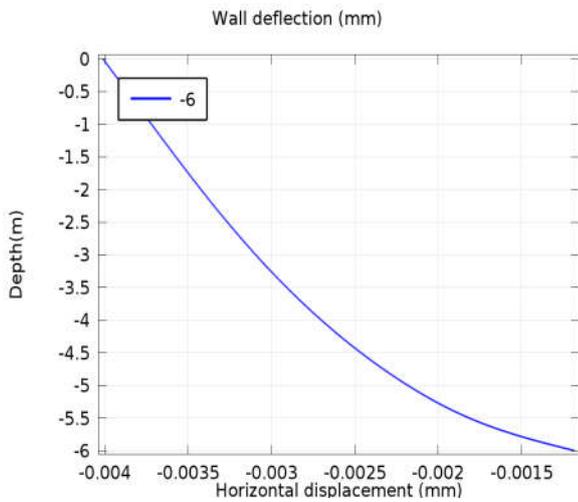


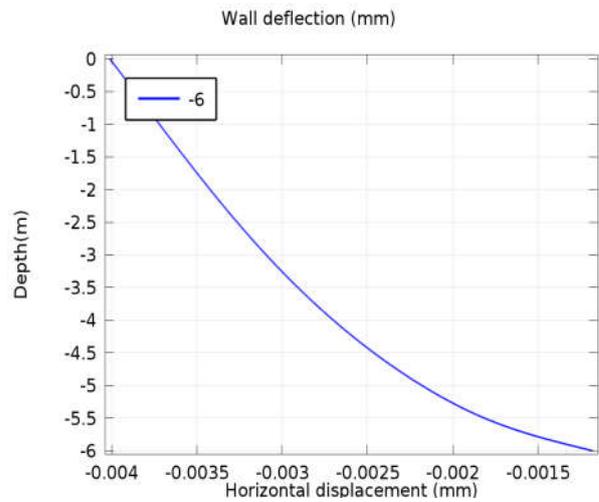
Fig.4.21. Région Plastique

Si on compare les Fig.4.21 . On constate une très grande similitude du mode de ruine de la region plastique .Le mode de ruine est pratiquement les meme si on compare les 04 cas et déformations se concentrent sur la region limitée par la hauteur de mur rideau et une largeur de 12 m à partir de bord de ce mur environ double de hauteur .

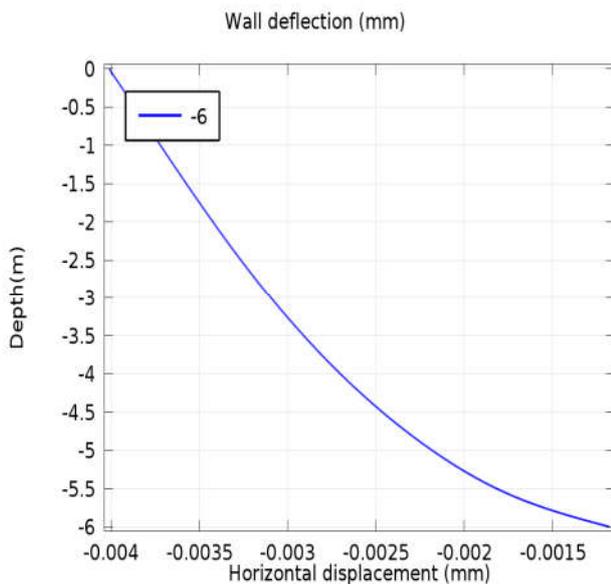
4.4.8.3 Déflexion de mur rideau de palplanche :



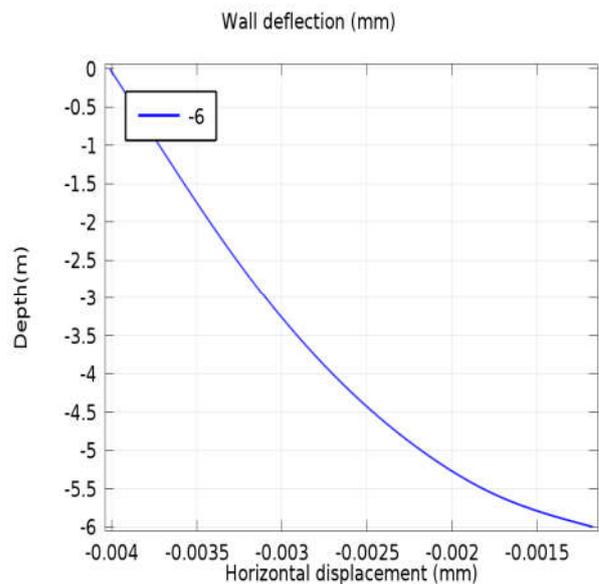
Ep=12mm (Sain)



Ep=11.45mm (après 25 ans)



Ep=10.9mm (après 50 ans)

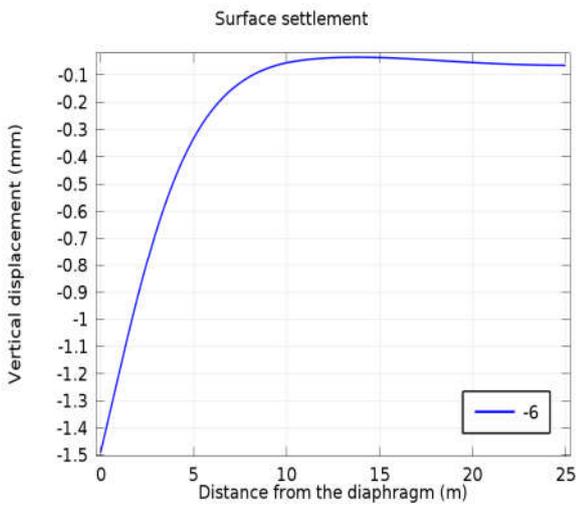


Ep=9.8mm (après 100 ans)

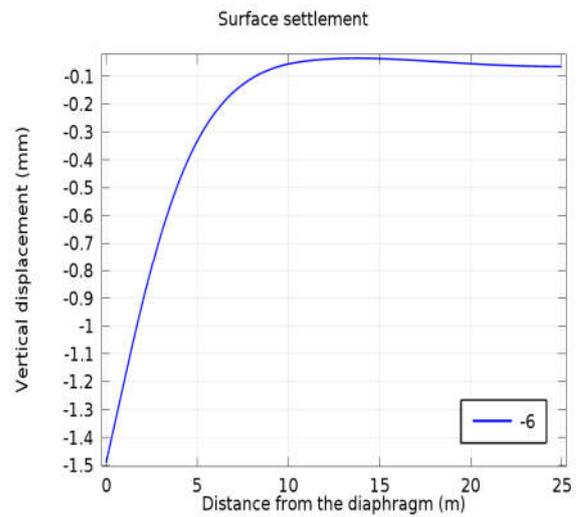
Fig.4.22. Déflexion de mur rideau de palplanche

Les courbes fig4.22 présentent les variations des déplacements sur le profondeur .les valeurs de déplacements horizontales s’augmentent de haut vers bas (à 0m :  $\Delta=4\text{mm}$  et à -6m :  $\Delta=1\text{mm}$  ) et ce malgré le passage de durée de vie et les pertes d’épaisseurs de rideau de palplanche à cause de la corrosion atmosphérique et dans le sol.

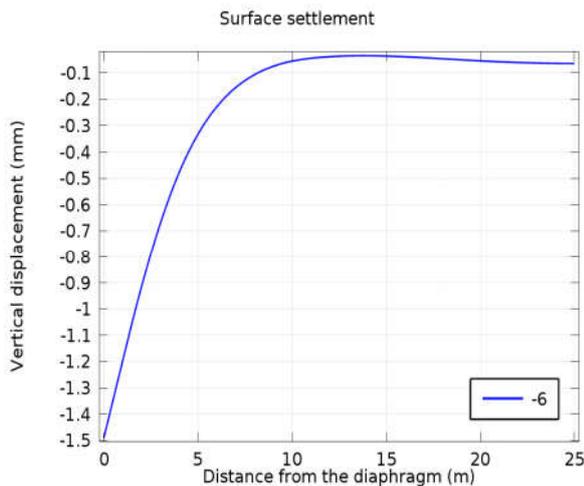
4.4.8.4 Surface de tassement :



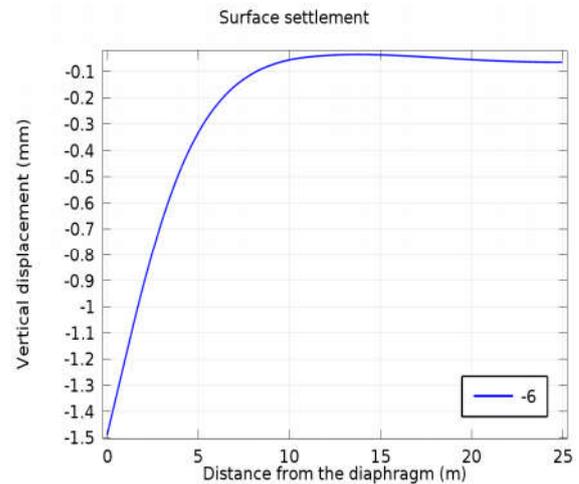
Ep=12mm (Sain)



Ep=11.45mm (après 25 ans)



Ep=10.9mm (après 50 ans)



Ep=9.8mm (après 100 ans)

Fig.4.23 .Surface de tassement

Les courbes fig4.23 présentent les variations des déplacements sur la longueur du sol .les valeurs de déplacements s'augmentent dans les régions proches de mur rideau et s'abaissent loin de ce mur (à x=0m :  $\Delta=-1.5\text{mm}$  et à x=25m :  $\Delta=-0.1\text{mm}$  ) et ce malgré le passage de durée de vie et les pertes d'épaisseurs de rideau de palplanche à cause de la corrosion atmosphérique et dans le sol.

4.4.8.5 Contraintes de von Mises dans le rideau de palplanche :

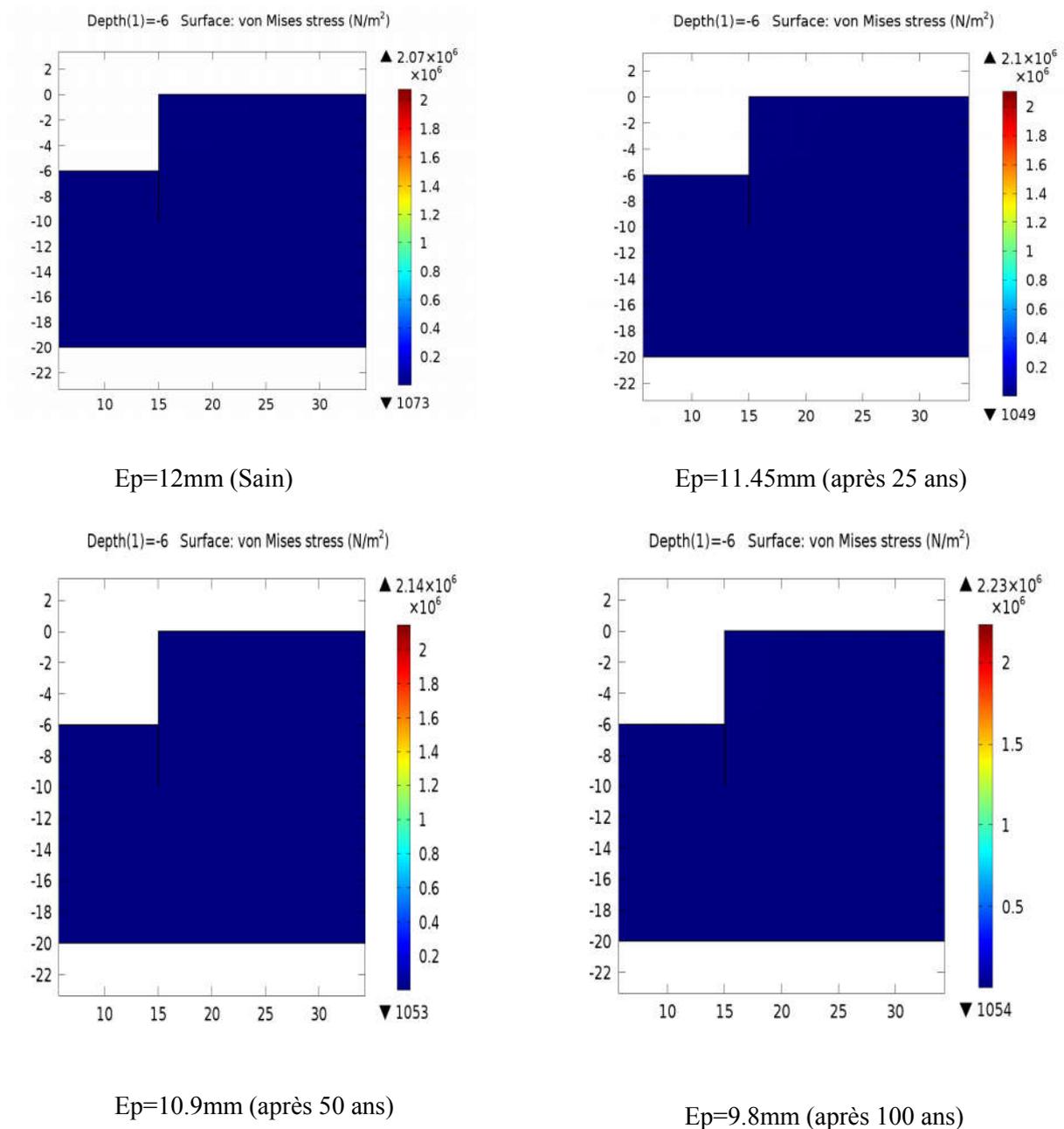


Fig.4.24. Contraintes de von Mises dans le rideau de palplanche

Les Fig. 4.24 montre les grandes valeurs des contraintes de von mises au niveau de rideau de palplanche se situent au point de pied vue la concentration des contraintes de poussées au pied de rideau de palplanche . Ces valeurs changent du  $2.07 \times 10^6$  N/mm<sup>2</sup> et augment avec le temps j'jusqu'a  $2.23 \times 10^6$  N/mm<sup>2</sup> .

## Conclusion générale

---

### CONCLUSION GENERALE

En génie civil, l'utilisation des palplanches est très vaste, qu'elle soit provisoire ou définitive, au vu des différents avantages qu'elles présentent, quant à la facilité de transport, de mise en œuvre, ou d'arrachage .

Notre démarche a consisté en une modélisation numérique d'un rideau de palplanche sous des conditions de chargement (contraintes de poussée et de butée ainsi les surcharges) . Le modèle géométrique est modélisé par le logiciel COMSOL en appliquant la méthode des éléments finis. La variation de l'épaisseur durant la durée de vie met en évidence la perte de surface, moment d'inertie et module de section et par conséquent la résistance aux efforts de poussée et butée soit dans le milieu sol, atmosphère et eau . Les résultats présentés sous forme de graphes (caractéristiques géométrique du rideau à savoir et champs de déplacements, déformations et de contraintes montrent le comportement mécanique du sol ainsi les zones qui peuvent être endommagées sous l'effet des contraintes de poussées.

Le rideau de palplanche de 6 m de hauteur et forme AU 20 d'épaisseur de 12 mm peut résister jusqu'à 100 ans vu le coefficient de sécurité supérieur à 1.5 malgré la réduction des caractéristiques géométriques ( module de section, moment d'inertie, section, capacité de moment de flexion), tout en supposant que les caractéristiques réelles du sol sont restées les même durant cette période de service.

D'une part Comme Durabiity est un logiciel destiné au vérification de la stabilité des rideaux de palplanches en prenant par considération la durée de vie et la corrosion affectant sur les deux face .D'autre part le Comsol Multiphysics est un logiciel général des éléments finis notamment pour résoudre les problèmes géotechniques des ouvrages de soutènement, il y a des possibilités infinies pour l'utilisateur lors de la mise en place d'un modèle. Toutefois, cette diversité ne toujours jouer en Comsol Multiphysics faveur lors de l'établissement d'un modèle idéalisé simple.

Les méthodes de dimensionnement des rideaux de palplanches reposent sur une vérification des efforts vis-à-vis des états limite de stabilité interne. L'approche que nous proposons introduit : les effets du temps, via les scénarios de corrosion. Cette prise en compte du temps peut être intégrée dans une approche de type dimensionnement : c'est ce qui est fait

## Conclusion générale

---

dans l'outil Comsol Multiphysics dont il a été question au chapitre 4. Le calcul de l'évolution des déplacements du rideau et déformations du sol c'est dans ce domaine que réside la principale originalité de ce travail.

Nous avons choisi les deux logiciels Durability et Comsol Multiphysique à partir de ses multiples avantages comme : la précision, la capacité de calcul et la vitesse d'exécution, il définit la structure à analyser dans son ensemble avec l'interprétation graphique des résultats.

Enfin, nous espérons que ce mémoire sera le point de départ pour d'autres projets afin de participer à la relance des infrastructures en domaine de génie civil notamment les ouvrages de soutènement.

## Références bibliographiques

- [1] **HADJ Abderrahmane Saida** (2012) ; « étude de l'interaction d'un rideau de palplanches avec le sol de fondation pour les ouvrages portuaires ». université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [2] **Eurocode 7 Potts, David**, *Cours de soutènement*. Londres : Imperial Collège, non publié.
- [3] Cours de mécanique des sols II Notes de cours Rideaux de palplanches.
- [4] **Rowe** (1957) *Limite Design souple Walls- Procédant Midlands - Mécanique des sols* Société Vol 1957
- [5] **Terzaghi (K.) et peck (R.B.)**. *Mécanique des sols appliquée aux Travaux Publics et au Bâtiment*. Dunod (1957).
- [6] **Rowe P.W**: Fiche Ancré pile Murs proc. Inst. Civ. Eng. janvier 1952
- [7] **SETRA** (1994). *Les ouvrages en Terre Armée: guide pour la surveillance spécialisée et le renforcement*. Paris.
- [8] **SETRA** (1979). *Les ouvrages en Terre Armée : recommandations et règles de l'art - Guides techniques*.
- [9] **LCPC, Ed.** (2003). *Guide technique - Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des ouvrages de soutènement en remblai renforcé par des éléments métalliques*, LCPC.
- [10] **Haïun G., Jailloux J.-M. et Renaudin F.** (2007). "Bilan des investigations effectuées sur des ouvrages en terre armée." SETRA - Ouvrages d'Art **1**.
- [11] **Romanoff M.** (1957). *Underground corrosion*. U. S. Department of Commerce. Houston, TX, National Bureau of Standards, Circular .
- [12] **Alban M.** (2007). *Rapport de projet de fin d'étude: Expertise non destructive des ouvrages en terre armée*.
- [13] **Hubbell** (2003). *Corrosion Guide - Step 7 Helical Screw Foundation System Design Manual for New Construction*. A.B. Chance Company.
- [14] **Darbin M., Jailloux J.-M. et Montuelle J.** (1988). "Durability of Reinforced Earth Structures: The Results of a Long term study conducted on Galvanized Steel." Proc. Instn Civil Engrs .

## Références bibliographiques

---

- [15] **Guilloux A. et Jailloux J. M.** (1979). "Full scale failure test on reinforced earth wall by accelerated corrosion." C.R. Coll. Int. Renforcement des sols.
- [16] **Terre Armée** (1986a). La durabilité des des ouvrages en terre armée, réalisés avec des armatures en acier galvanisé.
- [17] **Elias V.** (2000). FHWA-NHI-00-044 : Corrosion/degradation of soil reinforcements for mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes. Federal Highway Administration.
- [18] **Weatherby D. E.** (1982). FHWA RD-82-047: TIEBACKS. Federal Highway Administration.
- [19] **CHAU Truong-Linh** ; « Effet de la corrosion des armatures sur lecomportement des murs en remblai renforcé par des éléments métalliques » l'Université Paris - Est
- [20] **Chaker V. et Palmer J. D., Eds.** (1989). Effects of soil characteristics on corrosion. STP 1013, ASTM.
- [21] **Elias V.** (1990). FHWA-RD-89-186 : Durability/corrosion of soil reinforced structures. Federal Highway Administration. Baltimore, U.S.A. **MSE-1**: 22.
- [22] **Doyle G., Seica M. V. et Grabinsky M. W. F.** (2003). "The role of soil in the external corrosion of cast iron water mains in Toronto, Canada." Canadian Geotechnical Journal .
- [23] **Reynaud A.** (2006). Corrosions et fontes. Paris, CTIF
- [24] **Raharinaivo A., Ed.** (2005). Les méthode électrochimiques appliquées au diagnostic et à la réhabilitation du béton armé concerné par la corrosion, LCPC.
- [25] **European** comité for standardigation Eurocode 3 part 5 2007 designe oftal structure.
- [26] **Amina bendjebbour** (2011), corrosion localisé des aciers API5L-X52 de la ligne ASR/MP sollicite en sol Algérien. Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen
- [27] **Josean Me –H 1974.** Methode de calcul de rideau de palplanche : étude bibliographique LPC :Juin .aout
- [28] Guide de Durabilité crée par Arcelometal
- [29] Comsol (2011) Comsol Multiphysics User's Guide, Comsol 4.2a edn , Comsol AB, Tegnégatan 23 , SE-111 40.

### RÉSUMÉ :

Les rideaux de palplanches sont constitués de profilés généralement métalliques, emboîtés les uns dans les autres et battus dans le sol de fondation, pour former un écran souvent vertical. La corrosion, qu'elle soit a une relation avec le sol, atmosphère est une altération qui provoque une réduction de la section d'acier. Le besoin est alors de comprendre les mécanismes de la corrosion afin de réaliser une réévaluation de la durée de vie des ouvrages de soutènement en palplanches soumis à la corrosion ainsi les scénarios prévus au sol soutenu

**MOTS CLES :** Palplanches ; sol ; Corrosion ; Durabilité ; Numérique.

### ملخص:

تصنع الحواجز من عوارض معدنية عوما مركبة مع بعضها البعض وتوضع في الأرض بشكل عمودي لغرض دعم التربة الصداً (التآكل) مهما كان سببه. إما عوامل داخل التربة أو بسبب المحيط هو بحد ذاته يغير في الخواص الفيزيائية للمادة ويؤدي إلى نقصان سمك الحاجز الحديدي. المشكل إذن هو فهم معنى التآكل لغرض إعادة تقييم صلاحية هذه الهياكل المعدنية وكذلك فهم السيناريو الذي يحدث في التربة المدعمة بسبب تآكل الحاجز المدعم.

**كلمات المفتاح:** حواجز معدنية، التربة، التآكل، الاستدامة، الرقمي.