

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Thèse

Analyse analytique et numérique d'un rideau de palplanches corrodées.

Présentée au Département de Génie Civil et Travaux Publics, UDL, Sidi Bel Abbès

Pour obtenir Le diplôme de **Doctorat en Sciences**

Spécialité : **Génie Civil**

Option : Geotechnique et Matériaux

Par

BALEGH Benamar

Soutenue le 19 / 12 / 2018 devant la Commission d'examen

Jury MM.

Aissa ASROUN	Professeur	UDL SBA	Président
Belkacem MEKERTA	Professeur	UAD ADRAR	Examineur
Youcef HOUMADI	MCA	CU A TEMOUCHENT	Examineur
Habib TROUZINE	Professeur	UDL SBA	Encadreur

REMERCIEMENTS

Cette présente thèse a été réalisée au Laboratoire de Génie Civil et Environnement (L.G.C.E) du département génie civil de l'université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes.

Je remercie le président du jury, le Professeur Aissa ASROUN pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Je remercie également les Professeurs Belkacem MEKERTA , Youcef HOUMADI, pour avoir accepté de juger ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude et mes remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Habib Trouzine, Professeur à l'Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, pour avoir assuré l'encadrement scientifique de mon travail. C'est grâce à la confiance, qu'il a témoignée à mon égard, que j'ai pu arriver à la conclusion de ce travail.

Je remercie l'équipe de laboratoire (L.G.C.E) de l'Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes qui m'a aidé à réaliser ce travail. Mes vifs remerciements vont aussi au CEN "Comité Européen de Normalisation" pour m'avoir autorisé à utiliser et exploiter les tableaux de l'Eurocode 3 Part5. Aussi je tiens à remercier les responsables du Laboratoire de recherche du centre universitaire de Ain Témouchent d'avoir accepté de collaborer avec nous sur la partie numérique utilisant Comsol Multiphysics.

Analyse analytique et numérique d'un rideau de palplanches corrodé

Résumé

Pour des raisons technico-économiques, la qualité première d'un ouvrage de génie civil est de servir le plus longtemps possible avec un minimum d'entretien. Les rideaux de palplanches sont constitués de profilés généralement métalliques, emboîtées les uns dans les autres et battus dans le sol de fondation, pour former un écran souvent vertical. La corrosion, qu'elle soit due au contact avec l'eau, le sol et/ou l'atmosphère est un phénomène d'altération complexe difficile à prévoir qui provoque une réduction de la section d'acier. Le travail présenté s'inscrit dans le cadre de la compréhension des mécanismes de la corrosion afin de réaliser une ré-évaluation de la durée de vie des ouvrages de soutènement en palplanches soumis à la corrosion, nous avons analysé et comparé des modèles analytiques de la corrosion avec l'Eurocode 3, Partie 5 pour estimer le taux de corrosion et la perte d'épaisseur du rideau de la palplanche en acier, également des modèles numériques sont développés pour étudier l'effet de la corrosion sur les propriétés mécanique du rideau de palplanches et la stabilité de l'ouvrage grâce à une simulation numérique utilisant les techniques de couplage multi-physique. Ces modèles permettent la simulation et la prédiction de la synergie de la concentration des contraintes et de la corrosion uniforme et localisée sur les palplanches. Les résultats montrent qu'il faut veiller à ce que les moments de flexion maximum ne se produisent pas au même niveau que les zones de corrosion principales. De plus, il est possible de définir une limite supérieure et une limite inférieure, correspondant respectivement à la présence d'eau et aux sols, afin de prédire la perte d'épaisseur due à la corrosion aussi de prédire les scénarios de corrosion de rideaux de palplanches à travers leur durées de services en utilisant le logiciel des éléments finis Comsol

Mots-Clés : Palplanches, Corrosion, Eurocode 3 partie 5, Analytique, Numérique

Analytical and numerical study of corroded sheet pile

-Abstract

For technico-economic reasons, the main quality in civil engineering works is to serve as long as possible with a minimum of maintenance. The sheet piles consist of generally metallic profiles, nested one inside the other and beaten in the foundation ground, to form a screen often vertical. Corrosion, whether in contact with water, soil and the atmosphere, is a difficult complex weathering phenomenon that causes a reduction in the steel section. The work presented is part of the understanding of corrosion mechanisms in order to carry out a re-evaluation of the service life of corroded sheet piles, we have analyzed and compared empirical models of corrosion with Eurocode 3, Part 5 to estimate corrosion rate and thickness loss of steel sheet pile also numerical models are developed to study the effect of corrosion on the mechanical properties of sheet pile and stability of soil supported by a multiphysics coupling simulation. These models allow the simulation and prediction of the synergy of stress concentration and uniform and localized corrosion on sheet piles. The results show that it must be ensured that the maximum bending moments do not occur at the same level as the main corrosion zones. In addition, it is possible to define an upper limit and a lower limit, respectively corresponding to the presence of water and soils, to predict the loss of thickness due to corrosion also to predict the corrosion scenarios of sheet pile walls through their time of service lives by use of software of finite elements Comsol.

Keywords: Sheet piles, Corrosion, Eurocode 3 part 5, Empirical model, Analytical, Numerical

دراسة تحليلية و رقمية لجدار الاستناد الحديدي المتكون من كومة الألواح المتصدئة

ملخص

لأسباب تقنية واقتصادية، إن الجودة في مشاريع الهندسة المدنية أساسها العمل لأطول خدمة ممكنة بأقل صيانة. تتكون ستائر الألواح من أشكال معدنية بشكل عام ، متداخلة ويتم ردمها في التربة ، لتشكل جدار عمودي. إن الصدء ، سواء كان ملامسا للماء أو التربة أو الغلاف الجوي ، هو ظاهرة معقدة تسبب انخفاضاً في سمك الحديد. العمل المقدم هو جزء من أليات لإجراء إعادة تقييم للحياة كومة رقة الإبقاء على الهياكل الخاضعة للصدء، قمنا بتحليل ومقارنة التآكل نماذج تجريبية مع الكود الأوربي 3 ، الجزء 5 لتقدير معدل التآكل وفقدان سماكة كومة صفائح الفولاذ. كما تم تطوير نماذج عددية لدراسة تأثير التآكل على الخواص الميكانيكية الكهروكيميائية لستائر الألواح واستقرار التربة مدعومة بمحاكاة اقتران متعددة العوامل. تسمح هذه النماذج بمحاكاة وتوقع التآزر لتركيز الإجهاد والتآكل الموحد والموضعي على أكوام الصفيحة. تظهر النتائج أنه يجب التأكد من أن أقصى لحظات الانحناء لا تحدث في نفس مستوى مناطق التآكل الرئيسية. وبالإضافة إلى ذلك، فمن الممكن لوضع الحد الأعلى والحد الأدنى المقابلة على التوالي إلى وجود الماء والتربة للتنبؤ بفقدان سماكة الجدار بسبب الصدء. أيضا للتنبؤ بسيناريوهات التآكل من جدران من خلال فترة مدة الاستخدام وهذا من خلال استغلال برمجيات العناصر المحدودة كومصول.

الكلمات المفتاحية: جدار الاستناد الحديدي، الصدء، الكود الأوربي 3 الجزء 5، نموذج تجريبي، تحليلي ، رقمي

Table de Matière

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iv
Liste des symboles	viii
Introduction générale	1
01 Généralités sur les rideaux de palplanche et le phénomène de corrosion	
1.1 Introduction.....	6
1.2 Définition.....	6
1.3 Les différentes catégories de palplanche.....	7
1.4 Les serrures	12
1.5 Les éléments d'assemblage.....	15
1.6 Domaine d'utilisation et d'application	18
1.7 Mise en œuvre des palplanches	21
1.8 Enclenchement d'un rideau de palplanches	24
1.9 L'arrachage des palplanches.....	24
1.10 Principaux étanchements des palplanches.....	25
1.11 Les avantages et les inconvénients d'utilisation des palplanches.....	27
1.12 Différentes dégradations des rideaux de palplanches.....	27
1.13 Notions de corrosion.....	29
1.14 Effet mécanique de la corrosion des palplanches.....	30
1.14.1 Répartition de la corrosion.....	30
1.15 Corrosion des palplanches.....	33
1.15.1 Données expérimentales sur la corrosion des métaux dans le sol.....	33
1.15.2 Phénomène de la corrosion électrochimique sur les métaux.....	34
1.15.3 Principe de la protection par galvanisation.....	35
1.15.4 Les étapes de la corrosion de rideau de palplanche en acier galvanisé.....	35
1.16 Les facteurs de la corrosion.....	36
1.17 Les Facteurs influençant la corrosion.....	37
1.17.1 Nature de l'acier.....	37
1.18 Influence des ions.....	39
1.19 La température du sol	41
1.19.1 La résistivité	42
1.19.2 Prise en compte couplée du pH et de la teneur en eau.....	43
1.19.3 Nature du sol.....	43
1.20 La protection contre la corrosion.....	44
1.20.1 Protection électrique.....	45
1.20.2 Revêtements métalliques.....	47
1.20.3 Inhibition	48

1.21	Les essais de corrosion	49
1.22	Conclusion.....	51
02	<i>Calcul des rideaux de palplanches en génie civil avec prise en charge de la corrosion</i>	
2.1	Introduction.....	54
2.2	Principe de calcul de rideau de palplanche dans le sol	54
2.2.1	Méthode aux états limites.....	56
2.2.2	Méthode aux coefficients de réactions.....	56
2.2.3	Méthode des éléments finis	56
2.3	Etats limites de rupture selon L'Eurocode 3.....	57
2.4	Définition de la poussée et de la butée.....	58
2.5	Stabilité d'un mur de soutènement.....	59
2.5.1	Stabilité externe	59
2.5.2	Stabilité interne d'un écran de soutènement.....	67
2.6	Calcul d'ancrage	68
2.6.1	L'évaluation de l'effort d'ancrage T_u	68
2.6.2	L'hypothèse de calcul.....	69
2.6.3	La résistance ultime d'effort d'ancrage	70
2.7	Les coefficients de poussée et de butée	72
2.8	Le comportement d'un rideau de palplanche.....	72
2.8.1	La nature du sol.....	72
2.8.2	Les effets de l'eau sur les murs rideaux.....	74
2.8.3	Comportement de rideau de palplanche.....	75
2.8.4	La hauteur et la fiche de rideau de palplanche.....	75
2.8.5	Les appuis.....	76
2.8.6	Influence d'autres effets sur le comportement de rideau de palplanche.....	77
2.9	Les déformations horizontales et verticales.....	79
2.10	Estimation des tassements.....	80
2.10.1	Théorème de Clough et O'Rourke	80
2.10.2	Théorème de Hsieh et Ou.....	81
2.11	Effet de l'eau.....	84
2.11.1	Renard hydraulique.....	84
2.11.2	Effet de barrage d'un rideau de palplanches.....	85
2.12	Durabilité des rideaux de palplanches.....	85
2.12.1	Etude de l'environnement.....	86
2.12.2	Choix de la nuance d'acier.....	86
2.12.3	Conception pour la durabilité.....	88
2.13	Conclusion.....	91
03	<i>Modélisation analytique d'un rideau de palplanches corrodé</i>	
3.1	Introduction.....	94
3.2	Lecture de l'Eurocode 3 partie 5.....	94
3.3	Analyse du mécanisme de corrosion dans les aciers.....	97
3.4	Modèles analytique et mathématiques de corrosion.	100

3.5	Le cas étudié.....	102
3.6	Conclusion.....	103
04	Modélisation numérique d'un rideau de palplanches corrodé	
4.1	Introduction.....	107
4.2	Modélisation d'un rideau de palplanche par le logiciel COMSOL	107
4.2.1	Définition de logiciel	107
4.2.2	Conception d'un modèle.....	108
4.2.3	Choix du matériau.....	110
4.2.4	Les étapes de modélisation.....	112
4.2.5	Approche de conception.....	116
4.2.6	L'Analyse du modèle.....	116
4.3	Modélisation numérique de la corrosion uniforme dans le rideau de palplanches	117
4.3.1	Scenarios d'instabilité de rideau de palplanche corrodé.....	117
4.3.1.1	Déplacements totaux de rideau de palplanche.....	118
4.3.1.2	Zones plastiques du sol	119
4.4	Modélisation numérique de la corrosion localisée dans le rideau de palplanches	119
4.4.1	Paramètres géométriques initiaux et limites.....	119
4.4.2	Simulation de paramètres mécaniques développées sur le rideau de palplanches.....	120
4.4.2.1	Distributions de contraintes de Von Mises autour de défaut du à la corrosion dans l'eau.....	121
4.4.2.2	Distributions de déformations élastiques autour de défaut du à la corrosion dans l'eau.....	122
4.4.2.3	Distributions de contraintes autour de défaut du à la corrosion dans l'eau	123
4.4.3	Simulation de paramètres électrochimiques de corrosion dans le rideau de palplanche.....	124
4.4.3.1	Distributions des densités de courants de l'électrolyte autour de défaut du à la corrosion dans l'eau.....	125
4.4.3.2	Distributions des potentiels électrolytiques autour de défaut du à la corrosion dans l'eau.....	126
4.5	Conclusion.....	127
05	Résultats et interprétations	
5.1	Introduction.....	131
5.2	Analyse des modèles analytiques de corrosion	131
5.3	Analyse de valeurs de pertes d'épaisseurs dues à la corrosion selon l'Eurocode 3 partie 5.....	132
5.4	Comparaison entre les modèles analytique de corrosion et l'Eurocode 3 partie 5.....	133
5.5	Modélisation et les scénarios de corrosion aux cours de temps.....	137
5.6	Conclusion.....	138
	Conclusions générales et perspectives.....	141

Références bibliographiques

Annexes

Liste des figures

Figure1.1. Les palplanches à inertie	7
Figure1.2. Les palplanches plats	7
Figure 1.3. <i>Palplanches Laminées à Chaud</i>	8
Figure1.4. <i>Palplanches laminées à froid</i>	8
Figure1.5. Les palplanches raccords et les palplanches pliées	9
Figure1.6. Types de raccords	9
Figure1.7. Gabion cloisonné	10
Figure1.8. Gabions en palplanches [ALA97]	10
Figure1.9. Rideaux mixtes (HZ/AZ), port de Taipei, Taiwan	11
Figure1.10. Assemblage des éléments de la structure	11
Figure1.11. Combinaisons des éléments de la structure	12
Figure1.12. Utilisation des rideaux de palplanche comme soutènement provisoire dans un projet de pont à la région d'Adrar	12
Figure1.13. Serrure à la jonction de deux palplanches	13
Figure1.14. Différents types de raccordements	13
Figure. 1.15. Raccordement Omega	14
Figure1.16. Serrure des différents profilés	14
Figure1.17. Exemple d'application des profilés	14
Figure1.18. <i>La disposition des liernes dans un rideau de palplanches</i>	16
Figure1.19. Schéma général d'un rideau de palplanches ancré en tête	17
Figure1.20. Tirant attaché à un écran de soutènement	17
Figure1.21. Détail de raccordement du profilé HZ	18
Figure1.22. Exemple d'un rideau partiellement fiché dans le sol	19
Figure1.23. Quai permettant l'accostage de superpétroliers	19
Figure1.24. L'utilisation des palplanches comme batardeaux en rivière en France	19
Figure1.25. Terrassement dans le batardeau	20
Figure1.26. Le grand barrage de Mont Saint Michel en France	20
Figure1.27. Chantier d'une reconstruction d'un pont en utilisant des palplanches métalliques.	20
Figure1.28. Principe de fonctionnement du marteau hydraulique	21
Figure1.29. Travaux de battage	22
Figure1.30. Perforage avant fonçage	23
Figure1.31. Enclencheur automatique.	24
Figure1.32. Etanchement avec la soudure.	25
Figure1.33. Installation d'un système de drainage	25
Figure1.34. Système d'étanchéité horizontale (cas de tunnel)	26
Figure1.35. Système d'étanchéité (cas de fouille de radier)	27
Figure1.36. <i>Dégradation de mur de quai à cause de corrosion de rideau de palplanche [BRA04]</i>	28
Figure1.37. Dégradation de rideau de palplanche sous l'effet de corrosion [BRA04]	29
Figure1.38. Les aspects d'un solide métallique corrodé	30
Figure1.39. Metal due à l'hétérogénéité du métal [DAR88].	34
Figure1.40. Metal due à l'aération différentielle [DAR88]	34
Figure1.41. Pile simple « Fe-Zn » [TER1986]	35
Figure1.42. Protection cathodique par zinc [DAR88]	36
Figure1.43. Formation d'une piqûre dans un métal recouvert d'une couche passivante [GUI79]	38
Figure1.44. Développement de la piqûre dans l'acier galvanisé [WEA82]	39
Figure1.45. Effet de la teneur en eau sur la résistivité du sol [RAM57]	41
Figure1.46. Effet de la température sur la résistivité du sol [RAM57]	41
Figure1.47. Perte de masse par unité de surface en fonction de la résistivité renforcements en acier galvanisé [ELI00]	42
Figure1.48. Nomographe pour l'estimation de la vitesse de corrosion 'acier [HUB03]	43
Figure1.49. Moyens de prévention de la corrosion	45
Figure1.50. Préparation de la solution simulée de sol	49
Figure1.51. Dispositif d'essai de corrosion	51
Figure2.1. Modèle : a) rideau sans tirant d'ancrage b) rideau ancré dans le sol.	54
Figure2.2. Palplanche ancrée dans le sol.	55

Figure2.3. Rideau de palplanches soumis à une distribution de pression normale $p(z)$.	56
Figure2.4. Modes de rupture d'un rideau de palplanche	57
Figure2.5. Principe de la poussée et de la butée.	59
Figure2.6. Mécanisme de rupture d'un écran simplement butée.	60
Figure2.7. Rideau ancré en tête simplement buté en pied.	60
Figure2.8. Cas de la présence d'eau.	61
Figure2.9. Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête	61
Figure2.10. Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré	62
Figure2.11. Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile	63
Figure2.12. Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements dans l'écran de soutènement.	64
Figure2.13. Distribution idéalisée de la pression des terres.	65
Figure2.14. Résolution par la méthode de la poutre équivalente.	66
Figure2.15. Incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et le développement d'un effet de voûte.	67
Figure2.16. L'ensemble rideau et tirant d'ancrage.	69
Figure2.17. Résistance ultime de l'ancrage.	69
Figure2.18. Emplacement des ancrages.	70
Figure2.19. La résistance d'un bloc d'ancrage.	70
Figure2.20. L'emplacement de blocs d'ancrages dans le massif du sol.	71
Figure2.21. Parties de terrain commun à un rideau de palplanches	74
Figure2.22. Comportement d'un rideau ancré en tête soumis à une force horizontale croissante	78
Figure2.23. Un rideau avec frottement	79
Figure2.24. Profil de tassement de type convexe en tympan.	80
Figure2.25. Profil de tassement de type concave.	80
Figure2.26. Interaction sol structure de type convexe en tympan.	81
Figure2.27. Interaction sol structure de type concave.	81
Figure2.28. Méthode de détermination des tassements de type convexe	82
Figure2.29. La déformée d'un rideau de palplanches	83
Figure2.30. Méthode de détermination des tassements	83
Figure2.31. Méthode des gradients hydrauliques moyens.	84
Figure2.32. Effet de barrage d'un rideau de palplanches.	85
Figure2.33. Fenêtre sur logiciel durabilité d'Arcelometal [ARC15].	87
Figure2.34. Les différents Zones de corrosion dans le rideau de palplanche en milieu marin [ARC15].	89
Figure2.35. Les moments d'inertie réduits	90
Figure2.36. Les modules de flexion élastique et plastique réduits	90
Figure2.37. Les surfaces d'acier réduites	90
Figure2.38. Les moments de flexion réduits M_c, R_d	91
Figure2.39. Les moments de flexion réduits M_v, R_d	91
Figure3.1 Modèle analytique conceptionnel de Melchers de corrosion dans les structures en aciers [MEL99]	99
Figure3.2. Type de corrosion dans les rideaux de palplanches [BAL18a].	100
Figure3.3. Le cas étudié [BAL18b]	103
Figure4.1. Conception d'un modèle de Rideau de palplanche étudié	110
Figure4.2. Vue en 3D sur le rideau de palplanche	110
Figure4.3. Condition Initiales et condition aux limites	111
Figure4.4. Libre	112
Figure4.5. Symétrie	112
Figure4.6. Limite fixé (encastrement)	113
Figure4.7. Appui simple	113
Figure4.8. Limite de déplacement	113
Figure4.9. Les surcharges	114
Figure4.10. Les contraintes horizontales de poussées	114
Figure 4.11. Choix de maillage [BAL18a]	115
Figure 4.12. Déplacements totaux de rideau de palplanche [BAL18a].	118
Figure 4.13. Zones plastiques du sol [BAL18a].	119
Figure4.14. Distributions de contraintes de von Mises autour de défaut du à la corrosion [BAL16].	122
Figure4.15 Distributions de déformations élastiques autour de défaut du à la corrosion[BAL16].	123

Figure4.16. Distributions de tenseur des contraintes autour de défaut du à la corrosion [BAL16].	124
Figure4.17. Distributions des densités de courants de l'électrolyte autour de défaut du à la corrosion [BAL16].	126
Figure4.18 Distributions des potentiels électrolytiques autour de défaut du à la corrosion[BAL16].	127
Figure5.1. Modèles de corrosion empirique de Southwell., Melchers., Guedes et Garbator, Paik et Thayambali, Qui et Cui [BAL16b].	132
Figure5.2. Valeurs recommandée pour la perte d'épaisseur selon l'Eurocode 3 [BAL16b]	133
Figure5.3. Comparaison des valeurs recommandées pour la perte d'épaisseur selon l'Eurocode 3 avec des modèles empiriques de corrosion. [BAL18b]	135

Liste de tableaux

Tableau 1.1. <i>Caractéristiques des palplanches [MAR90]</i>	15
Tableau 1.2. <i>Série galvanique, obtenu dans l'eau de mer à 25°C [HAC90] [LUM05]</i>	31
Tableau 1.3. <i>Quelques exemples de couples matériau-milieu sensibles à la corrosion sous contrainte [PHI98]</i>	33
Tableau 1.4. <i>Les facteurs de la corrosion [MAR90]</i>	37
Tableau 1.5. <i>La composition chimique de la solution simulée de sol algérien(g/l) [SCU95]</i>	49
Tableau 2.1. <i>Caractéristiques des palplanches Larssen-Rombas (Sacilor) [BRA04]</i>	86
Tableau 3.1. <i>Perte d'épaisseur [mm] due à la corrosion pour les rideaux de palplanches en acier dans le sol et eau [EUR07]</i>	96
Tableau 3.2. <i>Les facteurs environnementaux dans la corrosion dans les milieux marins [MEL99]</i>	98
Tableau4.1. <i>Propriétés du Sol[BAL18a]</i>	108
Tableau4.2. <i>Propriétés de rideau de palplanche [BAL18a]</i>	109
Tableau4.3. <i>Paramètres et définitions Globales[BAL18a]</i>	109
Tableau4.4. <i>Les comportement et les propriétés issues du matériau</i>	111
Tableau4.5. <i>Le Critère de rupture du sol est de Mohr - Coulomb</i>	111
Tableau 5.1. <i>Récapitulatif des modèles de corrosion mathématique dans différents sols et eaux selon les recommandations de l'Eurocode 3 [BAL18b]</i>	135

Liste des symboles

- $P(z)$: La pression normal apporté par le sol (kN/m^2)
- $k(y)$: coefficient de proportionnalité en fonction de la déformée (y)
- Z : La profondeur (m)
- k_a : coefficient de poussée
- k_p : coefficient de poussée
- E : module d'élasticité de l'acier de la palplanche (N/mm^2)
- I : moment d'inertie (m^4)
- H : hauteur de rideau de palplanche (m)
- D : La fiche de rideau de palplanche (m)
- F_a : La force de poussée (kN)
- F_b : La force de butée (kN)
- Δ_a : Déplacement coté de poussée (mm)
- Δ_p : Déplacement coté de butée (mm)
- T : L'effort d'ancrage (kN)
- a : distance entre tête de rideau et la position de l'effort de l'ancrage (m)
- c_u : La cohésion non drainé à long terme (N/mm^2)
- φ_u : L'angle de frottement non trainé à long terme
- c' : La cohésion à court terme (N/mm^2)
- φ' : L'angle de frottement à court terme (deg)
- C_U : cohésion non drainé (N/mm^2)
- γ : poids volumique du sol (N/mm^3)
- σ_h : contrainte du sol (N/mm^2)
- k_0 : coefficient de repos
- Δ : Deplacement (mm)
- K : Coefficient de réaction (kN/m^3).
- M : moment de flexion (kN.m)
- M_{max} : moment de flexion maximum (kN.m)
- σ_{max} : La contrainte maximum de rideau de palplanche (kN/m^2)
- σ_a : La contrainte admissible de rideau de palplanche (kN/m^2)
- σ_e : La limite d'élasticité de rideau de palplanche (kN/m^2)
- b : La largeur (m)
- T_u : Force ultime de l'ancrage (kN)
- h : Hauteur du bloc d'ancrage (m)

N_b : Le facteur de stabilité
 N_C : Le facteur de portance
 δ_v : l'enfoncement verticale
 K_1, K_2, K_3 : la rigidité
 γ_w : Le poids volumique de l'eau (kN/m^3)
 h_{moy} : La hauteur moyenne (m)
 F_n : Le nombre de lits d'appuis
 ΔH : La profondeur de la fouille (m)
 FD :L'intensité
 FI :L'appuis
 d_{hor} : L'espacement horizontal des appuis (m)
 A : La section de la surface d'appuis (m^2)
 L : La longueur de scellement de l'appui considéré (m)
 C : L'utilisation de bermes
 δ_a : l'angle d'inclinaison d'effort de poussée (deg)
 δ_p : l'angle d'inclinaison d'effort de butée (deg)
 H : La profondeur finale de la fouille (m)
 δ_{hmax} : Déplacement horizontal maximal (mm)
 δ_{vmax} : Tassement maximal à la surface (mm)
 h_i : Espacement verticale des appuis (m)
 ρ : Le rapport entre les charges hydrauliques en tête et en pied de rideau de palplanches
 i_i et i_e : les gradients hydrauliques
 g : Perte de métal (g)
 A : masse atomique (g)
 I : courant (A)
 t : temps (s)
 n : valence du métal
 f : nombre de Faraday=96493 (coulombs)
 P : la perte par face en fonction du temps T (en μm)
 A : constante caractéristique du site
 n : Constante toujours inférieure à 1
 E_M : Le potentiel étant défini à l'aide de la relation de Nernst.
 I_{corr} et I_{corr}^{inh} : les courants de corrosion en l'absence et en présence d'inhibiteur (A)
 E : potentiel (v)
 I_y : Les moments d'inertie (m^4)
 W_{pl}, W_{el} : Les modules de flexion élastique et plastique (m^3)

A : Les surfaces d'acier (m^2)

$M_{c,Rd}$: Les moments de flexion ($kN.m$)

$M_{v,Rd}$: Les moments de flexion ($kN.m$)

$d(t)$: la perte d'épaisseur d'acier (mm)

t : temp (ans)

d_{∞} : l'épaisseur à long terme du perte de corrosion (mm)

T_0 : La durée de vie du revêtement (ans)

T_t : Le temps de la transition entre la durabilité du revêtement et l'initiation à la corrosion (ans)

C_1 et C_2 : est basée sur des données statistiques de corrosion collectées.

T_{st} : La période sans corrosion (ans)

β et η : coefficient déterminés par la méthode des moindres carrés.

N : Effort tranchant (kN)

M : Moment de flexion ($kN.m$)

φ : l'angle de frottement (deg)

c : la cohésion (kN/m^2)

ν : Coefficient de Poisson

Ψ : coefficient de dilatation

R_{in} : l'angle d'interaction sol/rideau de palplanche

σ_{xx} : Les contrainte horizontales du sol selon la direction xx (kN/m^2)

σ_{yy} : Les contrainte verticales du sol selon la direction yy (kN/m^2)

Introduction générale

Introduction générale

Les rideaux de palplanche sont largement utilisés dans le domaine du génie civil et des travaux publics (systèmes d'excavation, les blindages, les barrages, la stabilisation des pentes, les structures riveraines...) [ZEK15] [SER15].

Bien qu'il existe plusieurs autres matériaux (tels que le bois, le béton armé et les plastiques) qui sont utilisés pour les palplanches, les palplanches en acier sont les plus courantes [HON16]. Les murs de palplanches en acier sont classés comme des murs souples et ont une rigidité relativement plus faible par rapport à d'autres murs, tels que les murs en suspension [CLO90] [BIL10]. Ces structures peuvent être influencé par le milieu environnant (l'eau de mer, environnement, ou sols agressifs) par conséquent, ils sont sujets à la corrosion, en particulier après de nombreuses années de service (entre 5 et 100 ans). La corrosion est l'une des causes principales de la dégradation et de la destruction des rideaux palplanches. Les enjeux économiques qui en résultent sont conséquents. D'où l'importance de caractériser le comportement, la résistance et la longévité des palplanches vis-à-vis de ce phénomène. La connaissance de la cinétique de corrosion est importante pour la vérification de la capacité portante des structures corrodées. En terme de dimensionnement d'une palplanche, un certain taux de corrosion (mm/an) est supposé par les différents règlements. Selon les prescriptions de l'Eurocode 3, la perte d'épaisseur due à la corrosion atmosphérique dans les atmosphères normales est estimée à 0.01 mm par an et elle devient 0,02 mm par an dans les endroits où les conditions marines peuvent affecter les performances de la structure [EUR07]. Les taux de corrosion dans les sols dépendent du type de sol, de la variation du niveau de la nappe phréatique, de la présence d'oxygène, des contaminants et de la matière organique [SOR16].

L'étude de la durabilité à pour objectif d'avoir une estimation rapide de l'épaisseur des palplanches en tenant compte de la dégradation occasionnée par la corrosion tout au long de leur service. Depuis, et essentiellement pendant ces dernières décennies, plusieurs investigations ont été développées en vue de maintenir en service ces structures même après leurs dégradation, sur certaines zones le long de la hauteur, provoquée par le phénomène de la corrosion.

Sur le plan de modélisation mathématique, qui se base sur l'association des résultats de simulation avec les mesures in situ, tous les travaux publiés relatifs à ce phénomène ont considérablement amélioré la compréhension qualitative des processus de corrosion à divers endroits dans les structures [SOU79] [MEL99]. Les études analytiques et comparatives entre

les modèles empiriques de corrosion et la réglementation en vigueur demeurent très limitées, l'objectif du présent travail est d'analyser les résultats de certains modèles empiriques de corrosion avec des recommandations du code de conception européen en termes de valeurs de calcul du taux de corrosion dans le cas de palplanches ancrées sujettes à la corrosion du sol et de l'eau. Aussi une modélisation numérique utilisant les techniques de couplage numérique est proposée.

Ce manuscrit est organisé en trois parties, elles-mêmes divisées en cinq chapitres.

La première partie, constituée de deux chapitres, positionne le travail de thèse vis-à-vis de l'état de l'art. Elle contient une synthèse bibliographique sur les palplanches et le phénomène de corrosion:

Le premier chapitre présente le contexte de cette étude ainsi que les différents domaines d'application des rideaux de palplanche également présente le phénomène de corrosion sur des structures métalliques et les différents paramètres qui l'influencent, ainsi que l'évolution des propriétés mécaniques.

Le deuxième chapitre est consacré aux notions générales relatives aux calculs des rideaux de palplanches et les différentes méthodes utilisées dans le domaine de génie civil avec prise en charge de la corrosion.

La deuxième partie comporte deux chapitres consacrés à l'étude analytique et numérique d'un rideau de palplanche corrodé.

Le troisième chapitre commence par une revue des méthodes analytiques et mathématiques à base des expériences qui ont été proposées jusqu'à présent pour l'étude de phénomènes de corrosion dans les structures. Puis il présente la méthode retenue pour la suite, tant pour la modélisation analytique d'un rideau de palplanche.

Le quatrième chapitre présente la modélisation numérique d'un rideau de palplanche corrodé par développement d'une méthode par enchainement et étapes des calculs ainsi que quelques outils spécifiques et les résultats de calcul pour les scénarios de corrosion appliqués à l'ouvrage de référence. On étudie en détail les différents aspects du comportement du rideau : le déplacement du sol et du parement, le glissement relatif entre le sol à l'interface, le type de mode de ruine du rideau de palplanche et sa durée de vie même le changement de paramètres géotechniques du sol et les paramètres mécaniques et électrochimiques de rideau de palplanche à cause de l'effet de corrosion.

Dans le *cinquième chapitre*, les résultats des modélisations analytiques et numériques de rideau de palplanches corrodé sont analysés, interprétés et comparés, de manière essentiellement qualitative, à des résultats obtenus à base d'expérience utilisés dans la littérature [SOU79] [MEL95] [YAM98] [GUE99] [MEL97] [MEL98] [MEL99] [MEL03] [MEL08] [MEL14] [PAI98] [PAI02] [PAI12] [QIN02] [QIN03] [WAN14], et sur modèles analytiques réalisés. Par ailleurs, ils sont comparés aussi par les recommandations de L'Eurocode 3 partie 5 pour la détermination de la perte d'épaisseur ainsi que les paramètres influençant le taux de corrosion, sachant que les calculs numériques sont effectués avec le logiciel Comsol.

A la lumière des résultats obtenus, sont dégagés des conclusions et des perspectives sur la stabilité des rideaux de palplanches sous l'effet de corrosion.

Partie bibliographique

Chapitre 1
Généralités sur les rideaux de palplanche et le
phénomène de corrosion

1.1 Introduction

La nécessité de chercher de nouvelles techniques de réalisation des ouvrages et l'augmentation du taux des d'endommagement des structures sous l'influence de plusieurs paramètres ont poussé les chercheurs à utiliser des modes efficaces, utiles et économiques de construction, tels que les rideaux de palplanches notamment l'utilisation vaste dans le domaine du bâtiment et des travaux publics et en milieu marin. Le problème de la corrosion des métaux s'est révélé assez tôt dans le cas d'aciers. Ces matériaux sont abandonnés depuis maintenant longtemps. Il se pose aussi pour les palplanches en acier. D'un point de vue scientifique, la compréhension du comportement d'un ouvrage en acier notamment les structures immergées ou enterrées 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 [LCPC03]

De manière plus pratique, la prise en compte de la corrosion des aciers 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.

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.

1.2 Définition

Une palplanche est composé de pal et planche et conçu pour être battu en sol en s'enclenchant aux pieux voisins par l'intermédiaire de nervures latérales appelées serrures. Les palplanches constituent un mur de soutènement appelé rideau de palplanche, 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. Les autres types permettent de réaliser des structures contenant des matériaux dont les poussées engendrent des tractions importantes dans les joints.

La palplanche est une plaque métallique de section étudiée, permettant de l'emboîter à une autre et aussi elle est étanche en terrain sec ou immergés. Elle est souvent définie comme un profilé métallique qui désigne l'ensemble structurel formé par les palplanches assemblées entre elles (voir les figures (1.1,1.2) ci-dessous .

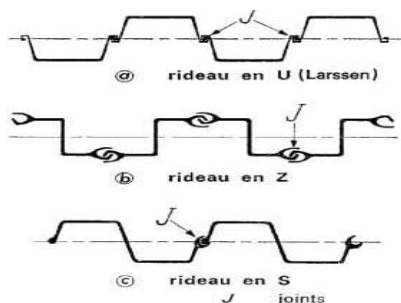


Figure1.1. Les palplanches à inertie [ARC15]

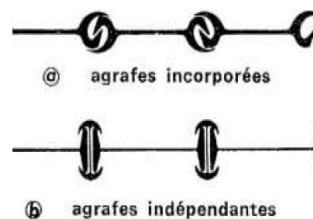


Figure1.2. Les palplanches plats [ARC15]

1.3 Les différentes catégories de palplanche

- ✓ Selon la géométrie et la forme

Palplanches en porte à faux : Les palplanches peuvent être fabriquées 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. Palplanches métalliques:

Une palplanche métallique est une tôle d'acier dont la section sous forme de "U" battu dans le sol et qui s'emboîte avec les pièces voisines grâce à des nervures

latérales. À partir des cloisons étanches ainsi formées, on réalise un mur de soutènement, digue pour conforter un talus, une berge naturelle ou un quai.

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. 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. Les types de palplanches métalliques sont obtenues par laminage à chaud ou profilage à froid (voir les figure (1.3) (1.4))



Figure 1.3. Palplanches Laminées à Chaud [ALA97]



Figure 1.4. Palplanches laminées à froid [ALA97]

Les avantages des palplanches profilées à froid:

- 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 utilisées à la réalisation des cellules cylindriques retenant un massif de remblai. 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. 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.

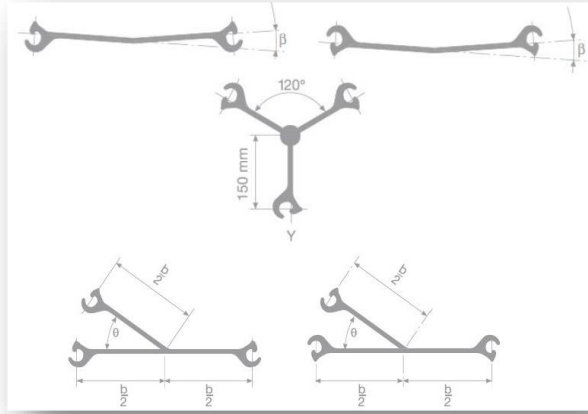


Figure1.5. Les palplanches raccords et les palplanches pliées

Pour vérifier la résistance des rideaux de palplanches, il est nécessaire de prendre en compte à la fois de la plastification de l'âme ainsi 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° si $L > 20\text{m}$).

Raccords

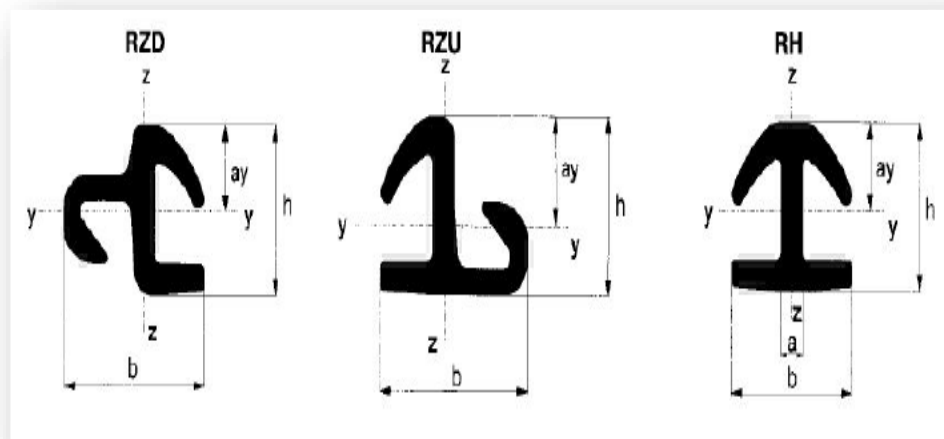


Figure1.6. Types de raccords

Gabion en palplanches

La largeur équivalente $W_e =$ surface intérieure d'une cellule+surface délimitée X (1ou2) arc(s), longueur outil du système x

$W_e =$ largeur de la cloison (dl) +2C

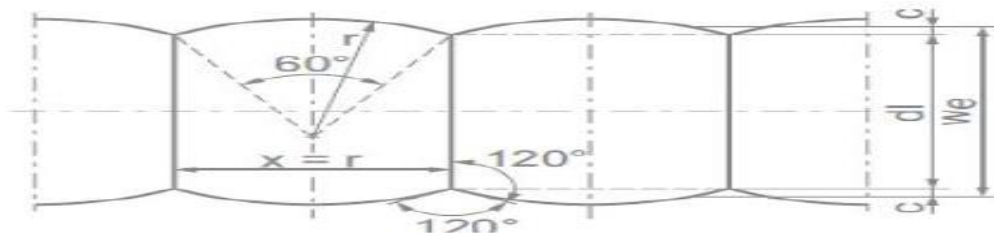


Figure1.7. Gabion cloisonné [ALA97].

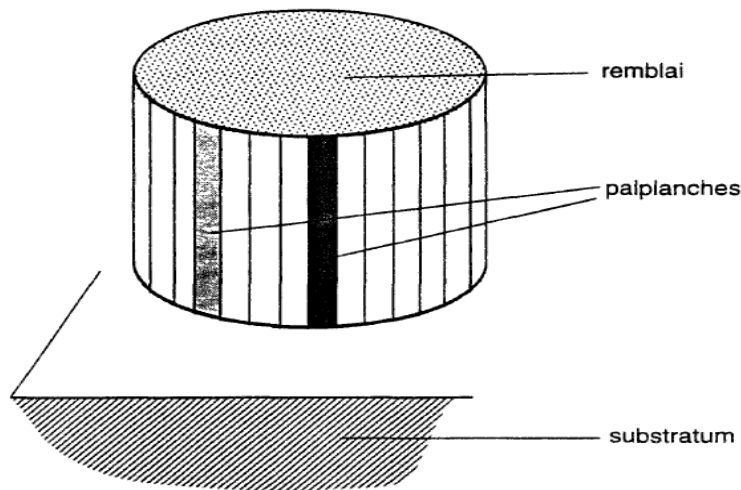


Figure1.8. Gabions en palplanches [ALA97]

Rideaux mixtes (HZ/AZ)

Le rideau HZ est en profilés HZ est utile 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 supporte des efforts horizontaux exercés par le sol et par la pression hydrostatique.

Les pieux reprennent les efforts verticaux de la superstructure. Les palplanches intermédiaires remplissent quand à elles uniquement une fonction de soutènement et de redistribution des

efforts. 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.



Figure 1.9. Rideaux mixtes (HZ/AZ), port de Taipei, Taiwan [ALA97]

Éléments simples (HZ)

Possibilité d'assemblage.

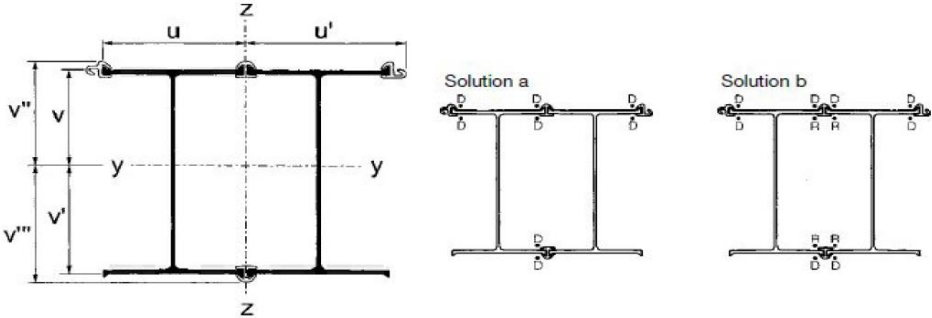
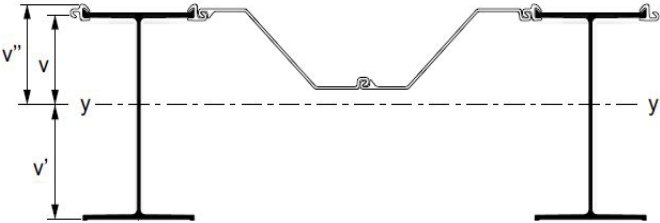


Figure 1.10. Assemblage des éléments de la structure [HOU86].

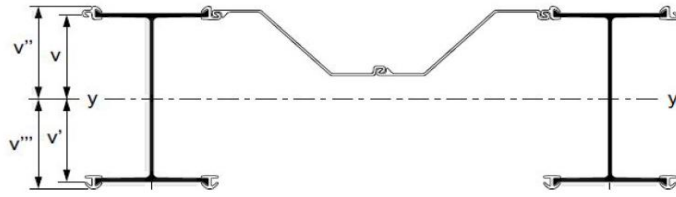
Combinaisons :

On distingue les combinaisons ci-après:

12/AZ 13



14/AZ 13



24/AZ 13

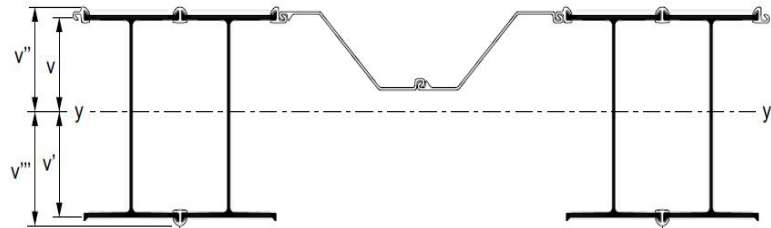


Figure1.11. *Combinaisons des éléments de la structure [HOU86].*



Figure1.12. *Utilisation des rideaux de palplanche comme soutènement provisoire dans un projet de pont à la région d'Adrar [BAL16a]*

1.4 Les serrures

Leurs rôles permettent d'assembler les rideaux continus en les enclenchant les uns aux autres sans avoir recours à des profilés de raccord. Les premiers profilés possédant de telles serrures.

Les serrures ont été réalisées en reliant des éléments secondaires aux profilés principaux, la liaison étant obtenue par rivetage. Autrement la mise au point des procédés de fabrication des serrures directement à partir du profilé principal.



Figure1.13. *Serrure à la jonction de deux palplanches [ALA97]*

Les raccords étant constitués des profils en I dont les ailes avaient préalablement été recourbées.

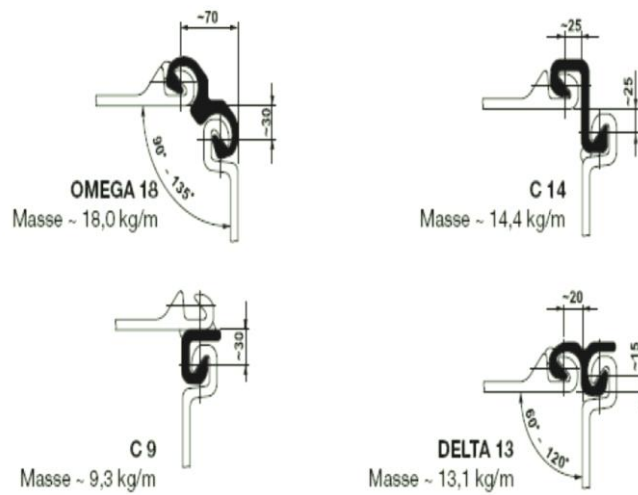


Figure1.14. *Différents types de raccordements*



Figure. 1.15. Raccordement Omega [ALB07]

Différents types de profilés :

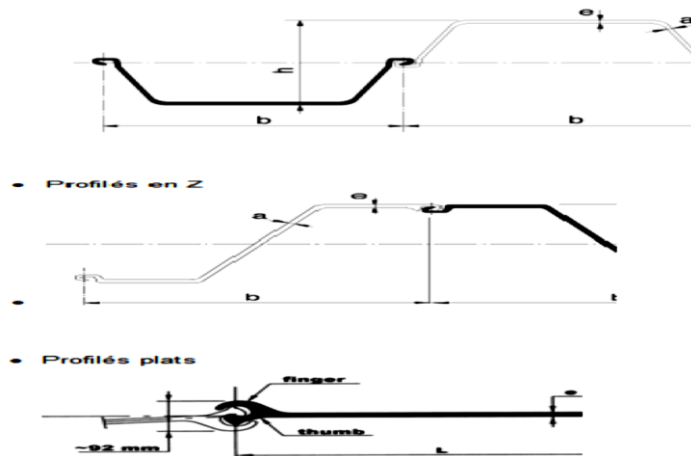


Figure1.16. Serrure des différents profilés

Application des profilés :

Les profilés en Z et en U sont destinés 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.



Figure1.17. Exemple d'application des profilés [ALB07]

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 présente quelques indications sur les caractéristiques de différents profils de palplanches de type courant :

Tableau 1.1 Caractéristiques des palplanches.[MAR90].

Type de palplanche	Hauteur (m)	Module de résistance par mètre de paroi (cm ³)
Larssen I	Jusqu'à 15	500
Larssen III	Jusqu'à 24,7	1360
Larssen IV	Jusqu'à 31	2040
Larssen V	Jusqu'à 34,4	2960

1.5 Les éléments d'assemblage

Liernes

Les liernes sont disposés régulièrement sur la hauteur de l'écran pour assurer la rigidité longitudinale, auquel elles sont souvent fixées par boulonnage ainsi disposées au droit des niveaux d'ancrage et servent d'appui aux têtes d'ancrage.

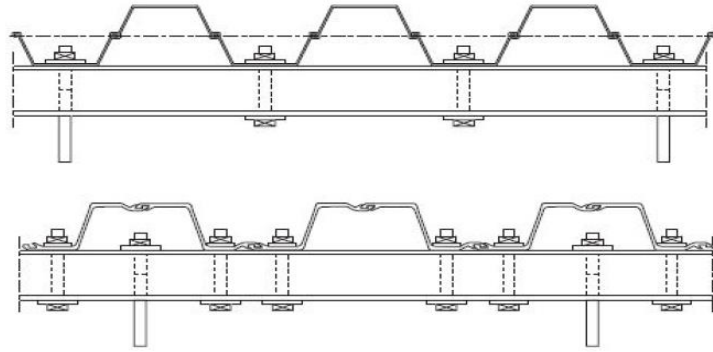


Figure 1.18. *La disposition des liernes dans un rideau de palplanches*

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.

Les appuis

Les appuis de mur sont constituées par le sol en fiche et par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de mur. 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.

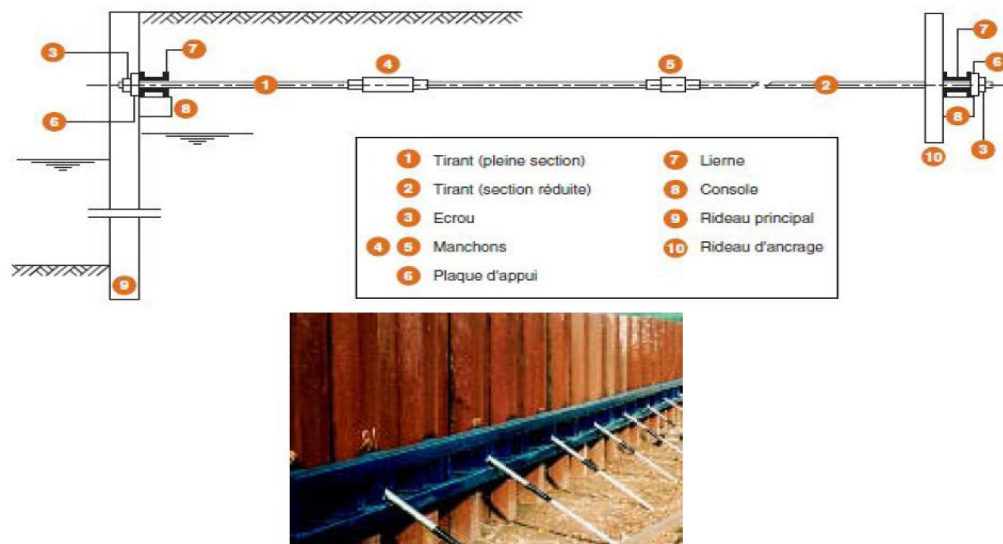


Figure 1.19. Schéma général d'un rideau de palplanches ancré en tête [ALB07]

✓ Principaux types de tirants passifs :

1-Tirants de type remblayés :

Par type d'ancrage (Tirants à ancrage par plaque, Tirants à ancrage par contre rideau, Tirants à ancrage par dalle de frottement).

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.)

2-Tirants de type battu constitués de profilés métalliques, de tubes, de pieux H ou de palplanches (Pieu battu injecté, Tirant battu injecté, Tirant à plaque pivotante de type Louis Ménard).

3-Tirants scellés ou forés : Sont tirants de précontrainte. Ils sont constitués d'une armature en acier de précontrainte à haute résistance.

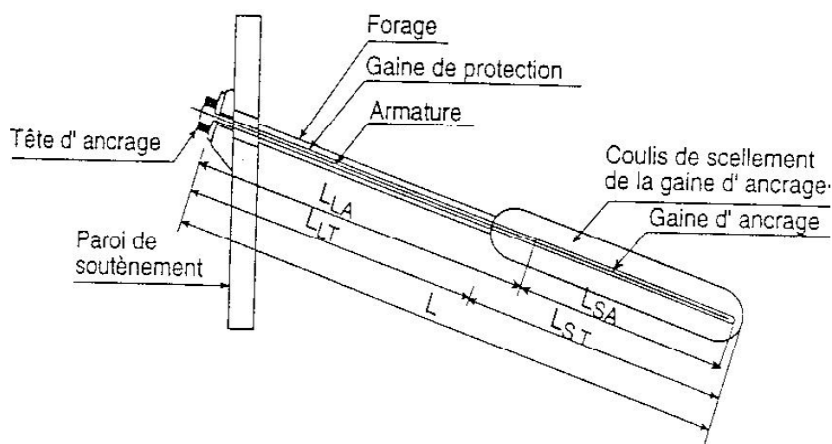


Figure 1.20. Tirant attaché à un écran de soutènement [MAR90].

Souvent le rideau type HZ sont ancré au moyen de tirants inclinés ou injectés mais il peut être fourni percés dans les lumières de raccordement pour les ancrages.

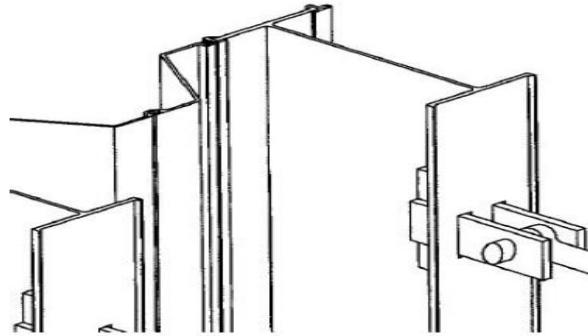


Figure1.21. *Détail de raccordement du profilé HZ [MAR90].*

Les boutons

Ils sont réalisés en béton armé ou de profilés métalliques prenant appui sur deux structures construites face à face.

1.6 Domaine d'utilisation et d'application

Palplanches en acier :

La durée de service est 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 en site aquatique et dans les terrains accidentés.

Autrement Ils ont employés pour les fouille de fondation (blindage de fouille) tant sur la terre ferme que dans l'eau, les batardeaux ainsi que les constructions souterraines en général même pour renforcer des digues existantes et dans les zones portuaires ou en site urbain.

Les palplanches sont utilisés pour la réalisation de constructions de murs de soutènement à savoir 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. Ils 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.

Palplanche en soutènement routier



Figure1.22. Exemple d'un rideau partiellement fiché dans le sol[ALB07]

• Quais d'accostage



Figure1.23. Quai permettant l'accostage de superpétroliers[ALB07]

Soutènement des talus.

Batardeaux en rivière.



Figure1.24. L'utilisation des palplanches comme batardeaux en rivière en France [ALB07]

Protection des berges en palplanches.

Cas de présence de la nappe.



Figure1.25. Terrassement dans le batardeau[ALB07].

La réhabilitation du barrage.



Figure1.26. Le grand barrage de Mont Saint Michel en France[MAR90].

Reconstruction d'un pont ferroviaire



Figure1.27. Chantier d'une reconstruction d'un pont en utilisant des palplanches métalliques[MAR90].

1.7 Mise en œuvre des palplanches

Battage :

A. Principe du marteau hydraulique :

Pour les marteaux hydrauliques, 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 s'enfoncer dans le sol.

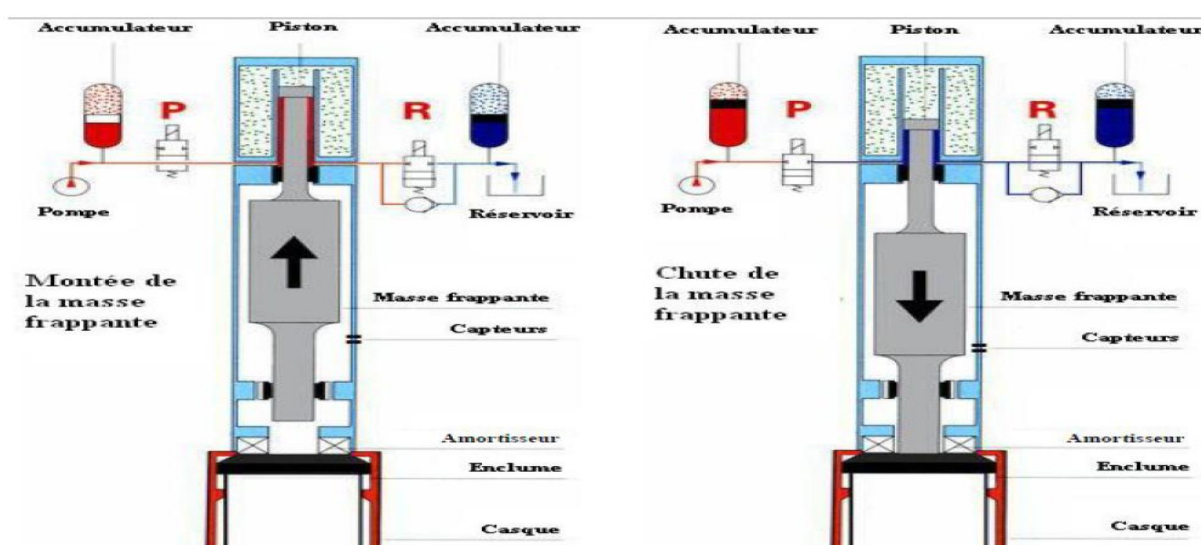


Figure1.28. Principe de fonctionnement du marteau hydraulique [MAR90].

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 fonder 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 trépieds ou les moutons à double effet à l'air comprimé et à frappes rapides.

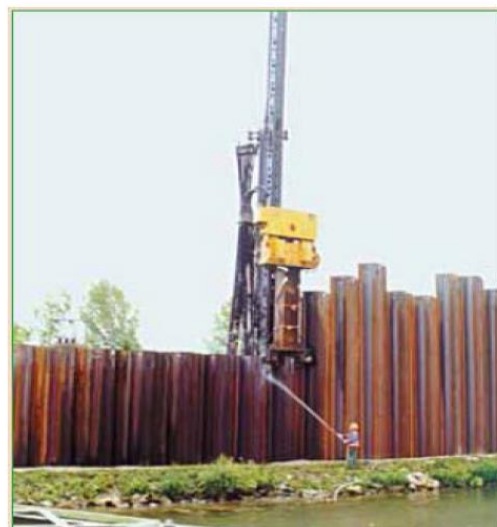


Figure 1.29. *Travaux de battage* [ALA97]

Vibor fonçage :

A. Principe :

Les vibrations résultent 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.

B. Matériels : -1 ou 2 gruesmobiles 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 vibrateurs 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 vibrateurs 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.



Figure1.30.*Perforage avant fonçage*

1.8 Enclenchement d'un rideau de palplanches

Enclencher la palplanche c'est à dire mettre en œuvre, 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.

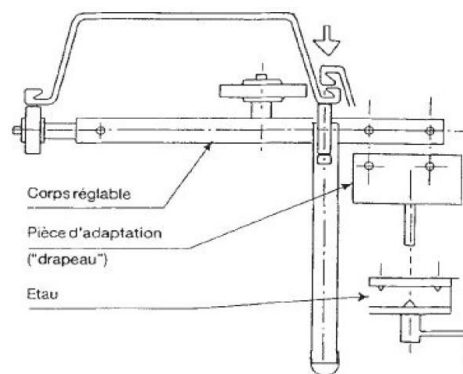


Figure 1.31. Enclencheur automatique.

1.9 L'arrachage des palplanches

Les rideaux de palplanches destinés pour des ouvrages provisoires, un moment ils doivent être arrachés en fin d'utilisation dans le 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 dû à l'élimination brutale de l'effort résistant.

1.10 Principaux étanchements des palplanches

Étanchement vertical

Pour étancher les serrures des palplanches, plusieurs systèmes d'étanchement dépendant de degré d'étanchéité souhaité.

a. Produit hydrocarboné mis en œuvre à chaud

Conditions d'application de comportement de ce produit lors de sa mise en œuvre sous certaines conditions lesquels, application sur métal -10°C à $+70^{\circ}\text{C}$, durcissement sous pluie, séchage sous UV.

b. Produit hydro gonflant mis en œuvre à froid (application sur métal humide, polymérisation sous UV).

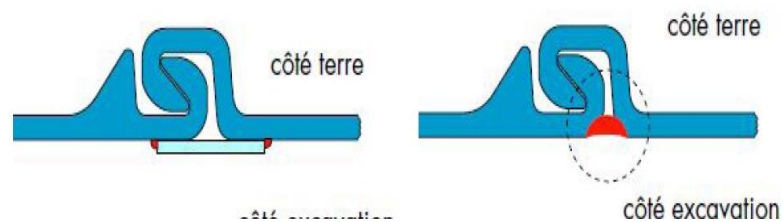


Figure 1.32. Étanchement avec la soudure.

c. Rideau de palplanches combiné avec une paroi bentonite ciment

d. Réparation des défauts d'étanchement dans les serrures

e. Étanchement par installation d'un système de drainage

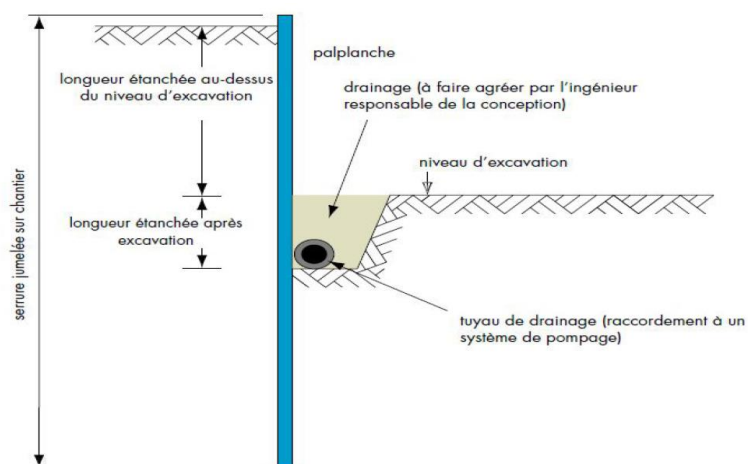


Figure 1.33. Installation d'un système de drainage

f. Etanchement avec Arcoseal

Le joint d'étanchéité est posé 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.

h. Etanchement avec wadit

Ce produit est réchauffé à l'huile thermique et réglé par un thermostat pour permettre 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.

Etanchement horizontal

La jonction étanche se trouve entre le mur de la palplanche et un élément d'ouvrage horizontal. On trouve deux types d'étanchement :

A: L'étanchéité avec la dalle de couverture

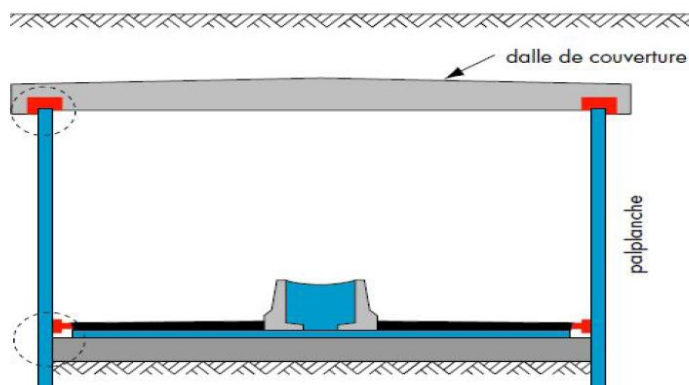


Figure 1.34. Système d'étanchéité horizontale (cas de tunnel)

B: L'étanchéité avec la dalle de fond.

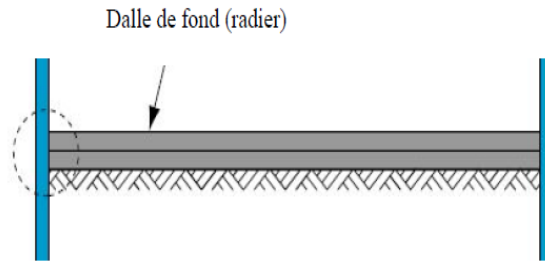


Figure 1.35. *Système d'étanchéité (cas de fouille de radier)*

1.11 Les avantages et les inconvénients d'utilisation des palplanches

Les palplanches en acier ont des avantages exceptionnels qui en font l'un des plus importants matériaux de construction à savoir durabilité, solidité, élasticité, pérennité, facilité et rapidité de la mise en œuvre.

Contrairement le défaut des rideaux de palplanches métalliques est la corrosion notamment dans les milieux marins, sols de nature agressifs même l'environnement. En outre les défauts dus aux mauvaises conceptions et pre-dimensionnement, mauvaise exécution, exploitation, environnement et autre agression physico-chimique, difficulté d'entretien.

1.12 Différentes dégradations des rideaux de palplanches

Les divers dégradations qui apparaissent sur une structure en palplanche dépendent de la zone de manifestation et peut induire un désordre en relation avec le départ du matériau retenu (tassement et affaissement), avec la stabilité de l'ouvrage supporté (déformation, fissuration et éclatement) ou avec le fonctionnement de la partie mobile notamment la rupture et descellement (voir la figure 1.36)

L'acier dans les rideaux de palplanche tend à se dégrader superficiellement lorsqu'il est soumis à des milieux corrosifs comme le sol, l'air et plus particulièrement l'eau. Les désordres observés sur les rideaux de palplanches métalliques des infrastructures soit portuaires

[WAL13], 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) [CHA10]



Figure1.36 Dégradation de mur de quai à cause de corrosion de rideau de palplanche[BRA04]

Les investigations ont prouvés que l'affaissement d'un rideau est souvent provoqué par le départ de remblais retenus par le rideau de palplanche. Une déchirure ou perforation apparaît, cet état de dégradation est l'effet de la corrosion très avancée qui n'a pas été décelée et corrigée à temps.

Généralement Le désordre est lié à la corrosion accélérée en eaux qui se manifeste dans les sites à grande hauteur de marnage. Le taux de corrosion pouvant se développer dans ces conditions est celui de l'aération différentielle avec un rapport de surfaces en contact élevé. La surface cathodique correspond à la surface aérée et mouillée (zone de marnage) et la zone anodique correspond à celle moins aérée et immergée (zone immergée adjacente à la zone aérée) comme il est indiqué dans la figure (1.37).



Figure 1.37. Dégradation de rideau de palplanche sous l'effet de corrosion [BRA04]

1.13 Notions de corrosion

La corrosion peut être définie de plusieurs manières :

- Destruction ou détérioration des matériaux à travers l'interaction d'un environnement agressif.
- Destruction des matériaux par des moyens non mécaniques.
- Retour des métaux et alliages à leur état naturel de minerais (état le plus stable).
- 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.

1.14 Effet mécanique de la corrosion des palplanches

1.14.1 Répartition de la corrosion

Les principaux types de corrosion des aciers dans les ouvrages géotechnique peuvent être la corrosion uniforme, par piqûre (corrosion localisée, par bactérie, sous contrainte et la corrosion fragile également une dissolution généralisée (corrosion uniforme), une dissolution localisée ou sélective ou une fissuration, notamment lorsque le matériau métallique est fortement tendu (Figure 1.38).

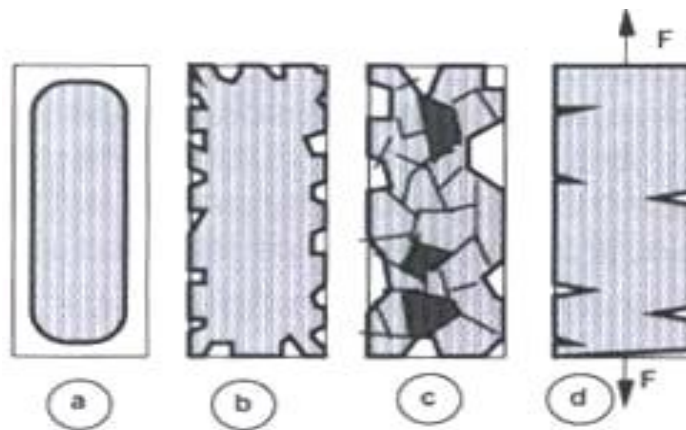


Figure 1.38. Les aspects d'un solide métallique corrodé [RAH05]

La figure (1.39) présente plusieurs type de corrosion lesquels :

a) Corrosion uniforme (corrosion généralisée)

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 de la surface des aciers est causée par la réaction électrochimique se produisant sur l'ensemble de la surface du métal par l'effet de

micropiles. Quand il y a une corrosion uniforme de la surface, la perte du métal peut être estimée [DAR88]

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.

c) 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 [JEA94]. 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.

Tableau 1.2. Série galvanique, obtenu dans l'eau de mer à 25°C [HAC90] [LUM05]

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



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.

La loi de Faraday donne [CIA03]:

Perte de métal en :

$$g = \frac{A.I.t}{n.f} \quad (3.1)$$

A : masse atomique en grammes

I : courant en Ampères

t : temps en secondes

n : valence du métal

f :: nombre de Faraday = 96493 coulombs par mole.

d) La corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte se présente sous la forme de fissures intergranulaires 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 1.3. *Quelques exemples de couples matériau-milieu sensibles à la corrosion sous contrainte* [PHI98]

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
de titane	Chlorures en milieu alcoolique
Alliages de zirconium	Acide nitrique

1.15 Corrosion des palplanches

1.15.1 Données expérimentales sur la corrosion des métaux 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 (dans le sol). 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 μm) en fonction du temps T en années [RAM57] [ALB07] [HUB03]:

$$P = A \cdot T \cdot n \quad (1.1)$$

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 « 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. 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 [DAR88].

1.15.2 Phénomène de la corrosion électrochimique sur les métaux

Il convient de rappeler quelques notions fondamentales. Les figures (1.39) et (1.40) 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. Le taux de corrosion est proportionnel à l'intensité du courant électrique issu des surfaces anodiques, selon la loi de Faraday de l'électrolyse.

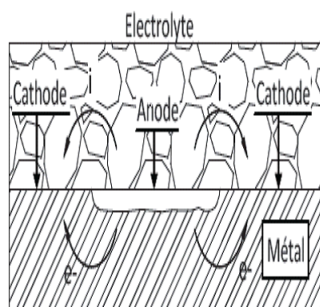


Figure 1.39. *Metal due à l'hétérogénéité du métal [DAR88].*

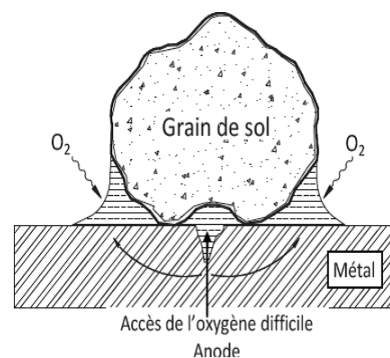


Figure 1.40. *Metal due à l'aération différentielle [DAR88].*

1.15.3 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 (voir la figure 1.41), 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.

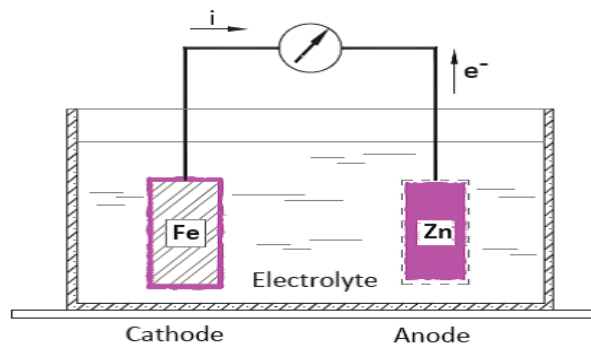


Figure 1.41. Pile simple « Fe-Zn » [TER1986]

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.

1. 15.4 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 figure 1.42). 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.

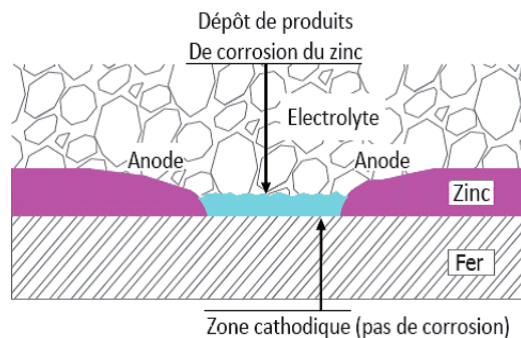


Figure1.42. Protection cathodique par zinc [DAR88]

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

1.16 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 1.4

Tableau.1.4. *Les facteurs de la corrosion*

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

1.17 Les Facteurs influençant la corrosion

1.17.1 Nature de l'acier

On distingue selon le comportement de quelques matériaux susceptibles de constituer des aciers :

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 [CHA10].

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 [CHA10]

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 selon la figure (1.43).

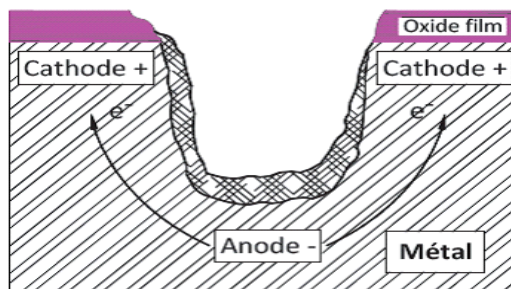


Figure1.43. Formation d'une piqûre dans un métal recouvert d'une couche passivante [GUI79]

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.

1.18 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 [ELI00].

a) Chlorures

Les chlorures minéraux sont très solubles et c'est pour cela qu'on les obtient dans l'extrait aqueux. La Figure III.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). L'ion Cl facilite la corrosion métallique par formation des chlorures de métaux complexes et l'hydrolyse.

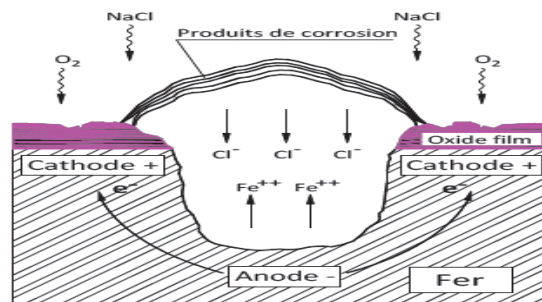


Figure1.44. Développement de la piqûre dans l'acier galvanisé [WEA82]

b) Ion H⁺ :

La concentration en ion 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 [GUI79]. 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 [ELI00].

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.

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 [GUI79].

L'effet de l'humidité sur la résistivité d'un sol argileux est montré dans la figure (1.47). 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 [RAM57].

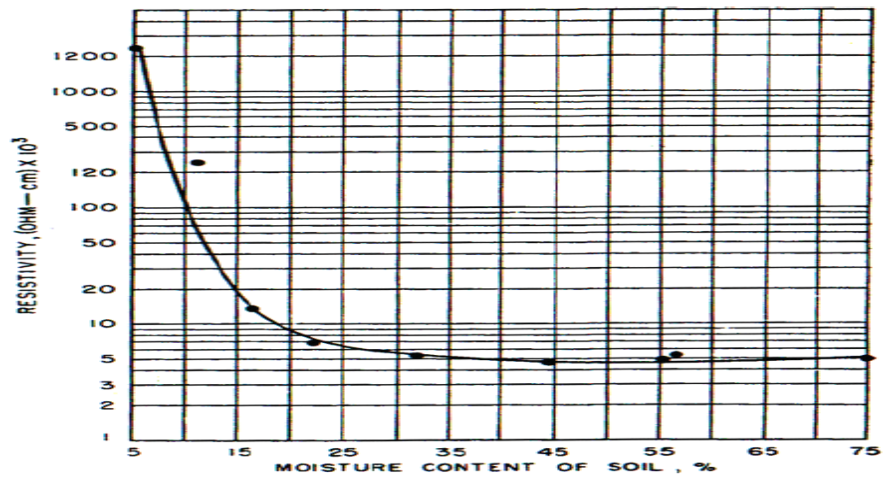


Figure.1.45. Effet de la teneur en eau sur la résistivité du sol [RAM57]

1.19 La température du sol

La Figure (1.46) 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. 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.

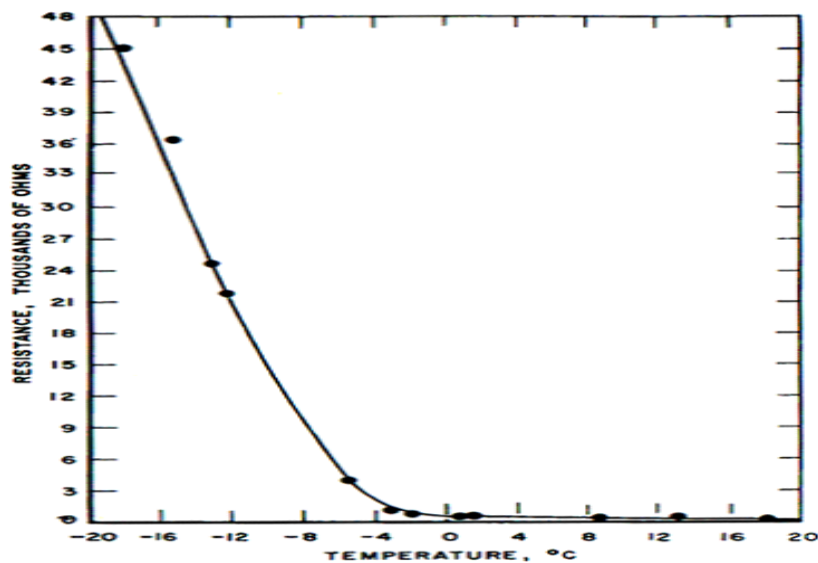


Figure1.46. Effet de la température sur la résistivité du sol [RAM57]

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.

1.19.2 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 (voir la figure 1.48) évaluant la perte de masse en g/m²/an en connaissant le pH et la résistivité du sol. On trouve dans des exemples d'utilisation :

pour un pH de 6,5 et une résistivité de 200 Ω.cm, la perte de poids est d'environ 1,3 oz/ft²/year (396.29 g/m²/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/ft²/year (701.129 g/m²/an) et la durée prévue est d'environ 38 années.

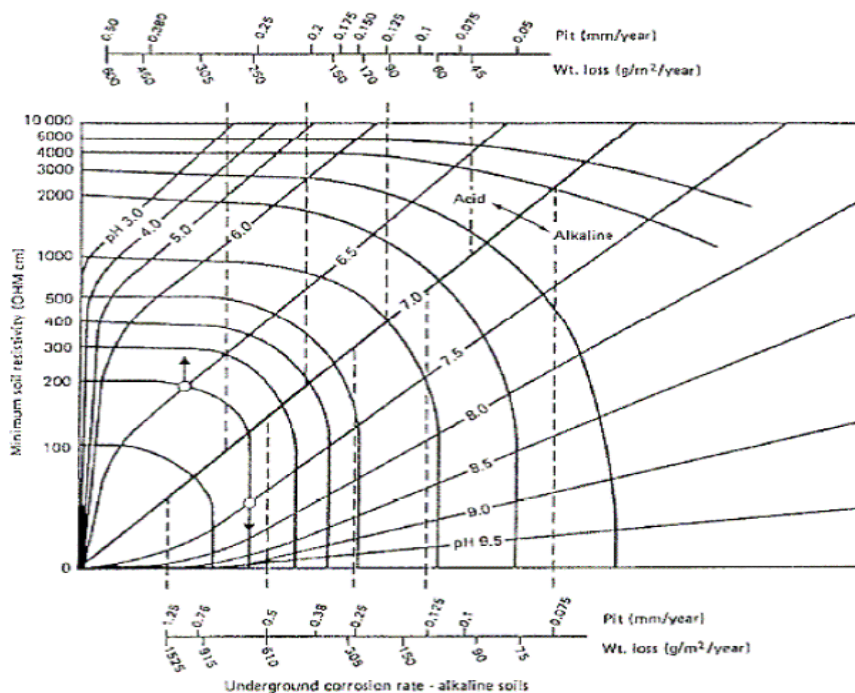


Figure 1.48. Nomographe pour l'estimation de la vitesse de corrosion de l'acier [HUB03]

1.19.3 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.

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. 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.

1.20 La protection contre la corrosion

La prévention de la corrosion doit être envisagée dès la phase de conception d'une installation comme il est illustré dans la figure (1.49). En effet, des mesures préventives prises au bon moment permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet, notamment pour des industries telles que le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accident peuvent avoir des conséquences particulièrement graves pour les personnes et l'environnement.

Pour lutter contre la corrosion, il ne suffit pas de choisir un matériau qui résiste bien à un certain milieu, il faut également penser à toutes les interactions électrochimiques, mécaniques et physiques prévisibles qui pourraient influencer le comportement du système métal/milieu [JOS74]. Ainsi, en plus des mesures de prévention permettant d'éviter de nombreux problèmes de corrosion (choix judicieux des matériaux et de la forme des pièces qu'on veut obtenir, etc.), il existe des méthodes de protection (revêtements, inhibiteurs, etc.) qui demandent en général des connaissances plus spécifiques et amènent des frais supplémentaires.

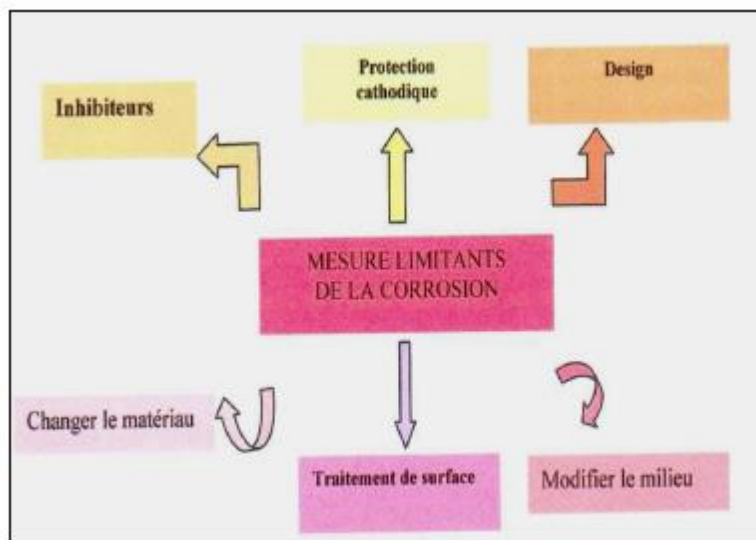


Figure1.49. Moyens de prévention de la corrosion

1.20.1 Protection électrique

Reposent sur la variation des propriétés électrochimiques du métal sous l'effet du courant polarisant, et Pour effectuer la protection électrochimique d'un métal, on modifie son potentiel de dissolution de façon à l'utiliser soit dans la zone d'immunité, soit dans la zone de passivité. On parle alors de protection cathodique ou anodique :

✓ Protection cathodique

Protéger un matériau de telle sorte que la réaction anodique devienne thermodynamiquement impossible revient à se placer dans des conditions de polarisation où le potentiel sera inférieur au potentiel d'équilibre de la réaction anodique, ce potentiel étant défini à l'aide de la relation de Nernst :

$$E_M = E_M^0 + \frac{RT}{nF} \log M^{n+} \quad (3.3)$$

Les conditions de la protection cathodique sont donc : $V_c < E_M$ ou $I_c > I_{critique}$.

Il apparaît ainsi deux méthodes différentes :

✓ Protection par anode sacrificielle

Il s'agit d'imposer, par couplage galvanique, au potentiel du métal à protéger, une valeur suffisamment négative. On utilise alors des anodes solubles (à base de plomb, zinc ou magnésium) en court-circuit avec le métal à protéger [SCU95]. C'est la méthode par anode sacrificielle.

Si l'on considère le cas de blocs de zinc utilisés pour protéger les coques en acier des bateaux, on a deux réactions qui vont se produire :

à l'anode : $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$

à la cathode (acier de la coque) : $\frac{1}{4} O_2 + \frac{1}{2} H_2O + e^- \rightarrow OH^-$

En fait, le potentiel du fer EC devient plus négatif que son potentiel de corrosion naturelle : la réaction d'oxydation du fer est remplacée par celle du zinc.

Protection par courant imposé

Dans ce cas, on impose, à l'aide d'une source extérieure, un courant ou un potentiel cathodique par rapport à une anode constituée par un matériau inaltérable (titane platiné, graphite...). C'est la méthode par courant imposé.

On impose un courant entre le métal à protéger (cathode) et une électrode ; à partir d'un certain potentiel, il n'y aura plus possibilité d'oxydation du fer qui se trouve alors à un potentiel $E_p < E_M$.

La réaction suivante se produit alors : $\frac{1}{4} O_2 + \frac{1}{2} H_2O + e^- \rightarrow OH^-$

C'est à dire la réduction de l'eau en H_2 , l'ion OH^- réagissant aussitôt.

Cette méthode est très délicate à mettre en oeuvre car une surveillance continue du courant imposé est nécessaire : en effet, un courant trop élevé entraîne une augmentation de pH à la cathode par libération d'ions OH^- , ce qui peut induire des réactions parasites sur certains métaux. Cet excès d'intensité crée aussi un dégagement d'ions H^+ (baisse du pH) à l'anode, d'où d'autres réactions parasites. A contrario, une valeur de courant trop faible ne permet pas à la protection de fonctionner.

De plus, les ions Mg^{++} et Ca^{++} présents en milieu marin vont former en surface des dépôts de $Mg(OH)_2$; ces dépôts, en protégeant la surface de l'acier de l'eau de mer, limitent fortement les valeurs de courant nécessaires pour que la protection cathodique fonctionne : il

faut donc obligatoirement faire évoluer au cours du temps les conditions de protection [BEN11].

✓ Protection anodique

Le principe de la protection anodique diffère de celui de la protection cathodique en ce sens qu'on fait augmenter le potentiel de corrosion de façon qu'il se situe dans la zone passive.

Cette méthode est donc uniquement applicable aux métaux qui peuvent être passivés.

Elle consiste à réduire la vitesse de dissolution du métal en diminuant la valeur du potentiel de corrosion mixte du spécimen jusqu'à ce qu'il atteigne le potentiel réversible de la réaction anodique. Même dans cette condition, il y aura corrosion mais à faible vitesse, ce que l'on accepte étant donné qu'il s'agit alors d'une corrosion uniforme. La transition de l'état passif à l'état actif implique la baisse de la densité de courant jusqu'à une très petite valeur. Cette caractéristique est très utilisée industriellement : protéger un métal en le maintenant dans son domaine de passivité s'appelle la protection anodique [SCU95].

1.20.2 Revêtements métalliques

Une autre approche générale est de séparer le métal de son environnement corrosif en utilisant un revêtement. Tout métal immergé dans une solution électrolytique quelconque, prend un potentiel de dissolution (corrosion naturelle) que l'on peut mesurer expérimentalement. Pour une solution donnée, il est possible d'établir la série galvanique correspondante, c'est à dire un classement des différents métaux et alliages en fonction de ce potentiel. Selon la place relative occupée par le métal protecteur par rapport au métal à protéger, nous distinguons deux types de revêtements :

- ✓ Revêtements anodiques : dans ce cas le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger.
- ✓ Revêtements cathodiques : le métal protecteur plus noble que le métal à protéger: exemple: Ni ou Cr sur l'acier.
- ✓ Par ailleurs, le rapport Aire anodique/Aire cathodique qui est petit risque d'entraîner une attaque rapide de l'acier (densité de courant élevée).
- ✓ La qualité essentielle que devra posséder un revêtement cathodique est donc l'absence de défauts tels que porosité, fissure,...Le contrôle impératif de la continuité et de l'homogénéité de la couche s'impose [SCU95].

1.20.3 Inhibition

Ces méthodes consistent à isoler le métal du milieu environnant en agissant sur:

- ✓ La diminution de la température
- ✓ La diminution de la vitesse
- ✓ L'élimination de l'oxygène et des oxydants
- ✓ La modification de la concentration

D'une manière générale les inhibiteurs de corrosion doit abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier. Il doit être non seulement stable en présence des autres constituants du milieu, mais également ne pas influencer sur la stabilité des espèces contenues dans ce milieu. Un inhibiteur est définitivement reconnu comme tel s'il est stable à la température d'utilisation et efficace à faible concentration. Il peut être utilisé en vue d'une protection permanente (surveillance primordiale du dispositif) ou plus couramment en vue d'une protection temporaire : durant une période où la pièce est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage,...) ou encore lorsque la pièce est soumise à des usinages très sévères comme le perçage, taraudage, forage, filetage,...

- ✓ Il existe plusieurs possibilités de classer les inhibiteurs, celles-ci se distinguant les unes des autres de diverses manières :
- ✓ La formulation des produits (inhibiteurs organiques ou minéraux),
- ✓ Les mécanismes d'action électrochimique (inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes),
- ✓ Les mécanismes d'interface et principes d'action (adsorption et/ou formation d'un film).

Quel que soit le type de mécanisme par lequel agit l'inhibiteur, le pouvoir protecteur de ce dernier caractérise le ralentissement de la corrosion, c'est-à-dire la diminution du courant de corrosion (ou de la vitesse de corrosion). Le pouvoir protecteur d'un inhibiteur s'exprime par l'équation :

$$\text{Pouvoir protecteur}(\%) = \frac{I_{corr} - I_{inhcorr}}{I_{corr}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

I_{corr} et $I_{inhcorr}^{inh}$ représentent respectivement les courants de corrosion en l'absence et en présence d'inhibiteur. Il est possible d'accéder aux valeurs des courants de corrosion de

manière expérimentale, plus précisément en se basant sur des dispositifs relevant d'études électrochimiques.

1.21 Les essais de corrosion

La reconstitution de la composition de sol en une solution simulée de sol appelé solution simulée de sol (tableau 1.5)

Tableau 1.5. *La composition chimique de la solution simulée de sol algérien (g /l) [SCU95].*

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

Conductivité=65.5ms/cm

PH=8.8

Pour les mesures gravimétriques on a utilisé une balance analytique avec une précision de 10^{-6} , 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 chlore et du SO_4^- .



Figure1.50. *Préparation de la solution simulée de sol [SCU95].*

Il existe plusieurs méthodes de l'étude 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

- ✓ Les méthodes thermométrique basée sur la variation de la température avec de la température avec de la période de la dissolution du métal a été développée [DEL59].

Mesure du potentiel E

Les voltmètres ayant par nature deux bornes métalliques, 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 H₂)

L'électrode au calomel saturé (ECS), très pratique en milieu chloruré de laboratoire (Hg dans HgCl₂ saturé, suivi d'un 2e 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/CuSO₄, 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.

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.

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 1cm² 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 électrochimiques de polarisation potentiodynamique ont été effectuées en cellule électrochimique en verre conventionnelle à trois électrodes : contre électrode en platine, électrode de référence en calomel saturée (ECS) ; les échantillons en acier X-60 ont été employés 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 voir la figure (1.51). 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.

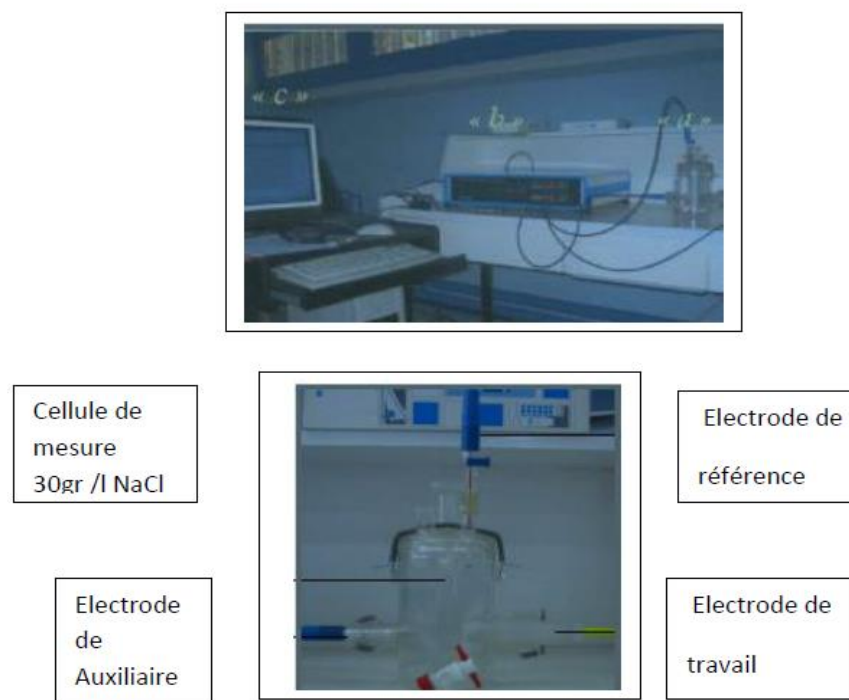


Figure 1.51. *Dispositif d'essai de corrosion [SCU95].*

1.22 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les éléments qui constituent les rideaux de palplanches. Ensuite on a donné les domaines d'utilisation et la mise en oeuvre de différents types de rideau de palplanches. En ce qui concerne la localisation d'étanchement, on a mis en évidence quelques techniques et méthodes proposées par des chercheurs avec leurs conditions d'application. Aussi ce chapitre nous permet de conclure que l'application des rideaux mixtes est plus avantageuse. Concluant que le comportement de la palplanche est conditionné par le comportement du sol en contact avec la structure.

La corrosion des aciers donc désigne l'altération par réaction chimique avec un oxydant dioxygène et le cation H^+ en majorité. Il faut en exclure les effets purement mécaniques , mais la corrosion peut se combiner avec les effets mécaniques et donner de la corrosion sous contrainte et de la fatigue-corrosion, de même, elle intervient dans certaines formes d'usure des surfaces dont les causes sont à la fois physicochimiques et mécaniques.

Les exemples les plus connus sont les altérations chimiques des aciers à l'air, ou dans l'eau et sol, telles la rouille du fer et de l'acier. L'étude fondamentale des phénomènes de corrosion des aciers relève essentiellement de l'électrochimie. Par ailleurs, La corrosion est un problème industriel important : le coût de la corrosion, qui recouvre l'ensemble des moyens de lutte contre la corrosion, le remplacement des pièces ou ouvrages corrodés et les conséquences directes et indirectes des accidents dus à la corrosion.

Chapitre 2

**Calcul des rideaux de
palplanches en génie civil**

**Avec la prise en charge de la
corrosion**

2.1 Introduction

Pour mieux comprendre l'interaction sol-structure et le comportement d'un mur de soutènement en contact avec le massif du sol ou l'eau, une présentation des figures de rupture éventuelle exigés. Ensuite des méthodes de calcul couramment utilisées pour la stabilité externe. Ces méthodes sont indispensable pour bien illustrer leur fonctionnement ainsi que les notions de poussée et de butée avec la prise en charge du l'influence de phénomène de corrosion sur ces structures de palplanche

2.2 Principe de calcul de rideau de palplanche dans le sol

Les rideaux plans ont des rôles pour supporter des efforts [TER57], comme il est illustré dans la figure (2.1), ces efforts sont :

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

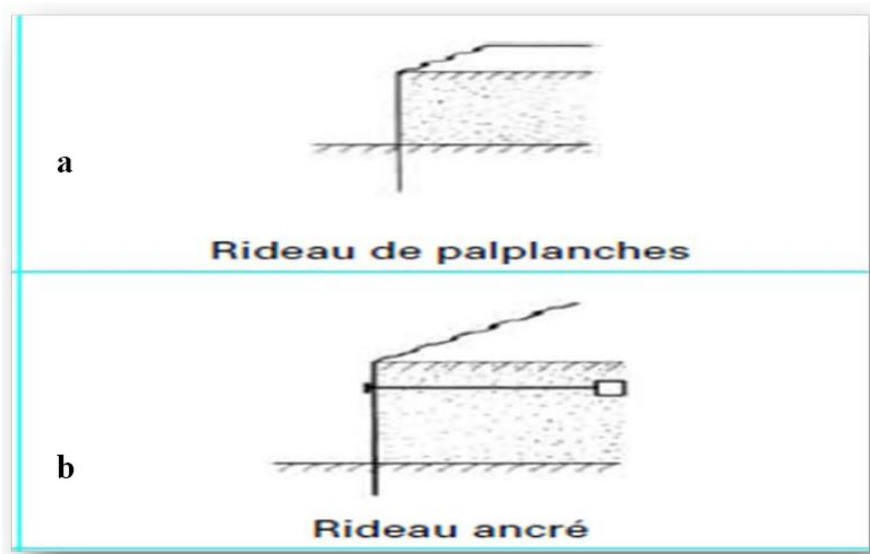


Figure 2.1. Modèles : *a)* rideau sans tirant d'ancrage *b)* rideau ancré dans le sol. [MAR90].

Un rideau travail comme une poutre verticale. L'objectif du calcul est de déterminer la longueur des palplanches, ainsi que de vérifier les déformations et 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.

On peut apercevoir que les méthodes de calcul de stabilité des rideaux de palplanches comportent une marge de sécurité [JOS74].

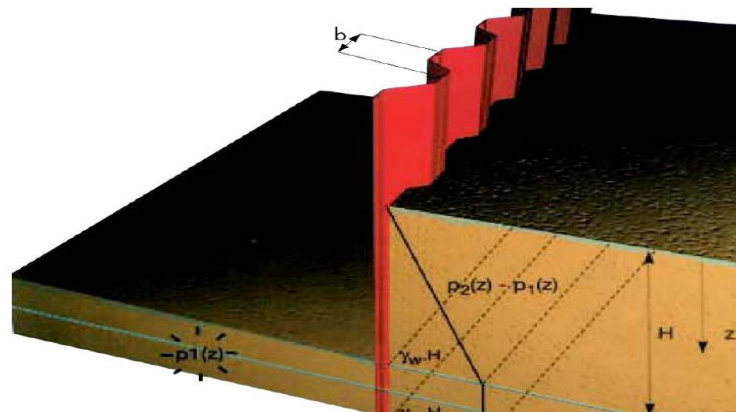


Figure 2.2. Palplanche ancrée dans le sol [MAR08].

On distingue deux parties selon la figure (2.2) :

1- Partie soutènement : on a uniquement la poussée du sol :

$$P(z) = k(y) \sigma_z = k(y) \gamma Z \quad (2.1)$$

$k(y)$ coefficient de proportionnalité en fonction de la déformée (y)

2- Partie fiche:

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

k_a (poussée) < $k(y)$ < k_p (butée)

✓ L'équilibre de la poutre :

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 :

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

La résolution de cette équation de 4^{ème} 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 successive. Ensuite 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 lesquelles :

2.2.1 Méthode aux états limites

Le sol est considéré à l'état d'équilibre limite. Elles ont une solution analytique dans les cas simples sans interaction avec la structure. 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 comme il est indiqué dans la figure (2.3) :

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)

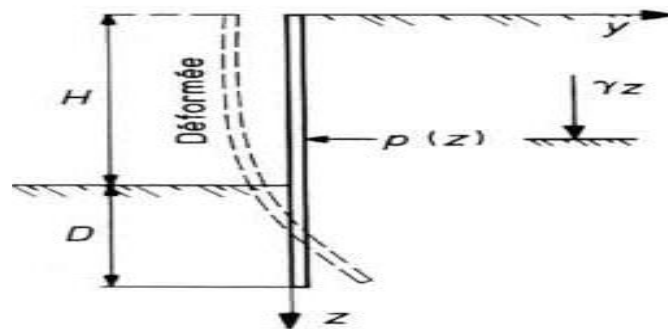


Figure 2.3. Rideau de palplanches soumis à une distribution de pression normale $p(z)$ [TER57].

2.2.2 Méthode aux coefficients de réactions

Le sol est modélisé à l'interface du sol et de l'écran par des ressorts et des patins en interaction avec la structure et les tirants ou butons, et cela en utilisation d'un logiciel adéquat.

2.2.3 Méthode des éléments finis

Grâce au développement de logiciels de calcul et à la puissance des micros ordinateurs, actuellement cette méthode est en cours d'évolution pour les études courantes destinés aux chercheurs et ingénieurs concernant l'interaction sol structure.

2.3 Etats limites de rupture selon L'Eurocode 3

La norme d'Eurocode 3 stipule la vérification d'une liste d'états limites pour la réalisation des écrans de soutènements [EUR07]. La conception du rideau de palplanches se fait en considérant quatre modes majeurs de rupture selon la figure (2.4):

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

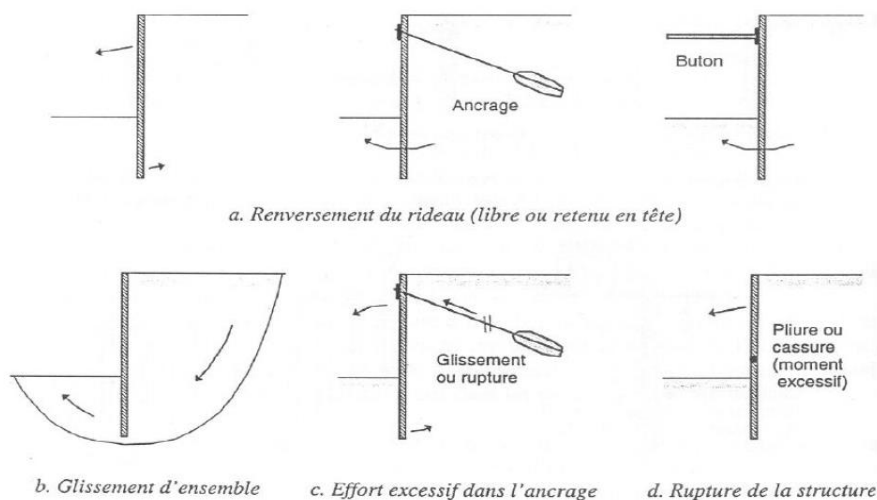


Figure 2.4. Modes de rupture d'un rideau de palplanche [TER57].

Les cas 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

Dans le cas d'un rideau de palplanche encastré à la surface d'un massif de sable. Le procédé 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 comme il est illustré dans la figure (2.5). Si on réalise une translation horizontale de l'écran, deux cas sont possibles :

Cas 1 : Butée

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.

Cas 2 : Poussée

Dans ce cas 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 Δ_p nécessaire à la mobilisation totale de l'état de butée est beaucoup plus important que celui Δ_a causant la situation de poussée.

Si H est la hauteur hors fiche du mur, on admettra les ordres de grandeur suivants:

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

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

Dans ces deux cas extrêmes, on parle de poussée et butée limites correspondant à la rupture du massif de sol [COST83].

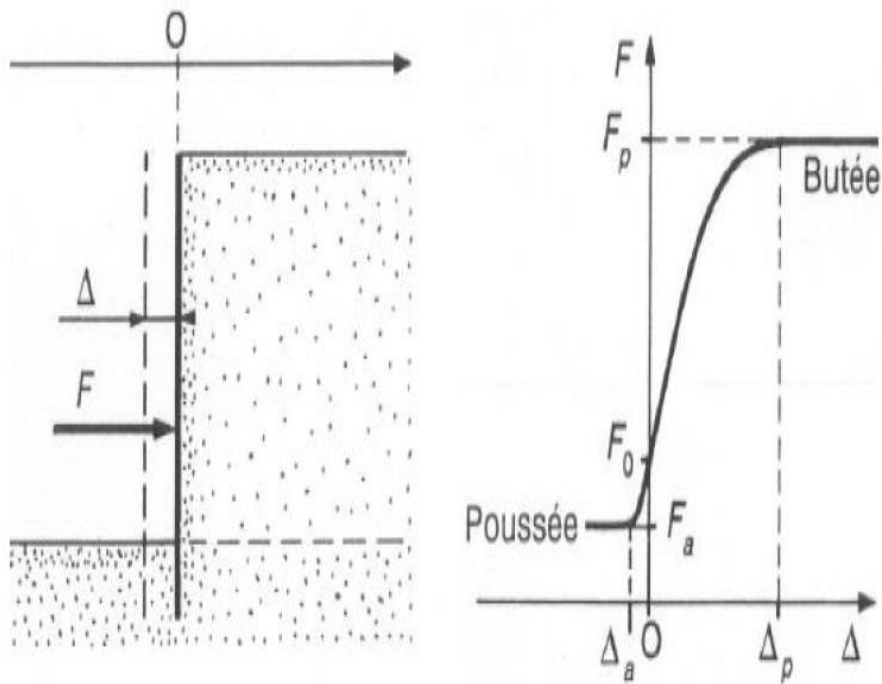


Figure 2.5. Principe de la poussée et de la butée. [TER57].

2.5 Stabilité d'un rideau de palplanche

2.5.1 Stabilité externe

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 (voir la figure (2.6)). 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 [BRA87].

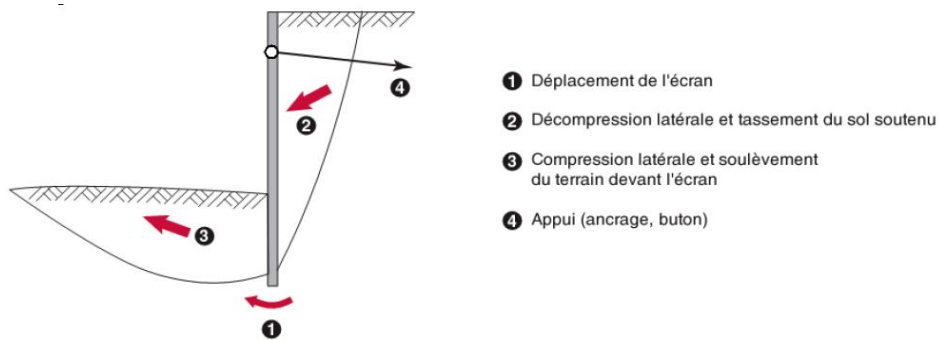


Figure 2.6. Mécanisme de rupture d'un écran simplement butée. [MAR90].

Le diagramme des efforts exercés sur le rideau, dans le cas d'un sable, est représenté sur la figure (2.7). Les inconnues à déterminer sont la fiche

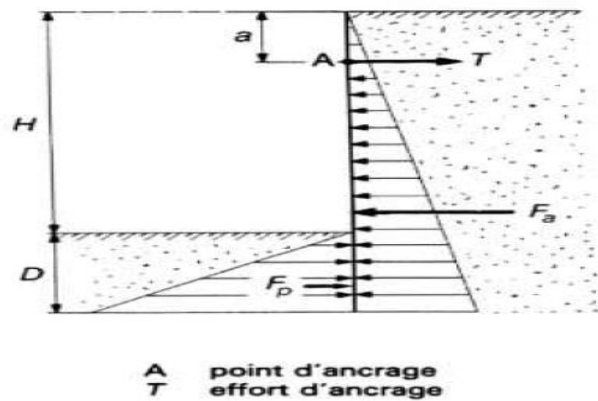


Figure 2.7. Rideau ancré en tête simplement buté en pied. [TER57].

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

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

Avec F_a : force de poussée exercée sur la face amont du rideau

F_p : force de butée sur la face avale, le coefficient $2/3$ étant dû à la répartition triangulaire des pressions

B: Résultante horizontale nulle

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

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.

A- Cas de la présence d'eau

Dans le cas où de l'eau est présente dans le massif. La stabilité de l'ouvrage est assurée alors en incluant les efforts dus à l'eau et calculés séparément, comme indiqué sur la figure (2.8). S'il y a écoulement d'eau dans le massif, il faudra commencer par résoudre le problème hydraulique [COST83].

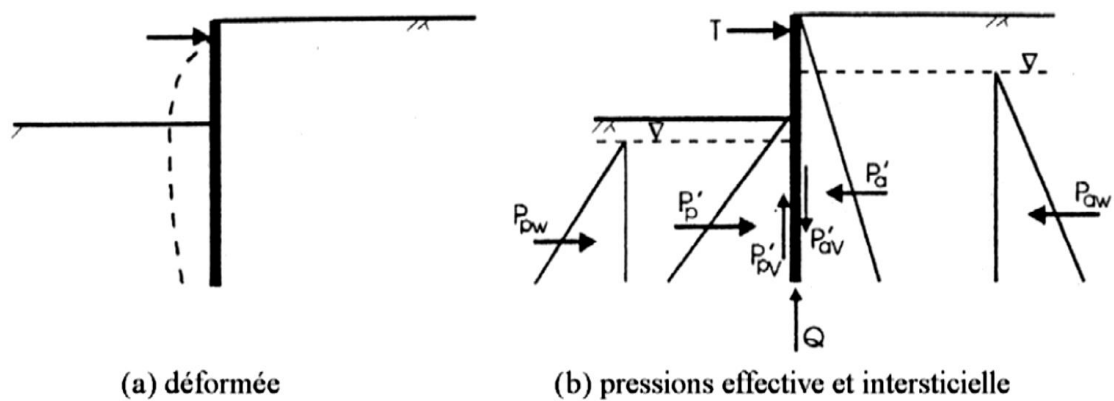


Figure 2.8. Cas de la présence d'eau.

✓ 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 figure (2.9) ci-après montre les déplacements du rideau et les efforts normaux correspondants.

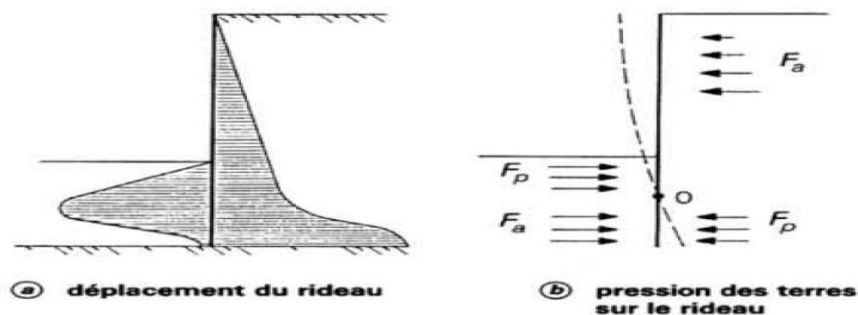


Figure 2.9. Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête [COS83].

Le calcul peut s'effectuer par la méthode de Rankine, à partir de la figure (2.10) et les hypothèses 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 butée en pied. La fiche du rideau a alors pour expression:

$$D = \frac{H}{Kp^2 - 1} + Z_0 + 0.2 Z_0 - 1 \quad (2.10)$$

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 :

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

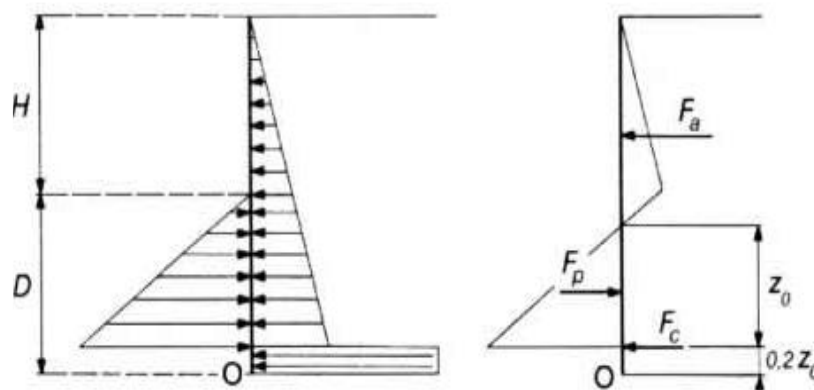


Figure 2.10. Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré

La détermination de la valeur maximale du moment fléchissant dans le rideau à partir du diagramme des pressions est possible dans ce cas ainsi le choix d'un type de palplanche à partir d'inertie obtenue.

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 (voir la figure (2.11)). 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', ϕ'). 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.

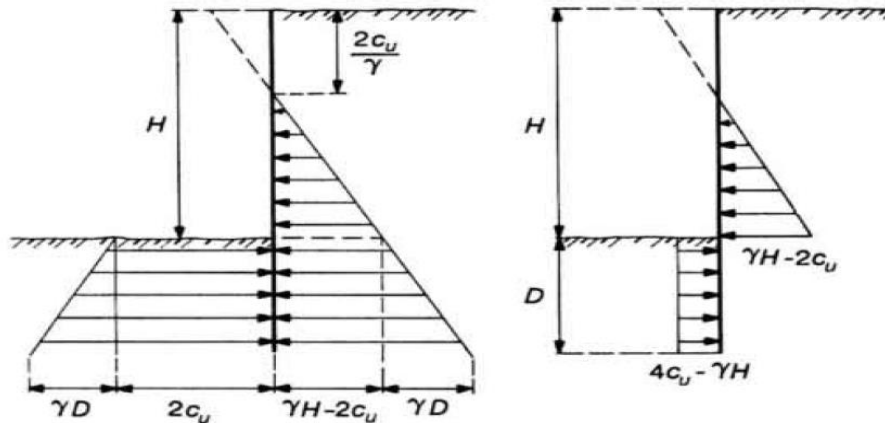


Figure 2.11. Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile [COS83].

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 :

$$c_u \geq \frac{\gamma H}{4} \quad (2.12)$$

1- Mur encastré en pied et ancré en tête

Hypothèses :

L'analyse de l'effet de l'allongement de la fiche sur la répartition de la pression des terres, du moment et du déplacement de l'écran [COST83]. 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.
- 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.

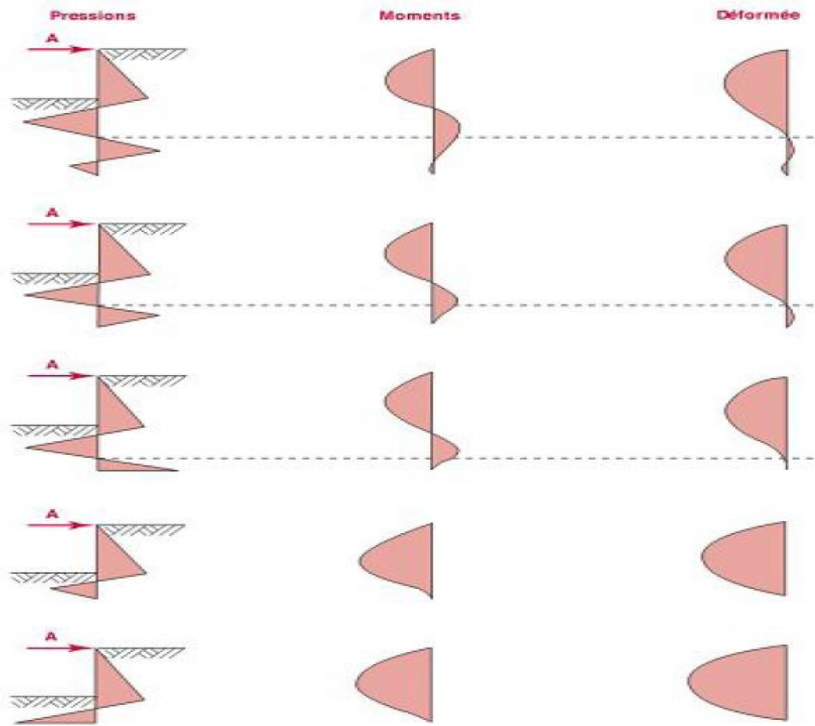


Figure 2.12. *Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements dans l'écran de soutènement*

Blum suggère de simplifier le calcul de représenter les efforts de contre-butée par une force localisée passant par le centre de rotation, avec une majoration de la fiche f_0 comme représenté sur la figure (2.12).

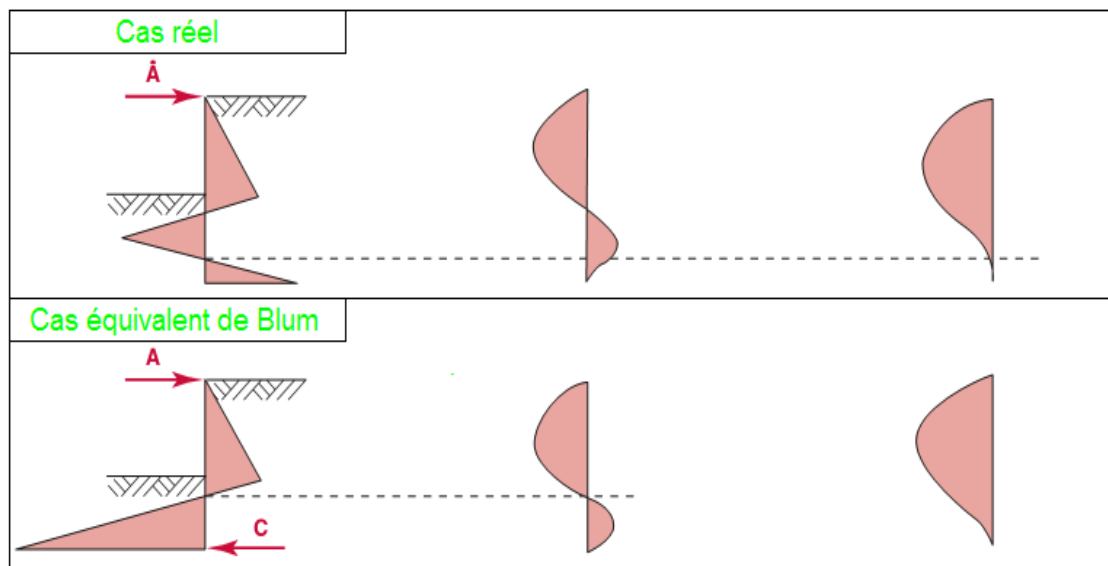


Figure 2.13. *Distribution idéalisée de la pression des terres [COS83].*

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 [COST83]

La résolution des trois inconnues nécessite une troisième équation. Pour lever l'indétermination, Blum fait appel à la flexibilité de l'écran théorie des poutres équivalentes et propose deux solutions (voir la figure (2.13)):

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).

Deuxième approche

Blum remarque que dans le rideau de palplanche, 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 [MAR90].

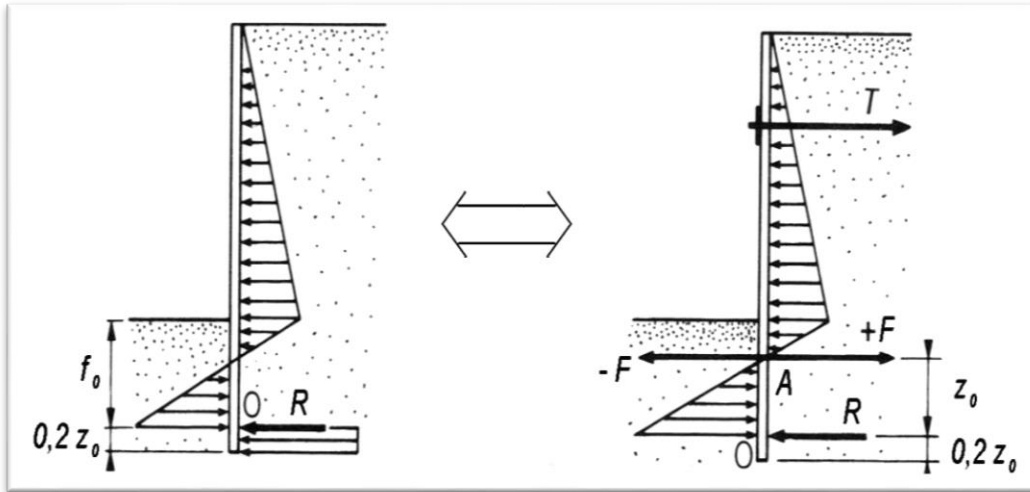


Figure 2.14. Résolution par la méthode de la poutre équivalente.

On calcule la profondeur du point de pression des terres nulle. En pratique, lorsque φ est compris entre 25° et 35° 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 (voir la figure (2.14)).

✓ Théorie du coefficient de réaction du sol

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 [COST83].

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 σ_h et le déplacement latéral Δ a pour expression :

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

Avec: K_0 : Coefficient de pression latérale des terres au repos

($K_0 \approx 1 - \sin \varphi$ dans les sables lâche selon la formule de Jacky).

K: Coefficient de réaction en (kN/m³). 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.

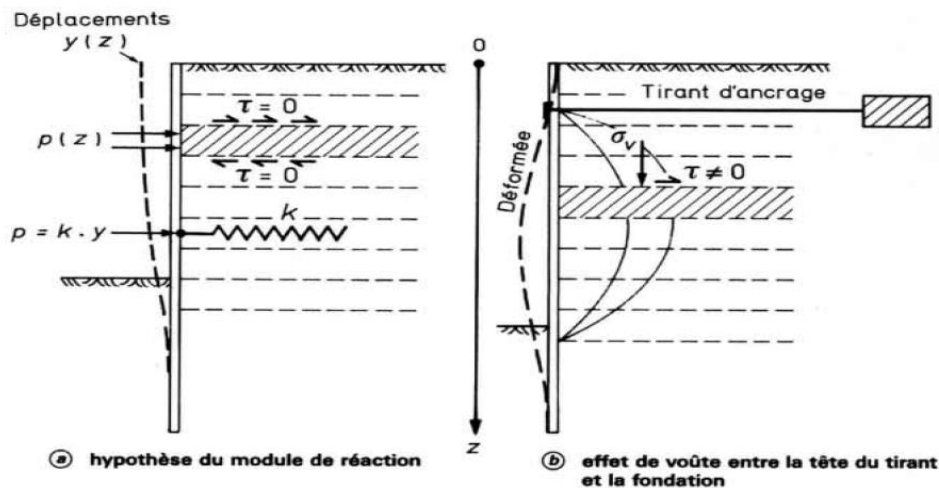


Figure 2.15. Incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et le développement d'un effet de voûte [COST83].

La pression des terres σ influe sur la sécurité classique 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 admissible, c'est à dire que la contrainte maximale dans une palplanche ne dépasse pas le niveau de contrainte admissible pour l'acier (voir la figure (2.15)).

2.5.2 Stabilité interne d'un écran de soutènement

Les rideaux de palplanches 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.

✓ Vérification du moment dans la palplanche

Il faut 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 :

$$\frac{d^2M}{d^2Z} = -\sigma_h \quad (2.14)$$

En plus les sécurités vis à vis d'une rupture de la structure en palplanche 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:

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

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 σ_e est la limite élastique de l'acier.

✓ Vérification des déformations

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

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 :

$$\frac{d^2x}{d^2Z} = \frac{-Ml}{EI} \quad (2.17)$$

2.6 Calcul 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 (voir la figure (2.16)) [MAR90].

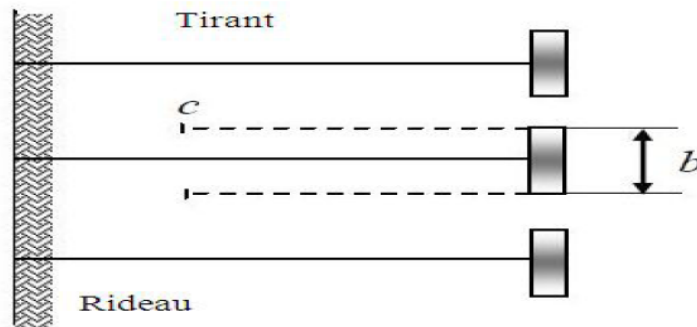


Figure2.16. *L'ensemble rideau et tirant d'ancrage [COS83].*

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 (voir la figure (2.17)). Nous pouvons en première approximation, prendre en compte le frottement qui agit sur les deux surfaces triangulaires verticales cf_g passant par les extrémités du bloc.

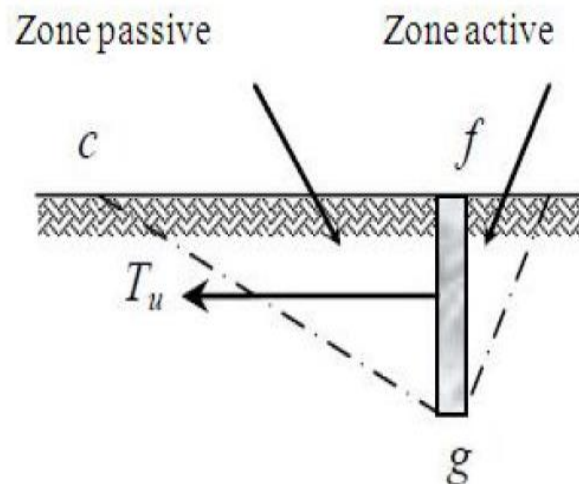


Figure2.17. *Résistance ultime de l'ancrage*

2.6.3 La résistance ultime d'effort d'ancrage

A cause de pression passive du sol en aval, la résistance dépend de son emplacement dans le sol soutenu. 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. La zone passive est située entièrement en dehors de la zone active abc selon la figure (2.18).

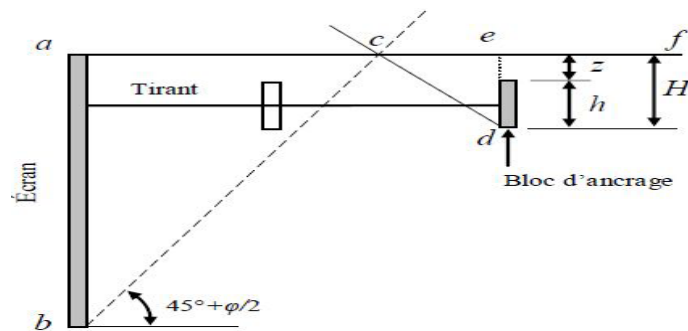


Figure 2.18. *Emplacement des ancrages [MAR90]*

✓ Méthode de Teng

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 (2.19) est l'une des surfaces concernée par le frottement latérale.

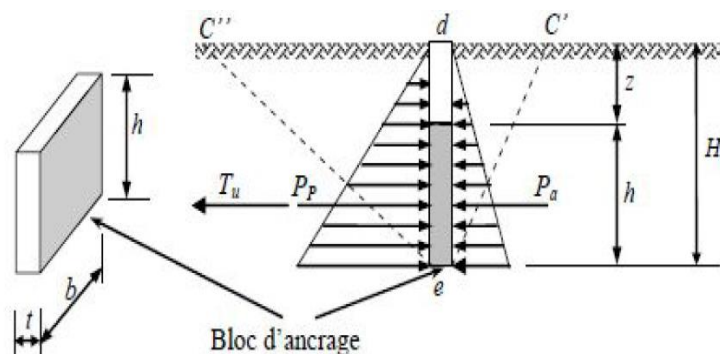


Figure 2.19. *La résistance d'un bloc d'ancrage [MAR90].*

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

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

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 [BRA87] [MAR90].

Avec

T_u : Force ultime de l'ancrage, γ : 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.

✓ Méthode d'Ovesen Brinch Hansen

Brinch Hansen a trouvé une méthode pour corriger les résultats de la pression passive tridimensionnelle (voir la figure (2.20)), cette méthode est basée sur les résultats des essais d'Ovesen.

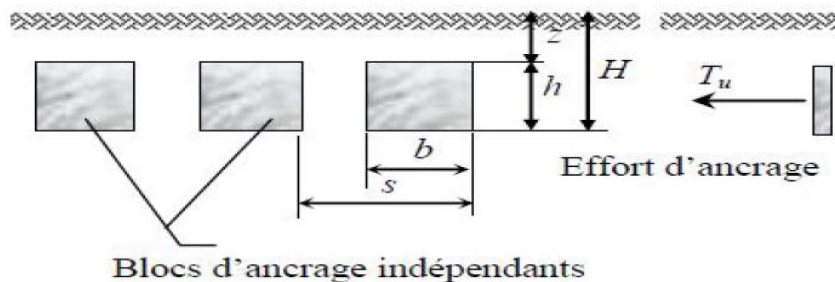


Figure 2.20. L'emplacement de blocs d'ancrages dans le massif du sol [HSI98].

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

$$T_u = M \cdot (K_p - K_a) P_0' \cdot bh \quad (2.19)$$

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.

2.7 Les coefficients de poussée et de butée

Les coefficients de poussée et de butée ont des relations avec des paramètres à savoir l'obliquité δ de la contrainte sur le rideau en butée qui a une influence sur les résultats de calcul. Quelques rares études prennent en même temps $\delta = +\varphi$ pour la poussée et $\delta = -\varphi$ pour la butée. Certains bureaux d'études adoptent pour la butée $\delta = -0.7\varphi$ dont:

$$K_p = 2 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2.20)$$

La majorité des études adoptent $\delta = 0$ 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 δ en poussée a moins d'influence, les valeurs couramment utilisées sont 0 et $2/3\varphi$. 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%.

2.8 Le comportement d'un rideau de palplanche

2.8.1 La nature du sol

La nature de sol tel que 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 plus 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 [TER57].

- ✓ Influence des types de sols sur les tassements

La première approche détaillée de la question de déformation des tassements est celle de sur les rideaux de palplanches boutonnés 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

$$N_b = \gamma H / C_u \quad (2.21)$$

Dont

C_u : La cohésion non drainé γ : Poids volumique du sol H : La profondeur atteinte dans le sol.

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.

On distingue trois parties pour l'identification des parties environnant l'écran de soutènement :

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.

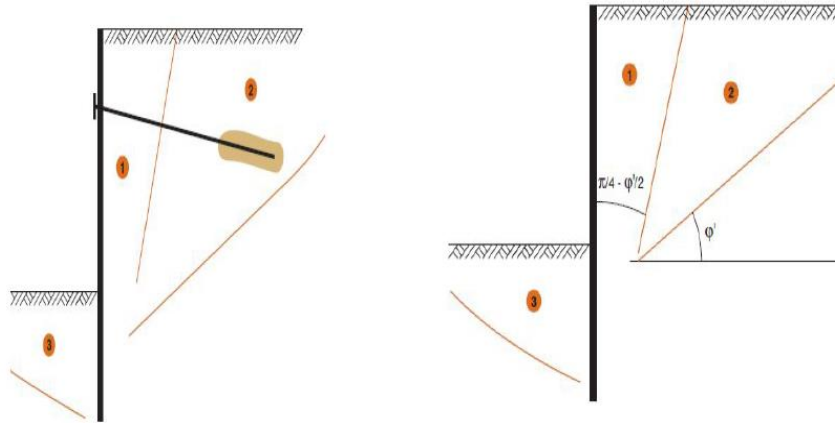


Figure 2.21. Parties de terrain commun à un rideau de palplanches [TER57].

Suivant le cas des rideaux ancrés présentés dans la figure (2.21), le terrain mobilisé devant le massif d'ancrage est étroitement commun 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 .

2.8.2 Les effets de l'eau sur les murs rideaux

L'influence de l'eau peuvent apparaitre de deux façons [CHA75] :

Pour les murs 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).

2.8.3 Comportement de rideau de palplanche

Rideau de palplanche, sol et le comportement de l'écran sont trois facteurs liés 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 del'écran. Outre la rigidité en flexion de l'écran EI, souvent employée par son logarithme :

$$K_1 = \ln EI \quad (2.22)$$

L'expression proposée par pour tenir compte de la profondeur H de la fouille est donnée par la formule suivante [CHA75]:

$$K_2 = Lg(H^4/EI) \quad (2.23)$$

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

$$K_3 = \frac{EI}{\gamma_w (h_{moy})^4} \quad (2.24)$$

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 [COST83]

2.8.4 La hauteur et la fiche de rideau de palplanche

✓ La hauteur de rideau de palplanche

C'est la profondeur de la fouille devant l'écran, également 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.

✓ La fiche de rideau de palplanche

L'encastrement dans le sol ou la fiche joue un rôle important vis à vis de la stabilité de mur. Plus la fiche est profonde, plus les coefficients de sécurité vis à vis de défaut de la fiche et d'instabilité est importante. Dans des conditions de terrain relativement mauvaises, un encastrement profond dans des sols rigides peut réduire nettement les déformations d'un soutènement.

Concernant l'installation de l'écran, les vibrations causées par l'installation des palplanches peuvent donner lieu à des tassements et des contraintes assez importants autour de l'écran.

2.8.5 Les appuis

- 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%.

- L'espacement horizontal et vertical entre appuis

L'espacement 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 ΔH : La profondeur de la fouille F_D et d'autre part l'intensité F_l des appuis.

$$FD = \frac{n}{\Delta H \cdot d_{nor}} [L/m^2] \quad (2.25)$$

$$F_l = \frac{EA}{L} F_D [KPa/m] \quad (2.26)$$

Dont 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.

2.8.6 Influence d'autres effets sur le comportement de rideau de palplanche

- L'effet de temps

Cet effet influe sur les sols fins cohérents, dont la consolidation entraîne une augmentation des déplacements avec le temps. Le comportement à long terme d'un rideau de palplanche est assez difficile à suivre pour des diverses raisons.

- la nature et les caractéristiques des sols

La nature du sol influe directement sur le comportement de rideau de palplanche.

- Température

Il s'agit de trois modes d'influence de la température :

Mode 1 : La température a un rôle important vis à vis des efforts dans le rideau et les butons en acier. Pour cela la peinture blanche avec de la chaux peut réduire l'influence temperature.

Mode 2 : le rideau de palplanche est sensible au rayonnement du soleil. Des parties à l'ombre peuvent avoir un comportement différent de celui des parties ensoleillées.

Mode 3 : L'importance des déformations hygrothermiques de béton dans le cas de refroidissement et le retrait d'une poutre de couronnement.

4- 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 (voir la figure (2.22)). 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 (figure. **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 (figure. **c**). Lorsque F continue à croître, la butée augmente, tandis que la contre butée diminue, le rideau est dit partiellement.

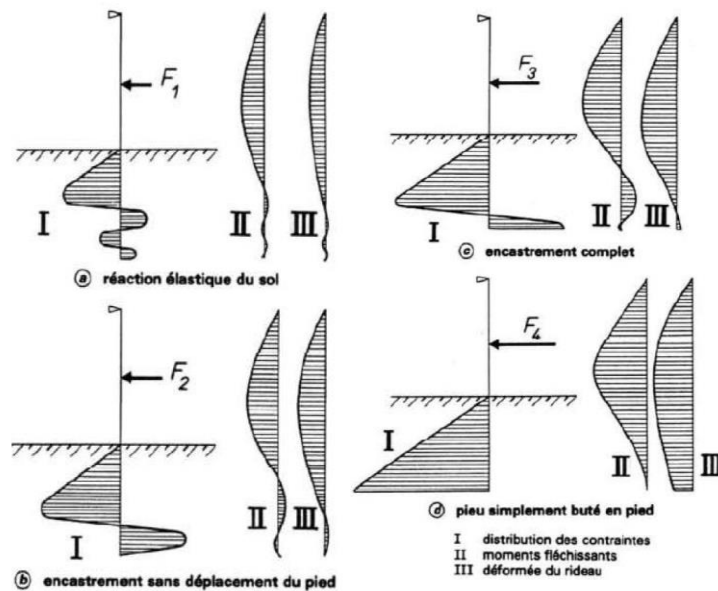


Figure 2.22. Comportement d'un rideau ancré en tête soumis à une force horizontale croissante [HOU86]

Dans le cas de poussée Le sol a tendance à descendre, la force est inclinée vers le bas :

$$\sigma_h = K_a \sigma_v \cos \delta_a \quad (2.27)$$

Dans le cas de butée Le sol est poussé vers le haut, la force est inclinée vers le haut :

$$\sigma_h = K_p \sigma_v \cos \delta_p \quad (2.28)$$

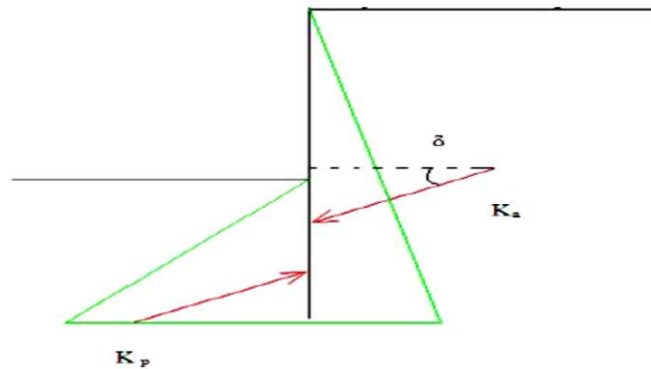


Figure 2.23. Un rideau avec frottement

A partir de la figure (2.23) ci-dessus l'équilibre en moment, l'angle étant le même en poussée et en butée, un facteur en $\cos\varphi$ affecte les poussées des terres. En outre l'équilibre en force dans la contrebutée, seuls les coefficients de poussée et de butée sont affectés par l'angle φ . L'hypothèse est que: $\delta_a = 0$ et $\delta_p = -\varphi/2$. Ceci n'affecte que peu les efforts

Structurels observés. Empiriquement, l'influence du frottement du rideau se révèle est peu.

2.9 Les déformations horizontales et verticales

On peut distinguer deux profils de déformations de sol et de l'écran de soutènement à savoir :

1. Le profil convexe en tympan

La forme convexe s'établit dans le cas où l'essentiel de la déformation de rideau se développe lors de la première phase des travaux, pour tous les rideaux de palplanches travaillant en console, c'est à dire la partie fiche de la palplanche est importante à partir de la figure (2.24).

L'augmentation de la déformation en partie haute. La déformée de rideau de palplanches diminue avec la profondeur et s'annule en fiche.

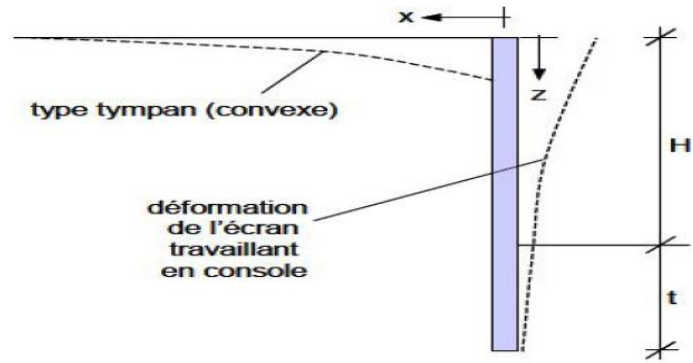


Figure 2.24. Profil de tassement de type convexe en tympan [TER57].

2. Le profil concave

Dans le cas où les déformations sont limitées en tête de rideau au moyen d'un appui comme le tirant d'ancrage, la poutre de couronnement, le buton, le profil des tassements tend à prendre une forme concave comme il est indiqué dans la figure (2.25).

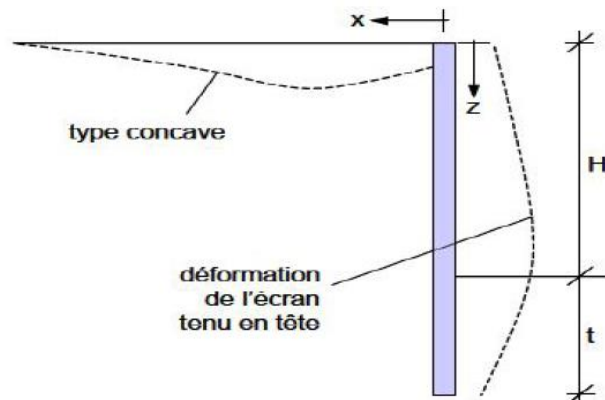


Figure 2.25. Profil de tassement de type concave [TER57].

2.10 Estimation des tassements

2.10.1 Théorème de Clough et O'Rourke

Selon le profil triangulaire : Le tassement est provoqué dans le cas d'utilisation de rideau de palplanches dans les sables et les argiles raides dans la figure (2.26). 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 [CLO90].

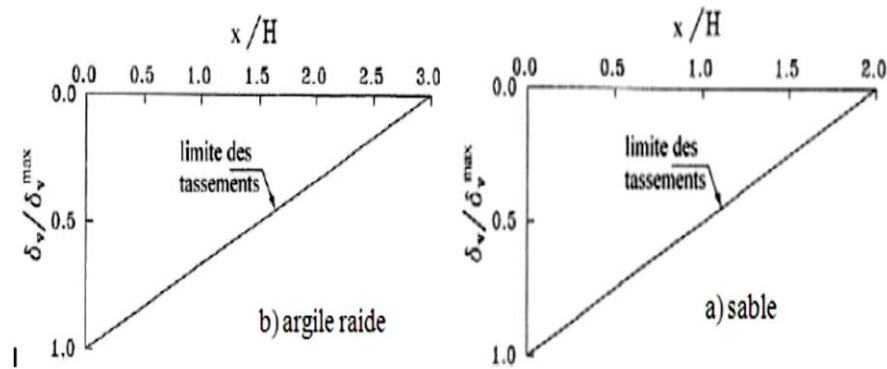


Figure 2.26. Interaction sol structure de type convexe en tympan [CLO90].

Selon le profil trapézoïdal : Il a une relation avec l'emploi de rideau de palplanches dans les argiles molles dans la figure (2.27). 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 n'égale à environ deux fois la profondeur de soutènement.

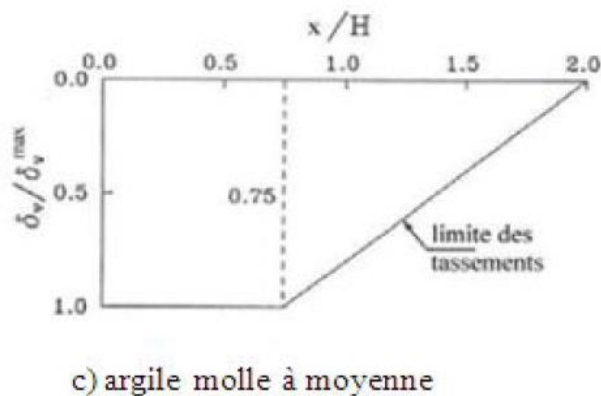


Figure 2.27. Interaction sol structure de type concave

2.10.2 Théorème de Hsieh et Ou

Dont le tassement est dite 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 selon les figures (2.28) (2.29) (2.30), moins influencé par le comportement de l'écran [HSI98].

$$\text{Pour } \frac{x}{H} \leq 2 \quad \sigma_v = (-0.636 \sqrt{\frac{x}{H}} + 1) \sigma_v^{\max} \quad (2.29)$$

$$\text{Pour } 2 < \frac{x}{H} \leq 4 \quad \sigma_v = (-0.171 \sqrt{\frac{x}{H}} + 0.342) \sigma_v^{\max} \quad (2.30)$$

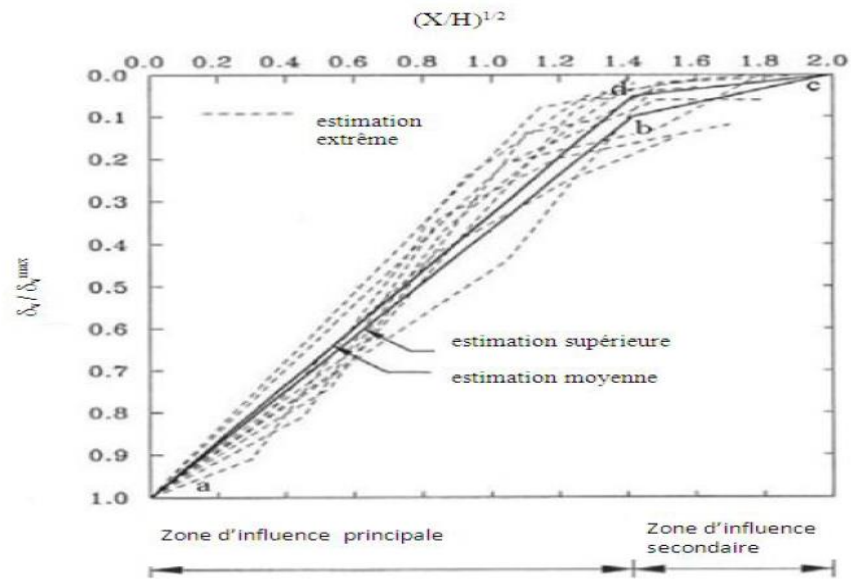


Figure 2.28. Méthode de détermination des tassements de type convexe [HSI98]

Cette méthode est classée comme semi empirique, elle se base sur trois hypothèses :

- ✓ Les déformations horizontales doivent être calculées 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 $\delta_{vmax} = 0.25 \delta_{hmax}$ avec une limite supérieure de $\delta_{vmax} = \delta_{hmax}$.
- ✓ 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 $A_s \leq 1.6A_c$.

Comme il est figuré ci-dessous, 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 : $A_c = \max (A_{c1} \text{ et } A_{c2})$.

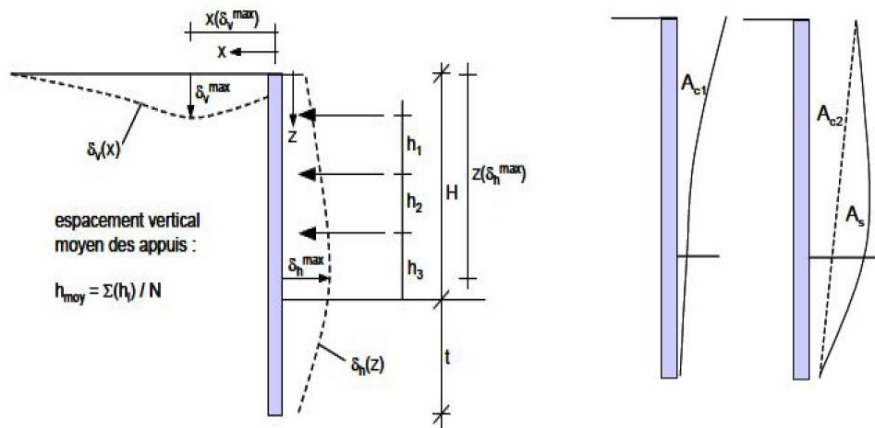


Figure 2.29. La déformée d'un rideau de palplanches [HSI98].

Tel que :

H : La profondeur finale de la fouille

δ_{hmax} : Déplacement horizontal maximal

t : La fiche de l'écran

δ_{vmax} : Tassement maximal à la surface

h_i : Espacement verticale des appuis

N : Nombre de lit d'appui

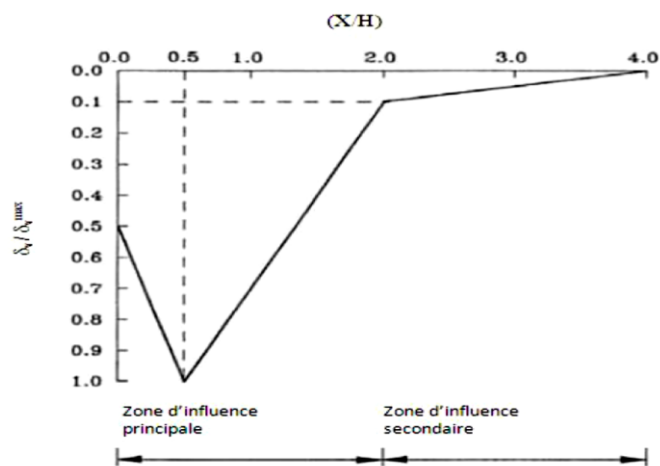


Figure 2.30. Méthode de détermination des tassements de type concave [HSI98]

2.11 Effet de l'eau

2.11.1 Renard hydraulique

Le mouvement hydraulique peut se produire qui a pour effet de modifier les conditions de pression interstitielle autour de rideau et le terrain accidenté. Le calcul des pressions hydrauliques montre qu'elles ont pour effet d'augmenter la poussée du sol et de diminuer la butée par rapport au cas hydrostatique selon la figure (2.31). Par conséquent, cette modification ne va pas dans le sens de la sécurité et doit être intégrée au modèle. Supposant que le gradient hydraulique varie linéairement sur la face amont et sur la face aval du rideau. 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.

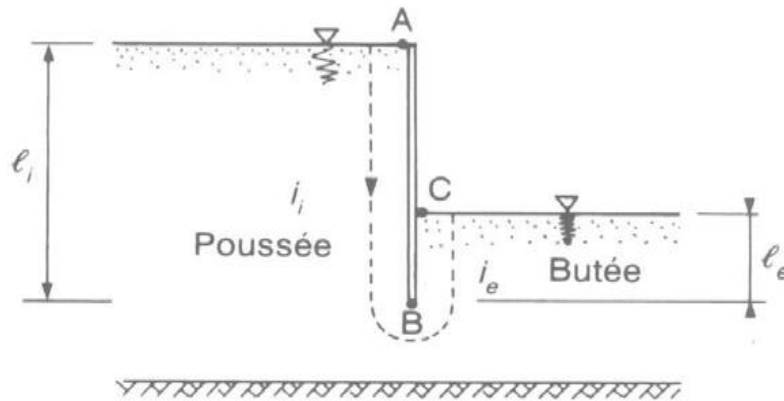


Figure 2.31. Méthode des gradients hydrauliques moyens [HSI98]

On a :

$$\rho = \frac{h_B - h_C}{h_A - h_C} = \frac{h_B}{h_A} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{L_i}{L_e}}} \quad (2.31)$$

Tel que ρ : 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 :

$$i_i = h_A \frac{1 - \rho}{l_i} \quad (2.32)$$

$$i_e = h_A \frac{\rho}{l_e} \quad (2.33)$$

Du côté de la poussée :

$$u = \gamma_w (1 - i_i) z_i \text{ et } \sigma'_{ha} = K_a [\gamma - \gamma_w (1 - i_i)] z \quad (2.34)$$

Du coté de la butée :

$$u = \gamma_w(1+ie)ze \text{ et } \sigma'_{hp} = K_p [\gamma - \gamma_w(1+ie)]ze \quad (2.35)$$

2.11.2 Effet de barrage d'un rideau de palplanches

Elle peut provoquer un effet de barrage d'un rideau de palplanche lorsque la nappe est en écoulement. Les ouvrages 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 le rideau et à une baisse en aval de l'écran et concentration de l'écoulement sous le pied de l'écran comme il est indiqué dans la figure (2.32). En outre le rideau de palplanches soutient une excavation ou la nappe peut se trouver rabattue derrière.

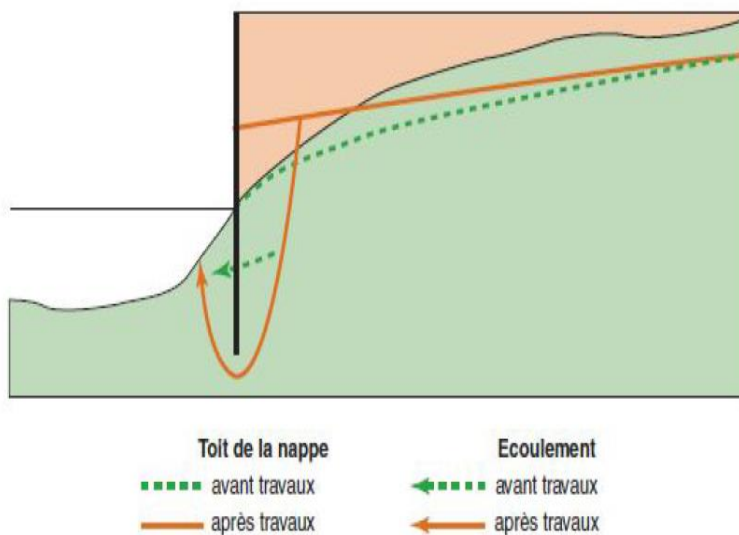


Figure 2.32. Effet de barrage d'un rideau de palplanches [MAR90].

2.12 Durabilité des rideaux de palplanches

Les palplanches peuvent a priori être choisies parmi les profils dont les caractéristiques par mètre courant de rideau sont données dans le tableau 2.1

Tableau 2.1 – *Caractéristiques des palplanches Larssen-Rombas (Sacilor)[BRA04]*

Profilé	Module de résistance I/V (cm ³)	Inertie I (cm ⁴)	Masse par m ² de rideau (kg)
SL 2	300	1950	72
SL 3	550	5550	84.5
SL 4	850	10600	104
SL 5	1050	14700	117
L II	850	8500	122
L III	1360	16800	155

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 agressif différent soit l'air ,sol ou eau et la durée de vie de la structure comme il est indiqué dans le tableau 2.1. Il est un outil simple très utile dans le cas où la conception est basée sur la méthode «conception des contraintes admissible.

2.12.1 Etude de l'environnement

La première étape consiste à caractériser l'environnement de service dans lequel se situera l'acier. La corrosivité d'un environnement est fonction de l'humidité, la température de l'air, la présence de produits chimiques et leur concentration, la teneur en oxygène, etc. La corrosion ne peut pas survenir en l'absence d'humidité. Les régions côtières sont très corrosives en raison de la présence de fortes concentrations d'ions chlorure dans l'air, et par conséquent, les structures exposées au marnage mais également aux embruns sont particulièrement sensibles aux attaques corrosives.

2.12.2 Choix de la nuance d'acier

L'étape la plus importante dans la prévention des problèmes liés à la corrosion est le choix d'une nuance d'acier appropriée, accompagnée de méthodes de fabrication adaptées pour l'environnement donné. Toutefois, même après avoir prescrit un acier particulier, il est nécessaire de soigner les détails constructifs et la mise en oeuvre afin d'obtenir la meilleure résistance à la corrosion.

Un logiciel «Durabilité» a été développée par 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. 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 (voir la figure (2.33)). Cependant, elle est limitée à de type Z «régulier» laminé à chaud palplanches en type U [ARC15].

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)

The screenshot displays the 'Durabilité' software interface for the design of an AZ 48 Z-section. The interface is divided into several panels:

- Graphiques**: Shows input data for actions: $M_{Ed} = 387$ kNm/m, $V_{Ed} = 112$ kN/m, $N_{Ed} = 0$ kN/m, and a water pressure of 0 m. A checkbox for 'vérifier éq. 5.13 (flambement)' is checked.
- Données**: Shows the selected section 'AZ 48', steel grade 'S 240 GP | $f_y = 240$ MPa', reduction factor '1.00 | 1.00', partial safety factors '1.00 | 1.15', and a design life of 100 years with a steel loss of 4.25 mm.
- Taux corrosion**: Shows a steel loss of 4.25 mm.
- Résultats**: Displays 'Bon choix.' and 'Facteur optimisation Of: 0.37 ≤ 1.0' with a green checkmark.
- Classification**: Shows classification parameters: $\epsilon = 0.990$, $(b/t_f)/\epsilon = 22$, 'Classe ini.' = 2, $(b/t_{f,red})/\epsilon = 28$, 'Classe red.' = 2, and $f_y(Classes)$ and $\sigma_y(Classes)$ are both '...'
- Caractéristiques palpl.**: A table comparing initial and reduced characteristics for the AZ 48 section.
- Perte acier**: Shows a steel loss of 4.25 mm, with 'Avant: 1.00 mm' and 'Arrière: 3.25 mm'.
- Atmosphères normales**: A note about 'Sols naturels agressifs (marais, marécages, tourbe, ...)'

	ini.	red.	
W _{el,y}	4800	3830	cm ³ /m
W _{pl,y}	5553	4385	cm ³ /m
I _y	115670	92060	cm ⁴ /m
A	306.5	238.2	cm ² /m
t _f	19.00	14.75	mm
t _w	15.00	10.75	mm
h	482.0	477.8	mm
alpha	71.5	...	°
b	414.9	...	mm
c	488.2	...	mm
Av	119.7	85.8	cm ² /m
S _y	2775	...	cm ³ /m
r ₀	15.0	...	mm
masse	240.7	...	kg/m ²

Figure 2.33. Fenêtre sur logiciel durabilité d'Arcelometal[ARC15].

2.12.3 Conception pour la durabilité

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. 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 (voir la figure (2.34)).

L'Eurocode 3 considère la fin de la vie de conception à se produire quand une partie de rideau de palplanche atteint la contrainte limite maximale admissible due à la perte de corrosion. La vie de conception étant à partir du point que l'épaisseur sacrificielle de la corrosion a atteint le maximum contrainte admissible, Les techniques de prévention de la corrosion des rideaux de palplanches sont diverses : le dimensionnement de l'acier, la protection par peinture ou autre revêtement de surface ou la protection cathodique. Le choix de l'une ou de plusieurs de ces techniques dépend de divers paramètres comme l'agressivité du milieu ambiant, la durée de protection envisagée, les possibilités de mise en oeuvre et d'entretien et le coût. Une optimisation technico-économique est à faire entre ces différents facteurs, on distingue :

- Epaisseur sacrificielle
- 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
- Limite d'élasticité élevée

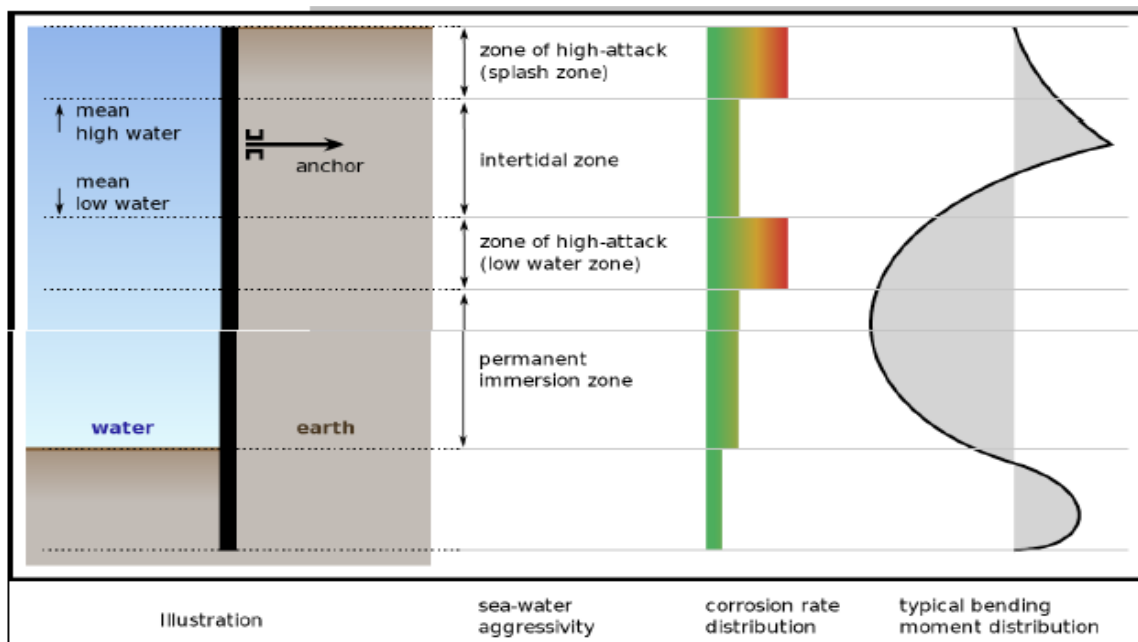


Figure 2.34. Les différents Zones de corrosion dans le rideau de palplanche en milieu marin [ARC15].

Selon l'agressivité de l'environnement de l'élément en acier, des mesures de protection contre les effets de la corrosion doivent être prises si d'éventuelles pertes d'épaisseur d'acier sont prévisibles. Si la corrosion doit être prise en compte dans le calcul par une réduction d'épaisseur, les taux de corrosion doivent être donnés dans le cahier des charges du projet. L'utilisation d'une épaisseur d'acier supplémentaire peut donc apparaître dans les calculs afin de prendre en compte de la corrosion et respecter la durée de vie des rideaux de palplanches [EUR07].

Lors de la conception des rideaux de palplanches, plusieurs aspects doivent être pris en considération: les conditions géotechniques, les systèmes structurels, les critères d'état, les propriétés des matériaux et l'agressivité du milieu. Pour la vérification de la durabilité des rideaux de palplanches on doit calculer le coefficient de sécurité qui est :

$$S_f = \frac{M}{W_x} + \frac{(N \cdot e)}{W_x} \quad (2.36)$$

Avec :

S_f : Coefficient de sécurité du rideau de palplanche

M : Moment de flexion du rideau de palplanche (kN.m)

N : Effort tranchant (kN)

W_x : Moment statique du rideau de palplanche (mm³)

e : Déplacement maximum de rideau de palplanche (mm)

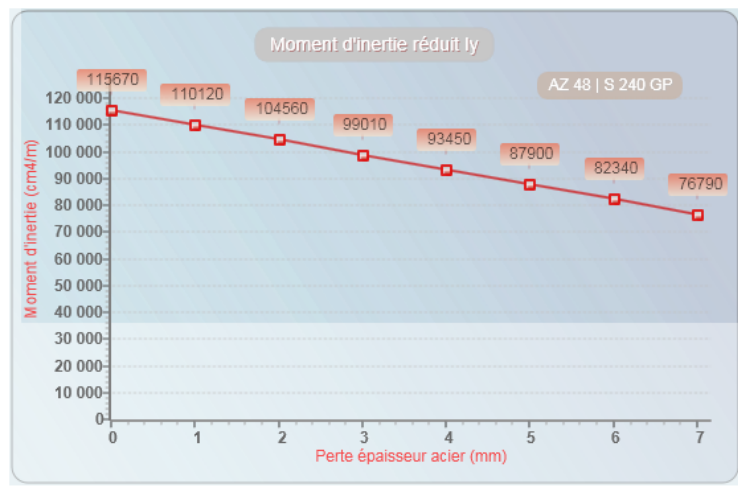


Figure 2.35. Les moments d'inertie réduits

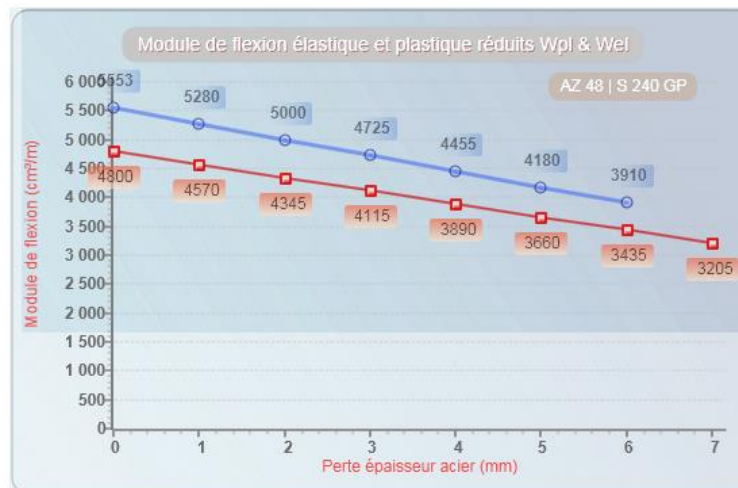


Figure 2.36. Les modules de flexion élastique et plastique réduits

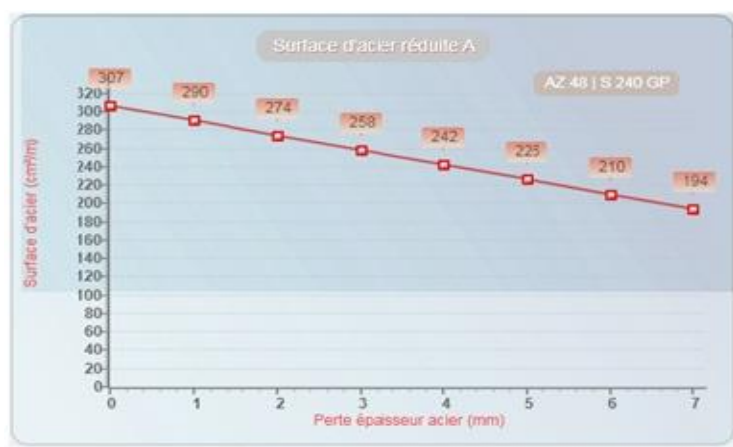


Figure 2.37. Les surfaces d'acier réduites



Figure 2.38. Les moments de flexion réduits $M_{c,Rd}$

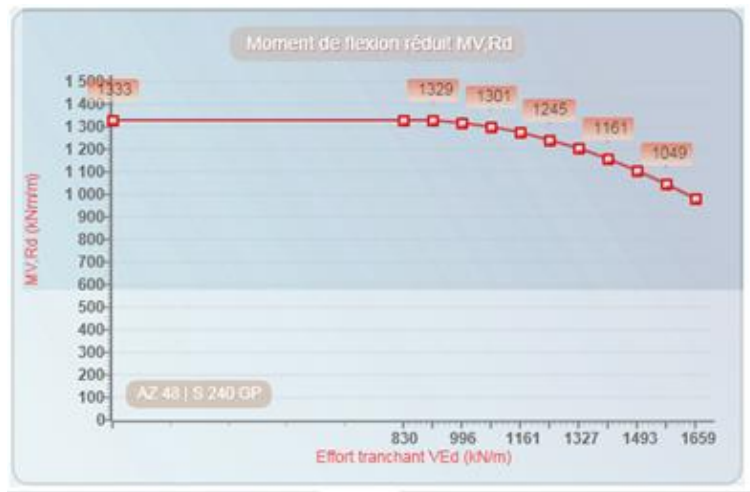


Figure 2.39. Les moments de flexion réduits $M_{v,Rd}$

Selon les résultats obtenus par le logiciel de Durabilité à savoir les figures (2.35), (2.36), (2.37), (2.38), (2.39). On constate que les caractéristiques géométriques de rideau de palplanche notamment les moments d'inertie, les modules de flexion élastique et plastique, Les surfaces d'acier, Les moments de flexion $M_{c,Rd}$, $M_{v,Rd}$ sont réduits graduellement en fonction de perte d'épaisseur durant toute la durée vie de rideau de palplanche qui est 100 ans, ce qui diminue de la durabilité et l'instabilité de rideau de palplanche.

2.13 Conclusion

A la fin de ce chapitre, on conclut que l'application des méthodes de calcul analytique de rideau de palplanche se basent sur les différentes hypothèses, et quelles

restent insuffisantes pour la résolution des problèmes d'instabilité géotechnique. Ces hypothèses peuvent avoir des influences importantes 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 méthodiques, ces hypothèses correspondent à la réalité notamment avec l'influence de phénomène de corrosion sur la stabilité et la durabilité des rideaux de palplanche.

CHAPITRE 3

Modélisation analytique d'un rideau de palplanche corrodé

3.1 Introduction

L'étude des rideaux de palplanche en acier battues dans le sol, nécessite habituellement de mesurer le taux de corrosion sur une certaine zone de la hauteur de la structure en palplanche.

Plusieurs études sur la corrosion ont été consacrées à estimer la vitesse de corrosion des palplanches en acier dans divers milieux soit sol, eau ou air. En ce sens, des modèles basés sur le couplage des relations théoriques avec des mesures d'épaisseur in situ ont été élaborés.

Le but de ce chapitre est d'analyser des modèles analytique et mathématique en s'appuyant sur la littérature [SOU79] [MEL99] [GUE99] [PAI02] [QIN02] ainsi les recommandations du code de conception européen d'Eurocode 3 partie 5 [EUR07].

3.2 Lecture de l'Eurocode 3 - Partie 5

En ce qui concerne la vérification de la résistance des palplanches pour l'état de service et l'état limite ultime, le Comité européen de normalisation de l'Eurocode 3 a déterminé la perte d'épaisseur des parties de palplanches en contact avec l'eau ou avec le sol. [EUR07], en fonction de la durée de vie nominale requise de la structure. Lorsque les palplanches sont en contact avec le sol ou l'eau de deux côtés, les taux de corrosion sont appliqués de chaque côté. Si l'agressivité du sol ou de l'eau est différente sur les côtés opposés d'un rideau de palplanches, alors les taux de corrosion donnés dans cette section doivent être considérés uniquement pour la conception. La perte d'épaisseur due à la corrosion atmosphérique peut être de 0,01 mm par an dans des atmosphères normales et de 0,02 mm par an dans des endroits où les conditions marines peuvent affecter les performances de la structure. Les éléments suivants ont une influence majeure sur les taux de corrosion dans les sols, le type de sol, la variation du niveau de la nappe phréatique, la présence d'oxygène et la présence de contaminants.

La valeur recommandée de la perte d'épaisseur due à la corrosion de rideaux de palplanches dans les sols avec ou sans eau souterraine est estimée pour 5, 25, 50, 75 et

100 ans, pour les cas suivants selon l'Eurocode 3 [EUR07] et comme il est indiqué dans le tableau (3.1):

En cas de contact avec le sol, les cas définis sont:

- Sols naturels non perturbés (sable, limon, argile, schiste, ...)
- Sols naturels pollués et sites industriels
- Sols naturels agressifs (marais, tourbe, ...)
- Remplissages non-compactés et non-agressifs (argile, schiste, sable, limon, ...)
- Remplissages non-compactés et agressifs (cendres, scories,)

En cas de présence d'eau douce ou d'eau de mer, les cas définis sont:

- Eau douce commune (rivière, canal de navire, ...) dans la zone de haute attaque (ligne d'eau).
- Eau douce très polluée (eaux usées, effluents industriels, ...) dans la zone d'attaque élevée (ligne d'eau).
- Eau de mer dans un climat tempéré dans la zone d'attaque élevée (zones de basses eaux et d'éclaboussures)
- L'eau de mer dans un climat tempéré dans la zone d'immersion permanente ou dans la zone intertidale.

Si la durée de vie de calcul spécifiée en exploitation est supérieure à la durée de vie réelle du revêtement, la perte d'épaisseur qui se produit pendant le restant de la durée de vie en exploitation doit être prise en compte dans les vérifications aux états limites de service et aux états limites ultimes.

Remarques :

- Une combinaison de différentes mesures de protection pourrait s'avérer utile pour obtenir une durée de vie en exploitation élevée. Le système de protection peut être défini en prenant en compte le calcul de la structure et du revêtement de protection ainsi que la faisabilité des contrôles.

- La possibilité que la corrosion ne soit pas uniforme sur la totalité de la longueur d'un profilé peut être prise en compte, en permettant une conception économique par le choix d'une répartition des moments dans les zones d'expositions de la corrosion.

En ce qui concerne les cordons de soudures il faut s'assurer qu'ils soient continus. On supprime ainsi les interstices et facilite également l'application de peinture.

Les effets suivants exercent une influence importante sur les taux de corrosion donnés par l'Eurocode 3 [EUR07] :

- présence ou non en zone de marnage ;
- en mer ou estuaire ;
- le taux d'oxygène.

Tableau 3.1. Perte d'épaisseur [mm] due à la corrosion pour les rideaux de palplanches en acier dans le sol et eau [EUR07]

Durée de vie	5 ans	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Atmosphère	0,05	0.25	0.50	0.75	1.00
Sol					
Sols naturels non perturbés	0,00	0.30	0.60	0.90	1.20
Sols naturels pollués et sols	0.15	0.75	1.50	2.25	3.00
Industriels					
Sols naturels agressifs (marais, tourbières, de la tourbe ...)	0.20	1.00	1.75	2.50	3.25
Non-compacté et non agressif fils (argile, schiste, de sable, de limon)	0.18	0.7	1.20	1.70	2.20
Fills, ashes non compactées et Agressifs	0.50	2.00	3.25	4.50	5.75
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	1.9	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

Les taux de corrosion dans les remblais compactés sont plus faibles que dans les régions non compactées. Les remblais compactés dont les chiffres du tableau (3.1) devraient être divisés par deux. Le taux de corrosion le plus élevé se trouve généralement dans la zone de faible eau et les éclaboussures ou au niveau bas de l'eau dans les eaux de marée. Cependant, dans la plupart des cas, les contraintes 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 extrapolées.

Concernant la conception et la maîtrise de la corrosion, les premières précautions doivent être prises pour gérer la corrosion de l'acier, ces précautions devront faciliter l'entretien.

3.3 Analyse du mécanisme de corrosion dans les aciers

Selon l'environnement d'exposition, la corrosion marine peut être divisée en quatre catégories [MEL98] : (1) immersion; (2) éclaboussure / zone de marée; (3) atmosphérique, et (4) espace semi-fermé. Seule la corrosion par immersion est faible. Les aciers sont utilisés dans des conditions marines (comme en mer). Les structures dans la mer sont typiques exemple de corrosion par immersion marine.

Les structures en acier fonctionnent dans un environnement complexe. Propriétés de l'eau telles que la salinité, la température, la teneur en oxygène, le niveau de pH et la composition chimique peuvent varier selon l'emplacement et la profondeur de l'eau. Aussi la face intérieure des plaques d'acier sera exposée aux environnements agressifs existant. Les structures sont souvent protégées, soit avec des peintures ou avec des systèmes cathodiques qui fournissent une intensité de courant à la surface métallique protégée inhibant le processus de corrosion. Par conséquent, le taux de corrosion des structures est influencé par de nombreux facteurs (par exemple revêtement et anodes) et divers paramètres opérationnels tels que le pourcentage de temps, l'emplacement et l'orientation des composants, le niveau d'oxygène, température, degré de flexibilité, fréquence et méthode de nettoyage du structure, entretien et réparation

Un résumé des facteurs environnementaux considérés comme ayant les effets possibles sur la corrosion des métaux légers et faiblement alliés sont donnés dans le tableau (3.2). Deux principaux mécanismes de corrosion sont généralement présents dans les plaques d'acier. L'un est un le perte général qui se traduit par une diminution généralisée de l'épaisseur de la plaque. Un autre le mécanisme est une piqûre qui consiste en une corrosion localisée avec des trous très profonds apparaissant dans la plaque. En fait, les piqûres peuvent entraîner des fuites mais, en général, très localisée, elle n'affecte pas la distribution moyenne des contraintes dans la plaque.

Tableau 3.2 Les facteurs environnementaux dans la corrosion dans les milieux marins

[MEL99]

Facteur	Effet sur le taux de corrosion initiale	Effet sur le taux de corrosion en régime permanent	Influencé par
Bactérie biologique	Non	Réduction est probable sur le contrôle de taux de corrosion	Température de l'eau de mer
Biomasse La vie végétale	-	-	Concentration NaCl Vitesse de l'eau Solides suspendues Le niveau et le type de polluant Pourcentage mouillé
Chimique O ₂	Proportionnel direct	Nom, si la corrosion contrôlé par le taux de transfert de O ₂	Température de l'eau de mer
Co ₂ - NaCl	Petit effet inversement proportionnel	Petit effet proportionnel	L'eau douce Effet biologique
PH	Petit effet	Petit effet	Situation géographique
carbonate solubilité des polluants	Petit effet varie	Petit effet varie	
Température physique	Proportionnel direct	proportionnel	Situation géographique
Pression	-	-	Non signifié pour l'eau
Vitesse de l'eau	Petit effet	Petit effet	Situation géographique
Le pourcentage de solides en suspension mouillant	Proportionnel pour les zones de marées et d'éclaboussures	Petit effet, si proportionnel pour les zones de marées et d'éclaboussures	Situation, le climat

Par conséquent, les piqûres ne sont pas prises en compte et la corrosion générale est modélisée comme une diminution monotone de l'épaisseur de la plaque d'acier. Parce que la corrosion est une fonction de plusieurs variables, beaucoup de nature incertaine, Le modèle probabiliste est plus approprié pour décrire la corrosion attendue.

Une étude fondamentale sur le mécanisme de corrosion de l'acier non protégé, le spécimen a été réalisé par Melcher et al [MEL95] [MEL97] [MEL98] [MEL99]. Certaine compréhension du mécanisme de corrosion par immersion a été atteinte. Pour les structures en acier non protégées, le processus de corrosion peut être divisé en quatre étapes (voir Figure 3.1) :

- (1) corrosion initiale
- (2) diffusion de l'oxygène contrôlée par les produits de corrosion et la croissance micro-organique.
- (3) limitation de l'approvisionnement alimentaire pour l'activité aérobie.
- (4) limitation de l'approvisionnement alimentaire pour l'activité anaérobie.

Pour certaines étapes, les principaux paramètres environnementaux ont été reconnus et quantifié mais pour d'autres étapes, une meilleure compréhension du mécanisme de corrosion est encore nécessaire. Par conséquent, d'autres recherches sont nécessaires pour appliquer leur modèle phénoménologique probabiliste.

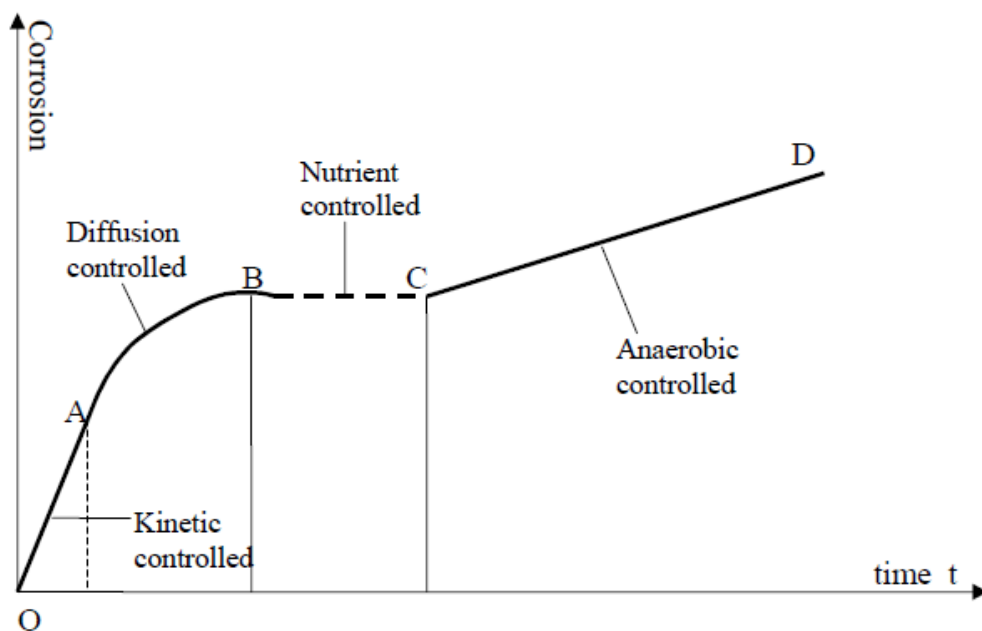


figure3.1 *Modele analytique conceptionel de Melchers de corrosion dans les structures en aciers [MEL99]*

Concernant les mécanismes de corrosion réels, les données recueillies ont une grande importance pour prédire le taux de corrosion des structures en acier notamment les rideaux de palplanches. Quelques données sur la corrosion sont actuellement disponibles, Yamamoto et Ikegami ont signalé l'épaisseur de 50 échantillons prélevés de structures métalliques [YAM98]. Paik et Kim mesurent les pertes d'épaisseurs dues aux corrosions à partir des citernes de ballast des navires âgé entre 11 et 27 ans [PAIK12], mais sans indiquer la présence d'un revêtement protecteur. En outre, les données de corrosion pour les structures à usage pétrolière de double coque fait actuellement des défauts, conduisant à des erreurs dans les tentatives de prédire la corrosion, dans ce type de structure en utilisant des données obtenus à partir de structure à simple coque, qui ont été éliminés depuis les 1990.

La durée de vie des palplanches dépend des contraintes imposées en service notamment l'effet de corrosion générale ou uniforme et locale comme il est indiqué dans la figure (3.2), que ce soit en acier doux ou en acier à haute résistance. La durée potentielle des sections varie de plus de 120 ans.

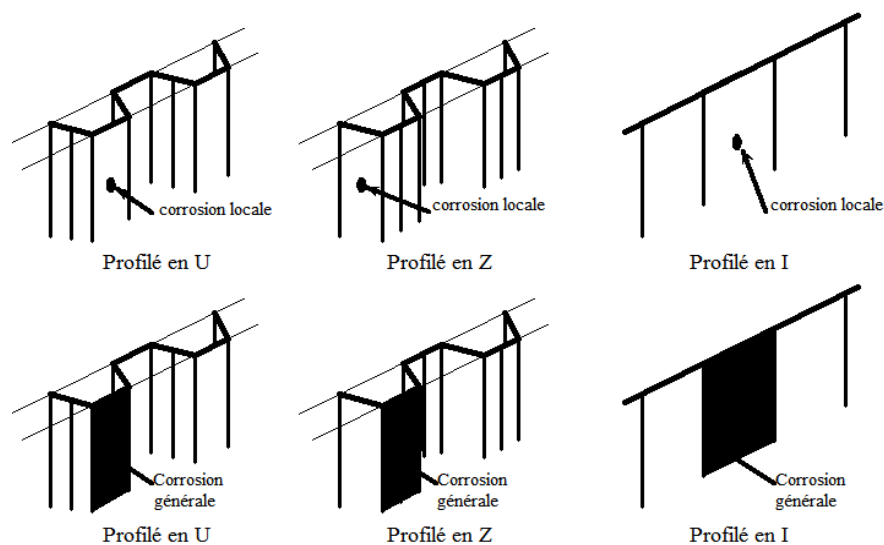


Figure3.2. Type de corrosion dans les rideaux de palplanches [BAL18a].

3.4 Modèles analytiques et mathématiques de corrosion

En supposant une vitesse de corrosion constante à partir des divers mécanismes de corrosion et des différentes données de corrosion disponibles dans la littérature, semble insuffisante pour prédire les dommages de corrosion dans certaines structures tandis que

les structures métalliques vieillissent. Une variété de modèles empiriques mathématiques a été proposée pour prédire l'évolution de la corrosion. Initialement, des relations linéaires simples de perte d'épaisseur par corrosion par rapport au temps ont été proposées par Southwell et al. en 1979 [SOU79] :

$$d(t) = 0.076 + 0.038t \quad (3.1)$$

Où $d(t)$ est la valeur moyenne de la perte d'épaisseur de la structure (mm), et t est le temps (année).

Cependant, ce modèle linéaire surestime la perte de corrosion initiale, cela peut être du par le fait que l'effet du revêtement n'a pas été considéré. Ainsi, un modèle modifié de Southwell est développé par Melchers en 1999 [MEL99] :

$$d(t) = 0.084t^{0.823} \quad (3.2)$$

En 1999, Guedes Soares et Garbatov ont proposé un modèle similaire Eq. (3.3), qui propose également d'inclure une corrosion et une transition entre la durabilité du revêtement et l'amorçage de la corrosion [GUE99]. Cependant, ils pensaient que la corrosion s'arrêterait progressivement à une certaine profondeur, étant donné que les protections de corrosion sur la surface de la plaque entraveraient le processus de corrosion. Toute perturbation, voire suppression, de cette couche d'oxyde pourrait conduire à une ré-initiation du processus de corrosion [WAN14].

$$d(t) = d_{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t-T_0}{T_t}\right) \right] \quad (3.3)$$

Lorsque d_{∞} est l'épaisseur à long terme de la perte de corrosion (mm), T_0 est la durée de vie du revêtement et T_t est la transition entre la durabilité du revêtement et l'initiation à la corrosion.

En 1998, Paik et Thayamballi ont proposé un modèle probabiliste linéaire [PAI98], modifié plus tard par Paik et Thayamballi en 2002 [PAI02], en séparant le processus de corrosion en trois phases successives: (1) pas de corrosion T_0 ; (2) transition entre la durabilité du revêtement et l'initiation à la corrosion T_t ; (3) corrosion générale. Pour la troisième étape, ils suggèrent trois types de taux de corrosion: le type convexe (accumulation progressive de la couche de rouille empêchera le métal de se corroder), le

type concave (susceptible de se produire sous des structures dynamiquement chargées en raison de la flexion exposant les zones fraîches à corrosion) et le type linéaire (la couche de rouille sont continuellement enlevés en raison de l'abrasion ou de l'usure) [PAI98].

Dans le modèle de Paik et Thayamballi, la durée du revêtement a été décrite en utilisant un modèle lognormal [YAM98] [AHM10]. La vitesse de corrosion n'est plus constante :

$$d(t) = C_1 (t - T_0 - T_t)^{C_2} \quad (3.4)$$

Lorsque l'obtention de C_1 et C_2 est basée sur des données statistiques de corrosion collectées.

En 2002, 2003, Qin et Cui ont proposé un modèle plus souple pour la corrosion généralisée des aciers doux en utilisant une fonction de Weibull [QIN02] [QIN03]. Contrairement au processus de corrosion décrit par Guedes et Garbatov et Paik [GUE99] [PAI98], ils pensaient qu'après la période de 'non corrosion' ($0_{T_{st}}$), la corrosion s'accélérait (T_{st} , T_A) jusqu'à ce que la corrosion généralisée ($T_A_{T_L}$) sur la durée de vie. Il a l'avantage d'être un modèle plus souple et peut décrire les modèles précédemment réalisés en appliquant certaines valeurs de paramètres. Cependant, ce modèle a été adapté à un ensemble supposé de données de corrosion au lieu de mesures réelles, ce qui rend difficile de déterminer le degré de précision et de rationalité.

$$d(t) = d_\infty \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^\beta \right] \right\} \quad (3.5)$$

Lorsque d_∞ est l'épaisseur à long terme de la perte d'épaisseur par corrosion (mm), T_{st} est la période sans corrosion et β et η sont déterminés par la méthode des moindres carrés.

3.5 Le cas étudié

Lors de la conception de palplanches, plusieurs aspects ont été pris en compte tels que les conditions géotechniques, les systèmes structuraux, les critères d'état, les propriétés des matériaux et l'agressivité des milieux [BAL18b].

Un rideau de palplanche est entièrement encastré et ancrée dans notre étude, comme le montre la figure (3.3).

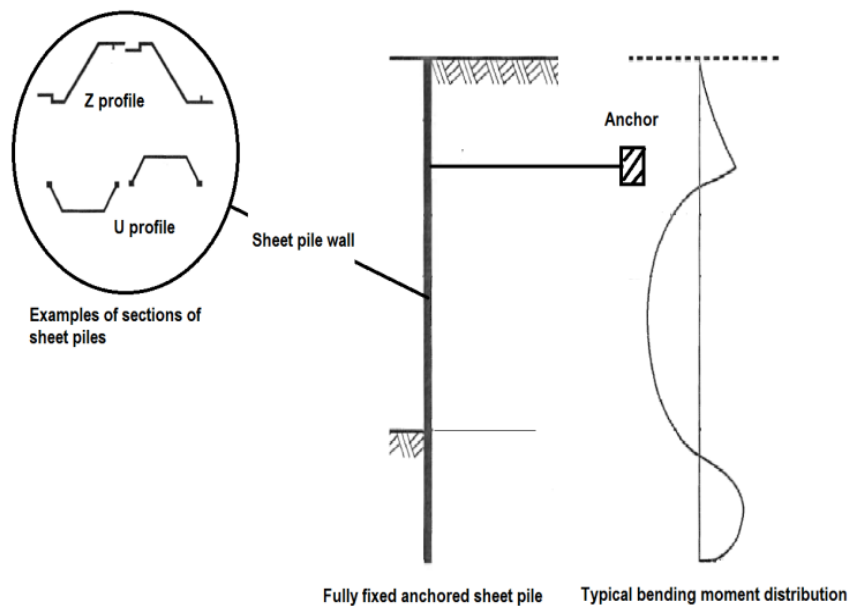


Figure 3.3. *Le cas étudié [BAL18b]*

Les sections de palplanches les plus couramment utilisées sont les profilés Z et U. Dans le cas de la conception d'un rideau de palplanches, les facteurs qui influencent le taux de corrosion doivent être pris en compte: température, concentration en oxygène, salinité, etc. Cinq modèles empiriques de corrosion sont appliqués dans cette étude. Le tableau (5.1) affiche les paramètres utilisés pour chaque modèle. Les valeurs recommandées pour la perte d'épaisseur due à la corrosion selon l'Eurocode 3 [EUR07], avec ou sans eau souterraine (eau douce ou eau de mer) sont appliquées et comparées aux valeurs données par les modèles mathématiques et analytiques.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on peut voir qu'une bonne modélisation analytique et prédiction de la réduction de la résistance des structures en acier notamment les rideaux de palplanches dépend largement de la qualité de la prévision de la corrosion. Les principales conclusions sont résumées comme suit:

Alors que le mécanisme général de corrosion pour l'acier a été systématiquement exploré, également l'application de la protection contre le système de corrosion est nécessaire.

Il existe de nombreux débats sur la question de savoir si un modèle de corrosion devrait s'appuyer sur des principes mécanistiques ou des données de corrosion réelles recueillies des enquêtes sur les milieux de corrosion et la lecture de l'Eurocode 3. La qualité du modèle dépend largement de la corrosion donnée pour lesquelles il est parfois difficile d'évaluer la précision en raison de sa variabilité.

Partie Méthodologie

CHAPITRE 4

Modélisation numérique d'un rideau de palplanche corrodé

4.1 Introduction

Pour modéliser numériquement un rideau de palplanche corrodé, il est évidemment nécessaire d'utiliser un modèle qui rend compte de l'interaction mécanique entre le sol et le mur rideau de palplanche, mais plusieurs approches sont possibles concernant la modélisation de ce modèle et de l'interaction de celles-ci avec le sol. Dans ce chapitre, on présente les différentes étapes de modélisation après qu'on effectue l'étude analytique pour calculer les forces de poussée et de butée ainsi le moment de flexion maximum pour permettre le choix de profilé de rideau de palplanche ensuite une vérification de la durabilité pendant la durée de service. Dans tous les cas, la démarche consiste à savoir les procédures de modélisation numérique de rideau de palplanches à l'aide de logiciel Comsol en prenant compte les charges, le comportement de matériaux, l'environnement de contacte et la méthode élaborée.

4.2 Modélisation d'un rideau de palplanche par le logiciel COMSOL

4.2.1 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 à l'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 logiciel numérique COMSOL, qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode d'éléments finis [COM16].

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 structuraux dans COMSOL/Multiphysics, qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique à savoir les contraintes, déformations et les déplacements. 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.)

4.2.2 Conception d'un modèle

Afin d'étudier ce mur rideau de palplanches qui est en porte-à-faux, le choix du type de palplanches est basé sur la fonction du mur, les caractéristiques des sols et la proximité du mur avec les structures existantes. Alors que le rideau de palplanche utilisé est habituellement pour $t = 19.00\text{mm}$ d'épaisseur, hauteur de $H = 10\text{m}$ et encastrer dans $D = 5\text{m}$ dans le sol (voir la figure (4.1)). Ainsi les propriétés de palplanches utilisées pour le modèle qui sont données dans Tableau 4.1.

Tableau4.1. Propriétés du Sol [BAL18a]

Propriétés	Valeurs	Descriptions
γ	19 kN/m ³	Poids volumique
φ	35°	Angle de frottement
C	0 kPa	Cohésion
Ψ	0	L'angle de dilatation
E	20000 kPa	Module de Young
ν	0.3	Coefficient de poisson
R_{in}	0,67	Coefficient d'interface

Pour le modèle étudié, le critère de Mohr-Coulomb est utilisé dans le sol, et ses propriétés sont données dans le tableau 4.2. La palplanche corrodée est constituée d'un matériau élastique linéaire. La couche de sol inférieure est soutenue par une base rugueuse rigide et parfaite. Par conséquent, une surcharge fixe sur la limite horizontale inférieure est appliquée. Les contraintes de poussées et butées avec la fonction contrainte et déformations initiales (Initial Stress and Strain) sont ajoutées. Notant que la contrainte causée par la gravité est compressive, ce qui est dans la convention utilisée dans le module de mécanique structurelle signifie signe négatif. Les contraintes expliquent les contraintes locales. Vous pouvez définir une valeur différente dans les directions verticale et horizontale. La contrainte horizontale σ_{xx} est utilisée et appliquée sur le coté limite de mur de rideau de palplanche, de même que la contrainte verticale σ_{yy} est également utilisée et appliquée comme surcharge.

Tableau4.2. Propriétés de rideau de palplanche [BAL18a]

Propriétés	Valeurs	Descriptions
γ	78,5 kN/m ³	Poids volumique
E	210.10 ⁶ kPa	Module de Young
ν	0,3	Coefficient de poisson

Les définitions globales et les paramètres sont donnés dans le tableau 4.3 avec l'ajout d'une paire d'identité au modèle pour la modélisation du contact entre le sol, la paroi de la palplanche, et la charge limite sur la palplanche est progressivement diminuée. Au fond du sol, il assure un déplacement initial nul. Ces opérateurs contraignent le déplacement normal entre la palplanche et le sol à rester en contact, alors que le déplacement tangentiel est sans contrainte.

Tableau4.3. Paramètres et définitions Globales[BAL18a]

Paramètres	Valeurs	Descriptions
σ_{xx}	-20 [kPa]	Contraites horizontales selon xx
σ_{yy}	-30 [kPa]	Contraites horizontales selon yy
H	10 [m]	Hauteur

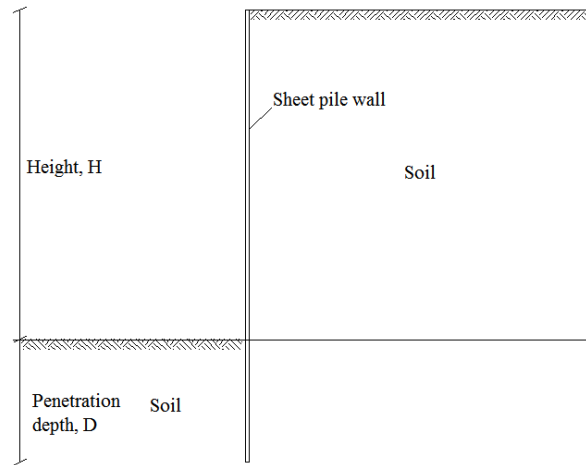


Figure4.1. Conception d'un modèle de Rideau de palplanche étudié [BAL18a]

4.2.3 Choix du matériau

Le Matériaux utilisés dans cette étude est l'acier dont les caractéristiques données dans le tableau (4.1).

Rideau de palplanche

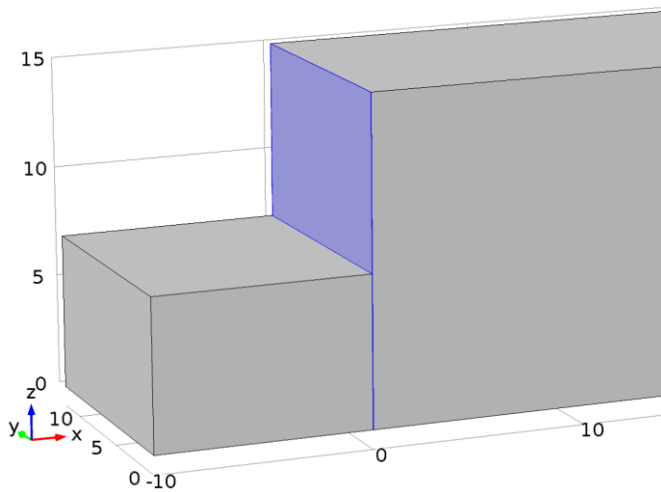


Figure4.2. Vue en 3D sur le rideau de palplanche

Le Comportement des matériau de rideau de palplanche est élastique linéaire

Tableau4.4. Les comportement et les propriétés issues du matériau[BAL18a]

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 :

Tableau4.5. Le Critère de rupture du sol est de Mohr - Coulomb[BAL18a]

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

Condition Initiales et condition aux limites :

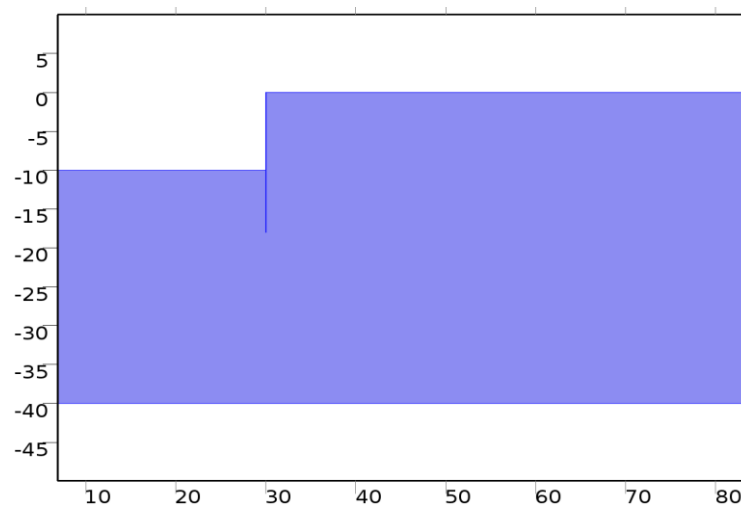


Figure4.3. Condition Initiales et condition aux limites

4.2.4 Les étapes de modélisation

Libre

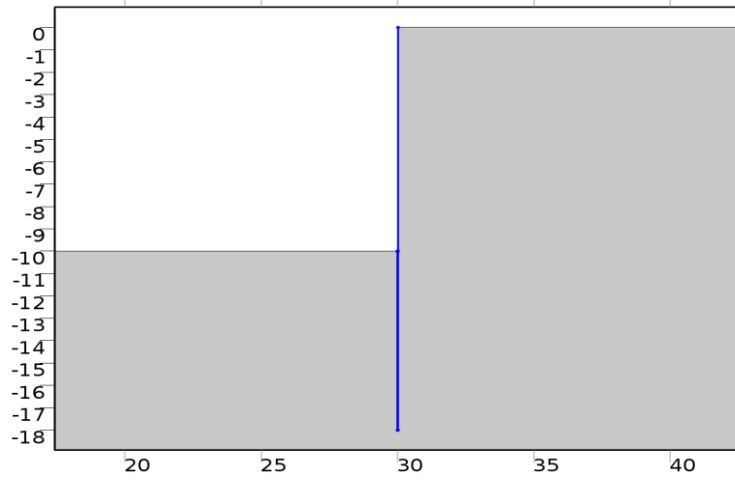


Figure4.4. Libre

Symétrie

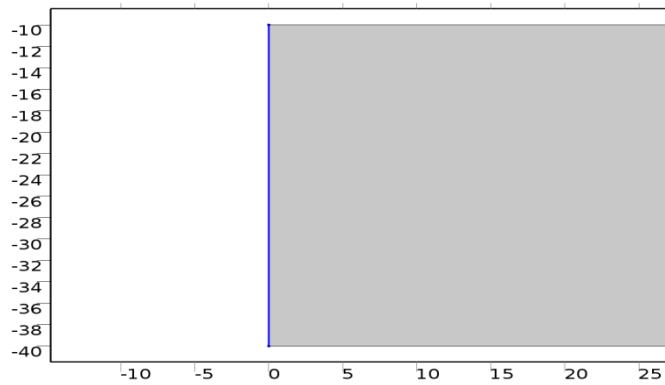


Figure4.5. Symétrie

Limite fixé (encastrement)

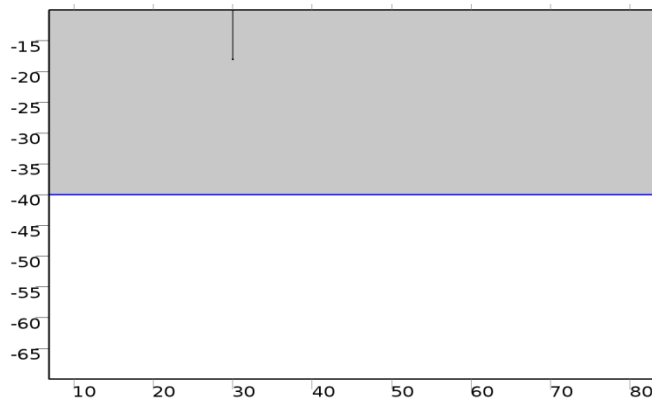


Figure4.6. *Limite fixé (encastrement)*

Appui simple

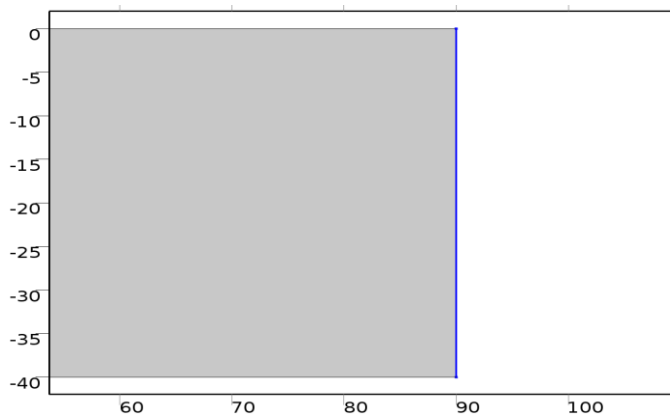


Figure4.7. *Appui simple*

Limite de déplacement

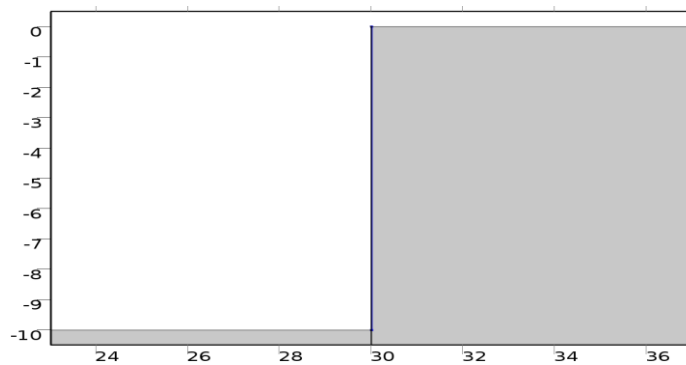


Figure4.8. *Limite de déplacement*

Les surcharges sont appliquées horizontalement et directement sur le sol dans les parties de poussés et butée comme elles sont indiquées dans la figure (4.9)

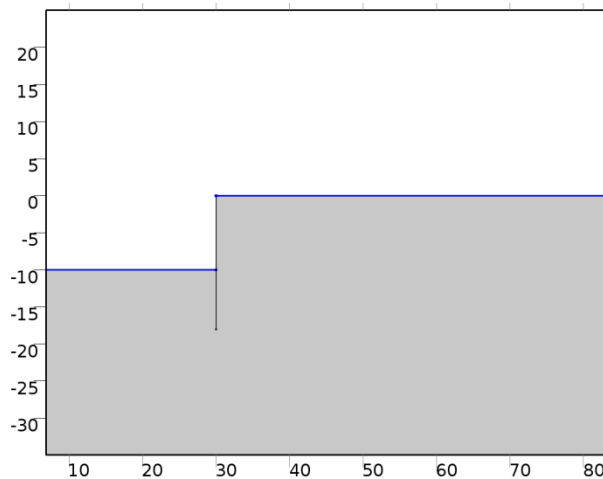


Figure4.9. *Les surcharges*

Les contraintes horizontales de poussées sont appliquées perpendiculaires au rideau de palplanches comme elles sont illustrées dans la figure (4.10)

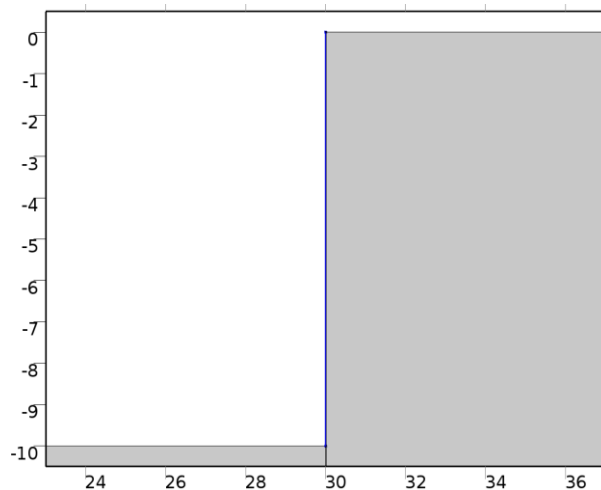


Figure4.10. *Les contraintes horizontales de poussées*

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

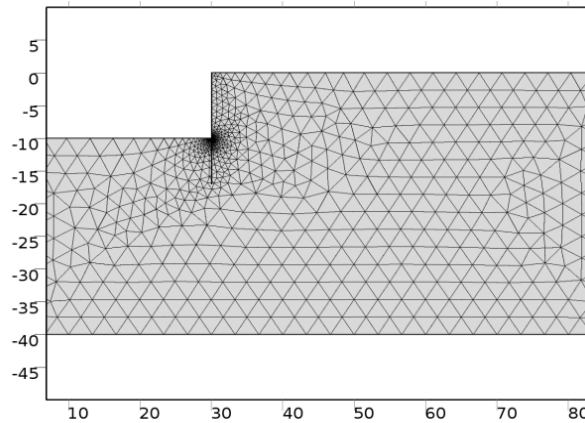


Figure 4.11. *Choix de maillage[BAL18a]*

La figure (4.11) présente un maillage de modèle d'éléments finis typique constitué d'éléments de nœuds. En raison d'une concentration des contraintes autour du mur, un maillage d'éléments finis plus fin a été utilisé dans ces zones et devenu plus grossier dans les zones éloignées du rideau de palplanches. Le mur de palplanches a été simulé par un élément de plaque avec un maillage rectangulaire. Concernant le maillage approprié pour effectuer les simulations dans cette étude, deux maillages d'éléments finis ont été considérés dans le sol, un maillage plus fin avec 3600 éléments quadrilatéraux et 9526 éléments triangulaires ont été utilisés pour déterminer les résultats de la modélisation. Dans les conditions aux limites, les supports fixes ont été considérés au bas de la géométrie, les supports simples se trouvaient sur les limites verticales et les conditions de palplanches dans ce modèle seront libres.

La couche inférieure du sol est soutenue par une base rigide et parfaite donc un encastrement sur la limite inférieure horizontale. Les contraintes initiales sont applicables. Notant que la contrainte causée par la gravité est compressive, ce qui est dans la convention utilisée dans le module de mécanique des structures signifie signe négatif.

Les contraintes représentent les contraintes locales. Vous pouvez définir une valeur différente dans les directions verticale et horizontale. La contrainte horizontale σ_{xx} est appliquée au rideau de palplanche. La contrainte verticale σ_{yy} est également utilisée sur le côté horizontal et appliquée autant que surcharge.

Ajout d'une paire d'identités pour la modélisation de l'interaction entre le sol et le rideau de palplanche. La charge limite sur la palplanche diminue progressivement. Au fond du sol, il assure un déplacement initial nul. Ces opérateurs limitent le déplacement normal entre le

rideau de palplanche et le sol pour rester en contact, tandis que le déplacement tangentiel est nul.

4.2.5 Approche de conception

La corrosion de l'acier est un phénomène naturel qui se produit dans certaines conditions, dans le cas de palplanches en acier, le facteur principal ayant une influence sur la corrosion dans le sol. Une source acceptable pour la perte estimée de l'épaisseur de l'acier peut être trouvée dans la norme européenne EN 1993-Part 5, estimant la perte d'acier pendant la durée de vie et prenant en compte en réduisant les propriétés de rideau de palplanche en acier [EUR07]

Dans cette étude, le rideau de palplanche a été étudiée dans le sol naturel sur la face en amont d'une coté et autour de l'air dans la l'autre face comme indiqué sur la figure (4.1) et la méthode d'équilibre limite a été utilisée, on suppose qu'il n'y a pas besoin de protection de surface. Pour assurer la durabilité et la stabilité de rideau de palplanche avec la prise en compte de la corrosion, il faut vérifier que le facteur de sécurité doit être supérieur à 1,5.

4.2.6 L'Analyse du modèle

La modélisation par éléments finis comprend des analyses de déformation plane bidimensionnelles en utilisant [COM11] afin d'étudier le comportement du sol soutenu par le rideau de palplanches et les déformations induites. Lors de l'utilisation d'un sol élastique linéaire dans l'analyse par éléments finis, la profondeur de la limite du modèle sous la ligne de dragage a un effet linéaire sur le mouvement vertical de la surface du sol au sommet du rideau de palplanches pendant la simulation constructive. Sur le mouvement horizontal, le mur de palplanches est modélisé en utilisant des dimensions de rectangles d'éléments de plaques élastiques.

Un modèle élasto-plastique est utilisé pour décrire la structure du sol [GRA02]. Le modèle constitutif de Mohr-Coulomb pour les sols a été couramment utilisé pour la modélisation par

éléments finis du comportement des parois de soutènement [TAN08]. Le modèle de Mohr-Coulomb est utilisé pour les sols granulaires dans cette étude pour modéliser le comportement contrainte-déformation du sol qui est linéaire et parfaitement plastique [BIL09]. Les paramètres nécessaires pour le modèle de Mohr-Coulomb sont le module de Young et le coefficient de Poisson pour la composante de déformation élastique du comportement du sol. Les paramètres de résistance effectifs sont également, la cohésion et l'angle de frottement [TAN09].

L'interface entre le rideau de palplanche et le domaine de sol environnant est définie en utilisant des éléments de contact poutres-solides bidimensionnels. Le comportement constitutif de l'interface est simulé et défini à l'aide de l'objet Matière du contact 2D nD Material [NEH06] [SCH02]. Ce modèle constitutif utilise une loi de frottement de Mohr-Coulomb régularisée permettant le collage et le glissement par frottement. Dans cet étude, une force d'interface R_{int} est définie; ce coefficient définit l'amplitude de la force de frottement qui se développe pendant la condition de glissement.

4.3 Modélisation numérique de la corrosion uniforme dans le rideau de palplanches

4.3.1 Scenarios d'instabilité de rideau de palplanche corrodé

Pour prédire les scénarios des modèles en fonction de temps de service, on a utilisé le logiciel numérique Comsol [COM16], qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode d'éléments finis. Les modèles étudiés sont des rideaux de palplanche de soutènements de sol avec des pertes d'épaisseurs du rideau de palplanche dues à la corrosion uniforme dt varie entre 0mm, 1mm, 1.75mm, 3,25mm pour une période allant respectivement de 0, 25, 50 et 100 ans selon Eurocode 3[BAL16c] [BAL18a].

4.3.1.1 Déplacements totaux de rideau de palplanche

La figure 4.12 illustre que les déplacements totaux du modèle étudié selon le critère de rupture du sol de Mohr-Coulomb avec diverses épaisseurs réduites de palplanches (sans corrosion pour une épaisseur de 18mm et avec corrosion pour des épaisseurs de 17mm, 16.25mm et 14.75mm consécutivement), toutes les propriétés du sol et de la palplanche sont supposée constantes. On voit que la présence relativement croissante des déplacements commençant du 0 à 50 ans, après que les déplacements totaux reviennent à l'état initiale du 50 à 100 ans de service [BAL18a].

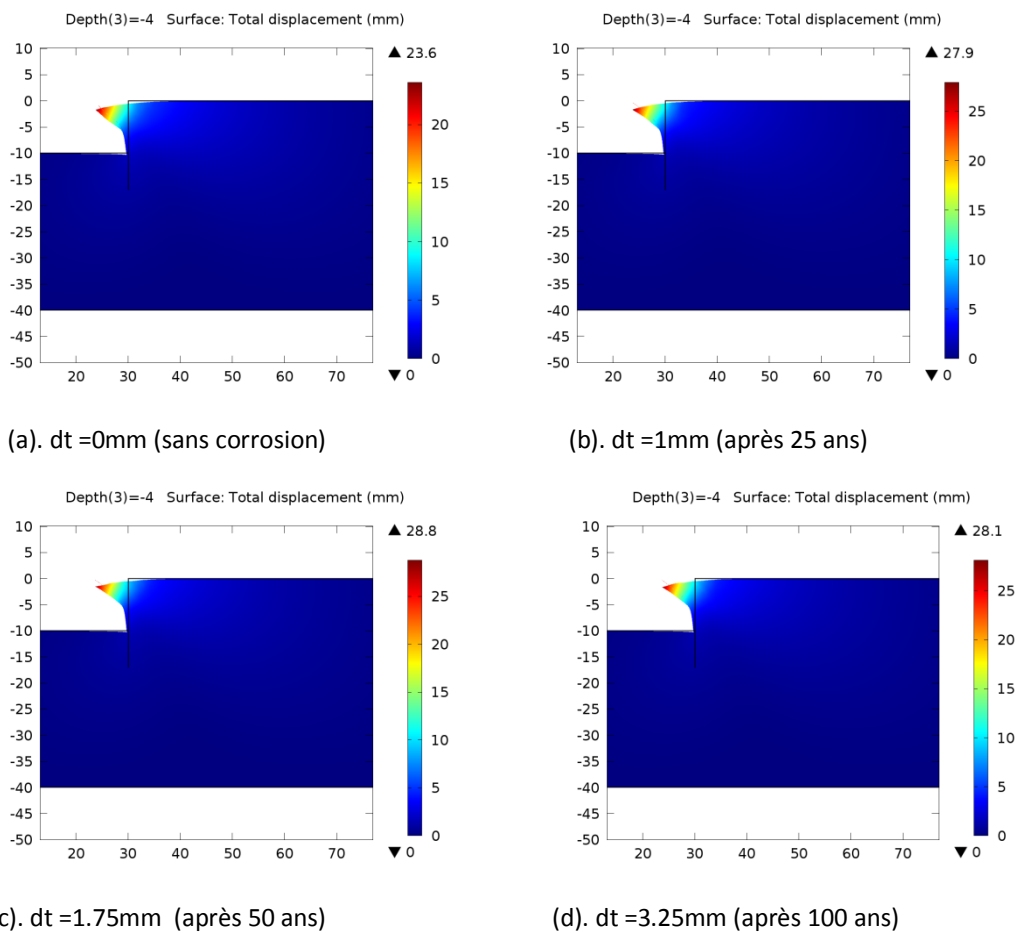


Figure. 4.12. Déplacements totaux de rideau de palplanche [BAL18a].

4.3.1.2 Zones plastiques du sol

La figure (4.13) présente les zones plastiques du sol pour les quatre modèles. La zone plastique s'élargit et avance en longueur et en profondeur dans le temps pendant la durée de vie de rideau de palplanche.

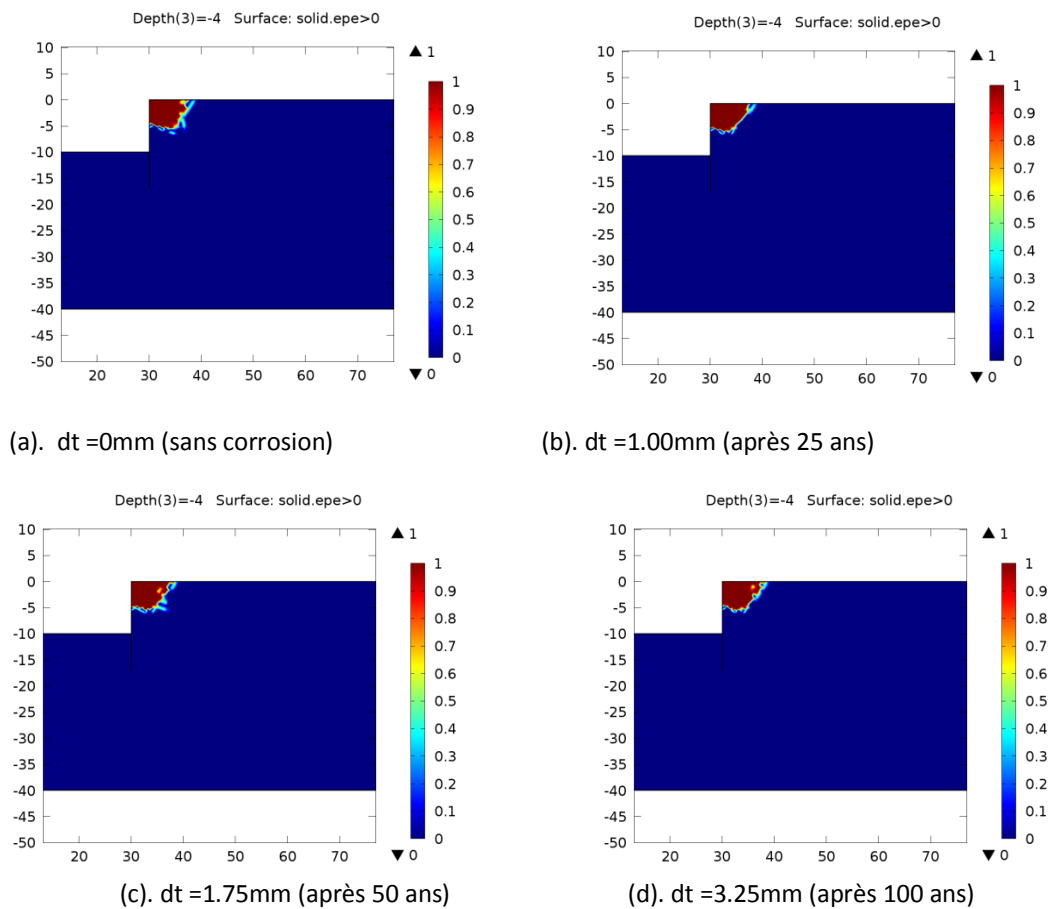


Figure 4.13. Zones plastiques du sol [BAL18a].

4.4 Modélisation numérique de la corrosion localisée dans le rideau de palplanches

4.4.1 Paramètres géométriques initiaux et limites

La simulation par la méthode des éléments finis de l'effet mécano-électrochimique de la corrosion des palplanches en acier a été réalisée. Le modèle géométrique de la palplanche contenant un défaut de corrosion, où le segment d'épaisseur de palplanche est de 18 mm et la longueur est de 60 mm pour la simulation en éléments finis. Le défaut de corrosion est de forme elliptique, avec une longueur de 200 mm et des profondeurs de 0,25 mm, 1,40 mm, 0,88 mm, 7,5 mm de l'épaisseur de la paroi de la palplanche respectivement. En réalité, le rapport d'aspect des défauts de corrosion peut changer pendant la corrosion. Cette étude suppose une longueur inchangée avec la profondeur de croissance pour le défaut de corrosion afin d'étudier la propagation du défaut de corrosion le long de la direction de rideau de palplanches.

La condition limite de la solution est que la limite de la solution est isolée électriquement, à l'exception de l'interface en acier qui est définie comme une limite libre. Alors que l'extrémité gauche du segment est fixe, le fond est chargé avec les contraintes de traction prescrites comme décrit ci-dessous et est défini comme une mise à la terre électrique. Le type de maille utilisé est triangulaire. Un maillage complet est constitué de 9240 éléments. Les tailles maximale et minimale des éléments sont de 5 mm et 0,1 mm, respectivement, avec un taux de croissance maximal de 1,3. Un solveur stationnaire et un solveur dépendant du temps sont sélectionnés pour ce cas.

La géométrie du segment palplanches est simplifiée en un modèle 2D en raison de la propriété symétrique. La simulation comporte deux aspects, à savoir: (i) l'analyse élasto-plastique mécanique des contraintes de la tôle pile, (ii) analyse du potentiel secondaire de corrosion et de la densité de courant à l'acier.

4.4.2 Simulation de paramètres mécaniques développées sur le rideau de palplanches

Les contraintes sur les palplanches proviennent principalement de l'eau. Une simulation de contrainte solide élastoplastique a été réalisée sur des palplanches en acier. Le modèle de durcissement isotrope est utilisé, E est le module de Young de 200 000 MPa. Le critère d'élasticité de Von Mises est utilisé pour la simulation élastoplastique puis une contrainte est appliquée sur le segment de palplanche dans le sens longitudinal pour simuler une déformation de l'acier de 5000 Pa [GUT94]. La déformation totale est égale à la déformation

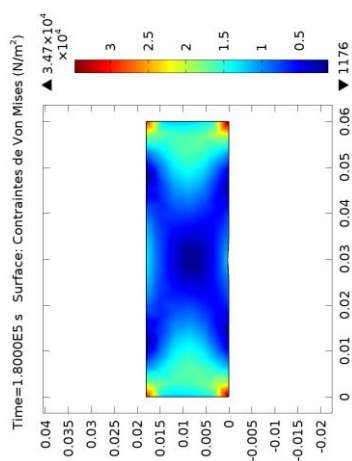
totale divisée par la longueur de la palplanche. La contrainte locale peut varier en raison de la présence de défauts.

4.4.2.1 Distributions de contraintes de Von Mises autour de défaut du à la corrosion dans l'eau

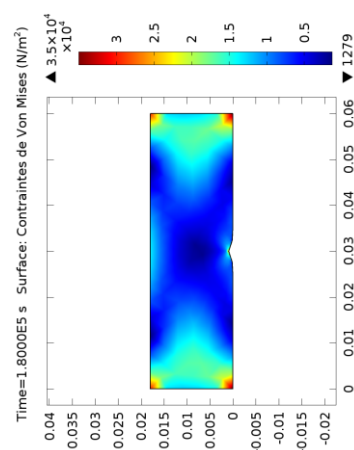
La figure (4.14) montre les distributions de la contrainte de Von Mises au défaut de corrosion sous divers défauts de corrosion dans l'eau. On voit que sous l'eau douce, le niveau local de contrainte de Von Mises (Pa) augmente apparemment et lentement au défaut de corrosion dans les 10 premières années (profondeur de corrosion 0.25mm) jusqu'à 100 ans (profondeur de corrosion 1.4 mm) de durée de vie indiquée par les couleurs rouge et rouge foncé avec un changement mineur.

Contrairement à ce que l'on voit, sous l'eau de mer, le niveau local de Von Mises (Pa) augmente apparemment et rapidement au défaut de corrosion dans les 10 premières années (profondeur de corrosion 0.887mm) jusqu'à 100 ans (profondeur de corrosion 7.5mm) indiqué par les couleurs rouge et rouge foncé.

On voit que la contrainte est répartie symétriquement au centre du défaut, et la contrainte la plus élevée se produit au centre du défaut.



Profondeur de corrosion 0.25mm sous l'eau douce dans les 10 premières années



La profondeur de corrosion 0.887mm sous l'eau de mer dans les 10 premières années

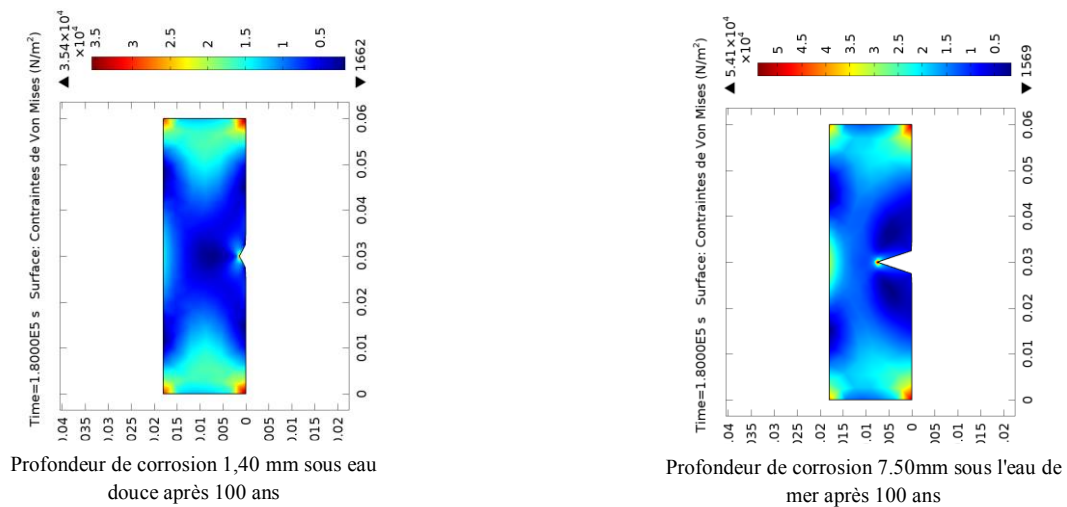


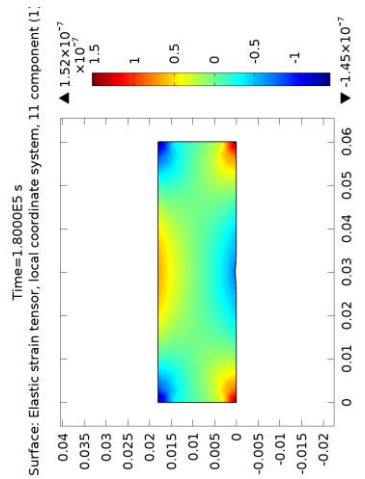
Figure 4.14. Distributions de contraintes de von Mises autour de défaut du à la corrosion [BAL16].

4.4.2.2 Distributions de déformations élastiques autour de défaut du à la corrosion dans l'eau

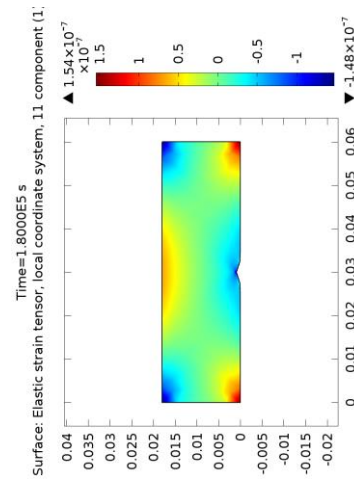
La figure (4.15) montre les distributions du tenseur de déformation élastique au défaut de corrosion sous divers défauts de corrosion dans l'eau. On remarque que sous l'eau douce, le niveau de déformation élastique local augmente apparemment à l'envers du défaut de corrosion dans les 10 premières années (profondeur de corrosion 0,25 mm) jusqu'à plus de 100 ans (profondeur de corrosion 1,4 mm) de durée de vie indiquée par les couleurs rouge et rouge foncé avec un changement mineur.

Alors que sous l'eau de mer, on voit que le niveau du tenseur de déformation élastique local augmente encore à la face opposée du défaut de corrosion dans les 10 premières années (profondeur de corrosion 0.887mm) jusqu'à 100 ans (profondeur de corrosion 7.5mm) par les couleurs rouge et rouge foncé.

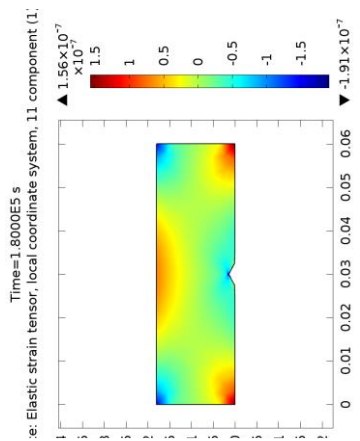
On voit que les déformations sont distribuées symétriquement au centre du défaut, et la contrainte la plus élevée se produit au centre du défaut.



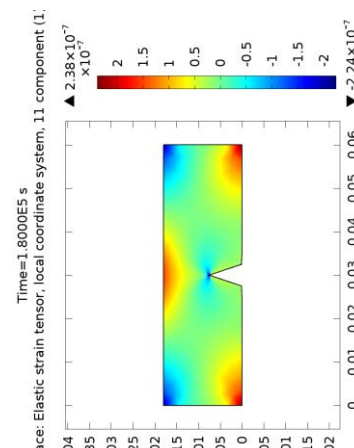
Profondeur de corrosion 0.25mm sous l'eau douce dans les 10 premières années



La profondeur de corrosion 0.887mm sous l'eau de mer dans les 10 premières années



Profondeur de corrosion 1,40 mm sous eau douce après 100 ans



Profondeur de corrosion 7.50mm sous l'eau de mer après 100 ans

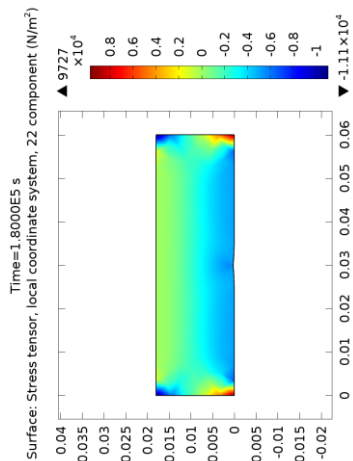
Figure 4.15 Distributions de déformations élastiques autour de défaut du à la corrosion [BAL16].

4.4.2.3 Distributions de contraintes autour de défaut du à la corrosion dans l'eau

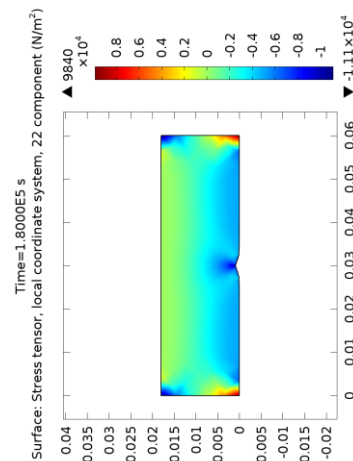
La figure (4.16) montre les distributions du tenseur de contrainte au défaut de corrosion sous divers défauts de corrosion dans l'eau. On voit que sous l'eau douce, le niveau du tenseur de contrainte local (Pa) diminue remarquablement et rapidement dans la région opposée de corrosion ans (profondeur de corrosion 0,25 mm) même après 100 ans (profondeur de corrosion 1,4 mm) de la durée de vie, comme indiqué par les couleurs rouge et rouge foncé avec des changements mineurs.

On peut voir les mêmes choses que sous l'eau de mer, le niveau du tenseur des contraintes locales diminue remarquablement et rapidement dans la région opposée dans les 10 premières années (profondeur de corrosion 0.887mm) jusqu'à 100 ans (profondeur de corrosion 7.5mm) indiqué par les couleurs rouge et rouge foncé.

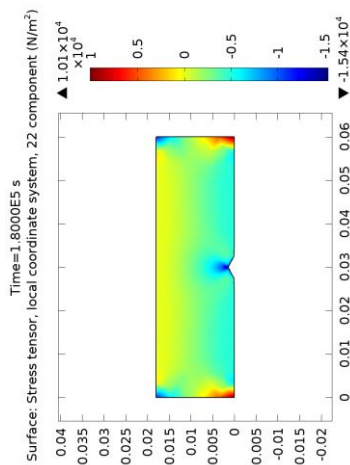
Le niveau uniforme du tenseur des contraintes est donné dans l'eau de mer après 100 ans. On voit aussi que le tenseur des contraintes est réparti symétriquement au centre du défaut.



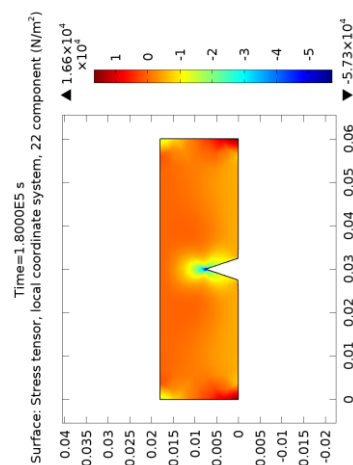
Profondeur de corrosion 0.25mm sous l'eau douce dans les 10 premières années



La profondeur de corrosion 0.887mm sous l'eau de mer dans les 10 premières années



Profondeur de corrosion 1,40 mm sous eau douce après 100 ans



Profondeur de corrosion 7.50mm sous l'eau de mer après 100 ans

Figure4.16. Distributions de tenseur des contraintes autour de défaut du à la corrosion [BAL16].

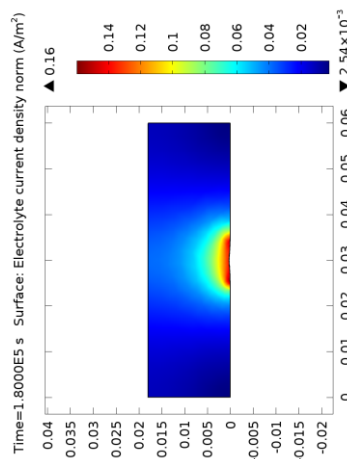
4.4.3 Simulation de paramètres électrochimiques de corrosion dans le rideau de palplanche

L'interface de la corrosion secondaire, trouvée sous la direction de la géométrie déformée par corrosion électrochimique lors de l'ajout d'une interface physique, décrit les distributions de courant et de potentiel dans une cellule de corrosion sous l'hypothèse que les variations de composition dans l'électrolyte sont négligeables. L'interface physique peut être combinée avec des interfaces physiques modélisant le transport de masse pour décrire les distributions de courant dépendant de la concentration [GUT94] [SIL13] [XU13].

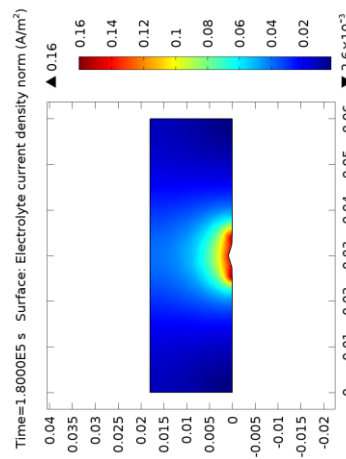
4.4.3.1 Distributions des densités de courants de l'électrolyte autour de défaut du à la corrosion dans l'eau

La figure (4.17) montre les distributions de la densité de courant de l'électrolyte au défaut de corrosion sous divers défauts de corrosion dans l'eau. On voit que sous l'eau douce, le niveau de densité de courant d'électrolyte local augmente légèrement au défaut de corrosion dans les 10 premières années (profondeur de corrosion 0,25 mm) jusqu'à 100 ans (profondeur de corrosion 1,4 mm) de durée de vie indiquée par le rouge et sombre couleurs rouges avec changement mineur.

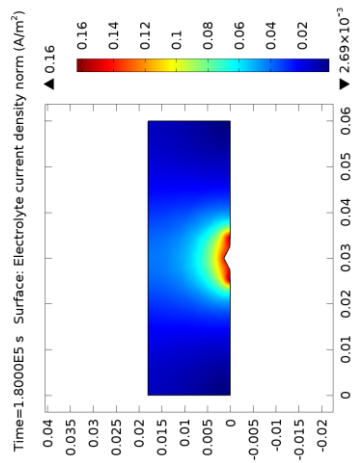
Les mêmes choses peuvent être observées, à savoir que sous l'eau de mer, le niveau de densité de courant de l'électrolyte local augmente légèrement au défaut de corrosion dans les 10 premières années (profondeur de corrosion 0.887mm) et jusqu'à 100 ans (profondeur de corrosion 7.5mm) indiqué par les couleurs rouge et rouge foncé. On voit que la densité de courant de l'électrolyte est répartie symétriquement par rapport au centre du défaut et que la densité de courant d'électrolyte la plus élevée se produit au centre du défaut et que la plus haute valeur (0,21 A / m²) l'eau après 100 ans.



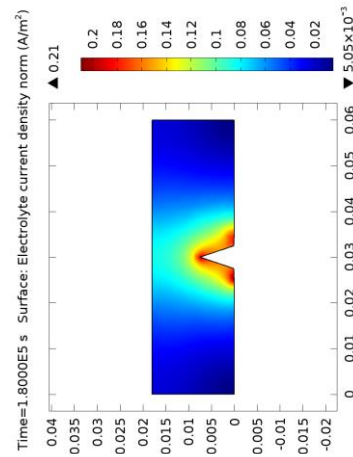
Profondeur de corrosion 0.25mm sous l'eau douce dans les 10 premières années



La profondeur de corrosion 0.887mm sous l'eau de mer dans les 10 premières années



Profondeur de corrosion 1,40 mm sous eau douce après 100 ans



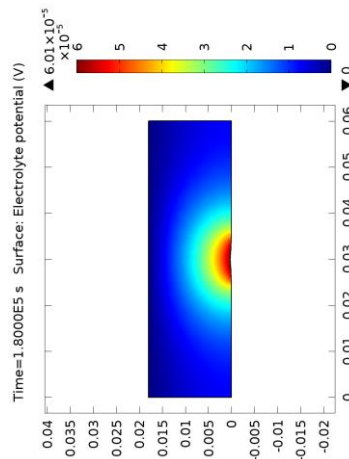
Profondeur de corrosion 7.50mm sous l'eau de mer après 100 ans

Figure4.17. Distributions des densités de courants de l'électrolyte autour de défaut du à la corrosion [BAL16].

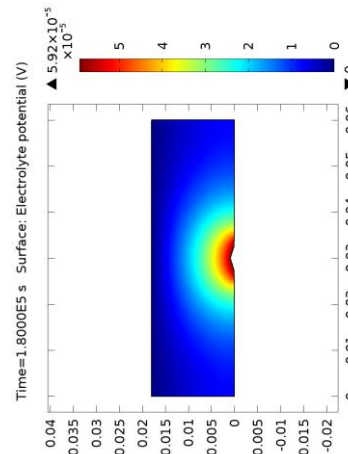
4.4.3.2 Distributions des potentiels électrolytiques autour de défaut du à la corrosion dans l'eau

La figure (4.18) montre les distributions du potentiel électrolytique au défaut de corrosion sous divers défauts corrosion dans l'eau. On voit que sous l'eau douce, le niveau potentiel d'électrolyte local augmente légèrement au défaut de corrosion dans les 10 premières années (profondeur de corrosion 0,25mm) 100 ans (profondeur de corrosion 1,4 mm) de la durée de vie indiquée par les couleurs rouge et rouge foncé avec des changements mineurs. Bien que sous l'eau de mer, il est reconnu que le niveau de potentiel d'électrolyte local augmente considérablement au cours des 10 premières années (profondeur de corrosion 0.887mm) jusqu'à 100 ans (profondeur de corrosion 7.5mm) de la durée de vie indiquée par le rouge et l'obscurité couleurs rouges.

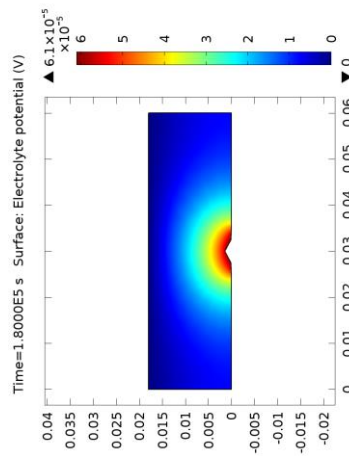
On voit que le potentiel d'électrolyte est réparti symétriquement par rapport au centre du défaut et le potentiel d'électrolyte le plus élevé se produit au centre du défaut et la valeur la plus élevée ($9.88 \cdot 10^{-5}$) se produit à la corrosion (7.5mm) dans l'eau de mer après 100 ans.



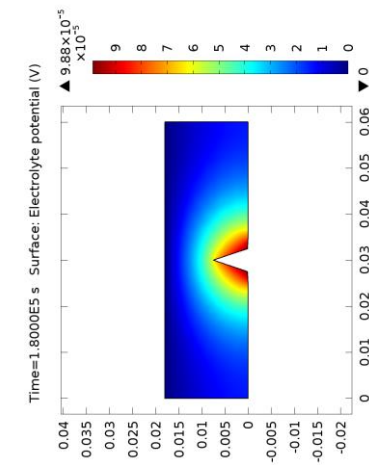
Profondeur de corrosion 0.25mm sous l'eau douce dans les 10 premières années



La profondeur de corrosion 0.887mm sous l'eau de mer dans les 10 premières années



Profondeur de corrosion 1,40 mm sous eau douce après 100 ans



Profondeur de corrosion 7.50mm sous l'eau de mer après 100 ans

Figure4.18 Distributions des potentiels électrolytiques autour de défaut du à la corrosion [BAL16].

4. 5 Conclusion

Dans ce chapitre, après un rappel de quelques notions de mécanique des milieux continus, nous avons présenté le logiciel Comsol avec les différents modèles rhéologiques sur lesquels il se base ainsi que la modélisation numérique objet de notre travail. La simulation du comportement du sol sous ouvrages de rideau de palplanche métallique dans notre cas, à l'aide du logiciel passe par plusieurs étapes. La première étape est la récolte des données géotechniques nécessaires. Ces données sont obtenues par des hypothèses. La seconde étape

est le maillage : le maillage est supposé être le plus fin possible afin d'avoir des résultats les plus précis possible. Dans notre cas, la discrétisation du sol en rectangle. La troisième étape est la supposition des conditions initiales et limites du modèle. Le côté inférieur est fixé dans la direction horizontale (x). Les limites en champs libre sont en plus assignées sur les deux côtés du modèle. Les conditions initiales sont les contraintes présentes initialement dans le sol. Dans notre cas, celles-ci sont les contraintes de poussées par le sol. L'avant dernière étape consiste en l'application des chargements. Enfin, vient la dernière étape qui consiste en l'extraction des divers résultats obtenus par l'application de ces chargements et leur interprétation.

Par ailleurs, Selon le présent modèle numérique, les scénarios d'instabilité des rideaux de palplanches corrodées, les déplacements et les zones plastifiées dans le sol montrent que les variations du poids du sol, les forces actives et les surcharges ont une influence sur la stabilité et la résistance du rideau de palplanche. Le mode de ruine est sensiblement modifié pendant la durée de service.

Partie
Résultats et interprétations

Chapitre5

Résultats et interprétations

5.1 Introduction

La corrosion des rideaux de palplanches en acier dans les sols et l'eau est un phénomène complexe. La détérioration de ces structures est coûteuse et difficile à prévoir. Dans ce chapitre on va traiter des modèles analytiques de corrosion qui sont analysés et comparés à l'Eurocode 3, Partie 5 pour estimer le taux de corrosion et la perte d'épaisseur dans les rideaux de palplanches en acier également on va conclure les résultats de modélisations numériques de la corrosion et les scénarios dans les rideaux de palplanches. Les résultats montrent qu'il faut veiller à ce que les moments de flexion maximum ne se produisent pas au même niveau que les zones de corrosion principales. De plus, il est possible de définir une limite supérieure et une limite inférieure, correspondant respectivement à la présence d'eau de mer et aux sols naturels, afin de prédire la perte d'épaisseur due à la corrosion.

5.2 Analyse des modèles analytiques de corrosion

Une distribution typique des moments de flexion de ce système structural est présentée à la figure (3.3), en ce qui concerne la conception par calcul, la résistance de la section doit être vérifiée pour un moment de flexion maximal, en tenant compte des moments de flexion positifs et négatifs. La conception d'un rideau de palplanches nécessite de veiller à ce que les moments de flexion maximum ne se produisent pas au même niveau que les zones de corrosion principales.

Sur la figure (5.1), des schémas du procédé des modèles de corrosion de Southwell, Melchers, Paik et Thayambali, Guedes et Garbator et Qin et Cui sont illustrés.

Southwell et al est un modèle linéaire simple qui donne la valeur maximale de la profondeur de corrosion pour un âge structurel entre 25 et 100 ans, le processus de corrosion commence également au moment initial. Le modèle de Melchers donne des valeurs de profondeur de corrosion plus grandes que le modèle de Southwell jusqu'à 75 ans. Pour le modèle Guedes et Garbator, la période sans corrosion est d'environ 1,5 an,

la transition entre la durabilité du revêtement et l'initiation de la corrosion est d'environ 4 ans.

Pour les modèles de Paik et Thayambali, la durée du revêtement est décrite en utilisant une distribution lognormale, la transition entre la durabilité du revêtement et l'initiation de la corrosion est d'environ 7,5 ans.

Pour le modèle Qin et Cui, la période sans corrosion est d'environ 1,4 ans que la corrosion accélère à 25 ans puis un ralentissement est noté, le modèle Qin et Cui donne les plus basses valeurs de profondeur de corrosion jusqu'à 70 ans.

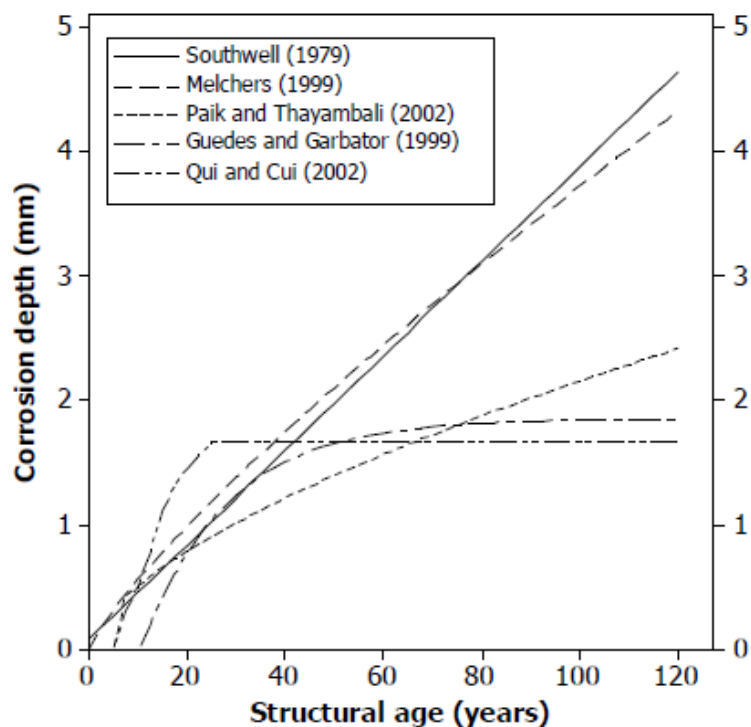


Figure 5.1. Modèles de corrosion empirique de Southwell., Melchers., Guedes et Garbator, Paik et Thayambali, Qin et Cui [BAL16b].

5.3 Analyse de valeurs de pertes d'épaisseurs dues à la corrosion selon l'Eurocode 3

La figure (5.2) donne les valeurs recommandées pour la perte d'épaisseur selon l'Eurocode 3 partie 5 pour différents types de sols et d'eaux par rapport à la durée de vie requise de 5 à 100 ans, les valeurs dépendent de l'agressivité des sols ou de l'eau.

La perte d'épaisseur due à la corrosion à 5 ans de 0,00 à 0,55 mm, concerne respectivement les sols naturels non perturbés et l'eau de mer dans un climat tempéré dans la zone de forte fixation. Après 100 ans, la perte d'épaisseur due à la corrosion de l'eau de mer dans un climat tempéré dans la zone de forte attaque, peut atteindre 7,50 mm. Comme présenté dans l'Eurocode 3, le taux de corrosion le plus élevé se trouve généralement dans la zone d'éclaboussure ou au niveau d'eau bas dans les eaux de marée.

Cependant, dans la plupart des cas, les contraintes les plus élevées en attente se produisent dans une zone d'immersion permanente.

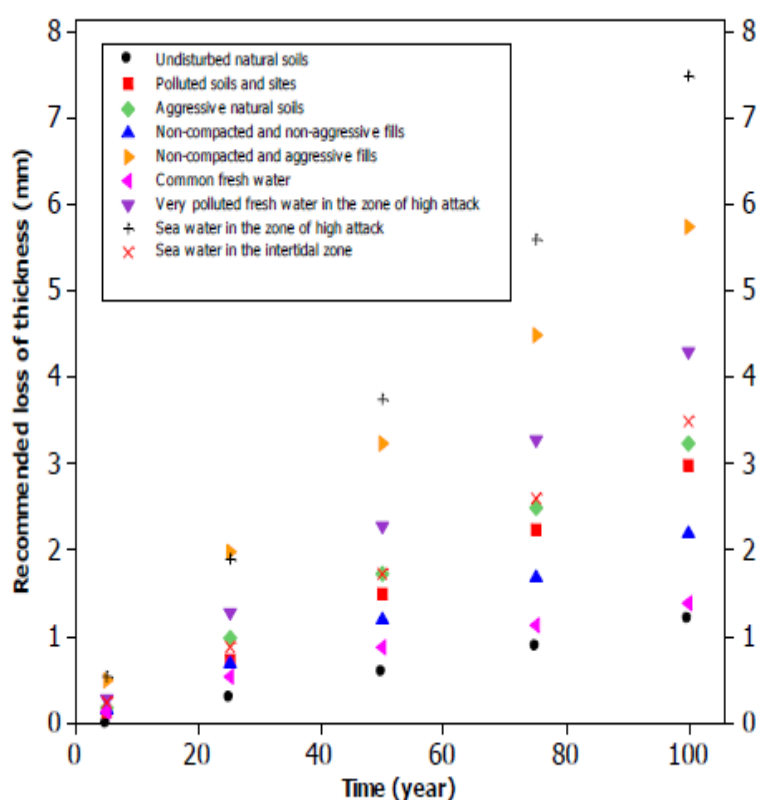


Figure 5.2. Valeurs recommandée pour la perte d'épaisseur selon l'Eurocode 3 [BAL16b]

5.4 Comparaison entre les modèles analytique de corrosion et l'Eurocode 3

La figure 5.3 présente une comparaison des valeurs recommandées pour la perte d'épaisseur selon l'Eurocode 3 avec les modèles analytique à base d'expérimentale de

corrosion et leur courbe principale. La courbe principale des modèles de Southwell et al, Paik et Thayambali, Melchers, Guedes et Garbator, et Qin et Cui est définie, en utilisant une régression linéaire, comme suit [BAL18b]:

$$d(t) = 0,233 + 0,0309 t \quad (5.6)$$

L'erreur-type de ce modèle S est 0.180343, le R-Sq est d'environ 96.4% et le R-carré ajusté est de 96.3%. Les valeurs recommandées pour la perte d'épaisseur due à la corrosion dans les sols naturels non perturbés, les remblais non compacts et non agressifs et l'eau douce courante sont inférieures à la courbe principale. Les valeurs de la perte d'épaisseur due à la corrosion dans les sols et sites pollués et les sols naturels agressifs sont plus proches de celles de la courbe principale. Les valeurs recommandées pour la perte d'épaisseur due à la corrosion dans l'eau de mer dans la zone intertidale, l'eau douce très polluée, les remblais non compacts et agressifs et l'eau de mer dans la zone d'attaque élevée sont importantes par rapport à celles de la courbe principale. L'écart augmente avec l'âge structurel. On remarque que les valeurs recommandées de la perte d'épaisseur due à la corrosion selon la norme européenne suivent une régression linéaire ajustée telle que présentée dans le tableau 2. Cette régression est 100% linéaire pour les cas de:

- Sols naturels pollués et sites industriels
- Eau de mer dans un climat tempéré dans la zone d'attaque élevée (zones de basses eaux et d'éclaboussures)
- Eau de mer dans un climat tempéré dans la zone d'immersion permanente ou dans la zone intertidale

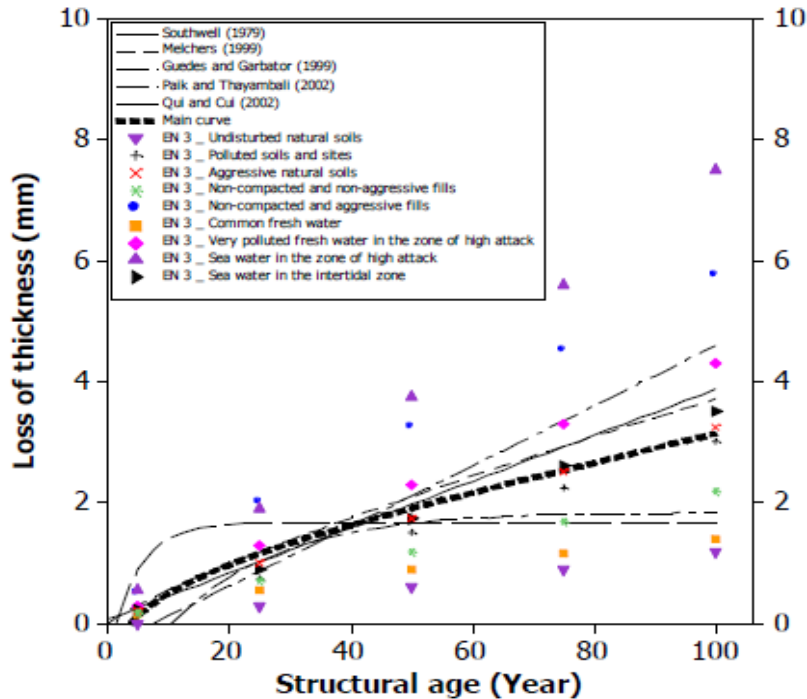


Figure 5.3. Comparaison des valeurs recommandées pour la perte d'épaisseur selon à l'Eurocode 3 avec des modèles empiriques de corrosion. [BAL18b]

La plus petite valeur ajustée au R-carré est de 97,1% et elle est notée dans le cas d'une eau douce courante (rivière, canal de navire, ...), dans la zone d'attaque élevée (ligne d'eau). Une Equation supérieur et inférieur. (5.7a), (5.7a), (5.8) peut être défini pour prédire la perte d'épaisseur due à la corrosion. La limite inférieure est un modèle bilinéaire correspondant à des sols naturels non perturbés définis par [BAL18b]:

$$d(t) = 0 \text{ Pour } 0 \leq t \leq 5 \text{ ans} \quad (5.7a)$$

$$d(t) = -0.036 + 0.0124 t \text{ Pour } t > 5 \text{ ans} \quad (5.7b)$$

La limite supérieure est un modèle linéaire correspondant au cas de l'eau de mer dans un climat tempéré dans la zone de haute attaque définie comme [BAL18b]:

$$d(t) = 0,117 + 0,0734 t \quad (5.8)$$

Tableau 5.1. Récapitulatif des modèles de corrosion mathématique dans différents sols et eaux selon les recommandations de l'Eurocode 3 [BAL18b]

Cas	Equations $d(t) = a + b \times t$	Analyses
Undisturbed natural soils (sand, silt, clay, schist,)	$a = -0.036$ $b = 0.0124$	$S = 0.0228020$ R-Sq = 99.83% R-Sq(adj) = 99.77%
Polluted natural soils and industrial sites	$a = 0.000$ $b = 0.0300$	$S = 0$ R-Sq = 100.0% R-Sq(adj) = 100.0%
Aggressive natural soils (swamp, marsh, peat, ...)	$a = 0.129$ $b = 0.0316$	$S = 0.0760066$ R-Sq = 99.7% R-Sq(adj) = 99.6%
Non-compacted and non-aggressive fills (clay, schist, sand, silt, ...)	$a = 0.127$ $b = 0.0210$	$S = 0.0456040$ R-Sq = 99.8% R-Sq(adj) = 99.7%
Non-compacted and aggressive fills (ashes, slag,)	$a = 0.447$ $b = 0.0540$	$S = 0.190017$ R-Sq = 99.4% R-Sq(adj) = 99.1%
Common fresh water (river, ship canal,) in the zone of high attack (water line)	$a = 0.175$ $b = 0.0128$	$S = 0.0844324$ R-Sq = 97.8% R-Sq(adj) = 97.1%
Very polluted fresh water (sewage, industrial effluent,....) in the zone of high attack (water line)	$a = 0.179$ $b = 0.0416$	$S = 0.0760066$ R-Sq = 99.8% R-Sq(adj) = 99.8%
Sea water in temperate climate in the zone of high attack (low water and splash zones)	$a = 0.117$ $b = 0.0734$	$S = 0.0598899$ R-Sq = 100.0% R-Sq(adj) = 100.0%
Sea water in temperate climate in the zone of permanent immersion or in the intertidal zone	$a = 0.056$ $b = 0.0342$	$S = 0.0253086$ R-Sq = 100.0% R-Sq(adj) = 100.0%

Avec une comparaison entre une limite supérieure et une limite inférieure, correspondant respectivement à la présence d'eau de mer dans un climat tempéré dans la zone d'attaque élevée et les sols naturels non perturbés à travers la figure (5.4) et selon

les équations. (5.7a), (5.7b), (5.8), la perte de corrosion dans l'eau de mer dans la zone d'attaque élevée est d'environ 6,25 fois plus élevée que dans le cas des sols naturels non perturbés.

Des modèles mathématiques de corrosion des aciers à base d'expérience ont été étudiés afin d'estimer les pertes d'épaisseurs des aciers en fonction du temps, il est remarqué que certains sont appliqués aux ouvrages spécifiques dans des milieux marins.

5.5 Modélisation et les scénarios de corrosion aux cours de temps

Concernant les résultats numériques on a obtenu les points suivants :

Les grands déplacements des rideaux de palplanche et la répartition des contraintes dépendent des conditions d'appuis, il faut aussi veiller est-ce que les moments de flexion maximum ne se produisent pas au même niveau que les zones de corrosion de grande agressivité.

Généralement, La corrosivité potentielle des expositions au sol dépend principalement de la présence des remblais ou des agents agressive, oxygène,..etc. Certains sols peuvent être plus ou moins corrosifs que d'autres.

Les déplacements et les zones plastifiées dans le sol montrent que les variations du poids du sol, les forces actives et les surcharges ont une influence sur la stabilité et la résistance du rideau de palplanche. Le mode de ruine est sensiblement modifié pendant la durée de service.

Un modèle numérique est développé pour étudier l'effet mécano-électrochimique de la corrosion par palplanches grâce à une simulation de couplage multiphysique. Le modèle permet la simulation et la prédiction de la synergie de la concentration des contraintes autour de défaut de la corrosion localisée sur les palplanches.

Une augmentation de la déformation longitudinale à la traction et de la profondeur du défaut de corrosion augmente la contrainte locale sur le rideau de palplanches. Cependant, leurs effets sur la répartition des contraintes sont différents. Alors qu'une contrainte de traction entraîne une augmentation globale de la contrainte à travers le rideau de palplanche, l'augmentation de la profondeur de corrosion provoque une contrainte plus concentrée au centre du défaut. La contrainte sur le côté du défaut diminue relativement avec la profondeur du défaut.

Lorsque le défaut de corrosion est sous déformation élastique locale, il n'y a pas d'interaction mécanique-électrochimique apparente affectant la corrosion. Lorsque la contrainte de traction ou la profondeur de corrosion est encore augmentée pour entraîner une déformation plastique locale, l'activité de corrosion locale est remarquablement accrue.

La corrosion localisée ou défaut de corrosion est composée d'une série de cellules galvaniques locales, où la région avec une contrainte élevée, telle que le centre du défaut, sert d'anode, et celle sous faible contrainte, comme les côtés du défaut, comme cathode. La dissolution anodique au centre du défaut est encore accélérée, tandis qu'elle est atténuée légèrement sur les côtés du défaut. La corrosion accélérée localement au centre du défaut est encore renforcée par l'augmentation de la profondeur du défaut de corrosion.

Une profondeur croissante de la corrosion entraîne une contrainte concentrée à la corrosion localisée. Lorsque la contrainte de traction appliquée ou la géométrie du défaut de corrosion est suffisante pour provoquer une déformation plastique du défaut, l'activité de corrosion locale est remarquablement augmentée. Le taux de corrosion est environ 1,5 fois plus important pour le cas de l'eau douce par rapport à l'eau de mer dans les dix premières années, puis le rapport augmente à 2,5 fois après 100 ans.

5.6 Conclusion

La conclusion suivante peut être tirée des analyses rapportées ici:

Une courbe principale des modèles de Southwell et al, Paik et Thayambali, Melchers, Guedes et Garbator, et Qin et Cui peut être définie, en utilisant une régression linéaire.

- Les valeurs recommandées de la perte d'épaisseur due à la corrosion selon la norme européenne d'Eurocode 3 suivent des régressions linéaires. Ces régressions sont 100% linéaires pour les sols naturels pollués et les sites industriels, le cas de l'eau de mer dans un climat tempéré dans la zone d'attaque élevée (basses eaux et zones d'éclaboussures) et le cas de l'eau de mer dans le climat tempéré de la zone d'immersion permanente, ou dans la zone intertidale. La valeur ajustée du R-carré le plus faible est de 97,1% et elle est notée dans le cas de l'eau douce courante (rivière, canal de navire, ...) dans la zone de haute attaque (ligne d'eau).

- Une limite supérieure et inférieure peut être définie comme un modèle mathématique pour prédire la perte d'épaisseur due à la corrosion qui correspond respectivement à un modèle linéaire dans le cas de l'eau de mer en climat tempéré dans la zone d'attaque haute et un modèle bilinéaire correspondant au cas des sols naturels non perturbés.

Conclusions générales et perspectives

Conclusions générales et perspectives

L'intérêt croissant porté depuis les années 1970 à l'utilisation diversifiée des rideaux palplanches a conduit les chercheurs à proposer de nouveaux modèles expérimentaux et mathématiques pour prédire l'évolution spatio-temporelle des processus de corrosion.

La corrosion des structures en palplanche se manifeste sous différentes formes qui résultent de plusieurs mécanismes. Les processus de corrosion peuvent être favorisés par les conditions du milieu ambiant en contact avec la structure tel que la salinité, la teneur en oxygène dissous, les salissures et le PH. Les observations relevées sur différentes structures mettent en évidence des zones préférentielles de développement de la corrosion. La zone de contact avec des dégradations aboutissant à des perforations ou des déchirures des palplanches.

A travers cette étude, nous pouvons tirer ces principales conclusions:

- Les milieux environnants les rideaux de palplanches sont généralement classés comme atmosphérique, sol ou eau. Généralement, l'enrobage initial de la corrosion est causé par les expositions atmosphériques; la corrosivité potentielle de l'exposition au sol dépend principalement de la présence d'oxygène dans le sol; l'eau polluée, fraîche ou salée, peut être moins ou plus corrosive que n'importe quel autre type d'eau. Une courbe principale des modèles de Southwell et al, Paik et Thayambali, Melchers, Guedes et Garbator, et Qin et Cui peut être définie, en utilisant une régression linéaire.
- Les valeurs recommandées de la perte d'épaisseur due à la corrosion selon la norme européenne suivent des régressions linéaires. Ces régressions sont à 100% linéaires pour les sols naturels pollués et les sites industriels, le cas de l'eau de mer dans un climat tempéré dans la zone d'attaque élevée (basses eaux et zones d'éclaboussures) et le cas de l'eau de mer dans le climat tempéré de la zone d'immersion permanente, ou dans la zone intertidale. La valeur ajustée du R-carré le plus faible est de 97,1% et elle est notée dans le cas de l'eau douce courante (rivière, canal de navire, ...) dans la zone de haute attaque (ligne d'eau).
- Une limite supérieure et inférieure peut être définie comme un modèle mathématique pour prédire la perte d'épaisseur due à la corrosion qui correspond respectivement à un modèle linéaire dans le cas de milieu de l'eau de mer en climat tempéré dans la zone d'attaque haute et un modèle bilinéaire correspondant au cas des sols naturels non remaniés.

- Comparaison avec les résultats expérimentaux sert à évaluer la précision des modèles mathématiques comme des outils dans la validation.
- Les déformations des rideaux de palplanche et la distribution des contraintes dépendent des conditions de support, et il faut veiller à ce que les moments de flexion maximum ne se produisent pas au même niveau que les zones de corrosion principales.
- Une étude par éléments finis a été menée pour étudier le comportement du sol et les rideaux de palplanches. En raison de l'absence et de la difficulté des tests expérimentaux, nous nous sommes intéressés à la prise en compte des études analytiques afin de trouver les conditions optimales d'une étude capable de donner des résultats et des conclusions satisfaisants économiquement et concrètement en mécanique des sols. Autrement, diverses mesures de suivi des ouvrages de soutènement sont mises en place. Mais ces mesures sont coûteuses, et ne sont pas toujours suffisantes face à l'hétérogénéité des phénomènes de corrosion avec le temps.
- La cinétique de corrosion et sa distribution surfacique dépendent de plusieurs facteurs qui méritent une prospection particulière pour la compréhension du mécanisme de dégradation. Ceci permettra de mieux envisager et adapter les opérations préventives et curatives.
- Ces résultats peuvent être utiles pour les chercheurs pour la conception des rideaux de palplanches résistantes. De plus, l'étude analytique et mathématique basée sur les essais expérimentaux est une solution appropriée pour prédire le scénario de corrosion dans le sol soutenu par les rideaux de palplanche durant ses durées de service.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [ALB07] M. Alban. Rapport de projet de fin d'étude: Expertise non destructive des ouvrages en terre armée, 2007
- [AHM10] M. Ahmmad, Y. Sumi, "Strength and deformability of corroded steel plates under quasi-static tensile load", *Journal of Marine Science and Technology*, 2010, 15, pp. 1–15.
- [ALA97] C. Alain, "Analyse de la stabilité d'ouvrages en gabions cellulaires par la théorie du calcul à la rupture", these de Doctorat, école Nationale des Ponts et Chaussées, 1997. Français.
- [ARC15] <http://sheetpiling.arcelormittal.com>
- [BAL16a] B. Balegh, H. Trouzine, D. Djafari, "Etude numérique de rideau de palplanche corrodé", Congrès International SIMaLoCoD, Adrar 4-5 Décembre, 2016
- [BAL16b] B. Balegh, H. Trouzine, "Time-varying ultimate strength of aging sheet pile considering corrosion effect", Congrès International IC-WNDT-MI'16 & ACNDT 2016, Oran 26-28 November .
- [BAL16c] B. Balegh, H. Trouzine, "Modeling and simulation of corrosion in sheet piling", Congrès International EUROCORR, 2016, Montpellier, France, 11-15 September.
- [BAL18a] B. Balegh, H. Trouzine, A. Hadj Mostefa, Y. Houmadi, "Etude de la corrosion des rideaux de palplanche en acier dans le sol", *Revue des Matériaux et Energies Renouvelable Vol 3, N°1*, 2018
- [BAL18b] B. Balegh, H. Trouzine, "Corrosion rate estimation in steel sheet pile walls – comparison between empirical models and Eurocode 3, Part 5", *International Journal of Engineering and Research in Africa Vol 39 , N°76* , 2018
- [BIL10] Ö. Bilgin, Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions, *Comput. Geotech.* 37, 2010, pp. 399–407.
- [BRA87] H. Brandl, "Retaining walls and other restraining structures. Ground Engineer's Reference Book, § 47, Butterworths and Co, 1987.
- [COM16] Comsol, Version 5, "Comsol Multiphysics User's Guide".2016
- [CHA10] T.L Chau, Effet de la corrosion des armatures sur le comportement des murs en remblai renforcé par des éléments métalliques, Thèse de Doctorat, université Paris-Est, 2010

- [CLO90] G.W. Clough, T.D O'. Rourke, Construction induced movements of in situ walls, In: ASCE specialty conference on design and performance of earth retaining structures, Ithaca (NY), 1990, pp. 439–470.
- [COST83] J. Costet . G. Sanglérat, ‘‘Cours pratiques de mécanique des sols, Calculs des ouvrages’’. Dunod, Paris, 1983.
- [CHA75] J. Chapon, ‘‘ Travaux maritimes: Les ouvrages intérieurs des ports maritimes- Dégagement des accès et plans d’eau des ports». Eyrolles, Paris, 1975
- [DAR88] M. Darbin., J.M. Jailloux., J. Montuelle, "Durability of Reinforced Earth Structures: The Results of a Long term study conducted on Galvanized Steel." Proc. Instn Civil Engrs, 1988
- [DEL59] S. Delessard, ‘‘ sur la structure du brai de rouille : essais de fractionnement rationnel’’, these de doctorat clermont—ferraud : faculté des sciences de clermont ferraud,1959, pp. 100
- [EUR07] Eurocode 3, Design of steel structures - Part 5: Piling, EN 1993-5:2007 (E), European Committee for Standardization, Brussels, 2007.
- [ELI00] V. Elias, ‘‘FHWA-NHI-00-044 : Corrosion/degradation of soil reinforcements for mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes’’, Federal Highway Administration: 94, 2000.
- [ELI90] V. Elias, ‘‘FHWA-RD-89-186 : Durability/corrosion of soil, U.S.A. MSE-1: 22, 1990.
- [GUE99] S.C. Guedes,. Y. Garbatov, ‘‘Reliability of maintained corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads’’, Marine Structures, 1999, 12, pp. 425–445.
- [GUI79] A. Guilloux., J. M. Jailloux, "Full scale failure test on reinforced earth wall by accelerated corrosion." C.R. Coll. Int. Renforcement des sols: pp. 503-508, 1979
- [HON16] Q. Honglue, L. Ruifeng, H. Huanguo, J. Hongyu, Z. Jianjing, An approach of seismic design for sheet pile retaining wall based on capacity spectrum method, Geomech Eng, An Int'l Journal. 11(2), 2016, pp. 309-323.
- [HUB03] Hubbell, ‘‘ Corrosion Guide - Step 7 Helical Screw Foundation System Design Manual for New Construction’’. A.B. Chance Company: 7.1-7.18, 2003.
- [HOU86] A. Houy, ‘‘Dimensionnement des ouvrages en palplanches en acier’’.492 p., M. Houy éd, 1986.
- [HAC90] H.P. Hack, D. Taylor, ‘‘Metals Handbook, Corrosion’’, vol. 13, A.S.M., Metals Park, Ohio, 1990, pp.234-238.

- [JOS74] H. Josseaume, "Méthodes de calcul des rideaux de palplanches". Étude bibliographique. Bull. Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, no 72, juil.-août 1974.
- [JEA94] J. Lamoureux, "Précis de corrosion", Editions Beauchemin Itée, Québec, 1994.
- [LUM05] E. Luminita Din-stirbu, "Thèse de doctorat, Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur hauffage", Génie des Matériaux : Université de Pitesti (Roumanie), pp.15, 2005.
- [LCPC03] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des rideaux de palplanches métalliques, 2004
- [LCPC03] LCPC, Ed, "Guide technique - Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des ouvrages de soutènement en remblai renforcé par des éléments métalliques", LCPC, 2003.
- [MEL95] RE Melchers, "Probabilistic modelling of marine corrosion of steel specimens". In: Proceedings of the ISOPE'95, 12-15 June, the Hague, the Netherlands, 1995, pp. 204-10.
- [MEL97] RE. Melchers, "Modeling of marine corrosion of steel specimens", In: Kain RM, Young WT, editors. Corrosion testing in natural waters, vol. 2. Philadelphia: ASTM STP 1300, 1997, pp. 20-33.
- [MEL98] RE. Melchers, "Probabilistic modelling of immersion marine corrosion", In: Shiraishi N, Shinozuka M, Wen YK, editors. Structural safety and reliability, vol.3. Rotterdam: Balkema, 1998, pp. 1143-1149.
- [MEL99] R.E. Melchers, "Corrosion uncertainty modelling for steel structures", Journal of Construction Steel Research, 1999, 52, pp. 3-19.
- [MEL03] R.E. Melchers, Probabilistic models for corrosion in structural reliability assessment, Part 2: Models based on mechanics, J. Offshore Mech. Arct. Eng. 125, 2003, pp. 272-280.
- [MEL08] R.E. Melchers, Condition assessment of aged structures, Wood head Publishing Limited, Newcastle, Australia, 2008.
- [MEL14] R.E. Melchers, R.J. Jeffrey, K.M Usher, Localized corrosion of steel sheet piling, Corros. Sci. 79, 2014, pp 134 - 147
- [MAR90] A. Marecel, A. Reimber, "Les ouvrages de soutènements", Eyrolles, Paris, 1990

- [MAR08] P. Martin, ‘‘ Geomecanique appliquée au BTP’’, Eyrolles, Paris, 2008
- [PAI98] J.K. Paik, S.K. Kim, S.K. Lee, ‘‘Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers’’, *Ocean Engineering*, 1998, 25, pp. 837–860.
- [PAI98] J.K. Paik, A.K. Thayamballi, ‘‘The strength and reliability of bulk carrier structures subject to age and accidental flooding’’, *SNAME Transactions*, 1998, 106, pp. 1–40..
- [PAI02] J.K. Paik, A.K. Thayamballi, ‘‘Ultimate strength of ageing ships’’, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2002, 216, pp. 57–78.
- [PAIK12] J.K. Paik, D.K. Kim, , ‘‘Advanced method for the development of an empirical model to predict time-dependent corrosion wastage’’, *Corrosion Science*, 63, 2012, pp. 51–58.
- [PHI98] A. Philibert,. Y, Vignes,. P, Bréchet, ‘‘Métallurgie, du minerai au matériau, Masson, partie 5 (Corrosion), Masson’’, Paris, 1998, pp. 893-1044.
- [QIN02] S. Qin, W. Cui, ‘‘A discussion of the ultimate strength of ageing ships, with particular reference to the corrosion model’’, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 216, 2002, pp. 155–160.
- [QIN03] S. Qin, W. Cui, ‘‘Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements’’, *Marine Structures*, 2003, 16, pp. 15–34.
- [RAH05] A Raharinaivo, ‘‘Les méthode électrochimiques appliquées au diagnostic et à la réhabilitation du béton armé concerné par la corrosion’’, LCPC, 2005
- [RAM57] M. Romanoff. *Underground corrosion*. U. S. Department of Commerce. Houston, TX, National Bureau of Standards, Circular, 1957.
- [SOR16] C. Soriano, A. Alfantazi, ‘‘Corrosion behavior of galvanized steel due to typical soil organics’’, *Constr. Build. Mater.* 102, 2016, pp. 904–912.
- [SER15] K. Serdar, M. F.S. Tomas, A Rafiq.,, "A numerical study on the seepage failure by heave in sheeted excavation pits", *Geomechanics and Engineering, An Int'l Journal*, 2015, 9 (4), pp. 513-530.
- [SHA14] Y. Sharifi, S. Tohidi, , ‘‘Ultimate capacity assessment of web plate beams with pitting corrosion subjected to patch loading by artificial neural networks’’, *Int. J. adv Steel Constr.* 10 (3), 2014, 325-350.
- [SHA10] Y. Sharifi, R. Rahgozar, , ‘‘Evaluation of the Remaining Shear Capacity in Corroded Steel I-Beams’’, *Int. J. adv Steel Constr*, Vol. 6 (2), 2010, pp. 803-816.

- [SOU79] C.R. Southwell., J.D. Bultman., J.C. Hummer, “Estimating of service life of steel in seawater”, *Seawater Corrosion Handbook*, 1979, pp. 87–374.
- [SCU95] J.C. Scully, ‘‘Corrosion Protection, principes fondamentaux’’, MASSON, 121-123, 125, 136,1995.
- [TER57] K. Terzaghi, R.B. PECK, ‘‘Mécanique des sols appliquée aux Travaux publics et au Bâtiment’’ .Dunod, 1957.
- [TER86] Terre Armée, , “La durabilité des ouvrages en terre armée, réalisés avec des armatures en acier galvanisé”, 1986.
- [TAL69] J. Talbot, *Métallurgie générale*. Masson, Paris, 1969.
- [WAN14] Y. Wang, J.A. Wharton, R.A. Shenoi, , “Ultimate strength analysis of aged steel-plated structures exposed to marine corrosion damage”, *Corros. Sci.* 86 (2014) pp. 42–60.
- [WAL13] H. Wall, L. Wadsö, , “Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment”, *Mar. Struct.* 33, 2013, pp. 21-32.
- [WEA82] D. E. Weatherby, ‘‘ FHWA RD-82-047: TIEBACKS’’. Federal Highway Administration: 249, 1982
- [YAN14] M. Yan, C. Sun, J. Xu, J. Dong, W. Ke, Role of Fe oxides in corrosion of pipeline steel in a red clay soil, *Corros. Sci.* 80, 2014, pp. 309–317.
- [YAM98] N. Yamamoto, K. Ikegami, “A study on the degradation of coating and corrosion of ship's hull based on the probabilistic approach”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1998, 120, pp. 121–128.
- [ZEK15] A. Zekri, A. Ghalandarzadeh,. P. Ghasemi, and M.H. Aminfar, “Experimental study of remediation measures of anchored sheet pile quay walls using soil compaction”, *Ocean Engineering*, 2015, 93, pp. 45–63.
- [GUT94] E.M. Gutman, *Mechanochemistry of Solid Surfaces*, World Scientific Publication, Singapore, (1994).
- [SIL13] J.E. Silva, Y. Garbatov and C. Guedes Soares, "Ultimate strength assessment of rectangular steel plates subjected to a random localised corrosion degradation", *Engineering Structures*, 52, 2013, pp. 295–305
- [XU13] L.Y. Xu, Y.F. Cheng, "Development of a finite element model for simulation and prediction of mechanochemical effect of pipeline corrosion", *Corrosion Science*, 73, 2013, pp. 150–160

ANNEXES

REQUEST FOR PERMISSION TO USE AN IDENTIFIED [TEXT – DIAGRAM - CHART]
OF [CEN] [GENELEC] EN XXXX- 1993-5 (2007)

The Licensee

Name	BALEGH Benamar
Title:	Mr (PhD student)
Organisation	Sidi Bel Abbas University
Address	LGCE, Faculty of Technology, BP89, DZ-22000, Sidi Bel Abbas, ALGERIA
Phone/Fax/	00213 670492800 00213 43264530
E-mail	baleggh.benamar@yahoo.com h_trouzine@yahoo.fr

Requests the CEN-CENELEC Management Centre, the Licensor on behalf of [CEN] [CENELEC], a non-exclusive, non-transferable license to use the [TEXT – DIAGRAM – CHART] indicated below

EN 1993-5 (2007) Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 5: Piling
<ul style="list-style-type: none">• Figure 4-1: Example of corrosion rate distribution• Table 4-1: Recommended value for the loss of thickness [mm] due to corrosion for piles and sheet piles in soils, with or without groundwater• Table 4-2: Recommended value for the loss of thickness [mm] due to corrosion for piles and sheet piles in fresh water or in sea water

For use in the following publication and subsequent editions of the same and for no other purpose:

Corrosion rate estimation in steel sheet pile walls - comparison between empirical models and Eurocode 3, Part 5
--

The Licensee shall give appropriate credit by mentioning after the indicted [TEXT – DIAGRAM – CHART] the following (as appropriate):

- © CEN, reproduced with permission
- ~~© CENELEC, reproduced with permission~~

In the event of a material breach of this Request by the Licensee, the license granted by the CEN-CENELEC Management Centre shall terminate with immediate effect.

This request will be effective upon email acceptance by the CEN-CENELEC Management Centre.

The relevant files containing the [TEXT – DIAGRAM – CHART], will be sent by email to the Licensee upon request.

(Signed) 

Date: 29/09/2017

APPROVAL OF REQUEST

The foregoing request is hereby approved by CEN-CENELEC Management Centre, subject to the conditions stated above;

Signature & Date of Approval
Director Legal Affairs

 9/10/2014

¹ Please make the necessary changes for texts highlighted in yellow