

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

LABORATOIRE DE RECHERCHE GEOMATERIAUX, ENVIRONNEMENT
& AMENAGEMENT (L.G.E.A)



MEMOIRE DE MAGISTER

SPECIALITE : GENIE CIVIL

OPTION : Géotechnique et Environnement

Présenté par :

HADJ Abderrahmane Saida

Sujet :

**ETUDE DE L'INTERACTION D'UN RIDEAU DE
PALPLANCHES AVEC LE SOL DE FONDATION
POUR LES OUVRAGES PORTUAIRES.**

Devant le jury d'examen suivant :

M^r KACI Salah	Professeur à l'UMMTO.....	Président.
M^r GABI Smail	Maître de conférences classe A à l'UMMTO.....	Rapporteur.
M^r HAMZA Ali	Maître de conférences classe A à l'UMMTO.....	Examineur.
M^r DJEMAI Mohammed	Maître de conférences classe A à l'UMMTO.....	Examineur.

Soutenu le :...../...../.....

REMERCIEMENTS

Ce présent mémoire a été réalisé au Laboratoire de recherche Géomatériaux, Environnement et Aménagement (L.G.E.A) du département génie civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Je remercie le président du jury, le Professeur KACI Salah pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Je remercie également M^{rs} HAMZA Ali et DJEMAI Mohammed, maitres de conférences classe A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour avoir accepté de juger ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude et mes remerciements à mon directeur de mémoire Monsieur GABI Smail, maitre de conférences classe A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 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 énormément M^f MERKITOU Abderrahmane qui m'a beaucoup aidé pour la réalisation de ce travail.

Je remercie l'équipe de laboratoire (L.G.E.A) de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui m'a aidé à réaliser ce travail.

Je remercie la direction du laboratoire des études maritimes, ainsi que son personnel, en particulier M^f BELAID Boualem, qui m'ont permis d'exploiter leur bibliothèque.

Je remercie le personnel de la bibliothèque de l'institut de génie civil. Ainsi que toute personne m'ayant aidé à réaliser ce mémoire.

Résumé

Le présent mémoire concerne l'utilisation des palplanches dans les ouvrages de génie civil de manière générale et particulièrement dans les ouvrages portuaires pour constituer différentes constructions de quai, d'appontement ou de duc d'albe.

Les palplanches qui présentent d'énormes avantages dans l'économie de matériaux de construction et d'énergie de battage sont très utilisées dans le monde comme ouvrage de protection, de soutènement ou d'étanchéisation des sols et ce notamment dans le domaine des travaux maritimes lorsqu'elles viennent renforcer une structure de quai existante, sans perturber le déroulement des opérations qui rentrent dans l'exploitation de cette structure, ou constituer un ouvrage en caissons cylindriques ou polygonaux avec des palplanches fermées .

Le développement de l'utilisation des palplanches réside essentiellement dans leur légèreté relative et l'emprise très réduite sur le sol, ainsi que dans leur maniabilité. Cette utilisation se fait selon des études préalables à savoir les conditions du site, les données géotechniques et le chargement donné du sol.

Dans notre étude on a choisi de travailler avec le modèle Mohr-coulomb en raison de la disponibilité des paramètres de la modélisation de l'interaction (sol-structure) avec le logiciel FLAC^{2D}. A titre d'exemple concret, nous avons réalisé la modélisation de cette interaction à l'étude de l'aménagement du port de Djendjen (postes céréaliers) en utilisant des palplanches métalliques.

Après cette modélisation on a aboutis à extraire des résultats les plus essentiels sont les contraintes vertical au niveau de l'interaction sol-palplanche, et sol-câble, et aussi les déplacements des sols à ces niveaux. Ces résultats sont sous forme des courbes qui entaient interprétées par la suite.

Mots clés : ouvrages portuaire, quai, rideau de palplanches, interaction sol-palplanches.

Abstract

This memo concerns the use of sheet piling in civil engineering in general and particularly in the port facilities to build different constructions of wharf, jetty or dolphin.

The piles that have enormous benefits to the economy of building materials and energy are used to hype the world as a work of protecting, retaining and sealing of the soil and especially in the field of maritime works when they reinforce an existing wharf structure without disrupting the workflow that fall within the operation of the structure, or be a work in chambers with cylindrical or polygonal piles closed.

The development of the use sheet piling lies in their relative lightness and grip very low to the ground, and in their handling. This use is made according to preliminary studies to know the conditions of the site, geotechnical data and gave the loading of the soil.

In our study we chose to work with the Mohr-Coulomb model because of the availability of parameters for modeling the interaction (soil-structure) with the software FLAC2D. As a concrete example, we realized the modeling of this interaction to the study of the development of the port of Djendjen (grain positions) using steel sheet piles.

After this model was successful extracting the most important results are the vertical stress at the soil-pile interaction, and the ground cable, and also the moment of soil at this level.

These results are in the form of curves which are interpreted thereafter.

Key words: books port, dock, sheet piling, piling soil-interaction

SOMMAIRE

LISTE DES NOTATIONS ET INDICES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Généralités sur les ouvrages portuaires.....	3
I/Généralités.....	4
I.1/Introduction.....	4
I.2/Historique.....	4
I.3/Définitions.....	5
I.4/Schéma de principe.....	6
I.5/ Types de ports.....	7
I.6/ Caractéristiques.....	10
II/Les ports en Algérie.....	12
II.1/Introduction.....	12
II.2/Planification des infrastructures et installations portuaires.....	12
II.3/Classification des ports algériens.....	12
II.4/Les perspectives pour les ports algériens.....	14
III/ Principaux type d'ouvrages d'un port maritime.....	18
III.1/ Les digues.....	18
III.2/Les quais.....	21
III.3/Les ouvrages d'accostage.....	22
IV. Conclusion.....	25

CHAPITRE II: Les palplanches en génie civil et travaux publics.....	26
I. Introduction.....	27
II. Définition.....	27
III. Types de palplanches.....	28
A. selon la géométrie et la forme.....	28
A.1: Palplanches en porte à faux.....	28
a. Les palplanches en bois.....	28
b. Les palplanches en béton armé.....	29
c. Palplanches PVC.....	29
d. Palplanches métalliques.....	30
IV/Serrures.....	37
IV.1/Les différents types de raccordement.....	38
IV.2/Différents types de profilés.....	39
IV.3/Application des profilés.....	40
V/Les éléments de rigidification.....	41
VI/Domaine d'application.....	45
VII/Mise en œuvre.....	52
VII.1/Battage.....	52
VII.2/Vibrofonçage.....	54
VII.3/ Mise en place par presse hydraulique.....	56
VIII/Enclenchement d'un rideau de palplanches.....	57
IX/L'arrachage des palplanches.....	58
X/Recepage des palplanches.....	58
XI/Principaux étanchements des palplanches.....	58
XI.1/Etanchement vertical.....	58
XI.2/Etanchement horizontal.....	61
XII-Corrosion des palplanches.....	62
XIII-La protection contre la corrosion.....	64

XIV/Conclusion.....	65
---------------------	----

CHAPITRE.III: L'interaction des palplanches avec le sol de fondation.....66

I. Introduction.....	67
II. La palplanche dans le sol.....	67
III. Etats limites de rupture selon L'Eurocode.....	70
IV. Définition de la poussée et de la butée.....	71
V. Stabilité d'un écran de soutènement.....	72
V.1: Stabilité externe.....	72
V.1.1: Rideau ancré et simplement buté en pied.....	72
V.1.2: Rideau non ancré en tête et encastré en pied.....	74
V.1.3: Mur encastré en pied et ancré en tête	76
V.1.4: Théorie du coefficient de réaction du sol.....	78
V.2: Stabilité interne d'un écran de soutènement.....	79
V.3: Méthodes classiques de calcul des blocs d'ancrage.....	80
V.4: Ancrages doubles.....	83
VI. Choix des coefficients de poussée et de butée.....	84
VII: Le comportement d'un rideau de palplanches.....	84
VIII: Le rapport des déformations horizontales et verticales	91
VIII.1: Les types de profils.....	91
VIII.2: Estimation des tassements	92
VIII.3: Renard hydraulique.....	96
VIII.4: Effet de barrage d'un rideau de palplanches.....	97
IX. Conclusion.....	97

**CHAPITRE.IV: Modélisation de l'interaction des palplanches avec le sol de fondation
.....98**

I. Présentation du logiciel FLAC.....	99
I.1- Introduction.....	99
I.2- Principe de résolution numérique dans du logiciel FLAC ^{2D}	99
I.3- Les différences finies.....	99
I.4- Schéma de résolution explicite.....	101

I.5. Equations du mouvement	101
II.Modèles rhéologiques et éléments structurels.....	104
II.1- Modèles de comportement de sol.....	104
II.2- Groupe des modèles élastiques.....	105
II.3- Lois de comportement élastoplastiques.....	106
III-Eléments de structures.....	108
V-Type de sollicitations.....	108
V. Déclaration des données dans le code FLAC ^{2D}	108
V.1- Générations des grilles.....	109
V.2- Conditions aux limites.....	109
V.3- Conditions initiales.....	109
V.4-Simulation du comportement du sol marin.....	110
V.5-Le maillage.....	110
V.6- Conditions aux limites et initiales.....	110
V.7-Inclusion de la structure.....	111
VI. Résultats obtenus.....	111
VII. Interprétation des résultats.....	123
VIII. Conclusion.....	124
Conclusion générale.....	127
Annexe 1.....	129
Annexe 2.....	132
Bibliographie.....	145

Liste des indices :

σ : Contrainte effective ;

c : Cohésion ;

h : Profondeur ;

ϕ : Angle de frottement interne ;

ϕ' : Angle de frottement remanié ;

γ_w : Poids volumique de l'eau ;

γ : Poids spécifique du sol hors d'eau ;

γ' : Poids spécifique déjaugé ;

ρ : la masse volumique ;

t : temps ;

\dot{u} : Le vecteur vitesse ;

x : Le vecteur position ;

P : Chargement appliqué ;

A : Surface ;

A_x : Surface au vent du navire ;

V : vitesse

σ_z : Contrainte verticale ;

r, z : Respectivement coordonnée horizontale et verticale ;

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

λ : Paramètre d'écrouissage

ν : Coefficient de Poisson ;

E : Module de Young ;

G : Module de cisaillement ;

K : Module volumétrique ou de compressibilité ;

Q : Chargement ponctuel ;

q : Charge uniforme ;

Δ : Laplacien ;

k : Coefficient sans dimension ;

w_0 : Facteur d'influence ;

ε^e : Déformation élastique ;

ε^p : Déformation plastique ;

Σ : Surface des voilures ;

B.S.I : British Standard Institution ;

tpl : Tonnes Port Lourds ;

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre .I

Tableau.1: Les principaux ports Algériens avec leurs caractéristiques.

Chapitre .II

Tableau.1: Caractéristiques des palplanches.

Tableau.2: Perte d'épaisseur [mm] provoquée par la corrosion pour les pieux et les palplanches mis-en Place dans les sols, avec ou sans nappe phréatique.

Tableau.3: Perte d'épaisseur [mm] provoquée par la corrosion pour les pieux et les palplanches mis-en place dans l'eau douce ou dans l'eau de mer.

Chapitre .IV

Tableau.1: Comparaison entre les méthodes explicites et implicites
(Candall [1981]).

Tableau.2: Relations entre les constantes élastiques
(D'après Leipholz [1974]).

Tableau.3: Paramètres géotechniques.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

- Figure I-1 :** *Intérieur du port, Josef Vernet 1754.*
Figure I-2 : *Ruine de l'ancien port de Sidon.*
Figure I-3: *Schéma de principe d'un port maritime*
Figure I-4 : *Photos d'un port commercial*
Figure I-5 : *Photos d'un port de pêche.*
Figure I-6 : *Port de plaisance du Havre (Seine-Maritime).*
Figure I-7 : *Port Nantes saint Nazaire (TOULON).*
Figure I-8: *Navire en présence de la houle*
Figure I-9: *Carte du littoral Algérien.*
Figure I-10: *Port de Gouraya.*
Figure I.11 : *Port de Cherchel.*
Figure I.12 : *Port de Tipaza.*
Figure I.13 : *Port de Sidi Fredj.*
Figure I-14: *Port d'Alger.*
Figure I-15: *Port de Zemmouri.*
Figure I-16: *Port de Dellys.*
Figure I-17: *Les deux principaux types de digues*
Figure I-18: *Digue à talus*
Figure I-19: *Digue verticale.*
Figure I-20: *Les types intermédiaires de digues*
Figure I-21: *Digue mixte.*
Figure I-22: *Tétrapodes et acropodes.*
Figure I-23: *Quais en rideaux de palplanches (A) et parois moulées (B)*
Figure I-24: *Quais sur pieux.*
Figure I-25: *Coupe d'un gabion (A), vue en plan d'une gabionnade
Avec arcs de raccordement (B) et d'une gabionnade cloisonnée (C)*
Figure I-26: *Différents types de quais-poids*
Figure I-27: *Ouvrage d'accostage.*
Figure I-28: *Quai en caisson.*
Figure I-29: *Quai en rideau de palplanches.*

Chapitre II :

- Figure II-1 :** *Les palplanches à module*
Figure II-2 : *Les palplanches plates*
Figure II-3: *Palplanche en bois*
Figure II-4: *Rideau de palplanches en bois*
Figure II-5 : *Palplanche en PVC*
Figure II-6: *Palplanches laminée à chaud.*
Figure II-7: *Palplanches laminées à froid.*
Figure II-8 : *Les palplanches raccords et les palplanches pliées*
Figure II-9 : *Types de raccords*
Figure II-10 : *Gabions circulaires avec des palplanches raccords à 35°*

Figure II-11 : *Gabions circulaires avec l'arc*
Figure II-12: *Gabions circulaires avec 2 arcs*
Figure II-13 : *Gabions cloisonnés avec des palplanches raccords à 120°*
Figure II-14 : *Gabion cloisonné*
Figure II-15 : *Gabions en palplanches*
Figure II-16 : *Rideaux mixtes (HZ/AZ)*
Figure III-17: *Assemblage des éléments de la structure*
Figure II-18 : *Combinaisons des éléments de la structure*
Figure II-19 : *Serrure à la jonction de deux palplanches.*
Figure II-20 : *Différents type de raccordements*
Figure II-21 : *Raccordement Omega.*
Figure II-22 : *Serrure des différents profilés*
Figure II-23 : *Jointure de plusieurs palplanches.*
Figure II-24 : *Exemple d'application des profilés.*
Figure II-25 : *La disposition des liernes dans un rideau de palplanches.*
Figure II-26 : *Schéma général d'un rideau de palplanches ancré en tête.*
Figure II-27 : *Attaches articulées*
Figure II-28 : *Attaches ordinaires*
Figure II-29 : *Schéma d'un tirant attaché à un écran de soutènement.*
Figure II-30 : *Détail de raccordement du profilé HZ*
Figure II-31 : *La lumière de raccordement.*
Figure II-32 : *Exemples de l'utilisation de palplanches en bois.*
Figure II-33 : *Exemple d'utilisation des palplanches en PVC.*
Figure II-34 : *Rideau est partiellement fiché dans le sol.*
Figure II-35 : *Quai permettant l'accostage de superpétroliers.*
Figure II-36 : *L'utilisation des palplanches pour une écluse.*
Figure II-37 : *Renforcement d'une digue anti crue.*
Figure II-38 : *L'utilisation des palplanches pour batardeaux en rivière.*
Figure II-39 : *Deûle à Lambersart (Nord de la France).*
Figure II-40 : *Terrassement dans le batardeau*
Figure II-41 : *Fouilles en présence de nappe.*
Figure II-42 : *Le chantier de MONT SAINT MICHEL*
Figure II-43 : *Pour la pose de canalisations.*
Figure II-44 : *En site industriel encombré.*
Figure II-45 : *Le grand barrage de Mont Saint Michel en France.*
Figure II-46 : *Chantier d'une reconstruction d'un pont.*
Figure II-47 : *Principe de fonctionnement du marteau hydraulique*
Figure II-48 : *Chantier de battage.*
Figure II-49 : *Principe mécanique du vibreur.*
Figure II-50 : *Principe de fonctionnement d'un vibreur*
Figure II-51 : *Un guide de control*
Figure II-52 : *Perforage avant fonçage*
Figure II-53 : *Principe de la presse hydraulique*
Figure II-54 : *La presse hydraulique*
Figure II-55 : *Enclencheur automatique.*
Figure II-56 : *Remplissage des serrures enclenchées avec un produit hydrocarboné.*
Figure II-57 : *Illustration de la mise en œuvre du produit hydro gonflant.*
Figure II-58 : *Etanchement avec la soudure.*
Figure II-59 : *Etanchement avec combinaison bentonite ciment.*
Figure II-60 : *Illustration de la réparation des défauts d'étanchement dans les serrures.*

- Figure II-61** : *Illustration pour l'installation d'un système de drainage*
Figure II-62 : *Etanchement horizontal dans le cas d'un tunnel ou une structure enterrée.*
Figure II-63 : *Etanchement d'une fouille avec un radier.*
Figure II-64 : *Elément métallique dans l'environnement marin*
Figure II-65 : *Exemples de Problèmes courants.*

Chapitre III :

- Figure III-1** : *Modèle : a) rideau sans tirant d'ancrage
b) rideau ancré dans le sol.*
- Figure III-2** : *Palplanche ancrée dans le sol.*
- Figure III-3** : *Rideau de palplanches soumis à une distribution de pression normale $p(z)$.*
- Figure III-4** : *Modes de rupture d'un rideau de palplanches*
- Figure III-5** : *Principe de la poussée et de la butée*
- Figure III-6** : *Mécanisme de rupture d'un écran simplement buté*
- Figure III-7** : *Rideau ancré en tête simplement buté en pied.*
- Figure III-8** : *Cas de la présence d'eau.*
- Figure III-9** : *Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête*
- Figure III-10** : *Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré*
- Figure III-11** : *Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile.*
- Figure III-12** : *Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements*
- Figure III-13** : *Distribution idéalisée de la pression des terres.*
- Figure III-14** : *Résolution par la méthode de la poutre équivalente*
- Figure III-15** : *Incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et l'effet de voûte..*
- Figure III-16** : *L'ensemble rideau et tirant d'ancrage.*
- Figure III-17** : *Résistance ultime de l'ancrage.*
- Figure III-18** : *Emplacement des ancrages.*
- Figure III-19** : *Détermination de la résistance d'un bloc d'ancrage.*
- Figure III-20** : *La disposition des blocs d'ancrages dans le massif du sol.*
- Figure III-21** : *Parties de terrain associées à un rideau de palplanches*
- Figure III-22** : *Diagramme pour estimation des déplacements vis à vis du soulèvement de font de fouille pour des écrans boutonnés dans l'argile.*
- Figure III-23** : *Comportement d'un rideau ancré en tête soumis à une force horizontale*
- Figure III-24** : *Cas d'un rideau avec frottement*
- Figure III-25** : *Profil de tassement de type convexe en tympan.*
- Figure III-26** : *Profil de tassement de type concave*
- Figure III-27** : *Interaction sol structure de type convexe en tympan.*
- Figure III-28** : *Interaction sol structure de type concave.*
- Figure III-29** : *Méthode de détermination des tassements de type convexe*
- Figure III-30** : *La déformée d'un rideau de palplanches*
- Figure III-31** : *Méthode de détermination des tassements de type concave.*
- Figure III-32** : *Méthode des gradients hydrauliques moyens.*
- Figure III-33** : *Effet de barrage d'un rideau de palplanches.*

Chapitre IV :

Figure IV-1: *Procédé général de résolution des problèmes géotechnique*

Figure IV-2 : *Séquence de calcul générale (Billiaux [1993]).*

Figure IV-3 : *le maillage utilisé pour la modélisation*

Figure IV-4: *les couches de sols de modèle choisi.*

Figure IV-5: *Le model après l'inclusion de la structure (la palplanche et le câble).*

Figure IV-6: *Le model après l'application des contraintes et la charge.*

Figure IV-7: *Les déplacements des couches de sol sous chargement*

Figure IV-8: *Les déplacements du sol selon y.*

Figure IV-9 : *le déplacement horizontal au voisinage du câble.*

Figure IV-10 : *a)le déplacement vertical au voisinage du câble*

Figure IV-10 : *b) le déplacement vertical au dessous du câble*

Figure IV-11 : *le déplacement vertical au dessous de la palplanche.*

Figure IV-12 : *le déplacement horizontal au dessous de la palplanche*

Figure IV-13 : *les contraintes totales x au dessous de la palplanche*

Figure IV-14 : *les contraintes totales y au dessous de la palplanche.*

Figure IV-15 : *les contraintes totales x au dessous du câble.*

Figure IV-16 : *les contraintes principales x au dessous de la palplanche*

Figure IV-17 : *les contraintes principales y au dessous de la palplanche.*

Figure IV-18 : *les contraintes principales x au dessous du câble (seg1)*

Figure IV-19 : *les contraintes principales y au dessous du câble (seg2).*

Figure IV-20 : *les contraintes effectives x au dessous de la palplanche.*

Figure IV-21 : *les contraintes effectives y au dessous de la palplanche.*

Figure IV-22 : *les contraintes effectives x au dessous du câble.*

Figure IV-23 : *les contraintes effectives y au dessous du câble.*

Figure IV-24: *le déplacement vertical du câble.*

Annexe 1:

Figure -1 : *Vue en plan du projet.*

Annexe 2:

Figure A1-1 : *Le bureau de démarrage dans la configuration graphique de FLAC^{2D}. GIIC.*

Figure A1-2 : *Fenêtre de dialogue « Model Options » dans la configuration graphique de FLAC^{2D} GIIC*

Figure A1-3 : *Menu déroulant principale dans la configuration graphique de FLAC^{2D} GIIC.*

Figure A1-4 : *Menu File dans la configuration graphique de FLAC GIIC*

Figure A1-5 : *Menu Show dans la configuration graphique de FLAC GIIC*

Figure A1-6 : *Menu Tools dans la configuration graphique de FLAC GIIC*

Figure A1-7 : *Menu View dans la configuration graphique de FLAC GIIC*

Figure A1-8 : *Menu View sous une forme de barre d'outils.*

Figure A1-9 : *Menu Help dans la configuration graphique de FLAC GIIC*

Figure A1-10: *Barre d'outils dans la configuration graphique de FLAC GIIC*

Figure A1-11: *Barre d'outils BUILD dans la configuration graphique de FLAC GIIC*

- Figure A1-12:** *Barre d'outils ALTER dans la configuration graphique de FLAC GIIC*
- Figure A1-13 :** *Barre d'outils MATERIAL dans la configuration graphique de FLAC GIIC*
- Figure A1-14 :** *Barre d'outils IN SITU dans la configuration graphique de FLAC GIIC*
- Figure A1-15 :** *Barre d'outils STRUCTURE dans la configuration graphique de FLAC GIIC*
- Figure A1-16 :** *Barre d'outils SETTINGS dans la configuration graphique de FLAC GIIC*
- Figure A1-17 :** *Barre d'outils SETTINGS dans la configuration graphique de FLAC GIIC*
- Figure A1-18 :** *Barre d'outils PLOT dans la configuration graphique de FLAC GIIC*
- Figure A1-19 :** *Barre d'outils RUN dans la configuration graphique de FLAC GIIC*

Introduction générale

L'évolution du trafic des marchandises (aussi bien dans leur nature, leur volume que leur mode de conditionnement) et le développement des caractéristiques des navires, ont un impact significatif sur l'aménagement des installations portuaires.

Les réponses apportées à ces évolutions par les autorités portuaires sont diverses et variées, mais se qui est constant c'est que les ports se sont toujours adaptés soit en créant de nouvelles installations, soit en adaptant les anciennes installations à la nouvelle situation de trafic et de caractéristiques des navires.

Ceci est valable pour tous les pays du monde. D'ailleurs l'Europe seule compte environ 1200 ports maritimes qui traitent près d'un milliard de tonnes de fret par an.

L'Algérie qui est sur la mer méditerranée et qui représente 1% des eaux de la planète assure le passage de 30% du fret, c'est dire l'importance de prendre en charge ce secteur économique, de le moderniser, et d'améliorer ses performances.

Notre pays essaye d'avancer dans ce domaine, soit par l'aménagement et la remise en bon état, ou par la création des nouvelles installations portuaires. A titre d'exemple, l'Algérie possède 10 ports commerciaux qui traitent 95% du commerce extérieur, et tous génèrent 1400 emplois directs sur l'ensemble des ports algériens. Parlant de budget, l'Algérie réserve une enveloppe de 100 milliards de dinars pour la période 2012-2014 seulement pour ce secteur.

Pour cela on s'est intéressé par l'étude d'un exemple réel en Algérie, c'est le port de Djendjen en travaux d'aménagement qui utilise des palplanches métalliques pour un raccordement. Cette étude était consacrée pour le comportement du sol de fondation en contact avec les palplanches sous l'effet de chargement et la poussée des terre-pleins de ce site.

L'utilité primordiale des palplanches était seulement dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, avec un élargissement d'utilisation à chaque fois qu'il ya lieu d'éviter le cout et la difficulté de transporter des matériaux pour construire des ouvrages en béton armé. Dans les dernières décennies, cette utilisation s'est répandue dans la construction des ouvrages portuaires, et c'est le cas de port de Djendjen.

Nous avons entrepris un travail de simulation du comportement du sol sous ouvrage portuaire en palplanches métalliques par un logiciel de calcul «FLAC^{2D}» acquis par notre laboratoire de recherche (L.G.E.A), spécialisé dans les problèmes de la géotechnique. Ce travail constitue une contribution à l'étude de l'interaction sol-palplanches dans le milieu maritime.

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

Le premier chapitre contient toutes les généralités sur les ports, les différents types, les capacités, l'importance des ouvrages portuaires dans le monde et en Algérie.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de l'utilisation des différents types de palplanches dans le domaine du bâtiment et des travaux publics ; soit comme utilisation provisoire de soutènement ou comme rideau étanche avec des exemples concrets pour chaque cas, soit comme utilisation définitive pour renforcer une structure existante.

Le troisième chapitre est une présentation des différentes méthodes théoriques de calcul de l'interaction des palplanches métalliques avec le sol de fondation pour les ouvrages portuaires.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation numérique avec le code de calcul «FLAC^{2D} », basé sur la méthode des différences finies, qui est une méthode explicite utilisant un schéma itératif pour la résolution des équations de mouvement pour chaque élément basées sur les valeurs des sollicitations des éléments voisins. Le choix de cette méthode est motivé par la simplicité de son applicabilité pour les problèmes géotechniques. Notre exemple modélisé avec ce logiciel est basé sur l'enfoncement des palplanches métalliques maintenues par un tirant d'encrage dans un sol tri-couche avec une sollicitation des efforts latérales en considérant la poussée hydrostatique, et une charge répartie sur ce sol.

A la fin de ce chapitre on donne les résultats de calcul avec les interprétations explicatives.

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

I. Généralités :

1/Introduction :

De par leur double importance économique et politique, les ouvrages portuaires jouent un rôle considérable dans le développement d'un pays. Depuis quelques décennies, nombre de pays, à l'instar de la Chine, ont compris que le port est une porte vers le monde puisque actuellement la quasi-totalité des échanges commerciaux entre les pays et les continents se font par voie maritime.

2/ Historique :

Les ports sont des lieux stratégiques, économiques et militaires. Ils ont pour cette raison et depuis des siècles faits l'objet de nombreuses attaques venant de la terre, de la mer ou des airs.

Les premiers ports construits semblent toutefois remonter aux Phéniciens avec les ports de Sidon et Tyr au XIII^e siècle av. J.-C.

Malgré les destructions suivant la fin de l'Empire romain, les ports se développent sur le pourtour de la Méditerranée et progressivement sur la façade Atlantique au fur et à mesure de l'expansion du commerce.



Fig. I.1. Intérieur d'un port



Fig. I.2. Ruines de l'ancien port de Sidon.

3/Définitions :

- Un **port** est une infrastructure située sur le littoral maritime, sur les berges d'un lac ou sur un cours d'eau et destiné à accueillir des bateaux et navires. Un port peut remplir plusieurs fonctions, mais doit avant tout permettre d'abriter les navires, en particulier pendant les opérations de chargement et de déchargement. Il facilite aussi les opérations de ravitaillement et de réparations.

- À l'opposé d'un mouillage consistant généralement d'une rade protégée des vents dominants et des vagues par la terre, un port sera protégé par une ou plusieurs digues ou môles. Il pourra être composé de plusieurs darses, de parties isolées par des écluses, de cales sèches ou flottantes. Il peut nécessiter des dragages afin d'entretenir une profondeur suffisante. Le port lui-même est aménagé avec des jetées, des quais, des pontons et doit être relié à d'autres moyens de transport (routier, ferroviaire...).

- Espace voué au transit de marchandises et de passagers, le port est :
 - une zone géographique
 - une communauté de professionnels
 - une zone industrielle et logistique
 - un lieu d'échanges et d'informations.

4/Schéma de principe:

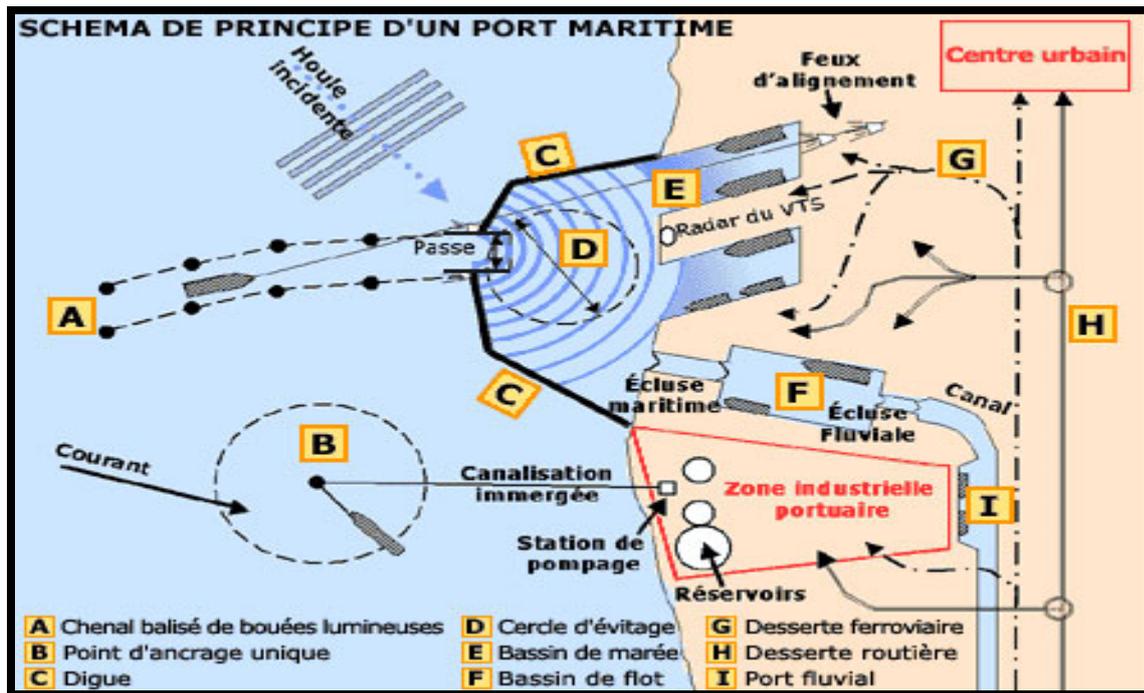


Fig. I.3. Schéma de principe d'un port maritime

Pour entrer dans le port, ou en sortir, le navire emprunte un **chenal balisé (A)**, aidé dans sa circulation par le radar du VTS (Visual Traffic System) et par les feux d'alignement.

L'**avant-port (D)** est protégé de la houle par des **digues (C)**. Le navire peut y effectuer des manœuvres "d'évitage" (c'est à-dire tourné sur lui-même de 180°), de façon à pouvoir être amarré à son poste d'opérations cap vers la sortie (ce qui facilite grandement l'abandon du poste en cas de nécessité).

Les **postes d'accostage** (conçus sous forme de quais, d'appontements ou de ducs d'Albe) sont établis en bordure :

- * de **bassins de marée (E)** en liaison directe avec l'avant-port

- * **ou de bassins à flot (F)** reliés à l'avant-port par une écluse maritime. Les postes sont desservis par des voies de transport intérieures (routes, rails, voies navigables (G, H, I) et équipés de terre-pleins permettant le stockage des cargaisons.

Lorsque l'agitation due à la houle n'est pas trop forte, les navires transportant des cargaisons liquides ou en vrac peuvent être reçus à des **postes non protégés (B)**. Ils chargent ou déchargent leur cargaison par des tuyaux flexibles reliés à un **point d'ancrage (B)** constitué d'une bouée ancrée sur le fond par des chaînes. La liaison entre ce point et les installations de stockage établis à terre s'effectue par des canalisations fixes posées sur le fond marin.

5/ Type de ports

Des ports de toutes tailles existent, abritant de quelques barques, à des milliers de bateaux et installations utilitaires ou industrielles de production.

Les ports peuvent être classés selon leur localisation, et leur(s) activité(s).

A/Localisation :

Selon leur localisation, on distingue les ports maritimes, lacustres, fluviaux et à sec

1/Ports maritimes

Ils sont situés sur la côte d'une mer ou d'un océan ; ce sont souvent les ports principaux pour un pays ayant une façade maritime, accueillant les plus grands tonnages. Ces ports ont besoin d'avantage de protection contre les vagues et le vent en raison de leur exposition.

Dans les ports maritimes européens, passent chaque année environ 3,5 milliards de tonnes de fret (marchandise), et environ 350 million de passagers (chiffres 2007). Les ports maritimes manient presque tout le fret impliqué dans le commerce extérieur et la moitié de celui impliqué dans le commerce intérieur.

2/Ports fluviaux

Les ports fluviaux, ou ports intérieurs, sont situés sur le bord d'un fleuve, d'une rivière ou d'un canal. Ils sont souvent aménagés sur un bras mort, une dérivation ou un élargissement naturel du cours d'eau afin d'éviter que le courant ne gêne les activités portuaire ; certains ports fluviaux sont créés artificiellement en creusant la terre pour créer des bassins accessibles depuis le fleuve. Les grands ports fluviaux sont souvent près des embouchures (entrée d'un fleuve dans la mer) de grands fleuves, accessibles à des navires venant de la mer ; on peut donc les considérer comme des ports maritimes au vu de leur trafic. La distinction peut devenir difficile à proximité de l'embouchure.

3/Ports lacustres

Ils sont situés en bordure d'un lac. S'ils ne sont pas soumis aux aléas des marées, les vagues peuvent poser problème sur les grandes étendues d'eau. Les ports lacustres comprennent les petites marinas au bord des lacs de montagne mais également les grands ports de commerce sur les Grands Lacs.

4/Ports à sec

Relativement récents (apparus dans les années 1960 aux États-Unis), les ports à sec permettent le stockage à terre de petites unités telles que les voiliers de plaisance et les yachts. Ces « ports » sont situés à proximité d'un port de plaisance ou au moins d'une cale de mise à l'eau.

C/Activités

Selon leurs activités et les types de bateaux accueillis, on distingue les ports de commerce, de pêche, de plaisance, et les ports militaires. Il est fréquent qu'un même port combine plusieurs activités, mais elles sont souvent séparées géographiquement, par exemple avec différents bassins.

- **ports de commerce** : servent à accueillir les navires de commerce : ceci inclut le trafic de passagers sur les ferries et les paquebots et le transport de marchandises pour les navires cargo. Les marchandises peuvent être liquides (pétroliers, chimiquiers) et nécessiter des réservoirs et tuyauteries dédiées ; ou solides, en vrac (vraquiers, nécessitant des silos ou des espaces de stockage) ou emballées : cargos mixtes ayant besoin d'entrepôts et de grues, ou les porte-conteneurs avec les grands espaces de stockage associés. Les cargaisons roulantes (pour les rouliers) ont besoin de zones d'attente, éventuellement de parkings. Outre les espaces de stockage et les moyens de manutention nécessaires, un port de commerce inclut aussi des liaisons routières et ferroviaires, voire fluviales, avec la terre ; différentes darses et terminaux spécialisés ; des bassins pour les navires de services associés ; selon les cas, des bassins dédiés à la réparation, un dispositif de séparation du trafic..



Fig. I.4. Un port commercial

- **ports de pêche** sont les plus nombreux dans le monde, et sont souvent ceux dont les dimensions sont les plus réduites. Leurs dimensions varient selon les bateaux accueillis : les chalutiers de haute mer partant pour plusieurs semaines auront besoin de plus d'espace de quai en revenant décharger leur cargaison, tandis que les petits bateaux de pêche partant à la journée auront besoin de pouvoir décharger rapidement pour la criée. L'infrastructure est plus simple que pour un port de commerce : quelques quais ou pontons, une station de ravitaillement, et un moyen de vendre le produit de la

pêche (marché à proximité), et éventuellement de le traiter avant la vente si cela n'a pas été fait sur le bateau.



Fig. I.5. Un port de pêche.

- **Les ports de plaisance** accueillent les bateaux de plaisance, de loisir et de compétition, à voile et à moteur. La plupart des bateaux sont de petite taille (inférieur à 20 m), et les places de port sont standardisées grâce à des pontons, différentes techniques d'amarrage sont utilisées selon les endroits. On y trouve une capitainerie, différents services d'avitaillement, de mise au sec et de réparation, une pompe à carburant, et divers services pour les équipages. Ils sont souvent situés près du centre des villes pour des raisons touristiques et pratiques (facilité d'accès et d'avitaillement).



Fig. I.6. Port de plaisance du Havre (Seine-Maritime).

- Les **ports militaires** (ou **bases navales**) accueillent les navires de guerre. Certains ports sont ouverts, mais d'autres, notamment les bases de sous-marins, sont fermés et interdits au public pour des raisons de sécurité. Un port militaire peut inclure un arsenal, une école navale, un chantier de réparations, des moyens de ravitaillement, de logement et d'entraînement pour les équipages. Certains navires militaires, comme les patrouilleurs, peuvent être basés dans d'autres types de ports.



Fig. I.7. Port Nantes saint Nazaire (TOULON)

6/Caractéristiques :

Un port possède différentes caractéristiques qui permettent de le classer par rapport aux autres :

✚ Emplacement et caractéristiques :

La position géographique et la géométrie des bassins portuaires et des jetées déterminent les qualités d'un port et influent sur les paramètres suivants :

- **Protection** : le port peut être ouvert ou disposer d'un abri naturel ou artificiel grâce à une jetée ou un brise-lames. Le port peut être fermé ou d'accès difficile quand les vagues et / ou le vent ont une orientation particulière. La vitesse des navires est réglementée dans le port et à ses abords. La circulation intra-portuaire ne doit pas générer de vagues importantes.

L'apparition de navires plus grands, lourds ou larges peut ainsi modifier la hauteur de vague, et indirectement les fonds, la sédimentation, la turbidité ou générer des vagues plus destructrices pour les berges et aménagements flottants. Des modèles ou essais

avec des maquettes permettent d'étudier ces problèmes ainsi que la manière dont la houle peut ou non entrer dans un port.

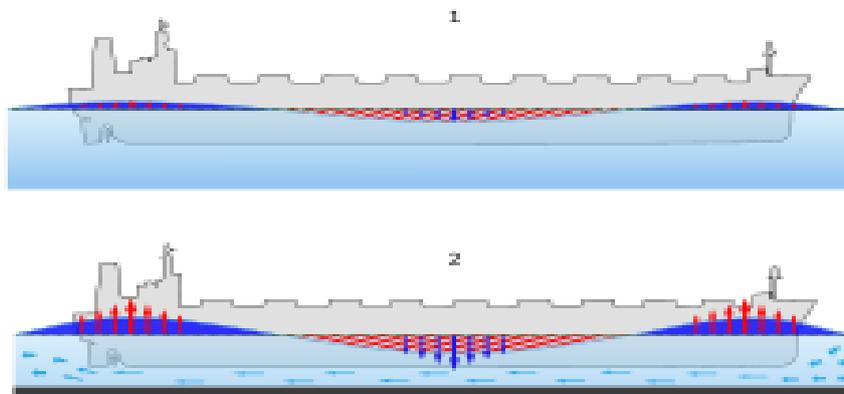


Fig. I.8. Navire en présence de la houle

- **Profondeur** : la profondeur disponible, suivant l'heure de la marée, détermine la taille des bateaux qui peuvent entrer en fonction de leur tirant d'eau. Pour les grands ports, la profondeur est entretenue par un dragage régulier du fond ou de chenaux d'accès. Afin de préserver une profondeur suffisante, certains ports disposent d'écluses ou de seuils ; le tirant d'eau du navire est aussi affecté par le phénomène de surenfoncement. Les ports les plus profonds au monde atteignent 30 m, mais 15 m est un chiffre plus courant pour les ports de commerce, et 2 à 6 m pour les ports de plaisance.
- **Balisage** : l'entrée d'un port doit être repérable de jour comme de nuit, par des moyens non visuels dans le brouillard (radar, corne de brume...). Le balisage s'appuie sur des bouées ou balises utilisant le système latéral ou cardinal, des feux et phares.

Infrastructure

Les installations portuaires comprennent des bassins, offrant un tirant d'eau suffisant, bordés par des quais généralement munis de défenses et des terre-pleins sécurisés, des équipements de manutention (grues...), des postes de sautage et de livraison d'eau douce, des jetées et brise-lames. Le chenal d'entrée est balisé. Le port est relié à son arrière-pays par des voies de communication.

II. Les ports en Algérie

1/Introduction :

Les ports en Algérie sont tout aussi importants que par le monde, et les autorités investissent énormément pour développer et entretenir les infrastructures portuaires existantes et en construire d'autres. En cherchant toujours à avoir le bon état et le meilleur rendement des ports, par l'investissement de 100 milliard de dinars sur la période 2012, 2014 sous une organisation, planification et classification.

2/Planification des infrastructures et installations portuaires.

Pour arriver à la planification des infrastructures portuaires un certain nombre de paramètres sont pris en considération; il s'agit notamment de :

- Volume total des cargaisons à traiter (chargées et déchargées) en tenant compte des tendances (telle que l'augmentation du trafic conteneurisé au détriment du volume des marchandises générales).
- Taille moyenne des navires pouvant accoster aux infrastructures existantes.
- Nombre de navires faisant escale.
- Productivité de la manutention (Nombre de grues, taux de rendement, etc.).
- Durée de séjour moyen de la cargaison au port (hangars, magasins spécialisés, terrepleins, silo, etc.).
- Voies de desserte (route et rail).

3/Classification des ports Algériens:

Les ports algériens sont classés selon leurs capacités et aussi leurs caractéristiques, dans l'ordre suivant :

Port principal.

Port secondaire important.

Petit port secondaire.



Fig. I.9. carte du littoral algérien.

Le tableau ci après donne la position géographique, les caractéristiques de chaque port.

Région	Wilaya	ports	Coordonnées	Caractéristique		
	maritime		géographiques	du port		
centre	Alger	Alger	03°02'00 E 36°50'00 N	Mixte (pêche+plaisance)		
	Tipaza	Bouharoun	02°39'35 E 36°37'55 N	pêche		
		Cherchell	02°11'17 E 36°36'36 N			
		Jijel	04°65'00 E 36°95'00 N			
Est	Jijel	Ziama	05°29'00 E 36°40'36 N	pêche		
		Skikda	Stora		06°53'50 E 36°53'90 N	
		Annaba	Annaba		07°46'00 E 36°54'30 N	Mixte (pêche+commerce)
	El Taref	El kala	08°26'30 E 36°42'00 N	pêche		
			Mostaganem	Mostaganem	00°05'00 E 35°56'00 N	Mixte (pêche+commerce)
			Oran	Oran	00°39'09 W 35°43'00 N	pêche
Ouest	Tlemcen	Ghazaouet	01°52'00 W 35°06'00 N	Mixte (pêche+commerce)		
	Ain Temouchent	Béni Saf	01°10'23 W 35°10'18 N	pêche		
			Bouzedjar		01°10'00 W 35°34'20 N	

Tableau 1. Les principaux ports Algériens avec leurs caractéristiques.

4/ Les perspectives pour les ports algériens :

Les perspectives de développement de ce secteur sont nombreuses et visent essentiellement à la maintenance du patrimoine existant, à la modernisation des infrastructures pour les modes de transports par conteneurs, et à la création de capacités portuaires nouvelles.

Tout cela se traduit par:

- l'achèvement de la construction de cinq ports de pêche (El Kala, El Marsa, Salamandre, Marsa Ben M'Hidi, Tizirt);
- la protection de onze rivages;
- le confortement, rempiètement, et renforcement d'ouvrages portuaires au niveau des ports d'Alger, d'Arzew, de Skikda et de Ténès
- l'aménagement portuaire de pêche à l'intérieur des ports de Bejaïa et la protection du port de Bouzedjar contre l'ensablement, le revêtement du port de pêche de Ziama Mansouriah et le dragage de la passe d'entrée du port de pêche de Boudis.
- la réalisation de cinq autres infrastructures de pêche.

5/Exemples de ports algériens :

- **Port de Gouraya (Tipaza)**

Le port de Gouraya a été réalisé en 1999, c'est un port de pêche, de production annuelle de 130 T. Il présente 150 ml de quai.



Fig. I.10. Port de Gouraya.

- **Port de Cherchel (Tipaza)**

Le port de Cherchell est un ancien port de pêche, il a été construit durant la période coloniale, sa capacité de production est de 5 500 T/an, il présente un linéaire de quai de 575 m.



Fig. I.11. Port de Cherchel.

- **Port de Tipaza**

Le port de Tipaza est situé à 70 Km à l'Ouest d'Alger, c'est un ancien port de pêche d'une capacité de production de 24 T/an, le port de Tipaza présente seulement 70 ml de quai.



Fig. I.12. Port de Tipaza.

▪ **Port de Sidi Fredj (Alger).**

Le port de Sidi Fredj est le seul port de plaisance en Algérie, il a été construit en 1974.

Il est composé de :

- Une jetée principale de 230 ml ;
- Une jetée secondaire de 215 ml ;
- Un quai et un appontement de 777 ml ;
- Une capacité de 400 plaisanciers.



Fig. I.13. Port de Sidi Fredj.

▪ **Port d'Alger**

C'est le plus important port de marchandises générales avec près de 10 Km de quai à des Profondeurs variant de 7 à 11 m.



Fig. I.14. Port d'Alger.

- **Port de Zemmouri (Boumerdes)**

Le port de Zemmouri El Bahri est un port de pêche qui a été construit en 1987, il a 365 ml de quai et une capacité de production de 12 904,07 T/an.



Fig. I.15. Port de Zemmouri.

- **Port de Dellys (Boumerdes)**

C'est un port mixte (commerce et pêche) il a été réalisé en 1946, avec 808 ml de quai et une Capacité de production annuelle de 4532,28 T.



Fig. I.16. Port de Dellys.

III. Principaux types d'ouvrages maritimes :

Les principaux types d'ouvrages maritimes sont les ouvrages poids, dont la stabilité est assurée par leur poids propre grâce au frottement qu'ils mobilisent au niveau de l'interface avec le sol de fondation.

Nous distinguons principalement les digues et les quais.

1/ Les digues

On peut les séparer en deux catégories :

- Les digues à talus (A)
- Les digues verticales (B)

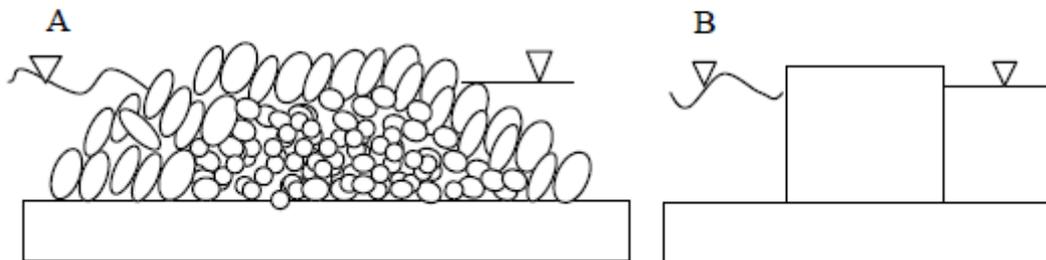


Fig. I.17. Les deux principaux types de digues

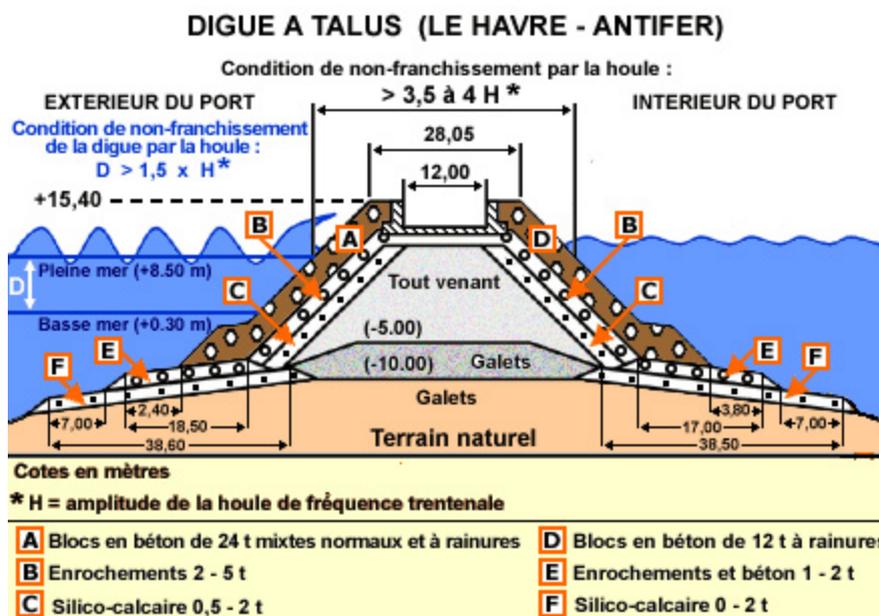


Fig. I.18. Digue à talus

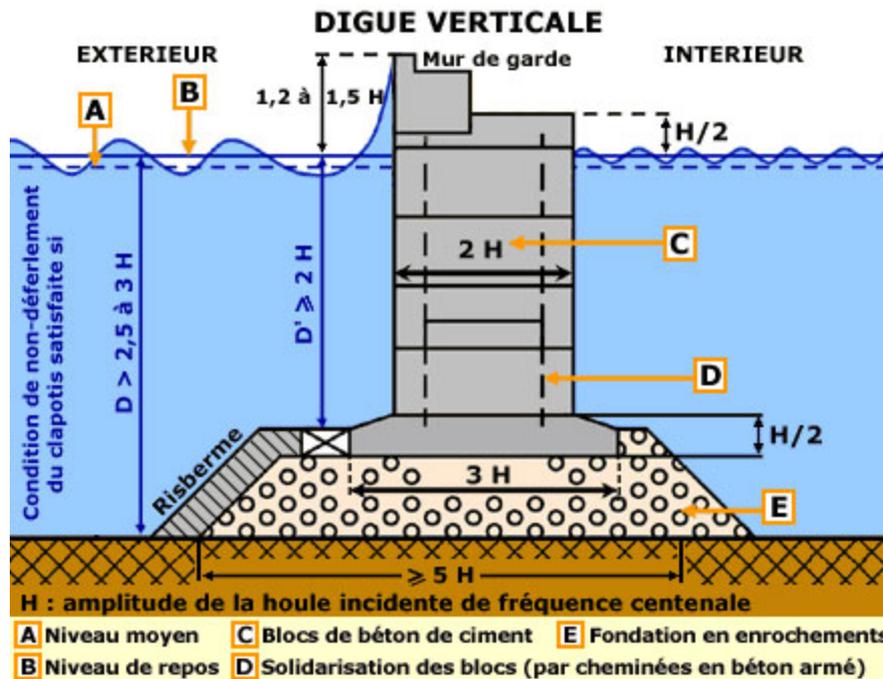


Fig. I.19. Digue verticale.

En pratique, deux catégories intermédiaires existent aussi :

- « digues mixtes » (C),
- « digues arrimées ou digues à blocs » (D).

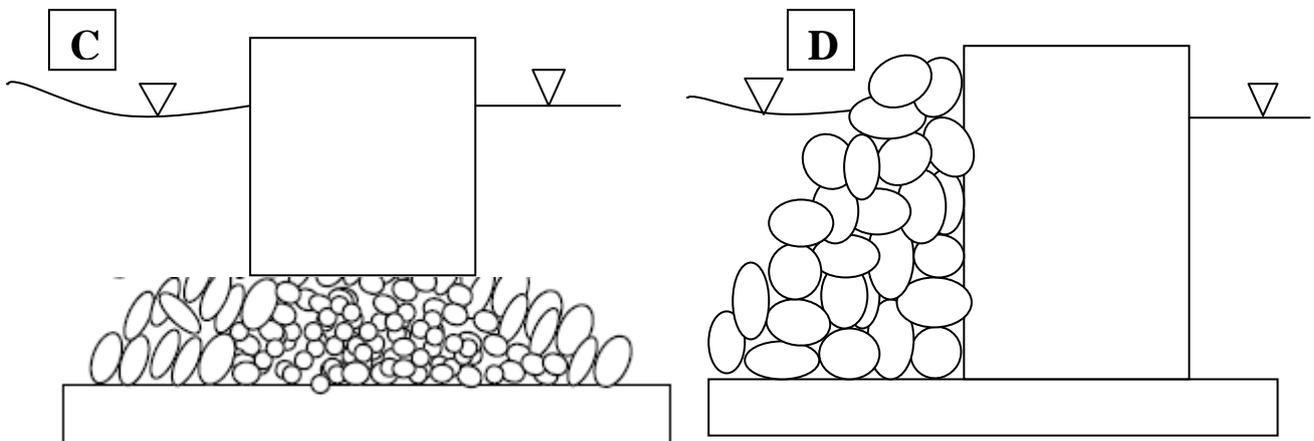


Fig. I.20. Les types intermédiaires de digues

Toutes ces structures résistent principalement par leur poids aux sollicitations horizontales. Toutefois, les digues sortent du cadre de cette étude. Nous nous limiterons donc dans cette étude à énumérer les types de digues existantes, les digues verticales (B) et les digues mixtes(C).

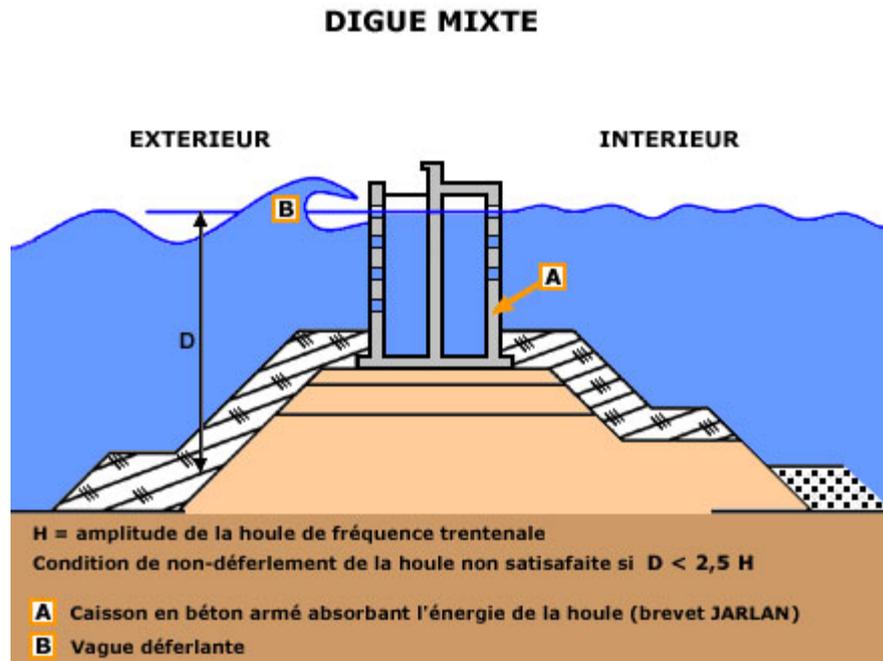


Fig. I.21. Digue mixte.

Les digues verticales connaissent aussi un certain nombre de variantes.
Elles peuvent être réalisées :

- en maçonnerie ou éventuellement en blocs de béton superposés ;
- en caissons parallélépipédiques.

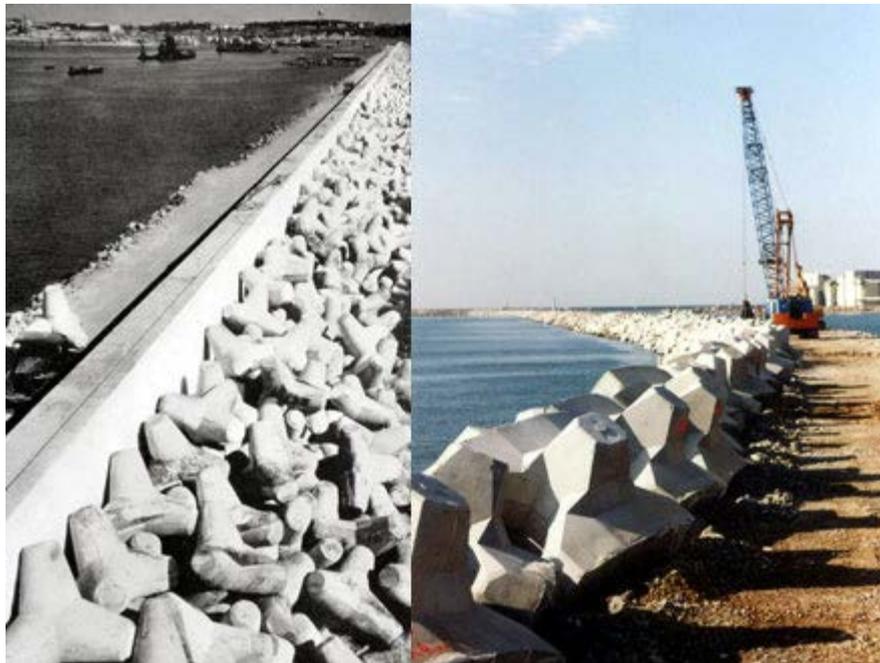


Fig. I.22. Tétrapodes et acropodes.

2/ Les quais

Les quais comportent une variété encore plus grande d'ouvrages, certains rattachables à la catégorie des ouvrages poids, d'autres non.

On peut citer ainsi les écrans de soutènement : quais en rideaux de **palplanches** (A) et en parois moulées (B).

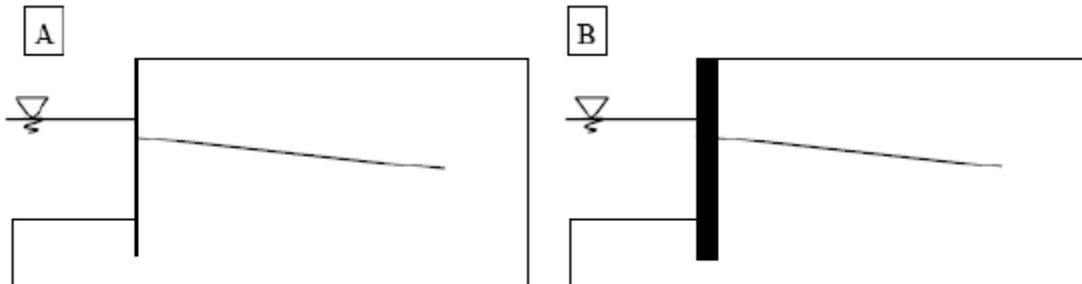


Fig. I.23. Quais en rideaux de palplanches (A) et parois moulées (B)

On peut également retenir les quais sur pieux :

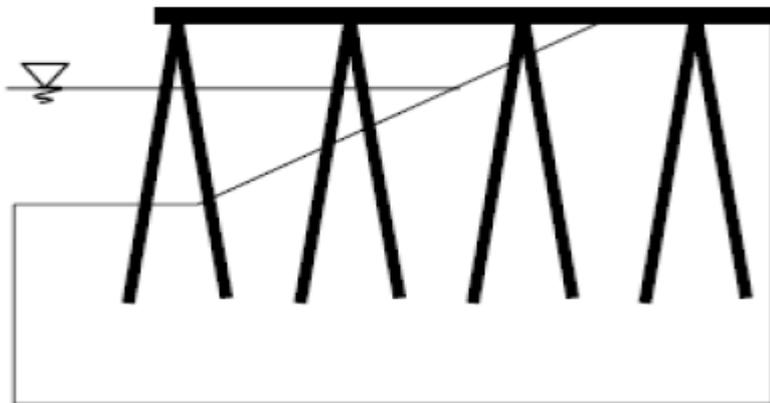


Fig. I.24. Quais sur pieux.

Les quais peuvent également être réalisés en gabions de palplanches plates :

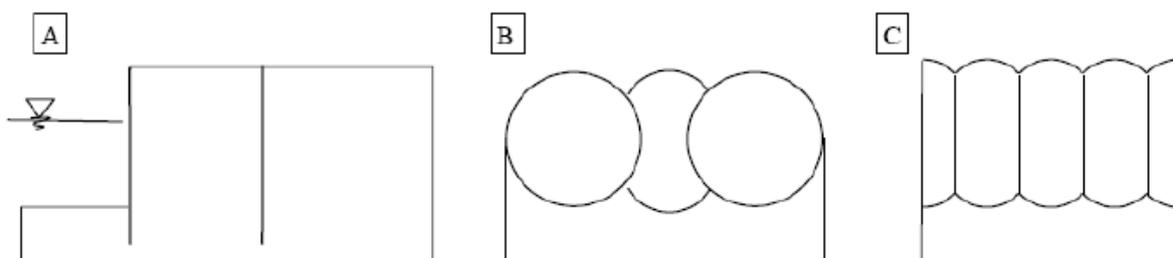


Fig. I.25. Coupe d'un gabion (A), vue en plan d'une gabionnade avec arcs de raccordement (B) et d'une gabionnade cloisonnée (C)

Ces ouvrages en gabions posent des problèmes particuliers et difficiles.

Pour les quais-poids. On peut distinguer :

- les ouvrages en maçonnerie (A) ;
- les ouvrages en blocs de béton (B) ;
- les caissons en béton armé (C) ;
- les murs en L (D).

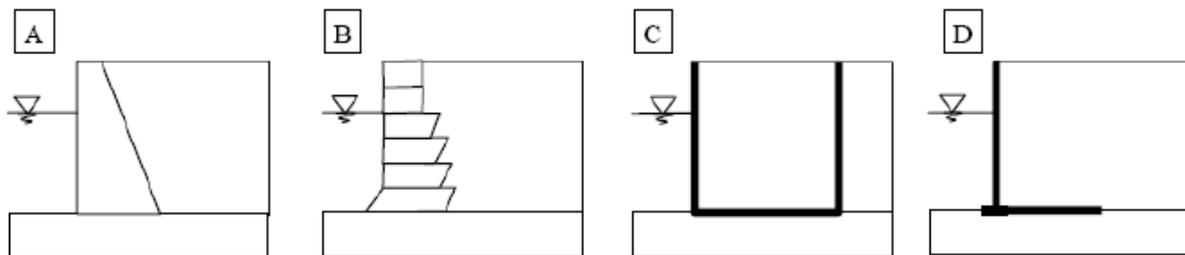


Fig. I.26. Différents types de quais-poids

Les divers ouvrages d'un port maritime sont les suivants :

- **les ouvrages de protection et d'accès** : Ils ont pour rôle de défendre le port contre la houle et les apports solides du transport littoral ; pour les ports intérieurs, ces ouvrages assurent le calibrage du chenal d'accès.
- **les plans d'eau** qui servent à l'évolution et au stationnement des navires ;
- **les ouvrages d'accostage qui sont** : les quais, les appontements et les ducs d'albe.

3/Les ouvrages d'accostage :

Les ouvrages d'accostage ont pour but d'offrir un appui aux navires qui stationnent dans un port pour procéder à des opérations de transbordement de marchandises ou de voyageurs, d'avitaillement, d'armement, de remisage ou de réparation à flot, ou enfin pour attendre la libération d'un poste d'opération.

Ainsi, ils peuvent remplir un triple rôle :

- 1- fournir au navire un dispositif d'appui, et éventuellement permettre son amarrage ;
- 2- assurer la liaison entre le navire et la terre (terre-pleins des quais, plate forme des appontements) ;
- 3- soutenir les terres à la limite du plan d'eau.

❖ **Par définition :**

- **Un quai** est un ouvrage remplissant les trois fonctions d'accostage et amarrage, de liaison avec la terre et de soutien des terres ;
- **Un appontement** remplit les deux premières fonctions ;
- **Un duc d'albe** remplit seulement la première de ces fonctions.

❖ **Caractéristiques communes aux diverses catégories d'ouvrages :**

• **Hauteur des ouvrages d'accostage :**

La hauteur d'un ouvrage d'accostage est déterminée de la façon suivante :

- Le niveau supérieur de l'ouvrage doit être arasé à une cote supérieure de 1,5 à 2 m à celle des plus hautes eaux connues. Cette cote peut être réduite pour un plan d'eau particulièrement bien abrité.
- On détermine la cote de dragage du pied des ouvrages d'accostage en retranchant du niveau de la plus basse mer connue, la valeur maxima du tirant d'eau des navires devant être reçus au poste, augmentée d'une marge comprise entre 0,50 m et 1,00 m. Cette marge est d'autant plus forte que le sol est plus dur (risque d'avarie par échouage) et que les apports solides sont importants.

On admet les valeurs suivantes pour les tirants d'eau maximaux des grands navires (par tonnes poids lourds) [Chapon 1975]:

Tankers de 500 000 tpl.....	28 m
Tankers de 300 000 tpl.....	22 m
Tankers et minéralier de 200 000 tpl.....	20 m
Minéralier de 100 000 tpl.....	14 m
Cargo porte- conteneurs.....	13 m
Paquebots transatlantiques.....	12 m
Cargo traditionnels de 12 000 tpl.....	10 à 11 m

Il faut toujours évaluer assez largement l'enfoncement du plus grand navire susceptible d'être reçu au poste dont on étudie le projet, car l'augmentation de profondeur au pied d'un quai pose presque toujours, de difficiles problèmes de rempiètement.

- Pratiquement, la hauteur totale de l'ouvrage au dessus du fond est égale à la somme de l'enfoncement maximum du plus grand navire devant être reçu au poste considéré et de la variation maxima du plan d'eau, augmentée d'une marge de 2 m à 3m.

✚ Ouvrages d'accostage sur sol de bonne portance

Lorsque le sol de fondation offre une bonne résistance (sols rocheux, galets, sable compact), les quais sont réalisés sous forme d'ouvrages massifs capables de résister aux efforts horizontaux (vers la terre, causés par l'accostage des navires et vers le bassin, provoqués par la poussée des remblais et l'amarrage des navires) et aux efforts verticaux dus à leur poids propre.

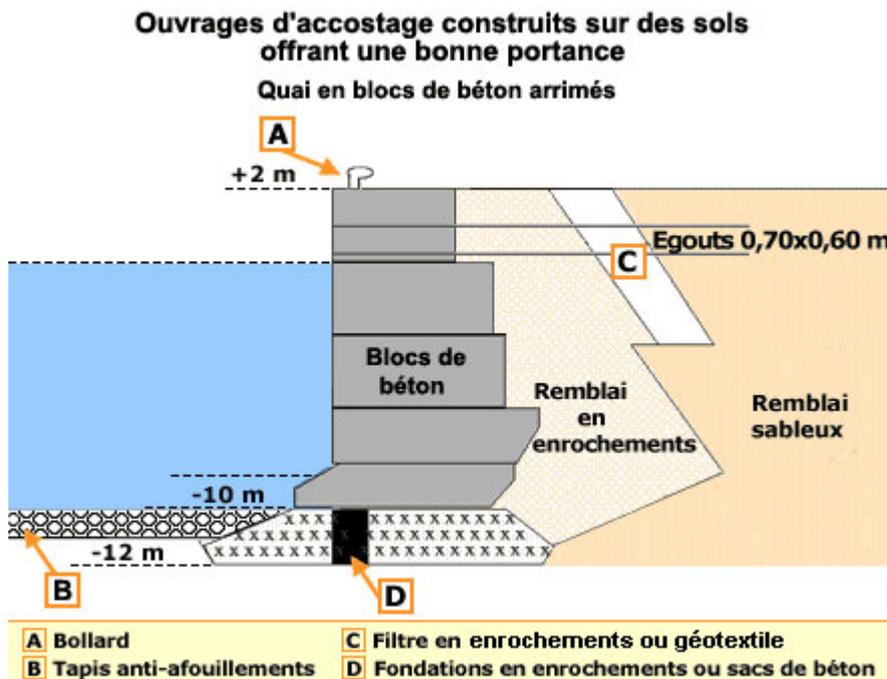


Fig. I.27. Ouvrage d'accostage.

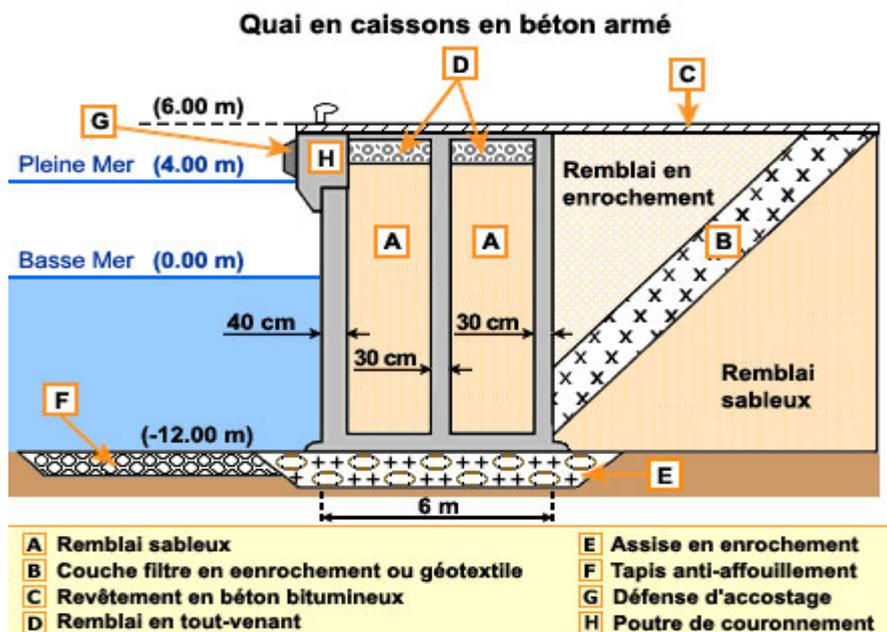


Fig. I.28. Quai en caisson.

✚ Ouvrages d'accostage sur sol de faible portance

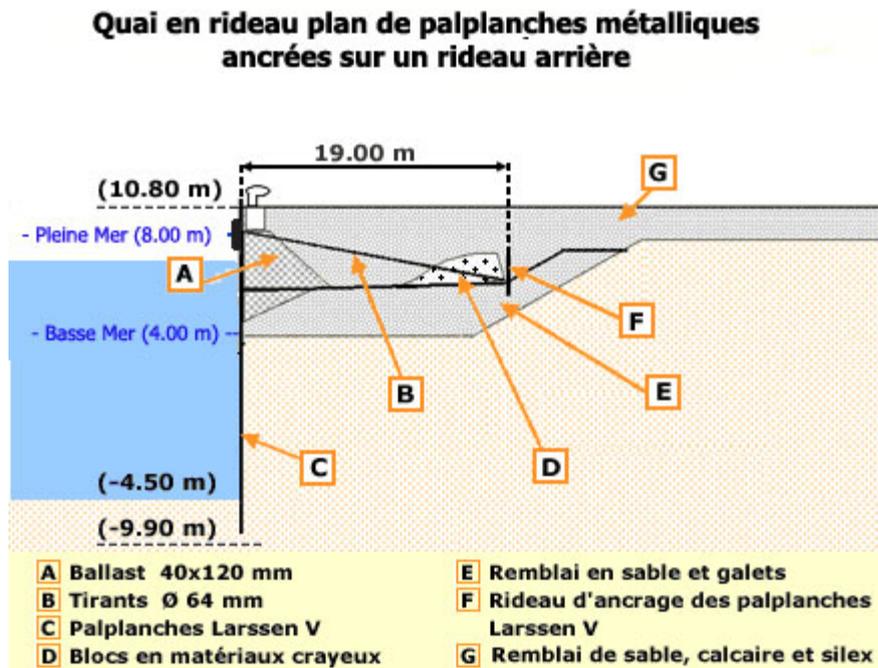


Fig. I.29. Quai en rideau de palplanches.

Les quais constitués par une paroi moulée en béton ou par un rideau de **palplanches** métalliques ancré sur un rideau arrière, sont utilisés lorsque le terrain naturel offre une portance insuffisante pour supporter un ouvrage massif, mais possède des caractéristiques géotechniques permettant d'offrir une butée au pied du rideau (côté bassin) capable d'équilibrer la poussée du remblai. C'est le cas des sols sableux, de marnes ou d'argiles suffisamment compactes.

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, consacré aux généralités sur les ouvrages portuaires, on a montré les différents types d'ouvrages portuaires et les éléments qui les constituent, on a montré aussi le rôle que joue un port dans l'économie d'un pays.

Pour le cas des ouvrages portuaires algériens, dont on a présenté quelques exemples, il est à signaler que l'infrastructure portuaire algérienne reste très en deçà des normes mondiales.

Et malgré les efforts consentis par l'état algérien dans la rénovation, le réaménagement et la construction de ports, il reste énormément de choses à faire pour rehausser l'infrastructure portuaire nationale au niveau des ports méditerranéens et mondiaux.

I. Introduction

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

II. Définition

Une **palplanche** (composé de *pal* et *planche*) est un pieu conçu pour être battu en terre en s'enclenchant aux pieux voisins par l'intermédiaire de nervures latérales appelées *serrures*. Les palplanches permettent de constituer un mur de soutènement, un batardeau, une palée ou un écran imperméable.

Les rideaux qu'elles constituent sont assimilables à des murs ou des parois supportant la poussée des terres en place, ou des remblais et des dénivelés d'eau.

On distingue :

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

Les premières se comportent comme des poutres verticales, mobilisant la butée au niveau de leur encastrement dans le sol et supportant les poussées dues aux dénivellations de terrain et d'eau (palplanches Larssen).

Les secondes permettent de réaliser des enveloppes cylindriques fermées, contenant des matériaux dont les poussées engendrent des tractions importantes dans les joints, ces derniers sont, de ce fait, conçus pour résister à des efforts.

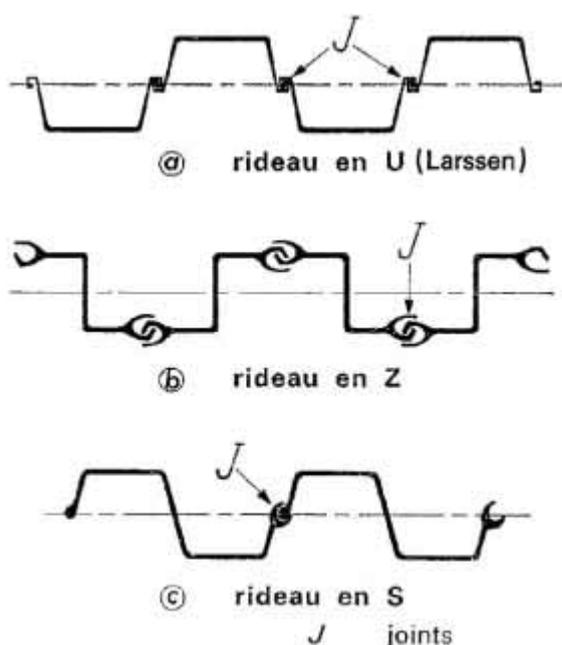


Fig. II.1. Les palplanches à module

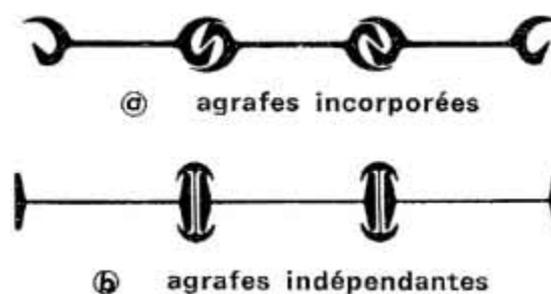


Fig. II.2. Les palplanches plates

III. Types de palplanches

A. selon la géométrie et la forme :

On trouve :

Palplanches en porte à faux

Palplanches avec étais ou ancrage

A.1: Palplanches en porte à faux

Les palplanches peuvent être construites en plusieurs types de matériaux (acier, aluminium, bois, béton armé, glass en fibre, vinyle, PVC etc.).

- Le choix de matériaux dépend des conditions de terrain et d'autres facteurs.
- La hauteur des palplanches en porte à faux est limitée entre 3 et 4 m.

a. Les palplanches en bois

A l'origine, les palplanches étaient réalisées en bois, il s'agissait de pieux faits de planches qu'on enfonçait en terre pour former un encaissement dans l'eau (palplanches).

La technique des écrans de soutènement consistant à opposer à la poussée des terres des éléments de structure fichés dans le sol et résistants à la flexion a fait, dans un premier temps, appel à des pieux en bois juxtaposés les uns aux autres de façon à constituer un écran continu.

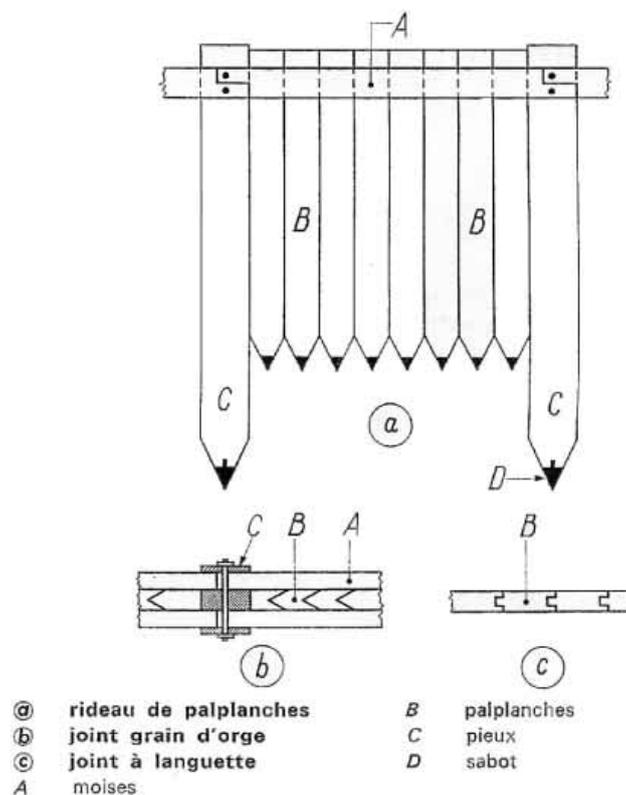


Fig. II.3. Palplanche en bois

L'évolution naturelle de cette technique a donc consisté à sophistication les joints entre les éléments successifs du soutènement. Les palplanches en bois, s'assemblant les unes aux autres en "grains d'orge" ou bien à l'aide d'un dispositif de rainures et languettes ou encore en faisant appel à un "clameau", se sont ainsi substituées aux pieux en bois initialement utilisés.



Fig. II.4. Rideau de palplanches en bois

b. Les palplanches en béton armé

C'est ainsi que, dès le début du XX^e siècle, les palplanches en béton armé ou en acier se sont inspirées des palplanches en bois.

L'emploi des palplanches en béton armé ne connaîtra pas de réel développement, du fait du poids de ces structures, de leur fragilité, des difficultés de battage qu'elles présentaient ainsi que des difficultés d'étanchement des joints entre palplanches.

c. Palplanches PVC

Les palplanches en PVC sont différentes des autres questions matériau et utilisation, En effet, la matière étant inerte, elle ne se dissout donc pas au contact de produits chimiques qui apparaissent souvent. De plus, les matériaux toxiques ne se répandent pas dans le sol ou dans l'eau. L'application du bois dur est de plus en plus impopulaire puisqu'elle menace les forêts tropicales. A cause de ses conservateurs nuisibles, ce bois appliqué devient dangereux pour l'environnement. Ainsi, on utilise de plus en plus des plantations adaptées pour installer des protections de rives naturelles sur des versants peu profonds. Lorsque cette solution n'est pas possible, on utilise des palplanches en PVC. Ces cas sont les suivants : les versants abrupts, la présence de courant fort et une grande profondeur d'eau.



Fig. II.5. Palplanche en PVC.

d. Palplanches métalliques:

Les premières palplanches métalliques sont apparues au début du XX^{ème} siècle grâce au développement de la sidérurgie.

❖ Définition:

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

❖ Caractéristiques :

Le poids au mètre linéaire varie selon le profil, de 20 à plus de 120 Kg et l'épaisseur de 5 à plus de 20 mm (chiffres indicatifs).

La longueur livrée varie de 1 à plus de 30 mètres.

Les principaux types de palplanches métalliques à module en forme de U, Z, caisson et de palplanches plates avec agrafes incorporées ou indépendantes. À quelques nuances de dimensionnement près, tous ces types de palplanches sont produits par les fabricants mondiaux, mais la forme et les performances des joints restent une de leurs principales particularités.

❖ Types de palplanches métalliques

Les palplanches métalliques sont obtenues par laminage à chaud ou profilage à froid :

(en U, Z, caisson) ;

▪ Palplanches Laminées à Chaud

Suivant Norme EN 10248, nuances S240GP à S430GP – longueurs jusqu'à 24 mètres.

Profils U

Type : VL601 à VL 606 – L600 à L607.N – L703 à L755 – L22 à L25 – SP-2W et SP-3W.

Type : AU14 à AU26 – PU6 à PU32 – GU6N à GU18-400.

Profils Z

Type : AZ12 à AZ50 – H122 à H3806.



Fig. II.6. Palplanches laminée à chaud.

▪ Palplanches Laminées à Froid

Suivant Norme EN 10249, nuances S235JR+AR à S355JR+AR et Q235B à MDB420.

Profils U

Type : PU6603 à PU8048.

Type : AU14 à AU26 – PU8R à PU22 – GU6N à GU18-400.

Type : WRU-7 à WRU45-750.

Profils Z

Type : PZC13 à PZC 38 – PZ7705 à PZ74412.

Type : WRZ12-650 à WRZ54-700.

Type : AZ12 à AZ50.



Fig. II.7. Palplanches laminées à froid.

Les palplanches profilées à froid présentent quelques avantages:

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

➤ Palplanches plates AS500

Elles sont destinées à la réalisation des cellules cylindriques retenant un massif de remblai. La stabilité des gabions ainsi constitués est assurée par leur poids propre. Les palplanches plates sont principalement utilisées dans le cas de l'horizon rocheux est très proche de la surface ainsi que dans les constructions où l'ancrage est difficile, voire impossible. En fonction des caractéristiques du projet et des particularités de site, elles sont assemblées à des gabions circulaires ou en gabionnades cloisonnées.

Les efforts qui se développent dans les palplanches sont essentiellement des efforts de traction horizontaux, ce qui nécessite des serrures présentant une résistance suffisante pour reprendre l'effort horizontal de l'âme.

La vérification de la résistance des palplanches nécessite de prendre en considération à la fois de la plastification de l'âme et le dégrafage des serrures.

Nous pouvons fournir les palplanches raccords nécessaires à l'assemblage des gabions entre eux. Lorsque l'angle de débattement dépasse $4,5^\circ$ (4° si $L > 20m$), il est possible d'employer les palplanches pliées pour réaliser des ouvrages de faible rayon.

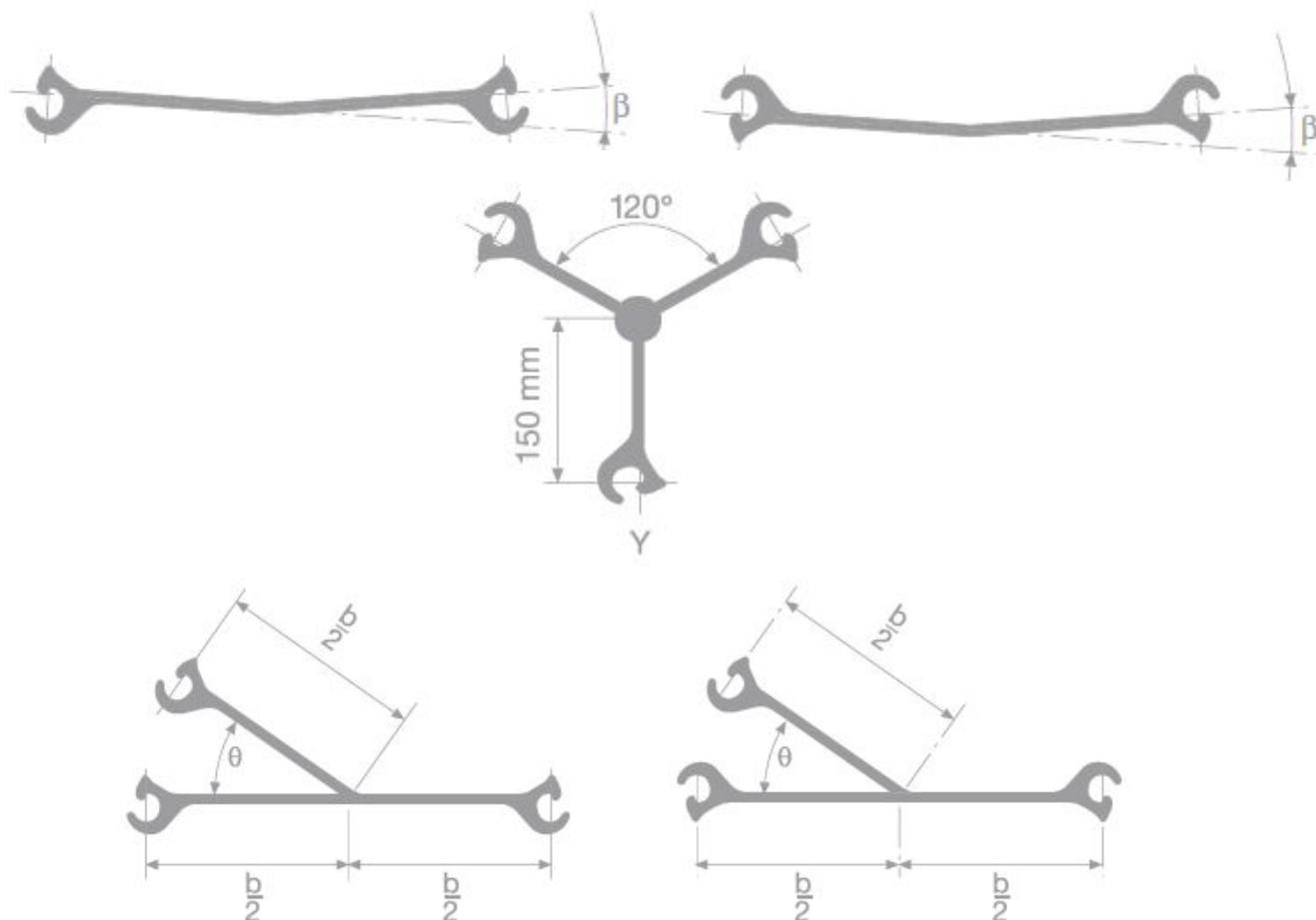


Fig. II.8. Les palplanches raccords et les palplanches pliées

❖ Raccords

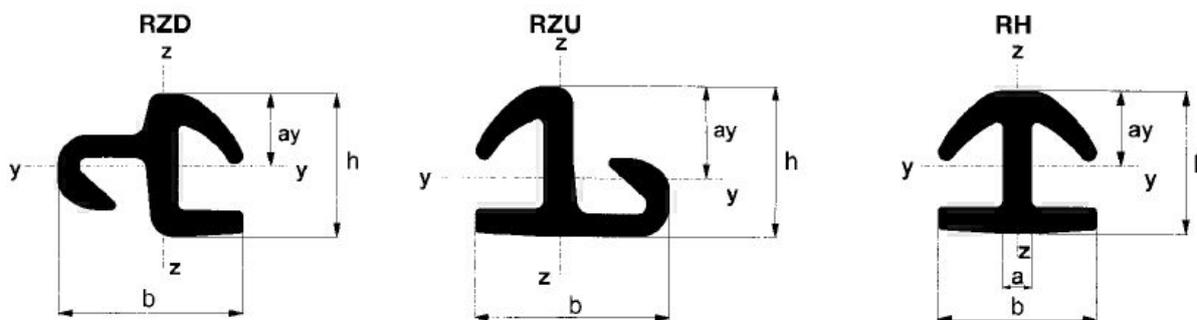


Fig. II.9. Types de raccords

➤ **Gabion en palplanches :**

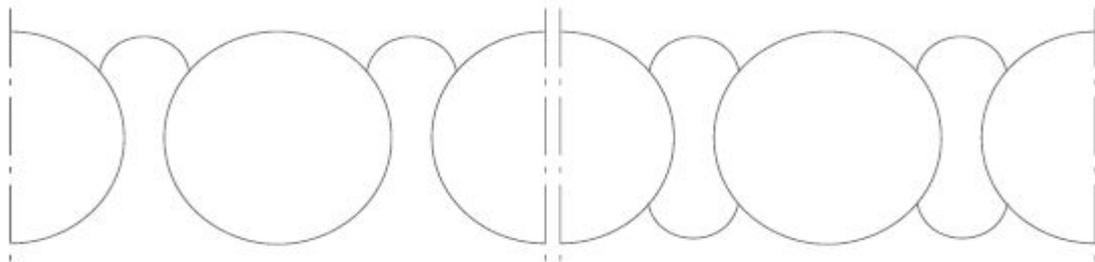


Fig. II.10. Gabions circulaires avec des palplanches raccords à 35°

La largeur équivalente W_e

$$W_e = \frac{\text{surface intérieure d'une cellule} + \text{surface dilimitée X(1ou2)arc(s)}}{\text{longueur utile du système } x}$$

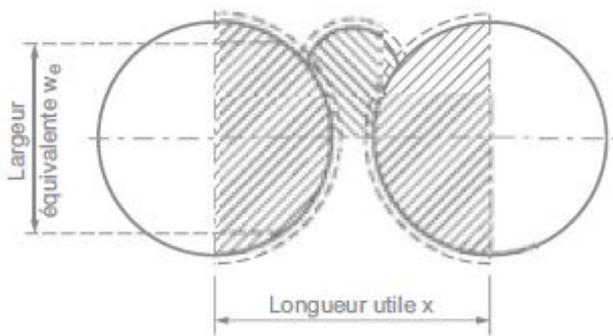


Fig. II.11. Gabions circulaires avec 1 arc

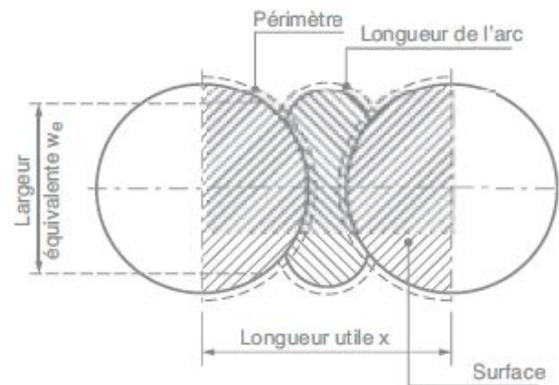


Fig. II.12. Gabions circulaires avec 2 arcs

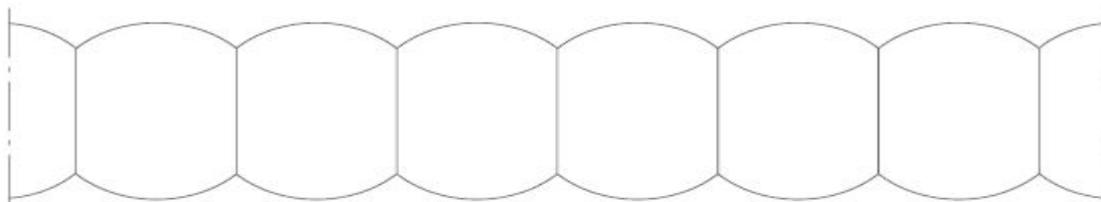


Fig. II.13. Gabions cloisonnés avec des palplanches raccords à 120°

La largeur équivalente W_e

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

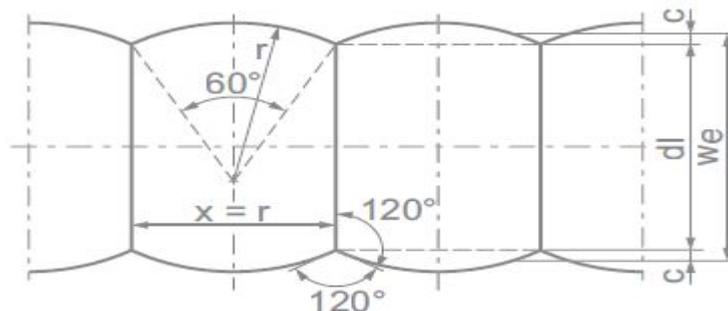


Fig. II.14. Gabion cloisonné



Fig. II.15. Gabions en palplanches

➤ **Rideaux mixtes (HZ/AZ)**

Le rideau HZ est un rideau mixte constitué :

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

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

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

Les palplanches intermédiaires remplissent quand à elles uniquement une fonction de soutènement et de redistribution des efforts. Elles peuvent être plus courtes que les éléments principaux de rideaux.

Selon la combinaison et la nuance d'acier retenues, le rideau HZ peut reprendre en toute sécurité des moments fléchissants allant jusqu'à 9000KNm/ml.

Ce chiffre donne une indication quand à l'éventail des applications pratiques du système HZ, application qui se caractérise par des efforts supérieurs à ce que des palplanches courantes peuvent supporter.

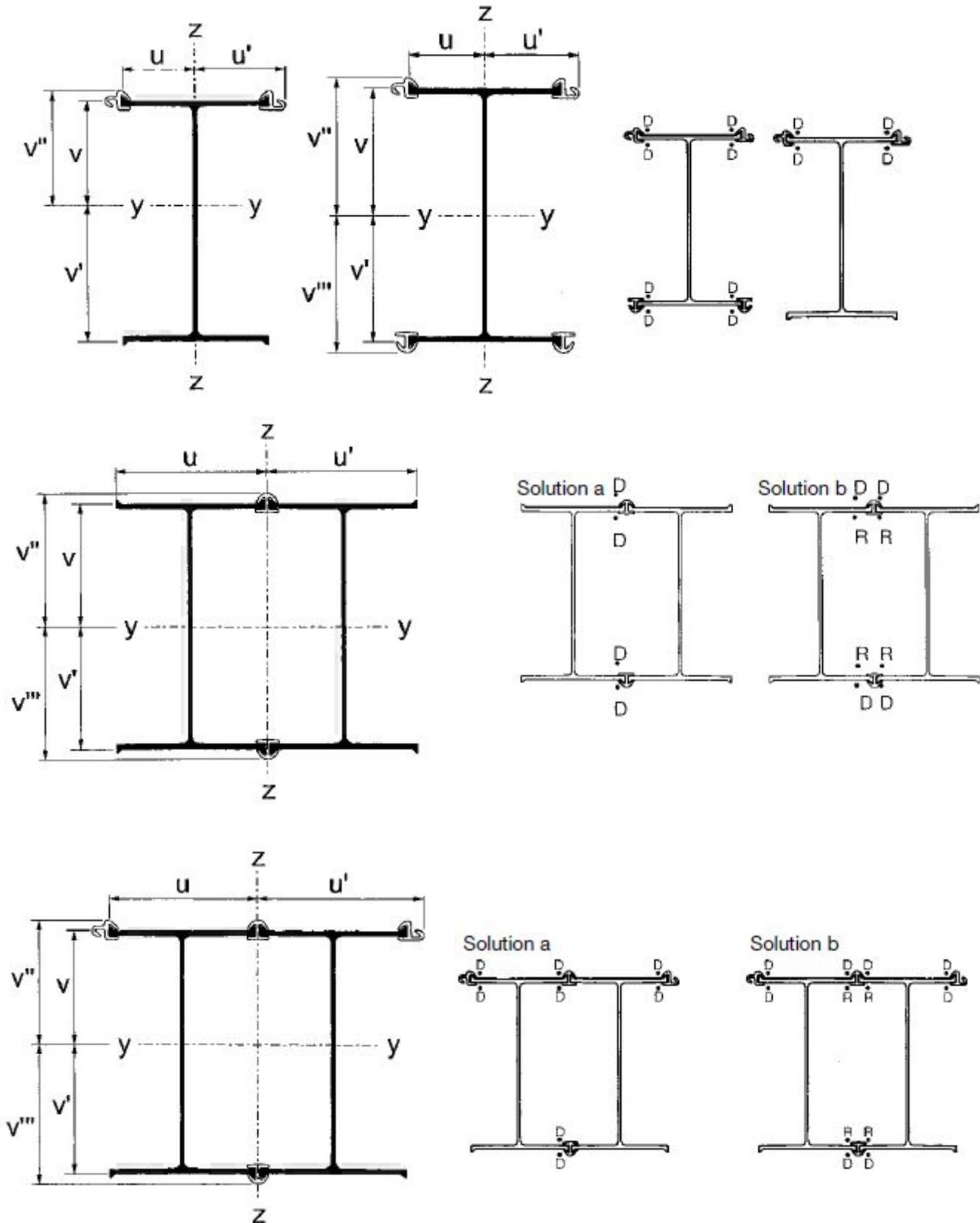
Les palplanches prennent la forme d'un arc de cercle à mesure que la pression augmente, se comportant alors comme une membrane (tension). Ceci conduit à une augmentation de la rigidité de la structure.



Fig. II.16. Rideaux mixtes (HZ/AZ)

➤ **Eléments simples (HZ)**

❖ **Possibilité d'assemblage.**



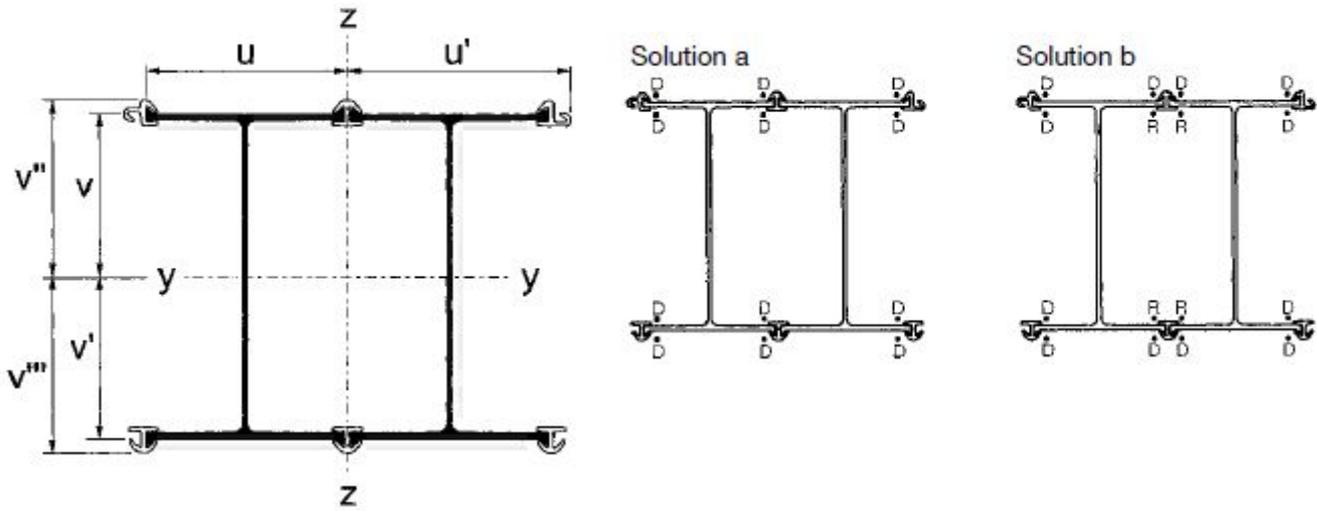
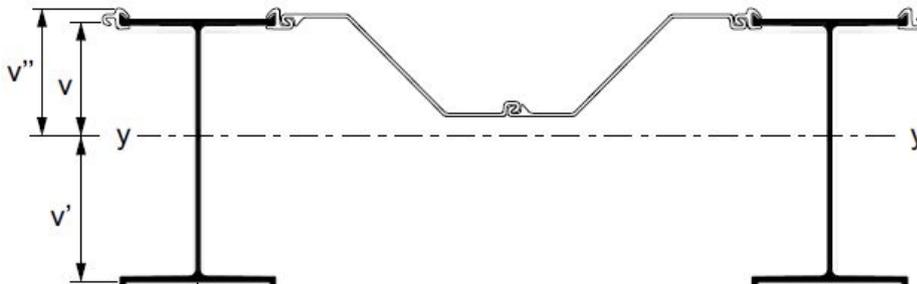


Fig. II.17. Assemblage des éléments de la structure

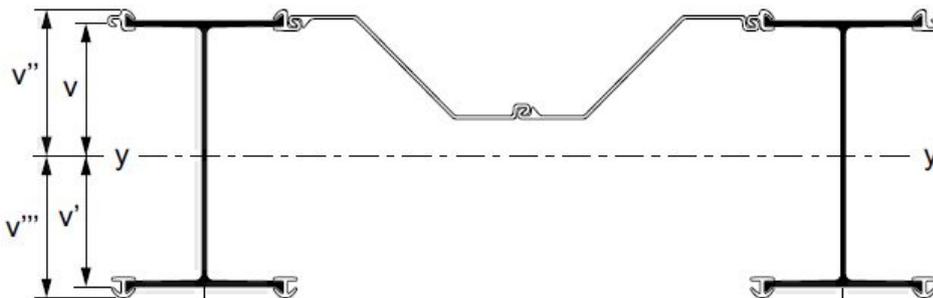
❖ **Combinaisons**

On distingue les combinaisons ci après:

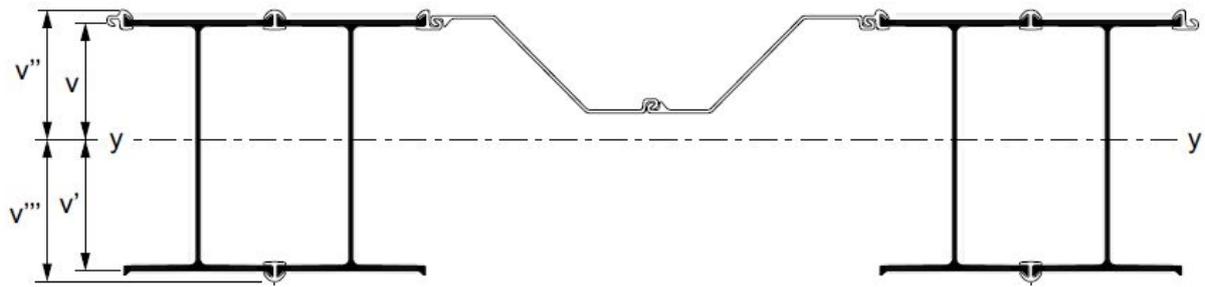
12/AZ 13



14/AZ 13



24/AZ 13



26/AZ 13

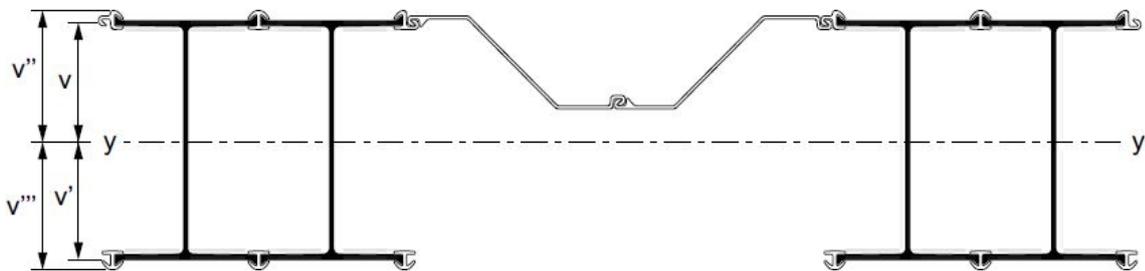


Fig. II.18. Combinaisons des éléments de la structure

IV. Les serrures

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



Fig. II.19. Serrure à la jonction de deux palplanches.

Les serrures ont initialement été réalisées en rapportant des éléments secondaires aux profilés principaux, la liaison étant obtenue par rivetage. Dans un deuxième temps la mise au point des procédés de fabrication permet d'usiner la serrure directement à partir du profilé principal.

1. Les différents types de raccordement

Les palplanches en acier vont par contre connaître un développement important. Initialement, elles ne différaient pas des profilés métalliques utilisés à d'autres fins et notamment en construction métallique.

Il s'agissait de profilés en I ou en U assemblés de sorte à constituer des écrans continus, le raccord étant constitué d'un profil en I dont les ailes avaient préalablement été recourbées. L'utilisation de telles palplanches restera marginale.

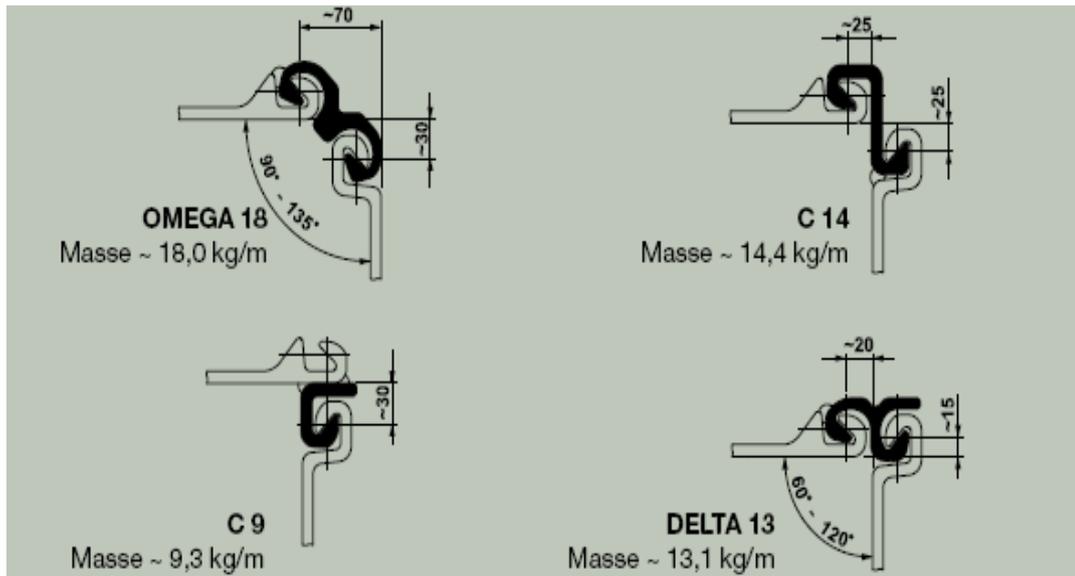


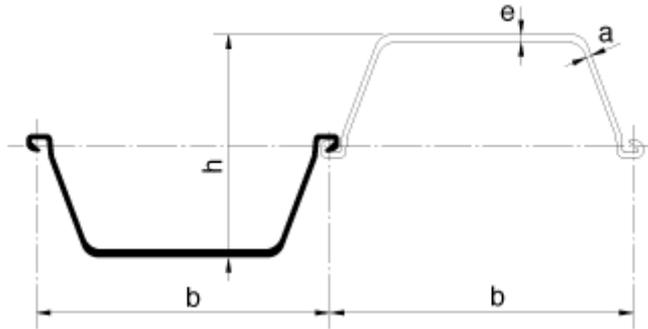
Fig. II.20. Différents types de raccords



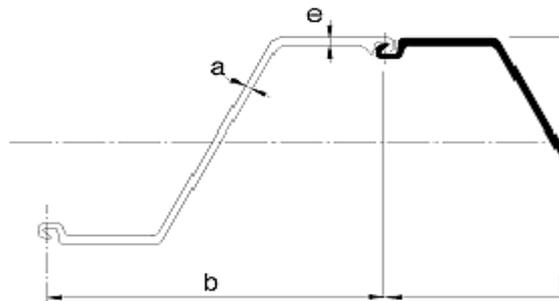
Fig. II.21. Raccordement Omega.

❖ Différents types de profilés :

2. Les différents types de profilés



• Profilés en Z



• Profilés plats

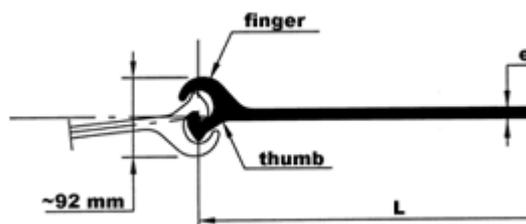


Fig. II.22.Serrure des différents profilés

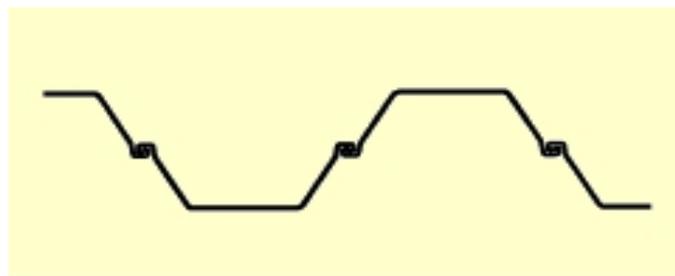


Fig. II.23.Jointure de plusieurs palplanches.

3. Application des profilés :

Les profilés en Z et en U sont utilisés pour supporter des charges de flexion. Les profilés plats sont utilisés pour supporter des charges de traction.

Les profilés en Z et en U peuvent être employés indépendamment ou combinés avec des pieux tubulaires ou des pieux HP pour les cloisons combinées.



Fig. II.24.Exemple d'application des profilés.

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

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

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

Tableau1 : Caractéristiques des palplanches.

V. Les éléments de rigidification :

1. Liernes

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

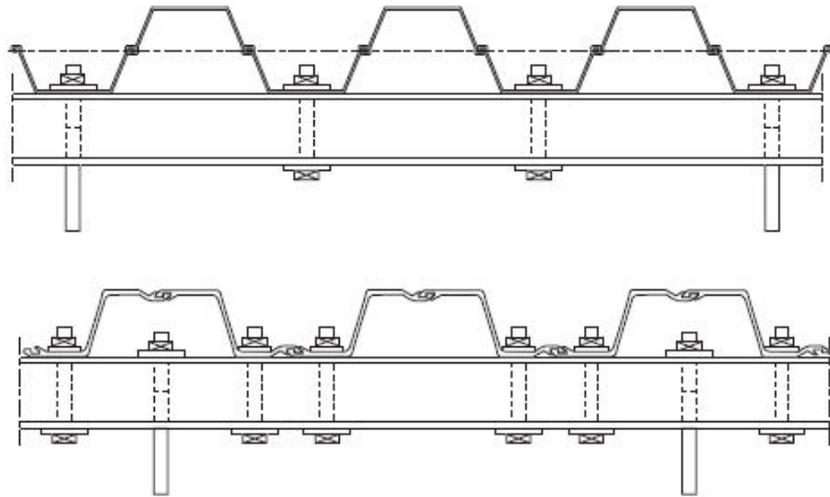


Fig. II.25. La disposition des liernes dans un rideau de palplanches.

2. Poutre de couronnement

Cette poutre assure plusieurs fonctions :

- Un élément de rigidification longitudinale de l'ouvrage ou chaînage.
- Transmettre des efforts au rideau de palplanches.
- Elle sert ainsi d'appui pour d'éventuel butons et constituer un élément architecturale de l'ouvrage.

3. Les appuis

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

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

Ainsi que la rigidité du sol de fondation et de l'écran, ainsi que la hauteur de la fiche déterminent d'une part la raideur de l'appui en fiche et, d'autre part, le type de l'appui

mobilisé, appui simple ou encastrement. La résistance au cisaillement de sol de fondation ainsi que la hauteur de la fiche déterminent pour leur part la valeur de l'appui mobilisable.

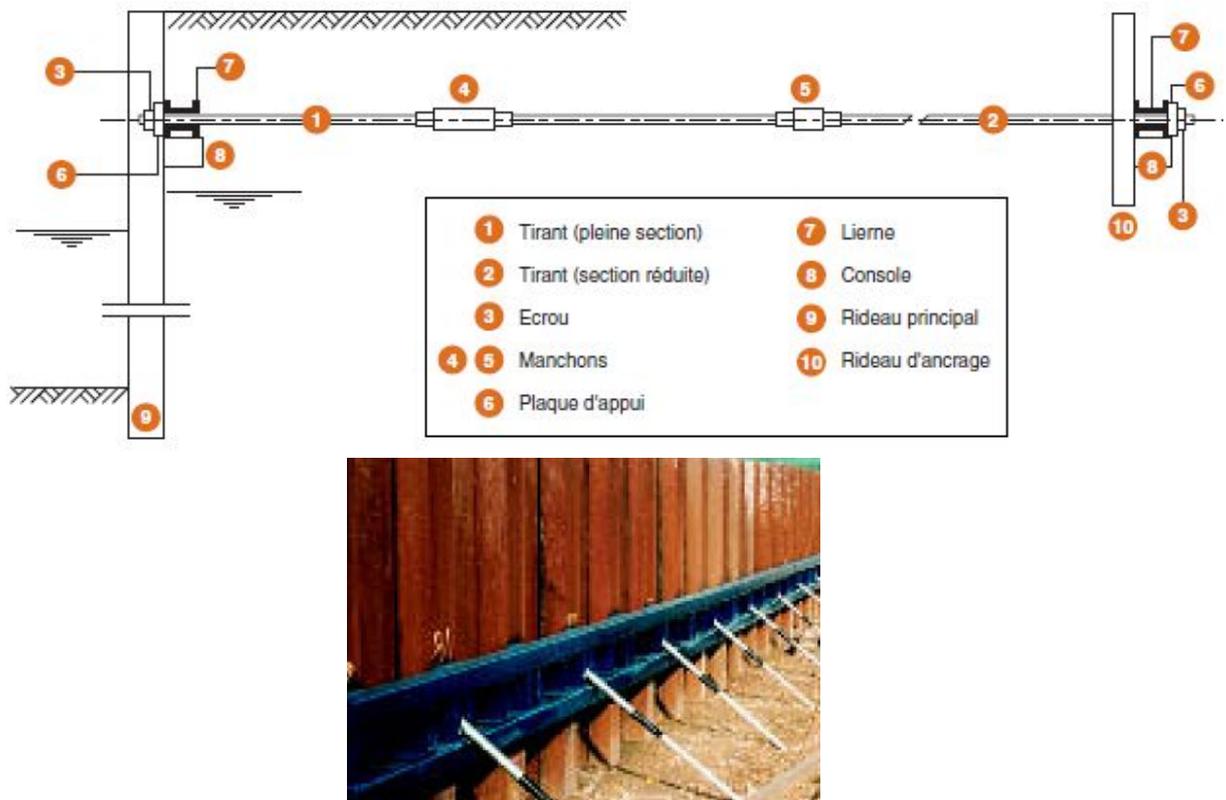


Fig. II.26. Schéma général d'un rideau de palplanches ancré en tête.

1: Principaux types de tirants passifs

A: Tirants de type remblayés

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

A.1: Par type d'ancrage

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

A.2: Par type de blocage

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

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

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

C: Tirants scellés ou forés

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

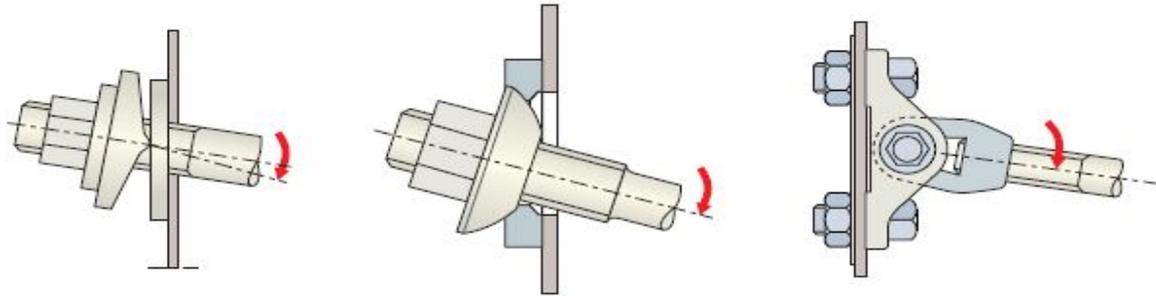


Fig. II.27. Attaches articulées

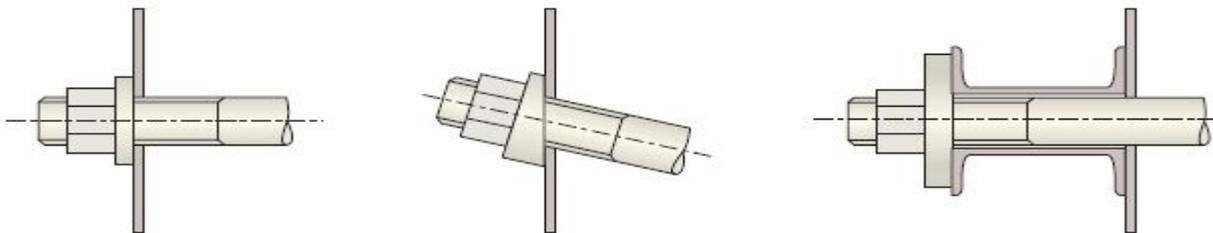


Fig. II.28. Attaches ordinaires

2: Tirants actifs

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

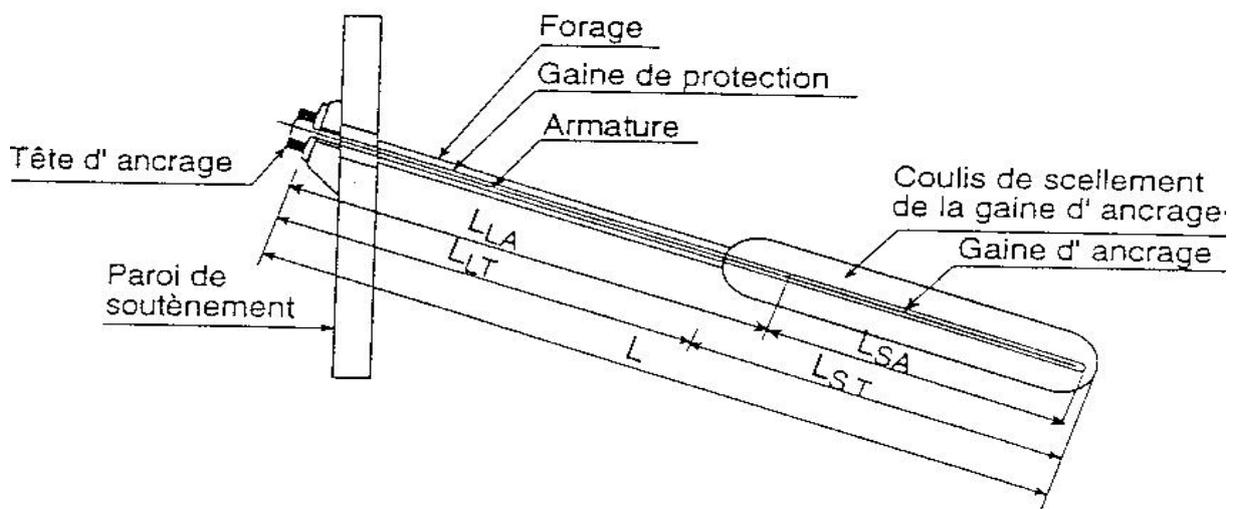


Fig. II.29. Schéma d'un tirant attaché à un écran de soutènement.

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

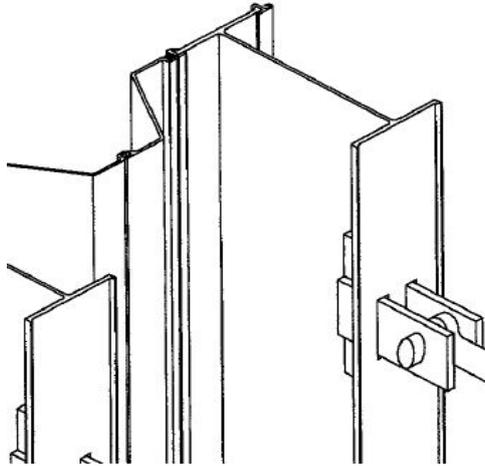


Fig. II.30. Détail de raccordement du profilé HZ

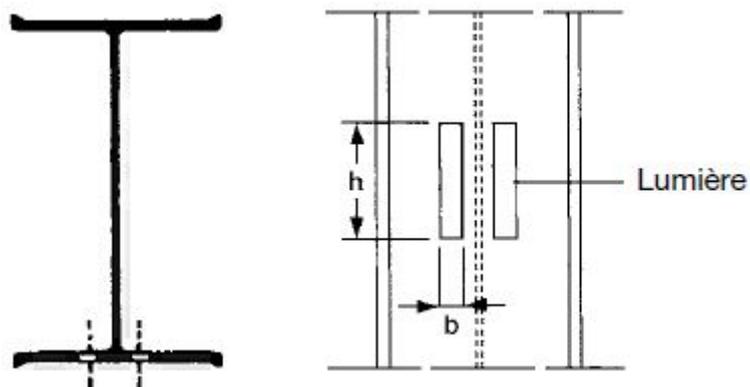


Fig. II.31. La lumière de raccordement.

4. Les boutons

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

VI. Domaine d'application

1. Palplanches en bois

Lorsque le terrain homogène et sans blocs les palplanches en bois sont plus économiques que les palplanches en acier ou en béton. Lors des dommages dus à la navigation, la grande élasticité du bois révèle des avantages importants par rapport au béton ou à l'acier, moins d'endommagement du bateau et absorber en partie l'énergie cinétique en cas de choc. Elles sont aussi utiliser :

- Pour protection de berge, dans les travaux de coffrage lors du blindage.
- Pour seuils déversoirs.
- Pour un système à lierne et un tirant.

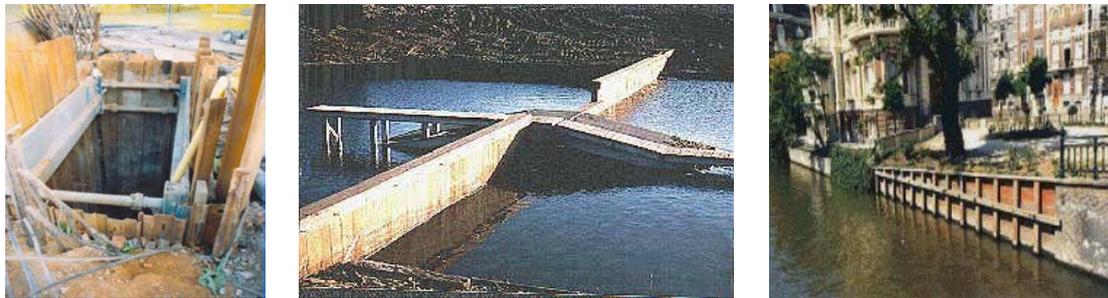


Fig. II.32.Exemples de l'utilisation de palplanches en bois.

2. Palplanches en PVC

Les palplanches en PVC sont utilisées à l'endroit où les bateaux sont amarrés et où une charge locale de la paroi peut apparaître. L'utilisation de ce type de palplanche reste limitée par rapport à celles de l'acier, mais elles présentent un avantage parlant du matériau, le vinyle par rapport aux matériaux alternatifs concerne la durée de fonctionnement combinée à une solution non polluante.



Fig. II.33.Exemple d'utilisation des palplanches en PVC.

3: Palplanches en acier

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

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

❖ Exemples d'utilisation des palplanches en acier

- palplanche en soutènement routier



Fig. II.34. Rideau partiellement fiché dans le sol.

- Quais d'accostage



Fig. II.35. Quai permettant l'accostage de superpétroliers.

- Construction d'une écluse.



Fig. II.36. L'utilisation des palplanches pour une écluse.

- Soutènement des talus.



Fig. II.37. Renforcement d'une digue anti crue.

- Batardeaux en rivière.



Fig. II.38. L'utilisation des palplanches comme batardeaux en rivière.

- Protection des berges en palplanches.



Fig. II.39. Deûle à Lambersart (Nord de la France).

- Cas de présence de la nappe.



Fig. II.40. Terrassement dans le batardeau



Fig. II.41. Fouilles en présence de nappe.

- Construction d'un nouveau barrage.



Fig. II.42. Chantier d'un barrage en travaux

- Utilisations provisoires.



Fig. II.43. Pose de canalisations.



Fig. II.44. En site industriel encombré.

- La réhabilitation du barrage.



Fig. II.45. Le grand barrage de Mont Saint Michel en France.

- Reconstruction d'un pont ferroviaire



Fig. II.46. Chantier d'une reconstruction d'un pont en utilisant des palplanches métalliques.

VII. Mise en œuvre des palplanches

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

1. Battage

A. Principe du marteau hydraulique

Pour les marteaux hydrauliques, un cycle d'opération débute par la levée de la masse frappante monobloc. La soupape P positionnée sur le circuit de pression est ouverte et la soupape R placée dans le circuit de retour est fermée. Une fois que la course de levage prééglée, en fonction de l'énergie souhaitée, est atteinte alors le fonctionnement des soupapes s'inverse. La masse est alors libérée. Après l'impact, le cycle se répète automatiquement.

La masse frappante est guidée en haut et en bas. Grâce au gaz pressurisé, le marteau peut fonctionner sous toutes les inclinaisons, même horizontalement. A chaque impact, la masse frappante percute une enclume. Elle est la pièce maîtresse, pour le transfert de l'énergie, du casque de battage qui a différentes formes en fonction du type de palplanche à mettre en fiche.

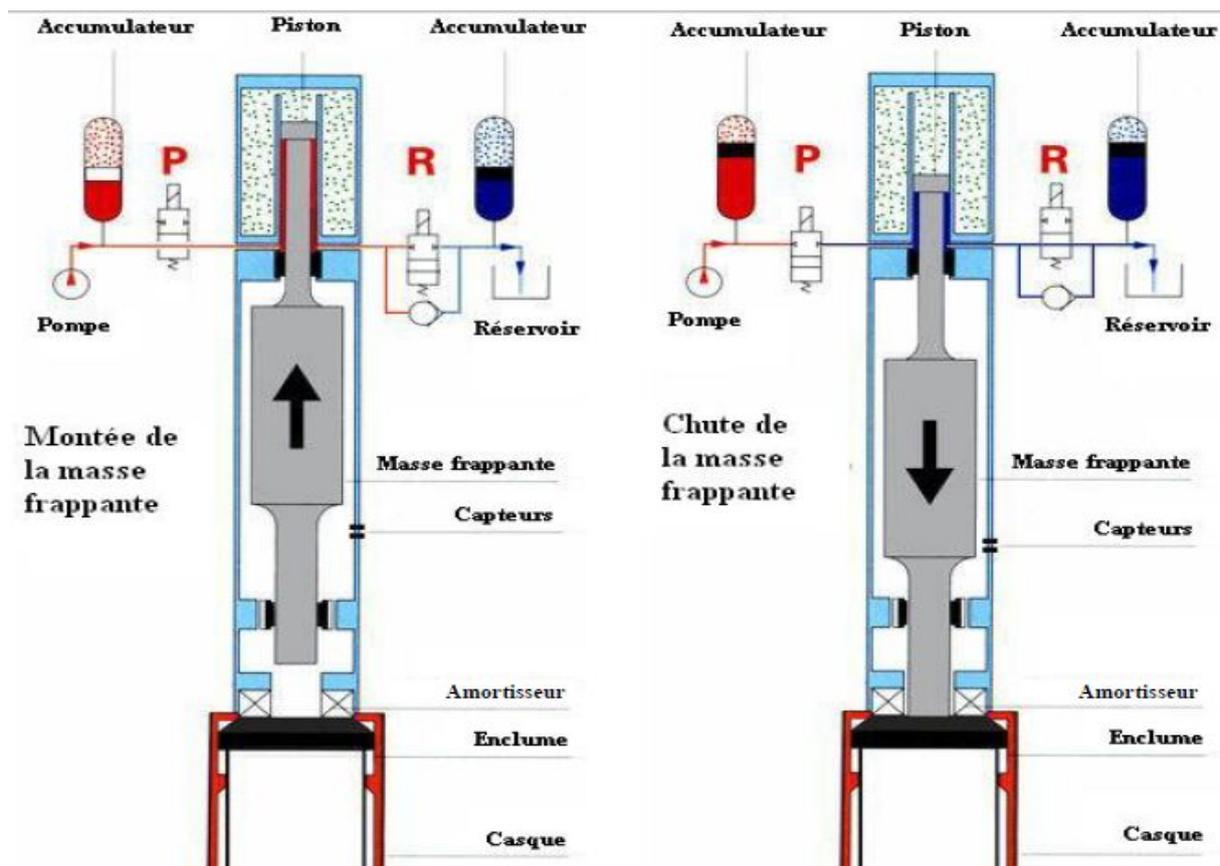


Fig. II.47.Principe de fonctionnement du marteau hydraulique (brochure IHC).

B. Matériels

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

B.1. Systèmes de guidage

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

B.1.1. Mât de battage

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

B.1.2. Guide de battage

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

B.1.3. Moutons ou marteaux

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

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



Fig. II.48. Chantier de battage.

2. Vibrofonçage

A. Principe

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

La vibration est générée par des balourds de masse m ou masses excentriques, en nombre pair, tournant à la même vitesse, mais en sens opposés, de sorte que les composantes horizontales (Fh) de la force centrifuge (Fc) s'annulent. La résultante est une force verticale (Fv) d'intensité sinusoïdale.

Actuellement, les masses excentriques sont entraînées par des moteurs hydrauliques, alimentés par une centrale à débit variable. La motorisation hydraulique présente de nombreux avantages tels qu'un bon rapport poids et la puissance, une grande souplesse d'utilisation avec des performances élevées et des possibilités de réglage de la vitesse de rotation et donc de la fréquence des masses excentriques. Selon le vibreur hydraulique, les masses excentriques tournent à des vitesses comprises entre 1200 et 3000 t/mn, soit des fréquences de 20 à 50 Hz.

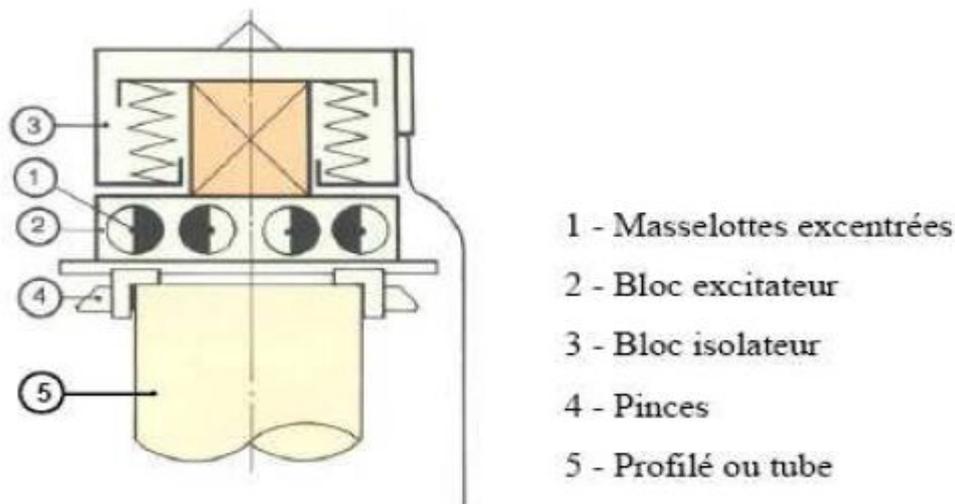


Fig. II.49.Principe mécanique du vibreur.

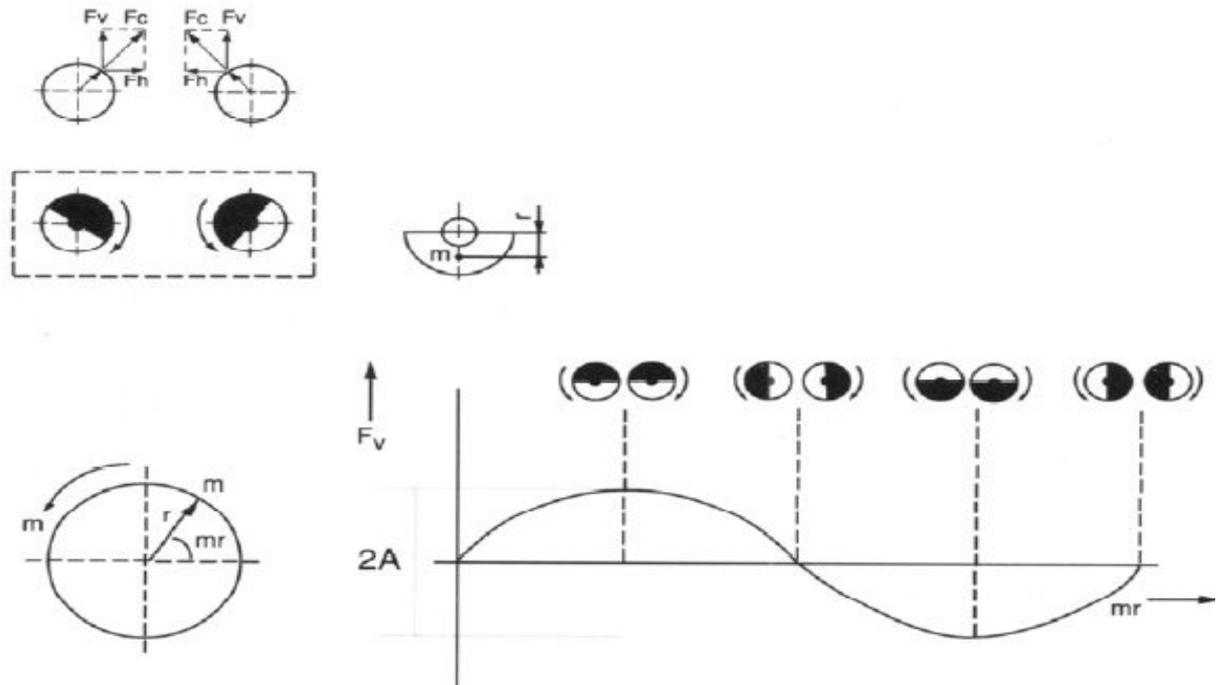


Fig. II.50.Principe de fonctionnement d'un vibreur (brochure ICE).

B. Matériels

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

- 1 vibreur hydraulique : les vibreurs sont alimentés par un groupe hydraulique, il est constitué d'un boîtier vibrant, d'un étrier de suspension, d'un casque, et d'une masse statique. Il existe 2 types de vibreur :

Vibreur à moment fixe adapté pour les palplanches et les profilés de grandes dimensions en conditions difficiles.

Vibreur à moment d'excentricité qui fonctionne avec un déphasage des masses excentriques, lors des phases de démarrage et d'arrêt, il peut être piloté par un ordinateur pour permettre de contrôler l'excentricité. Les vibreurs et les marteaux hydrauliques peuvent être utilisés aussi bien en site terrestre, à l'air libre, qu'en site aquatique sous l'eau.

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

• Types de Mise en Fiche

-Pelle Mécanique pour sol sableux, terre marécageuse ou vaseuse.

-Vibrofonçage pour sol moyen de type Limon, Sable, Grave.

-Marteau permettant la pénétration dans les sols durs de type Marne.

-Brise Roche avec guide ou palplanche acier jumelé dans des sols difficiles.



Fig. II.51. Un guide de contrôle



Fig. II.52. Perforage avant fonçage

3. Mise en place par presse hydraulique

A. Principe

Ce système est plus lent que les systèmes de vibrofonçage et battage. Il peut rencontrer quelques difficultés dans les terrains durs. Les trois premières palplanches doivent être mises en place grâce à un gabarit conçu spécialement pour la presse. Ensuite cette presse s'auto porte de palplanche en palplanche et assure sa stabilité en s'accrochant sur les trois dernières palplanches mises en place. En s'appuyant sur les trois dernières palplanches par des mouvements répétitifs, la presse enfonce la totalité de la palplanche.

Le procédé pour l'extraction des palplanches est identique que la mise en place, la presse soulève par étapes les palplanches les unes après les autres. Son avantage est : Peu de nuisances sonores et pas de vibration.

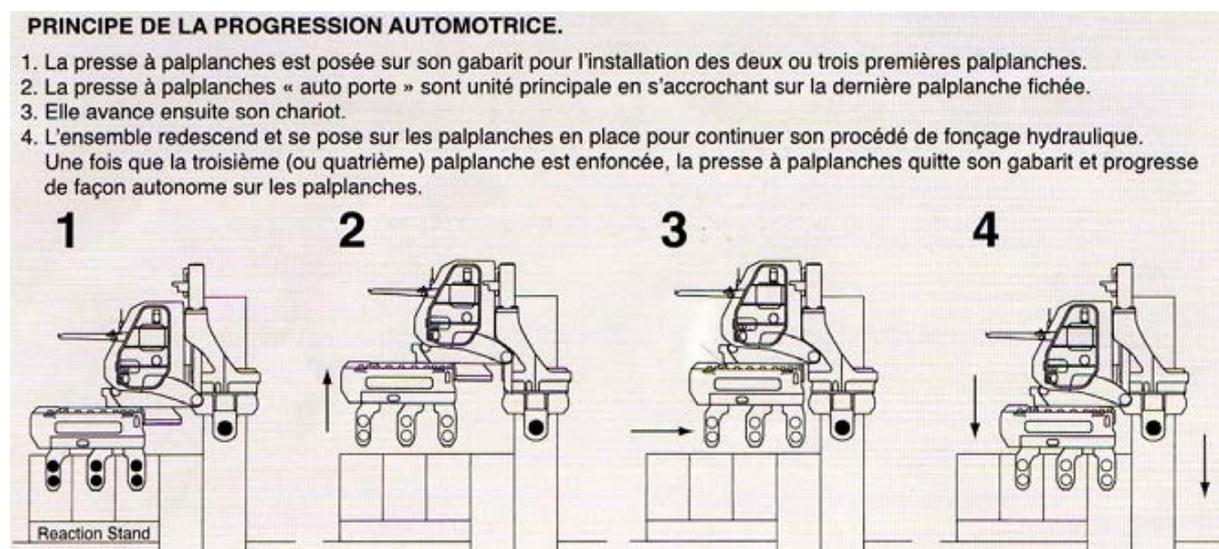


Fig. II.53. Principe de la presse hydraulique.

B. Matériels

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



Fig. II.54. La presse hydraulique

VIII. Enclenchement d'un rideau de palplanches

Cette opération consiste à enclencher la palplanche à 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.

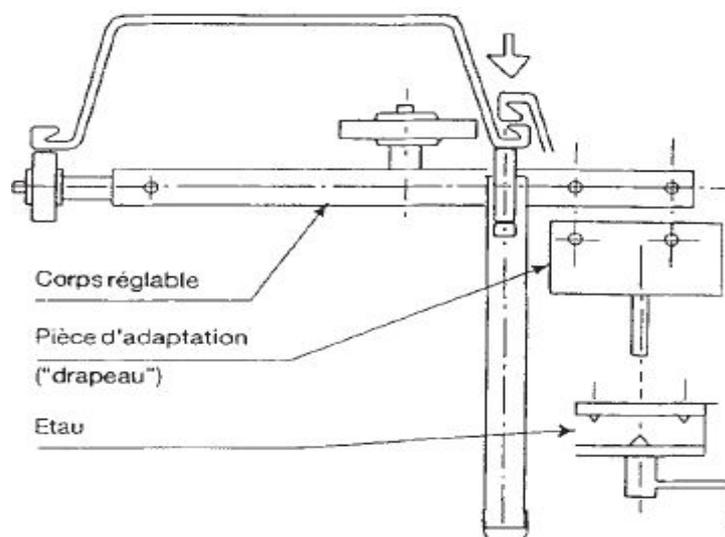


Fig. II.55. Enclencheur automatique.

IX. L'arrachage des palplanches

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

X. Reçepage des palplanches

Le reçepage consiste à découper la tête des profilés de manière à les aligner à la hauteur voulue. Tout reçepage supérieur à 20cm doit faire l'objet d'un examen des relevées d'enfoncement afin de vérifier que la fiche prévue a été atteinte.

Les opérations d'oxycoupage doivent être réalisées par une personne qualifiée. L'élément à couper doit être maintenu par l'engin de levage jusqu'à sa découpe complète. Afin qu'il ne se balance pas, il convient d'assurer sa stabilité par des points d'attache.

XI. Principaux étanchements des palplanches

On distingue deux types d'étanchement :

❖ Etanchement vertical

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

a. Produit hydrocarboné mis en œuvre à chaud

a. 1. Conditions d'application

Le comportement de ce produit lors de sa mise en œuvre sous certaines conditions est résumé ci après :

- application sur métal -10°C à $+70^{\circ}\text{C}$.
- durcissement sous pluie.
- séchage sous UV.

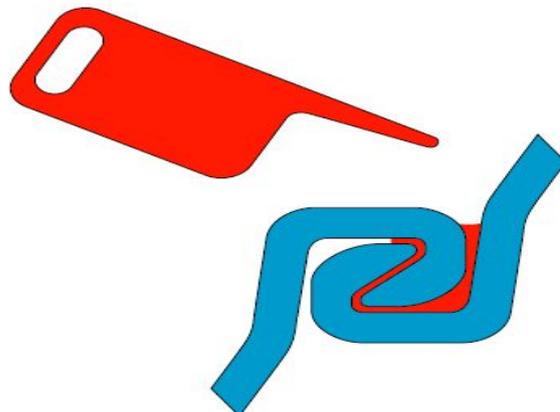


Fig. II.56. Remplissage des serrures enclenchées avec un produit hydrocarboné.

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

- application sur métal humide.
- polymérisation sous UV.

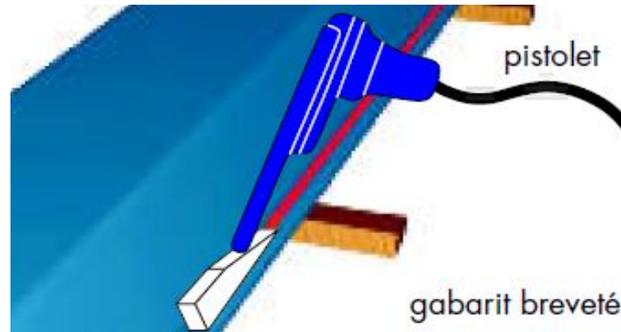


Fig. II.57. Illustration de la mise en œuvre du produit hydro gonflant.

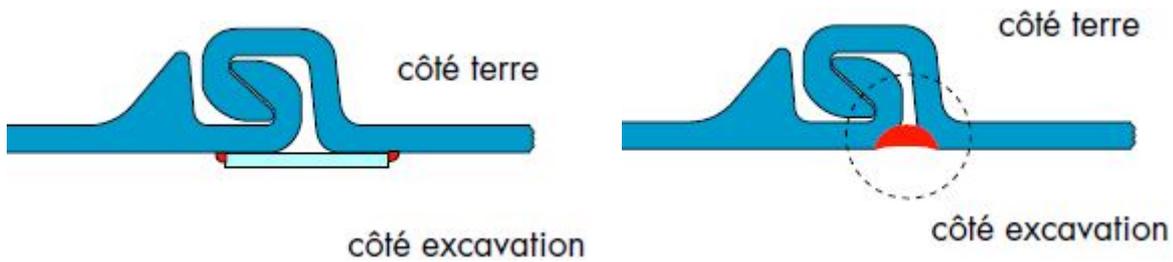
c. Soudure

Fig. II.58. Etanchement avec la soudure.

d. Rideau de palplanches combiné avec une paroi bentonite ciment

Fig. II.59. Etanchement avec combinaison bentonite ciment.

e. Réparation des défauts d'étanchement dans les serrures

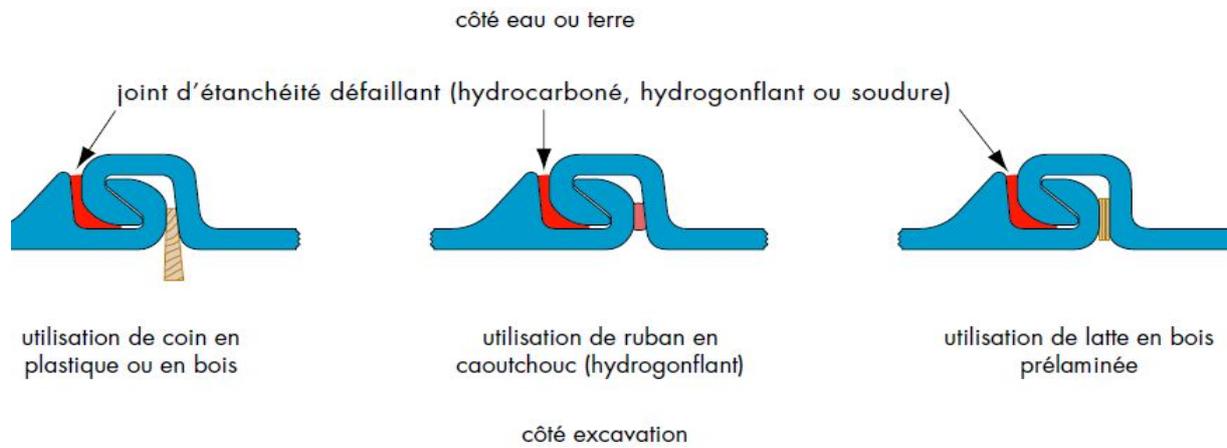


Fig. II.60. Illustration de la réparation des défauts d'étanchement dans les serrures.

f. Etanchement par installation d'un système de drainage

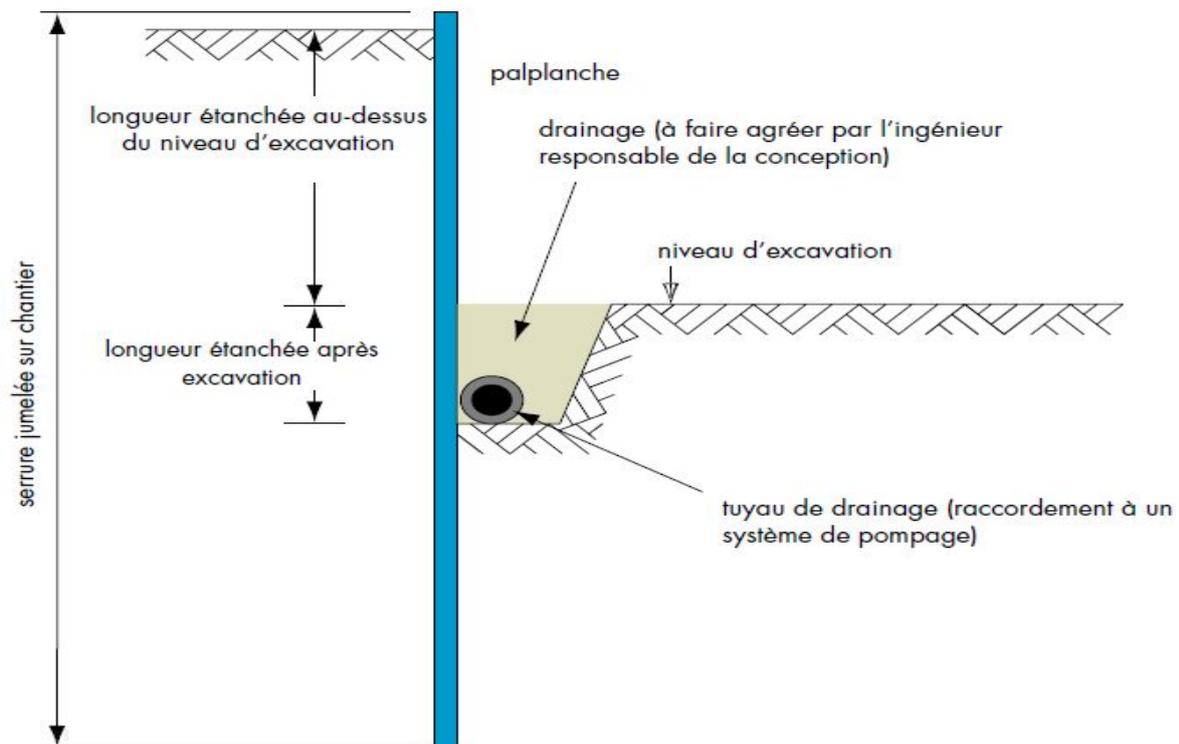


Fig. II.61. Installation d'un système de drainage.

g. Etanchement avec Arcoseal.

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

h. Etanchement avec wadit

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

❖ Etanchement horizontal

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

A: L'étanchéité avec la dalle de couverture

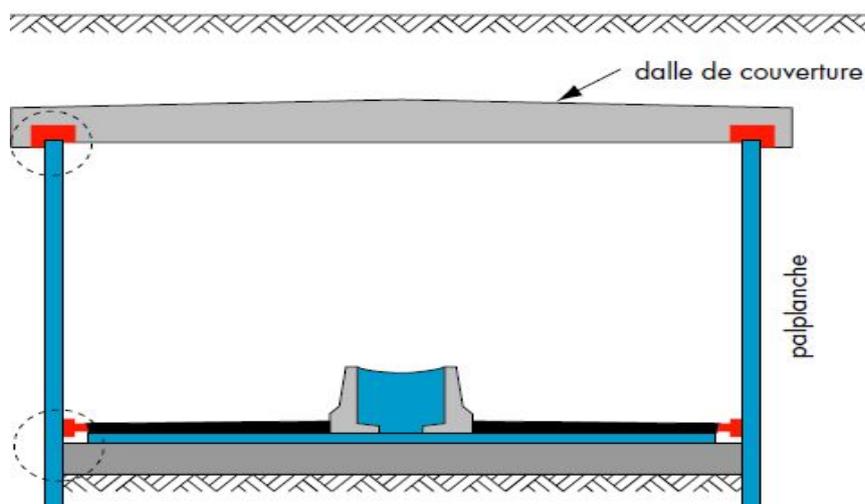
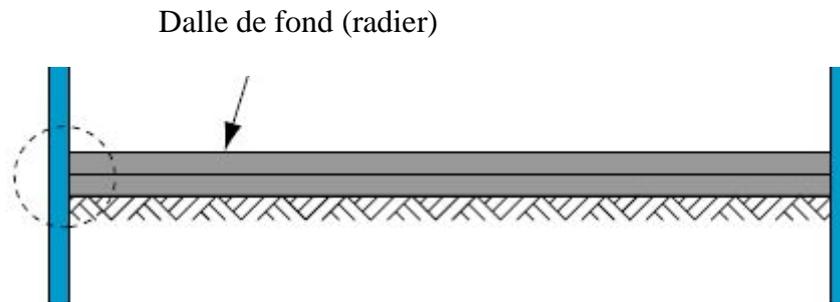


Fig. II.62. Etanchement horizontal dans le cas d'un tunnel ou une structure enterrée.

B: L'étanchéité avec la dalle de fond.**Fig. II.63. Etanchement d'une fouille avec un radier.****Avantage :**

Les palplanches en acier présentent des avantages exceptionnels qui en font l'un des plus importants matériaux de construction : solidité, élasticité, pérennité, facilité et rapidité de mise en œuvre.

Inconvénient :

Le défaut des palplanches en acier est la corrosion.

XII. Corrosion des palplanches

La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant. Elle entraîne souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, ou de son environnement, ou les deux au même temps.

Pour l'acier, la corrosion se traduit par la formation de rouille. Ce produit composé d'oxydes plus ou moins hydratés ne se forme qu'en présence d'oxygène et d'eau à température ordinaire. Cette corrosion est dite aqueuse.

a. Le milieu corrosif

Les milieux corrosifs les plus courants sont l'atmosphère, le sol et l'eau.

L'eau de mer et l'eau douce sont suffisamment chargées en sels pour être des éléments actifs des piles de corrosion, au contact de l'acier nu. L'eau de pluie et l'eau de condensation de l'humidité atmosphérique ne sont pas chargées de sel et leurs conductivités électriques sont faibles. Cependant, lorsque l'atmosphère contient des impuretés telles que du dioxyde de soufre (SO_2), du dioxyde de carbone (CO_2), des chlorures en bord de mer, et autres composés, l'eau de pluie ou de condensation s'en trouve chargée, devient conductrice et, par suite, peut favoriser la corrosion.

L'eau étant un des éléments nécessaires à la corrosion, il est évident que les structures en acier exposées à l'atmosphère, occasionnellement au contact de l'eau (pluie, condensation), subiront une corrosion moindre que celles constamment ou surtout alternativement immergées et émergées.

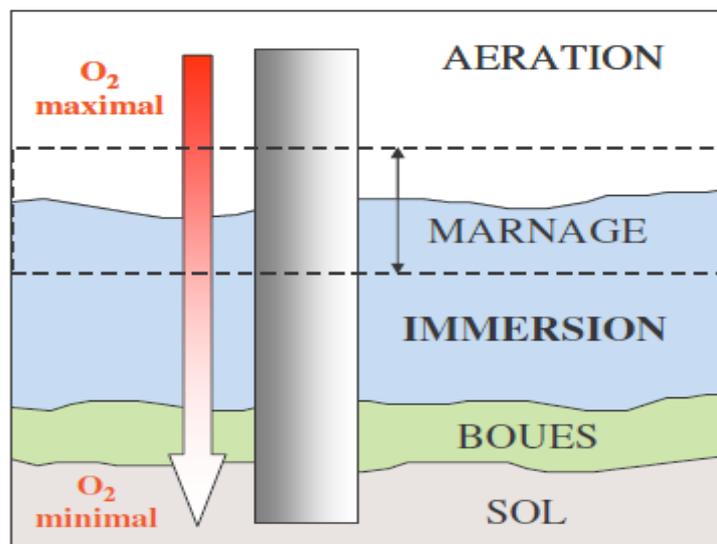


Fig. II.64. Élément métallique dans l'environnement marin.

b. La perte d'épaisseur

La perte d'épaisseur provoquée par la corrosion atmosphérique peut être prise égale à $[0,01]$ mm par an en atmosphères normales, et à $[0,02]$ mm par an dans les emplacements proches de la mer. Si l'agressivité du sol ou de l'eau est différente sur les côtés opposés d'un rideau de Palplanches, deux taux de corrosion différents peuvent être appliqués.

Durée de vie de calcul exigée	5 ans	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Sols naturels intacts (sable, limon, argile, schiste, ...)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Sols naturels pollués et terrains industriels	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Sols naturels agressifs (marais, marécages, tourbe, ...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Remblais non compactés et non agressifs (argile, schiste, sable, limon, ...)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Remblais non compactés et agressifs (cendres, scories, ...)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

NOTES :

- 1) Les taux de corrosion dans les remblais compactés sont inférieurs à ceux observés dans les remblais non compactés. Dans les remblais compactés, il convient de diviser par deux les chiffres du tableau.
- 2) Ces valeurs sont données uniquement à titre indicatif. Il convient d'étudier les conditions locales car elles peuvent affecter le régime de corrosion réel, qui peut être supérieur ou inférieur à la valeur moyenne donnée dans le tableau.
- 3) Les valeurs données pour 5 ans et 25 ans sont basées sur des mesures, tandis que les autres valeurs sont extrapolées.

Tableau.2. Perte d'épaisseur [mm] provoquée par la corrosion pour les pieux et les palplanches mis-en Place dans les sols, avec ou sans nappe phréatique.

Durée de vie de calcul exigée	5 ans	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Eau douce ordinaire (rivière, canal navigable, ...) dans la zone d'attaque élevée (ligne d'eau)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Eau douce très polluée (égouts, effluent industriel, ...) dans la zone d'attaque élevée (ligne d'eau)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Eau de mer sous climat tempéré dans la zone d'attaque élevée (basses eaux et zones de clapotis)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Eau de mer sous climat tempéré dans la zone d'immersion permanente ou dans la zone de marnage	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50

NOTES :

- 1) Le régime de corrosion le plus élevé se trouve habituellement au niveau de la zone de clapotis ou à l'emplacement du niveau des eaux à marée basse. Cependant, dans la plupart des cas, les contraintes les plus élevées se situent dans la zone d'immersion permanente, voir Figure 2.1.
- 2) Ces valeurs sont données uniquement à titre d'indication. Il convient d'étudier les conditions locales car elles peuvent affecter le régime de corrosion réel, qui peut être supérieur ou inférieur à la valeur moyenne donnée dans le tableau.
- 3) Les valeurs données pour 5 ans et 25 ans sont basées sur des mesures, tandis que les autres valeurs sont extrapolées.

Tableau.3. Perte d'épaisseur [mm] provoquée par la corrosion pour les pieux et les palplanches mis-en place dans l'eau douce ou dans l'eau de mer.

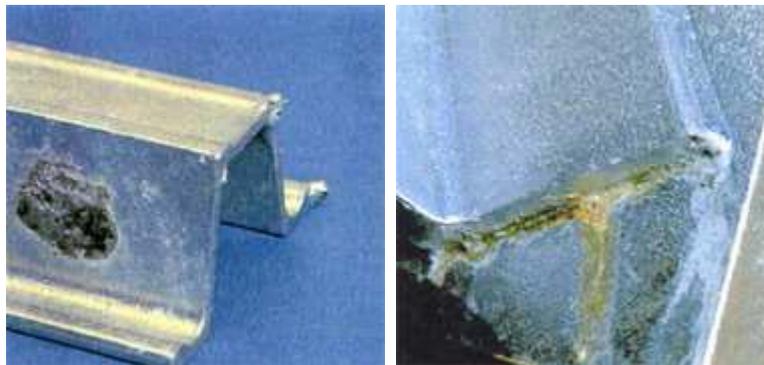


Fig. II.65.Exemples de Problèmes courants.

XIII. La protection contre la corrosion.

La durée de protection est principalement fonction de l'épaisseur de la couche de galvanisation.

Les trois facteurs les plus déterminants, de cette épaisseur, sont :

- ✚ L'épaisseur de paroi de l'acier : les épaisseurs minimales locales et moyennes en fonction de l'épaisseur de l'acier sont données par la norme de galvanisation.

- ✚ La composition de l'acier : plus particulièrement sa teneur en silicium et en phosphore.

Ces dernières déterminent la « réactivité » de l'acier vis-à-vis du zinc fondu.

Les aciers réactifs donnent des couches épaisses de couleur gris terne présentant un aspect rugueux et irrégulier.

- ✚ Rugosité de l'acier : un acier dont la surface est fort rugueuse présente une surface spécifique importante et réagira dès lors de manière plus violente avec le zinc fondu.

La protection contre ce phénomène est variée, la plus courante c'est la protection cathodique.

XIV. Conclusion

Les palplanches métalliques sont très couramment utilisées aujourd'hui pour la réalisation d'ouvrages provisoires et définitifs.

Dans ce chapitre, on a présenté les éléments constituant l'ensemble d'un rideau de palplanches. Ensuite on a donné le type, l'utilisation et la mise en œuvre d'un 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.

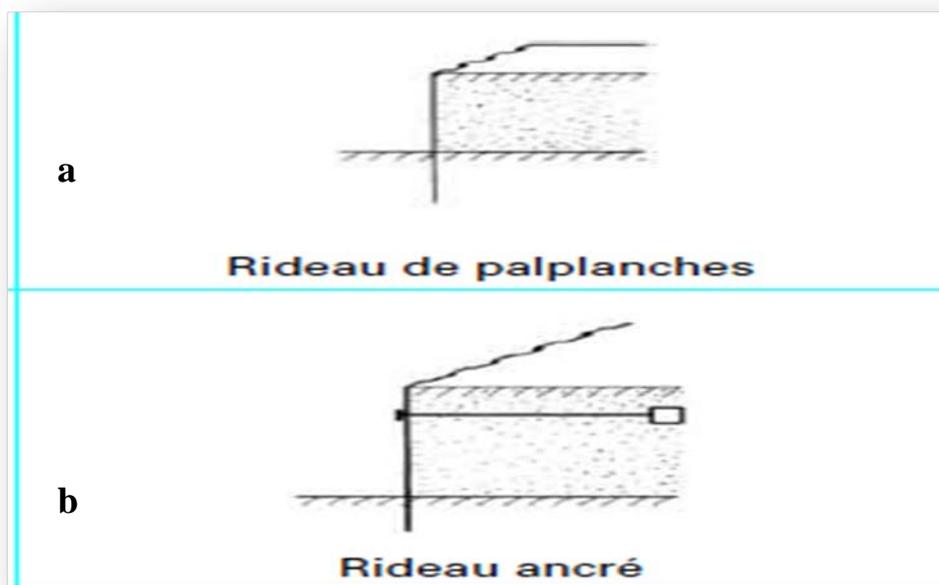
Cet exposé nous permet de conclure que l'application des rideaux mixtes est plus avantageuse, il se caractérise par des efforts supérieurs à ce que des palplanches courantes peuvent supporter. Mais le comportement de la palplanche est conditionné par le comportement du sol en contact avec la structure.

I. Introduction

Afin de comprendre l'interaction sol-structure et le comportement d'un écran de soutènement en contact avec le massif du sol, on commence par une présentation des schémas de rupture éventuelle exigés par L'Eurocode 7.

On passe ensuite aux méthodes de calcul couramment utilisées pour la stabilité externe. L'exposé de ces méthodes est indispensable pour bien illustrer leur fonctionnement ainsi que les notions de poussée et de butée.

II. La palplanche dans le sol



**Fig. III.1. Modèle : a) rideau sans tirant d'ancrage
b) rideau ancré dans le sol.**

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

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

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

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

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

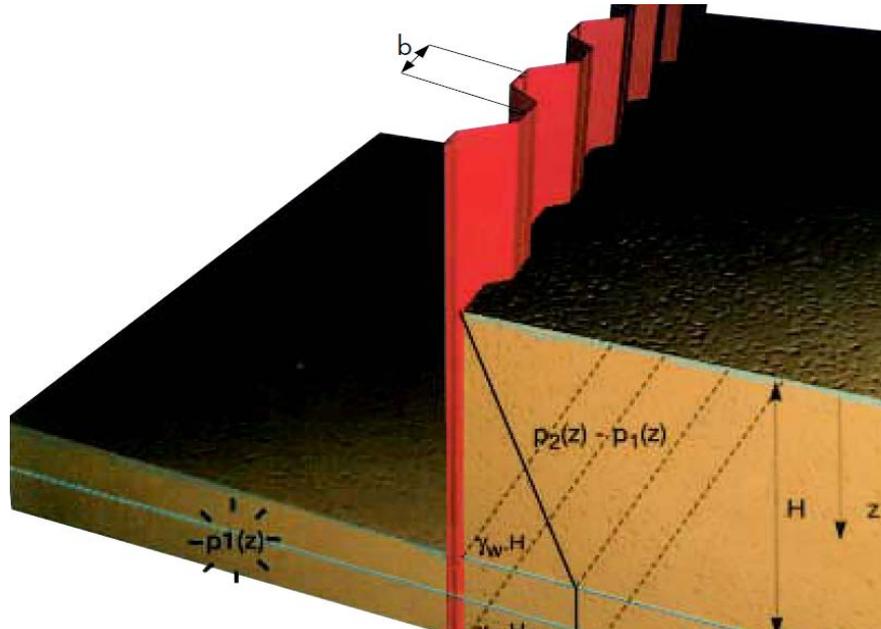


Fig. III.2. Palplanche ancrée dans le sol.

On distingue deux parties :

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

$$p(z) = k(y) \cdot \sigma_z = k(y) \cdot \gamma_z$$

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

-partie 2 (partie fiche):

$$P(z) = k_a(y) \cdot \gamma(Z-H) - k_p(y) \cdot \gamma \cdot (Z-H)$$

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

-L'équilibre de la poutre :

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

I : moment d'inertie de la palplanche.

L'équilibre de la palplanche (poutre) peut s'écrire:

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

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 successives. [Melbouci 2009].

De plus les méthodes utilisées sont basées sur des hypothèses simplificatrices déduites de l'observation expérimentale.

Les méthodes de calcul des écrans de soutènements sont de trois types :

- méthode aux états limites.
- méthode aux coefficients de réactions.
- méthode des éléments finis.

▪ **méthode aux états limites :**

Sans interaction avec la structure, le sol est considéré à l'état d'équilibre limite (méthodes aux états limites). Elles ont une solution analytique dans les cas simples. Elles supposent que la pression normale $p(z)$ apportée par le sol est proportionnelle à la contrainte normale verticale, quant à elle, égale au poids des terres, avec un coefficient K ne dépendant que du déplacement $y(z)$ du rideau au niveau considéré :

$$\text{pour } z \leq H : \quad p(z) = K(y) \gamma z$$

$$\text{pour } z \geq H : \quad p(z) = K(y) \gamma z - K(-y) \gamma(z - H)$$

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

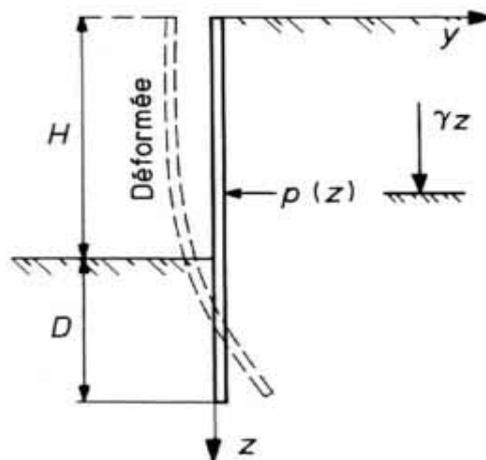


Fig. III.3. Rideau de palplanches soumis à une distribution de pression normale $p(z)$.

▪ **Méthode aux coefficients de réactions :**

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

▪ **La méthode des éléments finis**

Cette méthode, souvent utilisée dans le cadre de recherches appliquées, est actuellement en cours de développement pour les études courantes grâce au développement de logiciels de calcul destinés aux ingénieurs et à la puissance des micros ordinateurs.

Citons toutes ces méthodes concernant l'interaction avec le sol, on doit aussi savoir les facteurs influant sur le comportement d'un rideau de palplanches.

III. Etats limites de rupture selon L'Eurocode.

L'Eurocode7 exige la vérification d'une liste d'états limites pour la réalisation des écrans de soutènements. La conception du rideau de palplanches se fait en considérant quatre modes majeurs de rupture que sont :

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

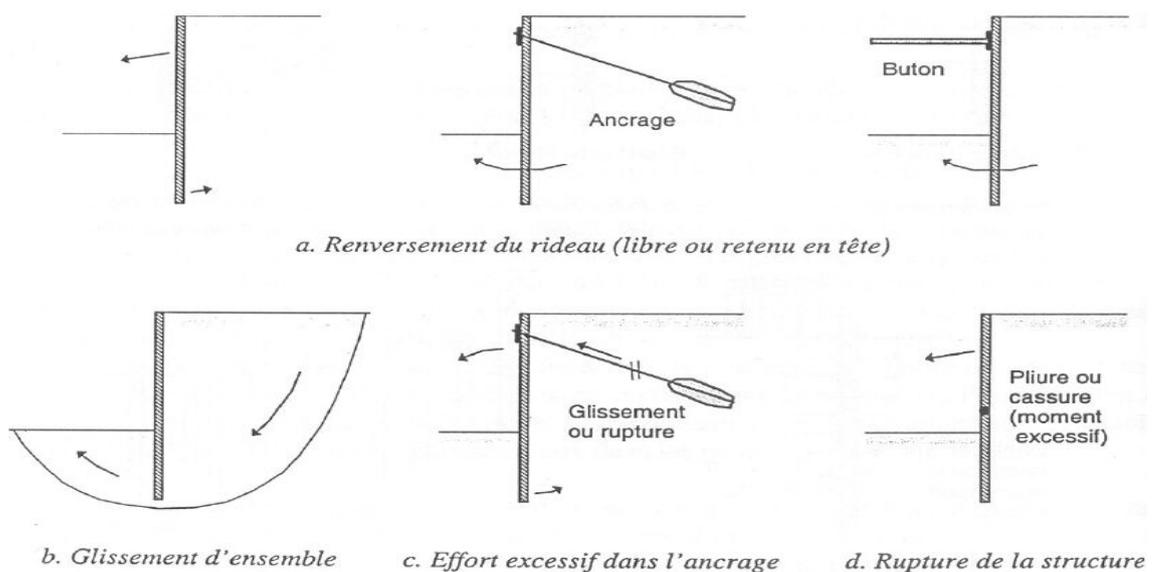


Fig. III.4. Modes de rupture d'un rideau de palplanches

- Les phénomènes 1 et 2 peuvent être évités en calculant la longueur minimale de fiche du rideau.
- L'arrachage 3 peut être écarté par un dimensionnement adapté du tirant.
- La rupture interne 4 est exclue en vérifiant que le moment de flexion et l'effort tranchant dans la paroi restent inférieurs aux valeurs admissibles par les palplanches.

IV. Définition de la poussée et de la butée

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

A: Butée

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

B: Poussée

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

$$\Delta_p \approx H / 100 \text{ et } \Delta_a \approx H / 1000$$

Dans ces deux cas extrêmes, on parle de poussée et butée limites correspondant à la rupture du massif de sol [Schlosser 1995].

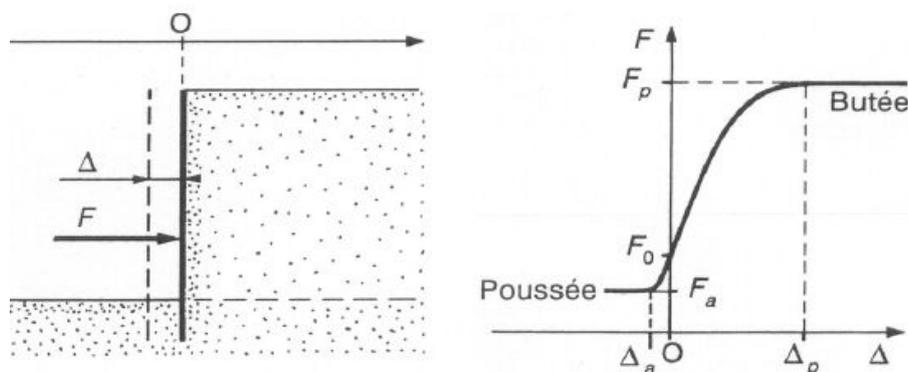


Fig. III.5.Principe de la poussée et de la butée.

V. Stabilité d'un écran de soutènement

V.1. Stabilité externe

1.1. Rideau ancré et simplement buté en pied

Un rideau ancré en tête est dit simplement buté en pied lorsque sa fiche est suffisamment faible pour permettre une rotation du rideau autour de son point d'ancrage et un déplacement du pied mobilisant la butée maximale. Chaque face ne supporte que des contraintes de butée ou des contraintes de poussée, il n'y a pas de contre butée. Le moment maximal se produit le plus souvent vers le bas de la partie libre de la palplanche [Delattre, 2001].

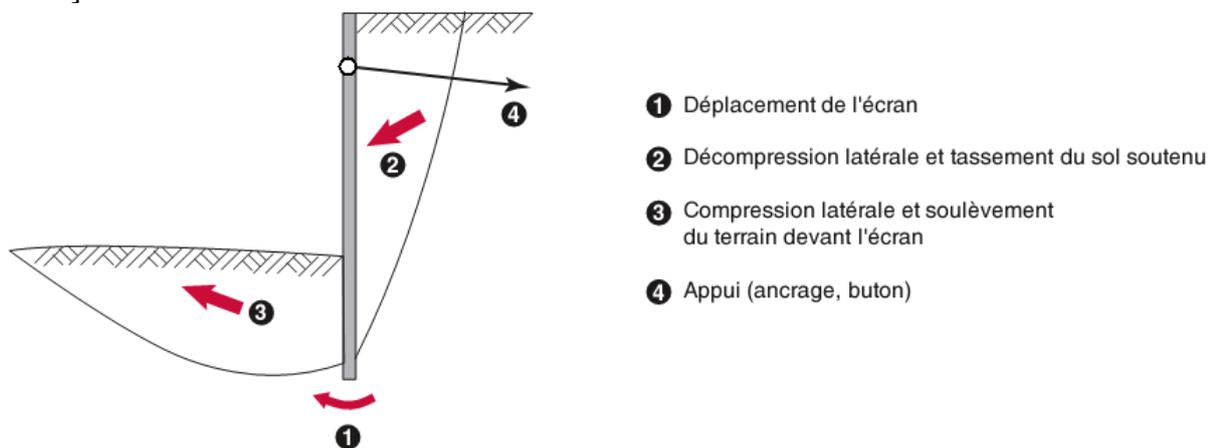


Fig.III.6.Mécanisme de rupture d'un écran simplement buté.

Le diagramme des efforts exercés sur le rideau, dans le cas d'un sable, est représenté sur la figure suivante. Les inconnues à déterminer sont la fiche D et l'effort d'ancrage T . L'équilibre statique du rideau fournit les deux équations nécessaires au dimensionnement.

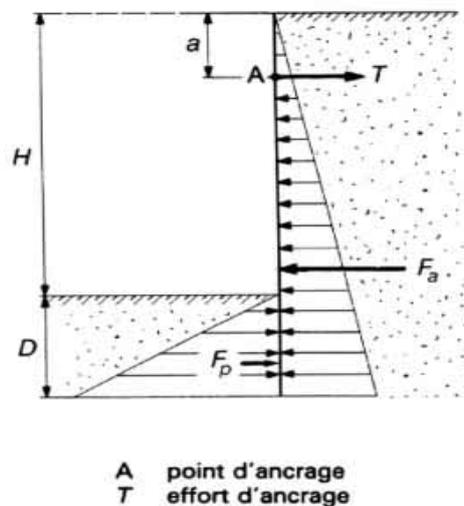


Fig.III.7.Rideau ancré en tête simplement buté en pied.

A: Moment résultant nul au point d'ancrage A

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

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

$$T = F_a - F_p$$

Le problème est statiquement déterminé, l'équation en moment est un polynôme de 3^e degré en D avec une seule racine réelle positive. L'équilibre horizontal des efforts permet ensuite le calcul de la force T à appliquer au tirant.

La butée du terrain est la seule force qui empêche le rideau de pivoter autour du point d'attache du tirant d'ancrage. Il est indispensable d'introduire un coefficient de sécurité. Pour cela, on divise par deux les coefficients de butée déduits dans des tables. Il est également de pratique courante, de ne pas utiliser de coefficient de sécurité dans le calcul, mais de multiplier la fiche par la racine de deux. On double bien la valeur de la butée, mais on augmente légèrement la poussée, si bien que le coefficient de sécurité correspondant à la nouvelle fiche est inférieur à 2. Dans ce cas, on doit multiplier la fiche par 1.7 au lieu de 1.41 pour retrouver le coefficient de sécurité égal à 2.

1.1. A: Cas de la présence d'eau

Nous avons jusqu'ici supposé implicitement que le matériau était sec. Dans le cas où de l'eau est présente dans le massif, le calcul doit la prendre en compte. La stabilité de l'ouvrage se calcule alors en incluant les efforts dus à l'eau et calculés séparément, comme indiqué sur la figure suivante.

S'il y a écoulement d'eau dans le massif, il faudra commencer par résoudre le problème hydraulique [Fourrie et Potts, 1988].

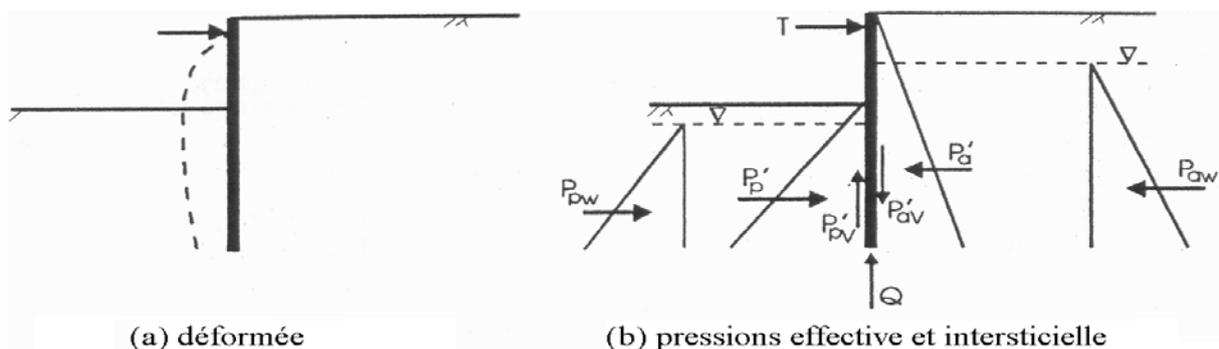


Fig. III.8. Cas de la présence d'eau.

V.1.2: Rideau non ancré en tête et encastré en pied

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

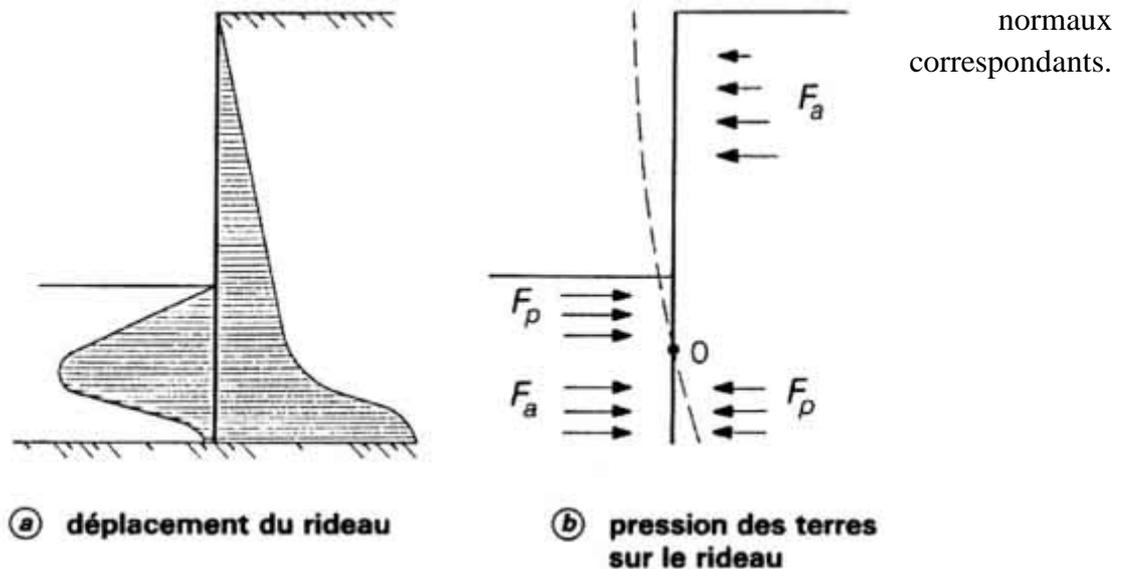


Fig. III.9. Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête

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

- Le sol des deux côtés du rideau, au-dessus du point de rotation O, est en état d'équilibre limite.
- Les efforts de contre butée sont équivalents à une force horizontale F_c appliquée au niveau du centre de rotation O.
- On prend généralement une hauteur de contre butée égale à 20 % de la hauteur de butée z_0 .

Dans ce cas les inconnues du problème sont la hauteur de butée z_0 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:

$$D = \frac{H}{K_p^2 - 1} + Z_0 + 0.2Z_0 - 1$$

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 : $F_c = F_p - F_a$.

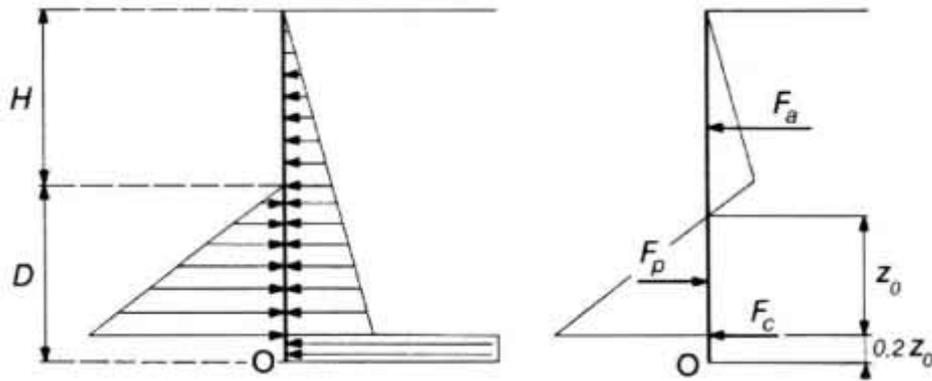


Fig. III.10. Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré

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

1.2.1: Cas des rideaux fichés dans l'argile

Les rideaux fichés dans l'argile et supportant un remblai de sol pulvérulent, ou les rideaux foncés entièrement dans de l'argile, se calculent par des méthodes tout à fait analogues. Il faut cependant noter que, pour l'argile, le calcul doit être fait à la fois à court terme ($c_u, \phi_u=0$) et à long terme (c', 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.

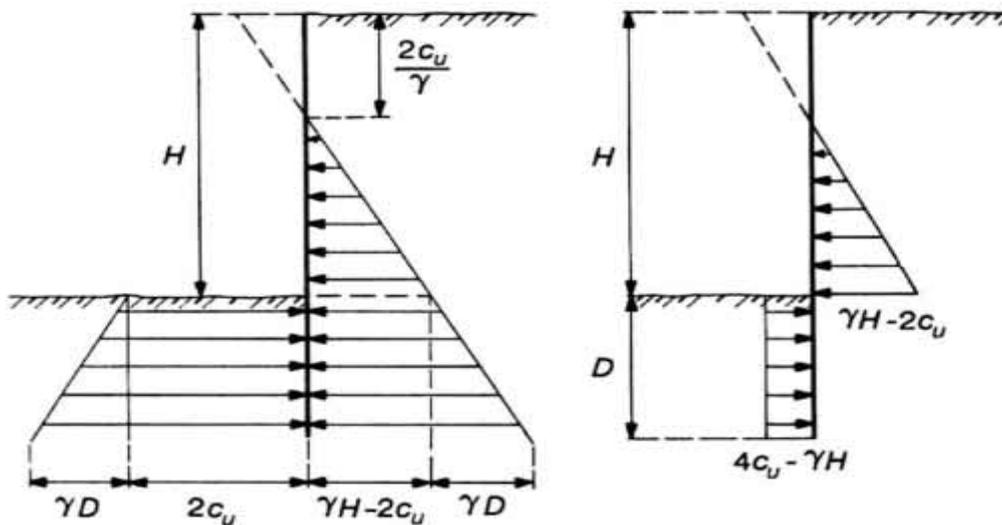


Fig. III.11. Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile.

L'équilibre des poussées et des butées s'exerçant sur un rideau non ancré dans une argile n'est possible que si l'on a l'inégalité : $C_u \geq \gamma H / 4$

V.1.3: Mur encastré en pied et ancré en tête

1.3.1: Hypothèses

Blum (1931) analyse l'effet de l'allongement de la fiche sur la répartition de la pression des terres, du moment et du déplacement de l'écran. Il observe que:

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

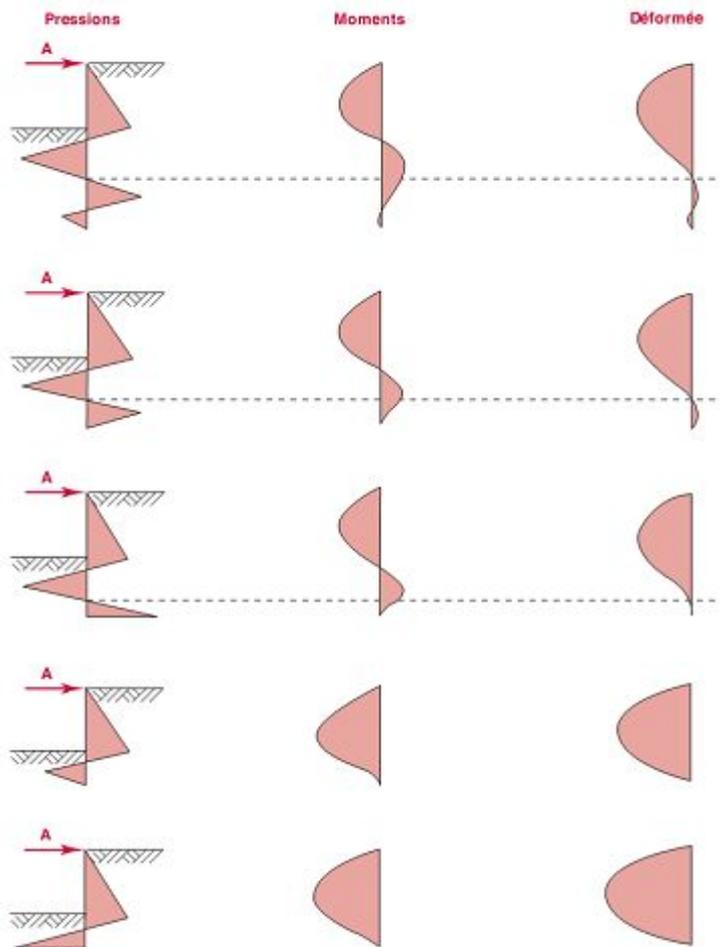


Fig. III.12. Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements dans l'écran de soutènement.

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

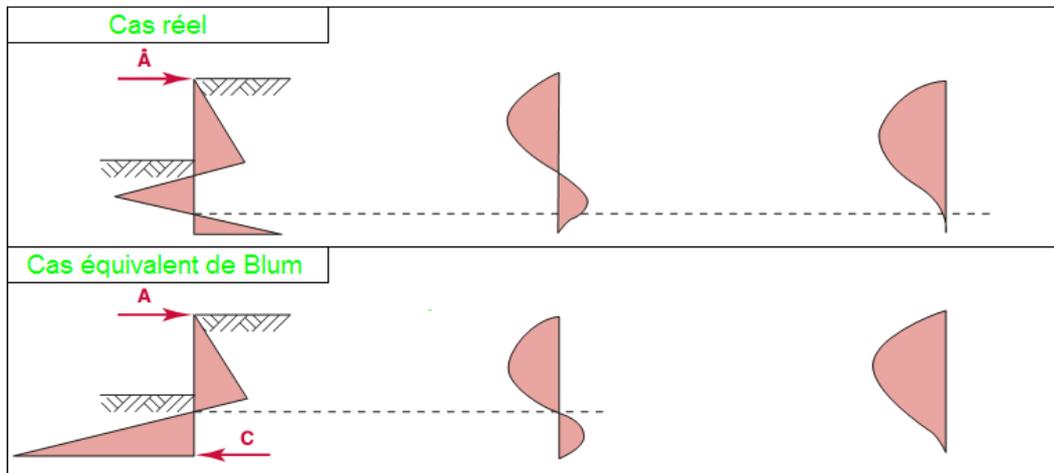


Fig. III.13. Distribution idéalisée de la pression des terres.

Le problème ainsi posé possède 3 inconnues, la force d'ancrage T , la longueur de la fiche f_0 et la résultante de contre butée R (Blum, 1931 cité par Delattre, 2001).

1.3.2: Levée de l'indétermination

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

A: Première approche

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

B: Deuxième approche

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

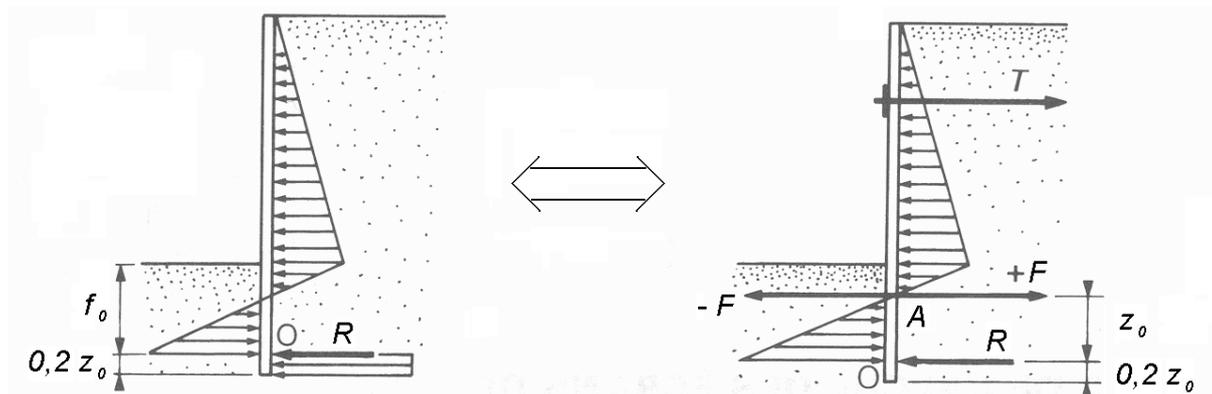


Fig. III.14. Résolution par la méthode de la poutre équivalente.

On commence par calculer la profondeur du point de pression des terres nulle. En pratique, lorsque φ est compris entre 25° et 30° 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.

V.1.4: Théorie du coefficient de réaction du sol

1.4.1: Contexte

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

1.4.2: Hypothèses

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

$$\sigma_h = k_0 \gamma z + k \Delta \quad ; \text{ Avec:}$$

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

K : Coefficient de réaction en (kN/m^3).

Le massif de sol est considéré comme étant composé de minces couches glissant les unes sur les autres, c'est à dire qu'il ne reprend pas d'efforts de cisaillement. Cette hypothèse revient à considérer que les plans horizontaux sont des plans principaux, et que les directions principales des contraintes sont verticale et horizontale. Il est évident que ce n'est pas là qu'une approximation de la réalité, et d'autant plus inexacte que les déplacements de l'écran et du sol s'éloignent d'une translation horizontale.

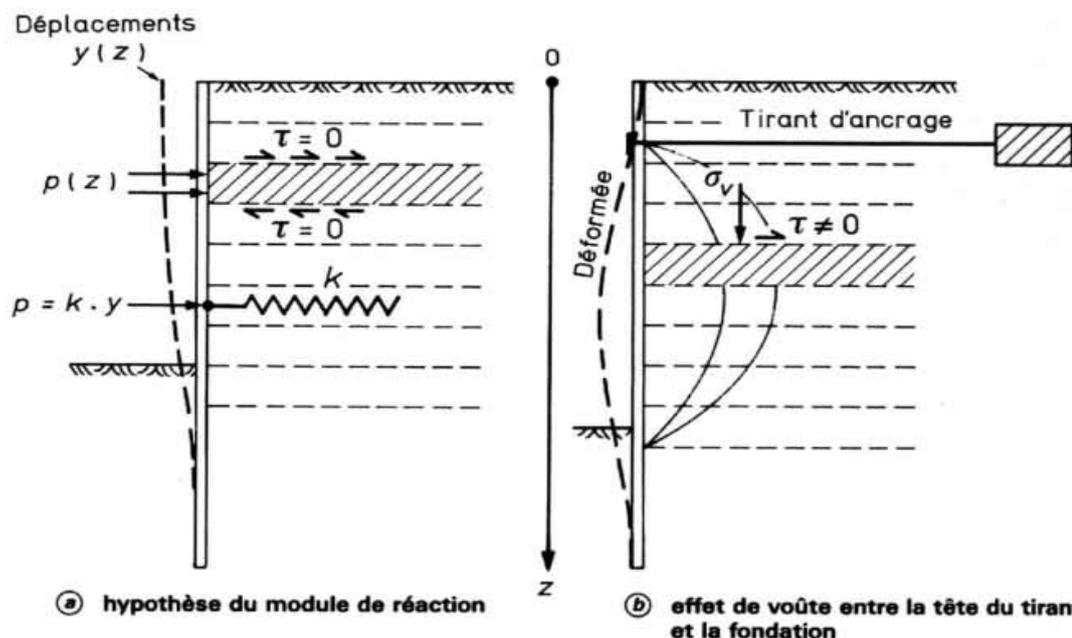


Fig. III.15. Incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et le développement d'un effet de voûte.

La pression des terres σ_h qui s'applique sur l'écran est fonction du déplacement latéral de celui-ci. Le paramètre k peut être obtenu selon plusieurs formules différentes dont celle de Ménard Bourdon (1964), Terzaghi (1955), Gigan (1989) et Rowe (1957).

V.2: Stabilité interne d'un écran de soutènement

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

2.1: Vérification du moment dans la palplanche

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

$$\frac{d^2M}{dz^2} = -\sigma_h$$

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

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{\frac{2I}{b}} \leq \sigma_a$$

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.

$$\sigma_a = \frac{2}{3}\sigma_e$$

2.2: Vérification des déformations

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 :

$$\frac{d^2u}{dz^2} = -\frac{M}{EI}$$

V.3: Méthodes classiques de calcul des blocs d'ancrage

3.1: L'évaluation de l'effort d'ancrage T_u

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

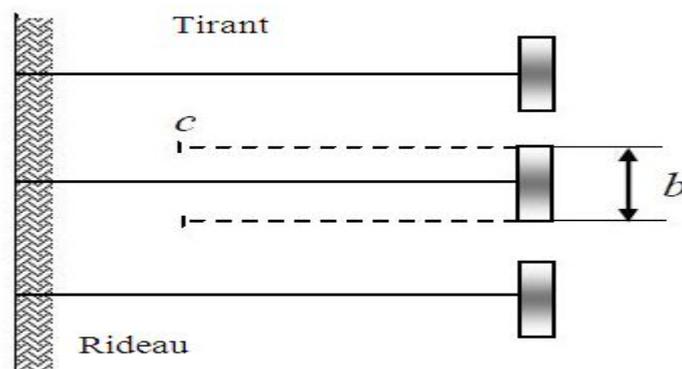


Fig. III.16.L'ensemble rideau et tirant d'ancrage.

3.2: L'hypothèse de calcul

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

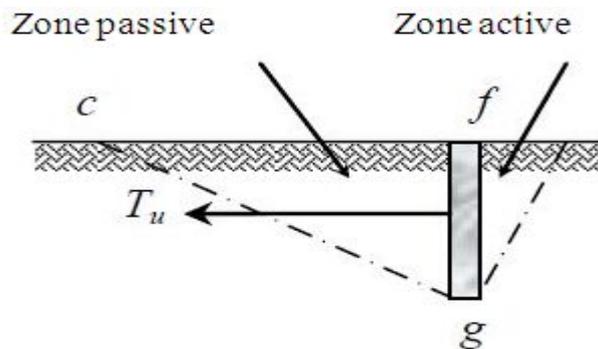


Fig. III.17. Résistance ultime de l'ancrage.

3.3: La résistance ultime du bloc d'ancrage

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

- ❖ L'ancrage est sans aucune résistance, s'il est situé à l'intérieur du prisme de rupture (zone active) abc , puisqu'il se déplace avec le sol.
- ❖ La résistance passive de l'ancrage est fortement diminuée, s'il est placé près de la ligne de rupture.
- ❖ Pour une mobilisation totale de la résistance passive du bloc d'ancrage, ce dernier doit être placé dans la zone def , la zone passive est située entièrement en dehors de la zone active abc .

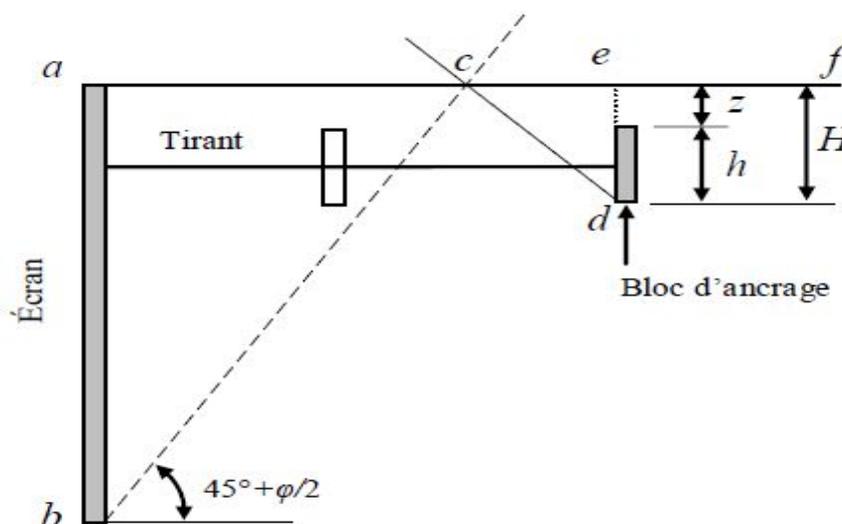


Fig. III.18. Emplacement des ancrages.

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

A: Méthode de Teng

La figure suivante montre un bloc d'ancrage de largeur b soumis à une force de traction T_u . Des expériences ont montré qu'au moment de la rupture, il se produit un soulèvement du sol dans une surface de longueur supérieure à celle de l'ancrage. La méthode de Teng est basée sur des équations simples, pour la détermination de la résistance ultime du bloc d'ancrage situé près ou à la surface libre du sol.

La résistance ultime est la somme de deux termes, dont le premier représente la résultante de la poussée et de la butée appliquées de part et d'autre du bloc d'ancrage, le deuxième donne la résistance au glissement le long des plans verticaux passant par les deux extrémités latérales. La surface $c''ec'$ présentée sur la figure suivante est l'une des surfaces concernée par le frottement latérale.

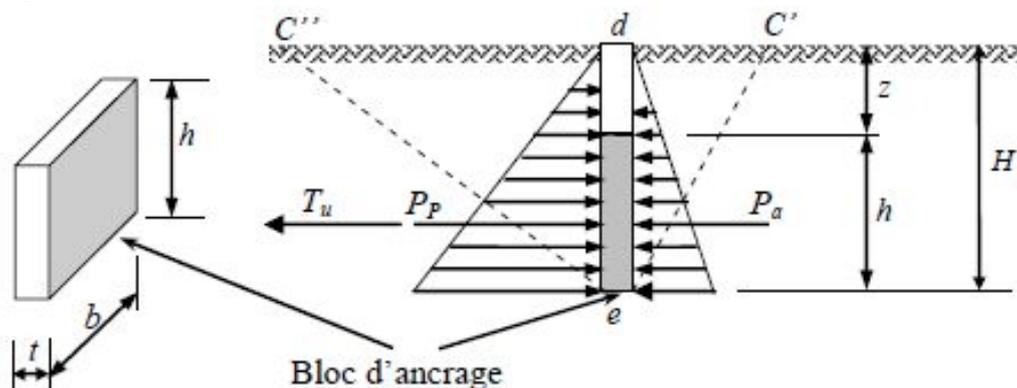


Fig. III.19. Détermination de la résistance d'un bloc d'ancrage.

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

$$T_u = b(p_p - p_a) + \frac{1}{3} K_0 \gamma (\sqrt{K_p} + \sqrt{K_a}) H^3 \tan \varphi$$

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 (Terzaghi).

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_0 : Coefficient de poussée au repos pris égal à 0.4 pour le calcul de l'ancrage.

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

B: Méthode d'Ovesen Brinch Hansen

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

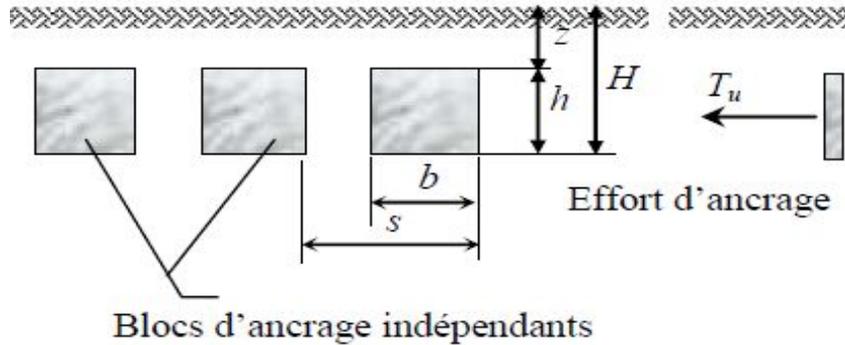


Fig. III.20. La disposition des blocs d'ancrages dans le massif du sol.

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

$$T_{ua} = M \cdot (K_p - K_a) p'_0 \cdot b h.$$

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.

$$M = 1 + (k_p - K_a)^{0.67} \times \left[1.1 \times E^4 + \frac{1.6 \times B}{1 + 5 \frac{B}{h}} + 0.4 (k_p - K_a) \frac{E^3 \times B^2}{1 + 0.05 \frac{B}{h}} \right]$$

$$B = 1 - (b/s)^2 \quad \text{et} \quad E = 1 - h / (z+h).$$

V.4. Ancrages doubles

Pour diminuer les moments fléchissant dans les palplanches, on doit placer les ancrages aussi bas que possible. Il faut alors éviter le déversement de la partie supérieure du rideau, on obtient ce résultat grâce à une deuxième ligne de tirants attachés en tête de rideau. Pour calculer ce nouvel ancrage on admet généralement qu'il doit pouvoir équilibrer le tiers de la poussée qui s'exerce sur la partie du rideau située au dessus de l'ancrage principal.

Lorsqu'il est nécessaire de prévoir deux lignes de tirants superposés, il est indispensable de les fixer sur la même plaque d'ancrage, afin d'éviter les déplacements des deux plaques d'ancrage qui peuvent être différents à cause de l'hétérogénéité du terrain.

VI. Choix des coefficients de poussée et de butée

Les coefficients de poussée et de butée dépendent d'un certain nombre de paramètres. Parmi ceux-ci l'obliquité δ de la contrainte sur le rideau. Le choix de δ , en butée surtout, a une influence sur les résultats de calcul.

Quelques rares auteurs prennent en même temps $\delta = +\varphi$ pour la poussée et $\delta = -\varphi$ pour la butée. Certains bureaux d'études adoptent pour la butée $\delta = -0.7\varphi$, Verdeyen propose même de choisir une obliquité telle que :

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

Mais en général, la plupart des auteurs préconisent d'adopter $\delta = 0$ pour la butée, c'est à dire de ne compter que sur la butée qui peut développer un équilibre de Rankine. Il est possible de prendre une valeur supérieure de 30% à 50% à celle de l'équilibre de Rankine pour les calculs correspondant à la période d'exécution de l'ouvrage ou lorsque l'ouvrage définitif ne doit pas rester en charge plus de quelques mois.

Le choix de 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%.

VII. Le comportement d'un rideau de palplanches

1: La nature du sol

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

1. A: Influence des types de sols sur les tassements

La première approche détaillée de la question de déformation des tassements est celle de Peck(1969) sur les rideaux de palplanches butonnés et ancrés. Afin de faire une bonne classification des zones il faut introduire un indice de stabilité N_b et le facteur de portance N_C pour calculer le coefficient de sécurité vis à vis du soulèvement et le déplacement de rideau sous les actions de différentes poussées exercées. On distingue :

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

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

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

Avec $N_b = \gamma H / C_u$

tel que

C_u : La cohésion non drainé

γ : Poids volumique du sol

H : La profondeur atteinte dans le sol.

D'après (Moormann, 2002) 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.

1. B. Identification des parties environnant l'écran de soutènement

On distingue :

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

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

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

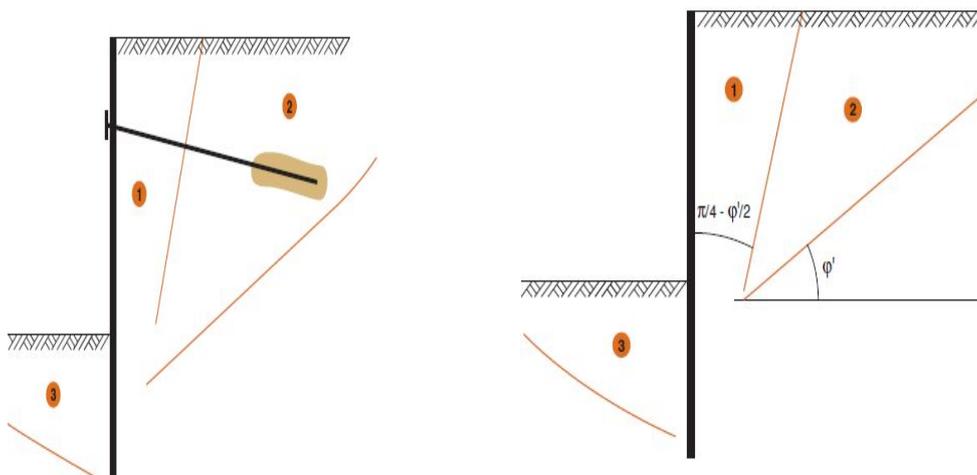


Fig. III.21. Parties de terrain associées à un rideau de palplanches

D'ans le cas des ouvrages ancrés, le terrain mobilisé devant le massif d'ancrage est étroitement associé à l'ouvrage et il en est de même du terrain situé immédiatement derrière l'ancrage, les dimensions de ce massif de sol sont liées à la longueur des ancrages, mais aussi à la profondeur à laquelle se trouve le massif d'ancrage. De façon conventionnelle, et par extension d'une disposition adoptée pour les ouvrages sur versants, elle est définie comme la zone s'étendant de part et d'autre de l'ouvrage sur une distance égale à trois fois sa hauteur libre [Dalay et Powerie, 2001].

2: Les effets de l'eau

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

❖ Pour les écrans encastrés dans une couche quasi imperméable et interceptant les arrivées d'eau, c'est principalement la pression de l'eau derrière l'écran qui est en jeu.

❖ Si le pied de l'écran s'arrête dans une couche perméable, l'écoulement d'eau qui s'établit autour de pied a des effets multiples. En amont, il augmente les contraintes effectives et provoque une consolidation des terrains. En aval ce mouvement de l'eau diminue les efforts résistants de la butée et donc la capacité d'appui par le sol et peut être à l'origine d'instabilités hydrauliques (boulance, renard).

3: Le type de l'écran

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

$$K_1 = \ln EI$$

L'expression proposée par Rowe (1952) pour tenir compte de la profondeur H de la fouille est donnée par la formule suivante :

$$K_2 = Lg \left(\frac{H^4}{EI} \right)$$

La relation de Goldberg et Al (1976) qui tient compte de la distance moyenne entre appuis est présentée comme suit :

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

Le premier diagramme mettant une relation les déplacements de l'écran avec le coefficient de sécurité vis à vis de soulèvement de fond de fouille pour les écrans butonnés dans des sols argileux a été proposé par [Clough et Al (1979)].

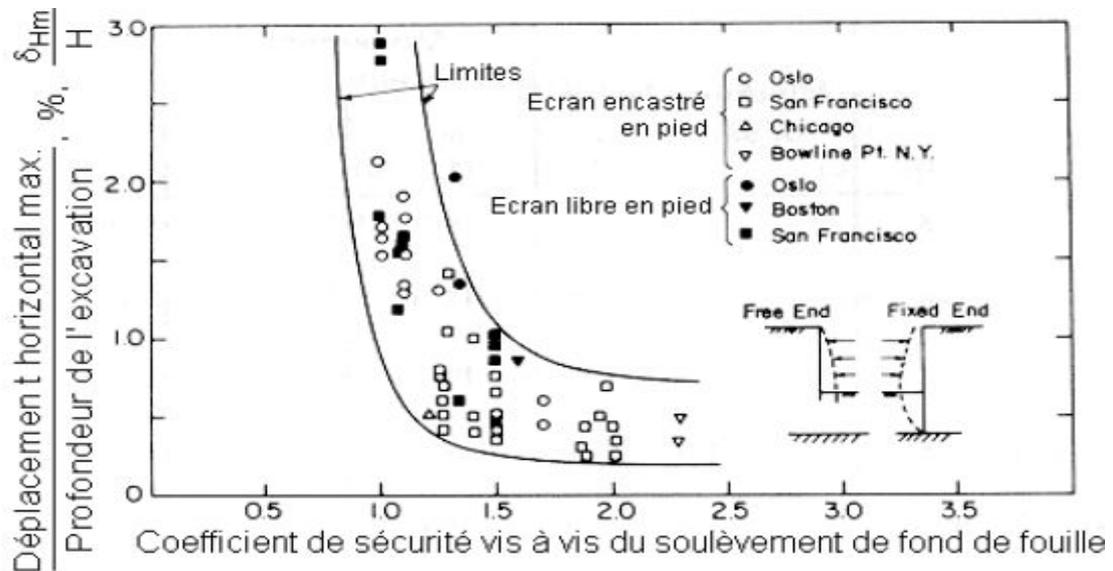


Fig. III.22. Diagramme pour estimation des déplacements vis à vis du soulèvement de fond de fouille pour des écrans butonnés dans l'argile.

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

4: La hauteur libre de l'écran

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

5. La fiche de l'écran

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

Gill et Lukas (1990) soulignent l'importance de la fiche, principalement parce que, dans des conditions de terrain relativement mauvaises, un encastrement profond dans des sols rigides peut réduire nettement les déformations d'un soutènement.

6. L'installation de l'écran

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

7. Systèmes d'appuis

A: Le type d'appuis

Les déformations sont élevées principalement pour les systèmes butonnés que pour les systèmes ancrés, les tassements dans les systèmes ancrés peuvent être dus aux scellements des tirants. Une injection très importante ou la perte de coulis peut entraîner un soulèvement du terrain au dessus de la zone de scellement. Une longueur insuffisante de tirant peut causer ou toute la zone ancrée commence à se déplacer plus au moins en bloc. Cela pratiquement difficile à maîtriser dans les argiles sur consolidées mais une analyse plus précise montre que les rideaux de palplanches sont pratiquement les seuls à se déplacer de plus de 1% [Moormann et Yoo, 2004].

B: 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_D et d'autre part l'intensité F_I des appuis (Som, 1995). On a :

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

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

n : Le nombre de lits d'appuis

ΔH : La profondeur de la fouille

d_{hor} : L'espacement horizontal des appuis

E : Le module de 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. [Puller 1996].

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 [Daly et Powrie 2001].

8. Autres facteurs

a. L'effet de temps

Cet effet concerne surtout les sols fins cohérents, pour lesquels la consolidation entraîne une augmentation des déplacements avec le temps.

Le comportement à long terme d'un écran est assez difficile à suivre pour des raisons multiples, généralement les instrumentations auscultées manuellement ne sont plus accessibles après la fin des travaux. L'utilisation d'une instrumentation entièrement automatique n'est pas encore très répandue, notamment en raison de coûts non négligeables [Carder et Uchida 1995].

b. la reconnaissance des sols

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

c. Température

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

➤ **Cas1** : rideau avec butons en profilés d'acier, la température joue un rôle important vis à vis des efforts dans les butons. L'intensité de cette influence dépend de la nature et de la géométrie de butonnage. Bien évidemment, des butons en bois ont un autre comportement que de butons en acier. Pour ces derniers une simple peinture blanche avec de la chaux peut réduire l'influence du soleil de moitié [Besler, 1994 d'après Weitbenbach, 1992].

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

➤ **Cas3** : on peut signaler l'importance des déformations hygrothermiques de béton, par exemple le refroidissement et le retrait d'une poutre de couronnement [Walter et Tarallo, 1985].

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

Pour de faibles valeurs de F , la réaction du sol est proportionnelle aux déplacements du rideau et le sol se comporte comme un matériau élastique (figure a).

A partir d'une valeur F_2 de F , la réaction du sol se réduit à une butée et à une contre butée. Tant que F reste inférieure à la valeur F_3 , il n'y a pas de déplacement du pied du rideau (fig. b).

Lorsque F atteint la valeur F_3 , le pied du rideau se déplace vers l'amont, ce qui mobilise la contre butée maximale. Le moment d'encastrement est alors maximal, on dit qu'il y a encastrement complet dans le sol (figure c).

Lorsque F continue à croître, la butée augmente, tandis que la contre butée diminue, le rideau est dit partiellement.

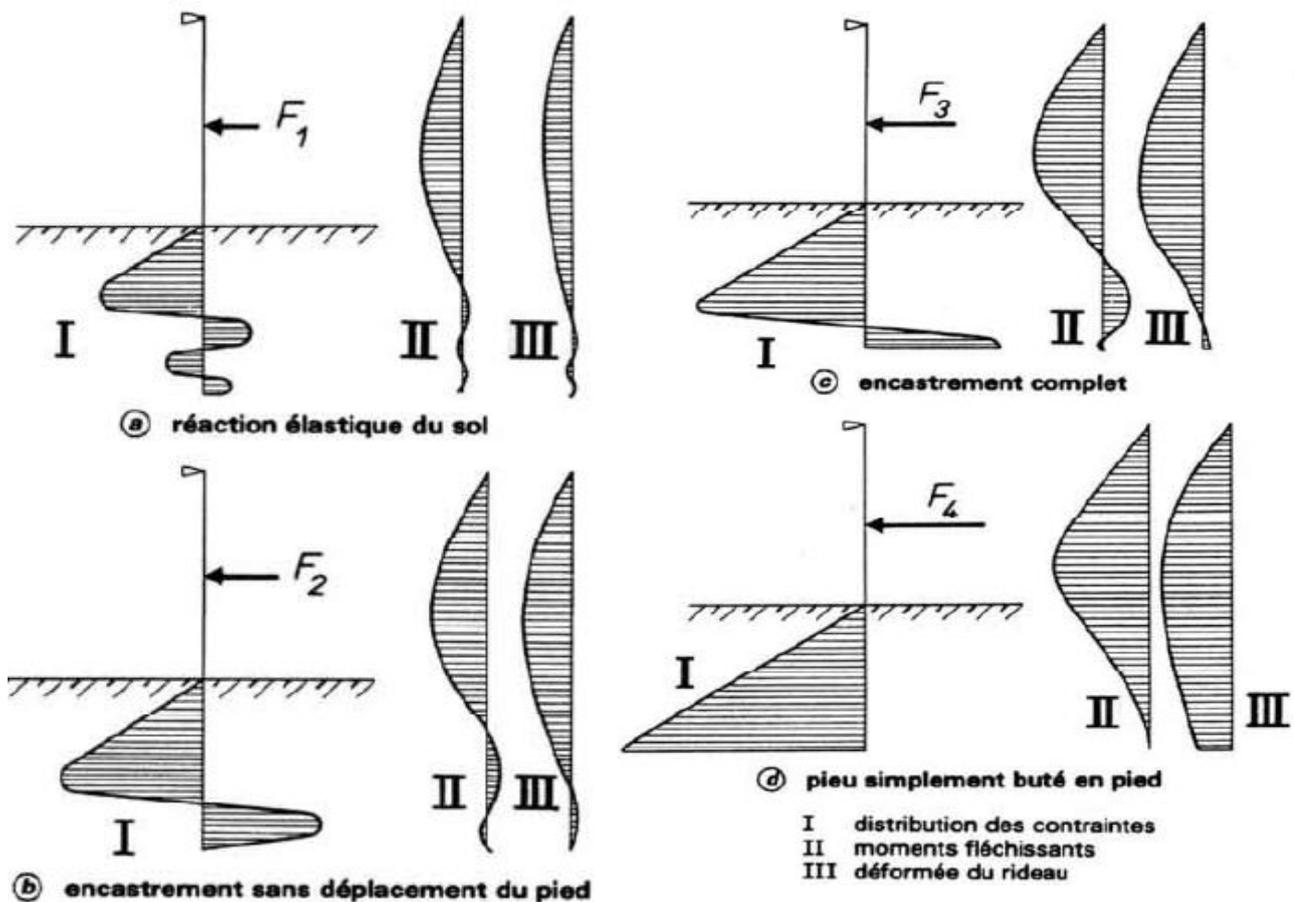


Fig. III.23. Comportement d'un rideau ancré en tête soumis à une force horizontale croissante.

e. Influence du frottement

Si on étudie l'influence du frottement φ sur le rideau de palplanche, on observe une inclinaison des efforts de poussée et de butée :

En poussée

Le sol a tendance à descendre, la force est inclinée vers le bas $\sigma_h = K_a \sigma_v \cos \delta_a$.

En butée

Le sol est poussé vers le haut, la force est inclinée vers le haut $\sigma_h = K_p \sigma_v \cos \delta_p$

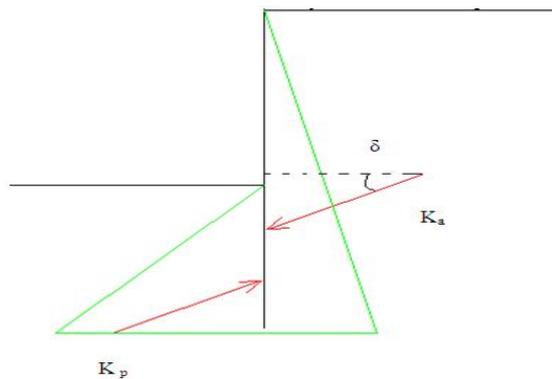


Fig. III.24. Cas d'un rideau avec frottement

Lors de la projection des efforts pour écrire l'équilibre en moment, l'angle étant le même en poussée et en butée, un facteur en $\cos\varphi$ affecte les poussées des terres.

Pour l'écriture de l'équilibre en force dans la contrebutée, seuls les coefficients de poussée et de butée sont affectés par l'angle φ .

En pratique, on prend souvent l'hypothèse $\delta_a = 0$ et $\delta_p = -\varphi/2$. Ceci n'affecte que peu les efforts structurels observés. Empiriquement, l'influence du frottement du rideau se révèle donc faible, un calcul sur un cas pratique permettant de s'en convaincre.

VIII. Le rapport des déformations horizontales et verticales

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

1: Les types de profils

A: Le profil convexe en tympan

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

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

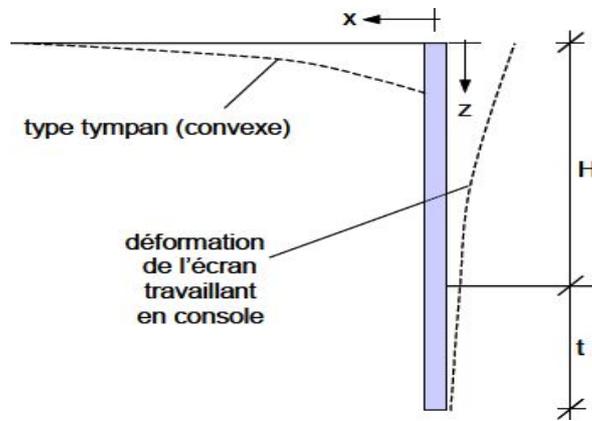


Fig. III.25. Profil de tassement de type convexe en tympan.

B: le profil concave

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

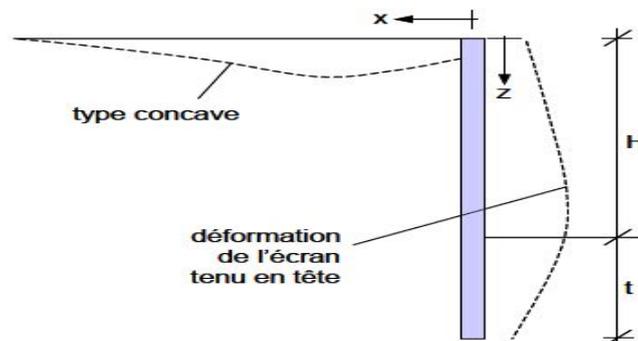


Fig. III.26. Profil de tassement de type concave.

VIII.2: Estimation des tassements

2.1: Théorème de Clough et O'Rourke (1990): On distingue deux types de profils:

A: Le profil triangulaire

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

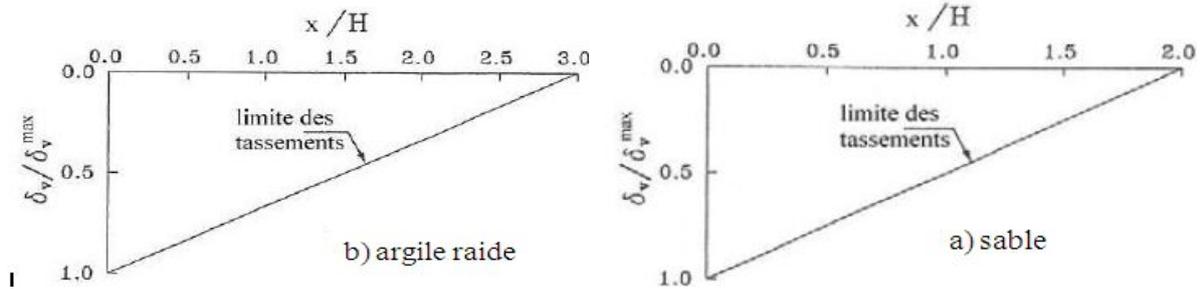


Fig. III.27. Interaction sol structure de type convexe en tympan.

B: Le profil trapézoïdal

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

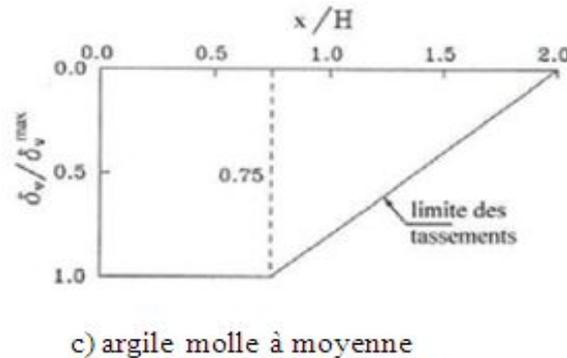


Fig. III.28. Interaction sol structure de type concave.

2.2: Théorème de Hsieh et Ou (1998)

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

$$\text{pour } X/H \leq 2 \quad \delta_v = \left(-0,636 \sqrt{\frac{X}{H}} + 1 \right) \delta_v^{\max}$$

$$\text{pour } 2 < \frac{X}{H} \leq 4 \quad \delta_v = \left(-0,171 \sqrt{\frac{X}{H}} + 0,342 \right) \delta_v^{\max}$$

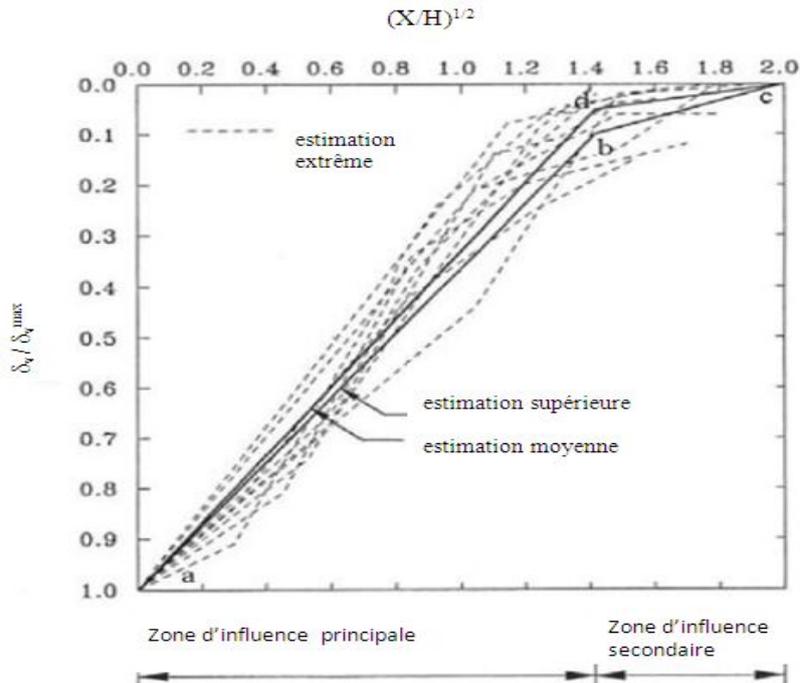


Fig. III.29. Méthode de détermination des tassements de type convexe

La méthode de Hsieh et Ou (1998) est de type semi empirique car elle s'appuie sur trois hypothèses fondamentales :

- ❖ Calculer les déformations horizontales par la méthode des éléments finis ou la méthode du coefficient de réaction car les méthodes empiriques ne donnent pas d'information sur la forme de la déformation.

- ❖ Le rapport entre le déplacement maximal horizontal et vertical doit appartenir à l'intervalle $\delta_v^{\max} = 0.25 \delta_h^{\max}$ avec une limite supérieure de $\delta_v^{\max} = \delta_h^{\max}$.

- ❖ Le profil des tassements peut être déterminé en tenant compte de la forme des déplacements horizontaux, Hsieh et Ou proposent le type concave pour $A_s > 1.6A_c$ et le type convexe pour $A_s \leq 1.6A_c$.

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

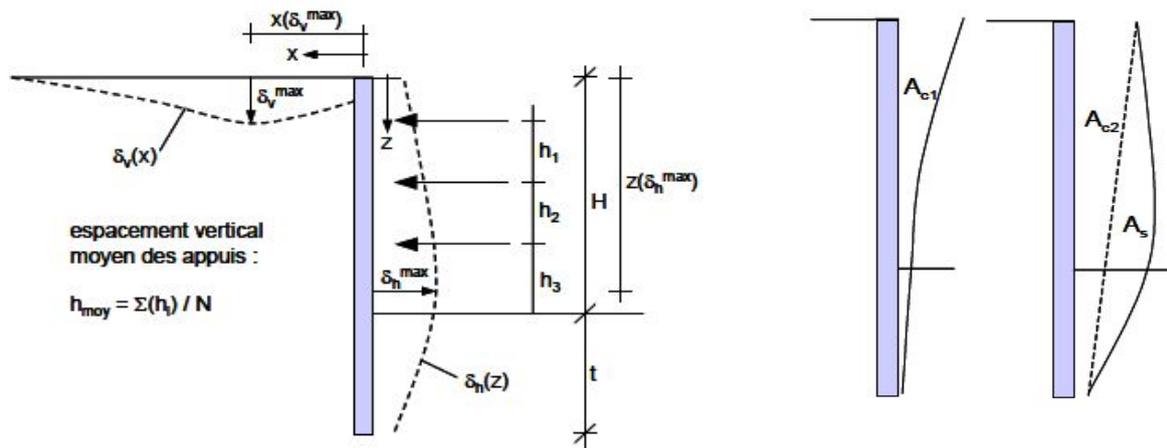


Fig. III.30. La déformée d'un rideau de palplanches

Tel que :

- H : La profondeur finale de la fouille δ_h^{\max} : Déplacement horizontal maximal
- t : La fiche de l'écran δ_v^{\max} : Tassement maximal à la surface
- h_i : Espacement verticale des appuis N : Nombre de lit d'appui

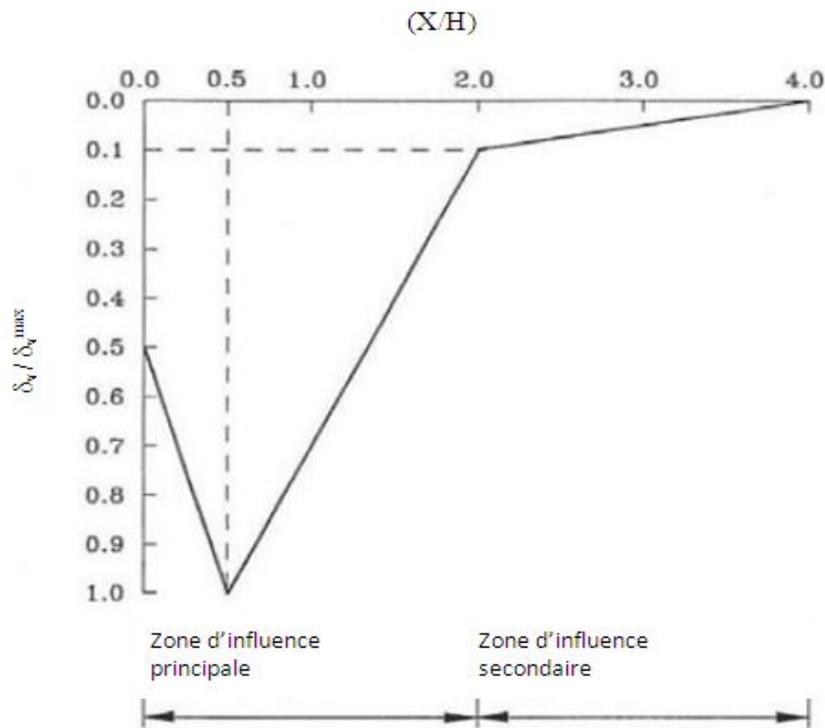


Fig.III.31.Méthode de détermination des tassements de type concave.

VIII.3: Renard hydraulique

Lorsqu'une dénivellation de la nappe existe de part et d'autre du rideau, une circulation hydraulique peut se produire qui a pour effet de modifier les conditions de pression interstitielle, et donc les efforts de poussée butée totaux. Le calcul des pressions hydrauliques montre qu'elles ont pour effet d'augmenter la poussée et de diminuer la butée par rapport au cas hydrostatique. Par conséquent, cette modification ne va pas dans le sens de la sécurité et doit être intégrée au modèle. Pour cela, on peut supposer que:

Le gradient hydraulique varie linéairement sur la face amont et sur la face aval du mur. Mandel a établi dans ce cas que si le substratum est rejeté à une profondeur infinie, le rapport des pertes de charges peut être estimé en prenant le référentiel de charge en C.

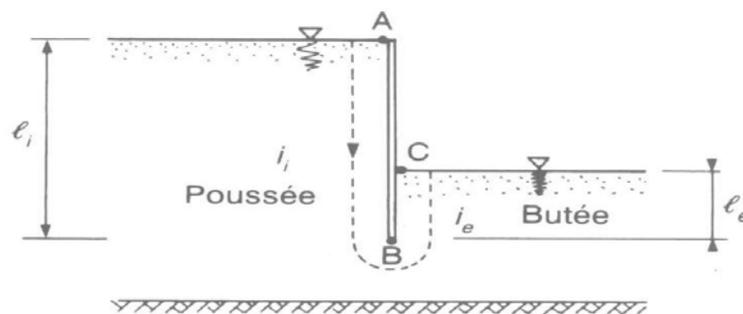


Fig. III.32. Méthode des gradients hydrauliques moyens.

On a :

$$\rho = \frac{h_B - h_C}{h_A - h_C} = \frac{h_B}{h_A} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{l_i}{l_e}}}$$

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 :

$$i_i = h_A \frac{1 - \rho}{l_i} \quad i_e = h_A \frac{\rho}{l_i}$$

Du côté de la poussée : $u = \gamma_w (1 - i_i) z_i$ et $\sigma'_{ha} = K_a [\gamma - \gamma_w (1 - i_i)] z_i$

Du côté de la butée : $u = \gamma_w (1 + i_e) z_e$ et $\sigma'_{hp} = K_p [\gamma - \gamma_w (1 + i_e)] z_e$

VIII.4: Effet de barrage d'un rideau de palplanches

L'étanchéité d'un écran permet d'éviter le transport de matériaux à travers l'ouvrage et donc la perte de particules fines au sein du massif soutenu.

Par contre elle peut provoquer un effet de barrage lorsque la nappe est en écoulement. C'est notamment le cas des ouvrages sur pente. Mais aussi des ouvrages de rive compte tenu des échanges naturels entre les berges et le canal ou la rivière.

Cet effet de barrage conduit généralement à une remontée de la nappe derrière l'écran et à une baisse en aval de l'écran et concentration de l'écoulement sous le pied de l'écran.

De telles modifications du niveau de la nappe, si elles ne sont pas prévues dans le dimensionnement, peuvent être à l'origine de désordres significatifs. A l'opposé lorsque, le rideau de palplanches soutient une excavation dont le fond est drainé, en présence d'un radier drainant par exemple, la nappe peut se trouver rabattue derrière le rideau de palplanches.

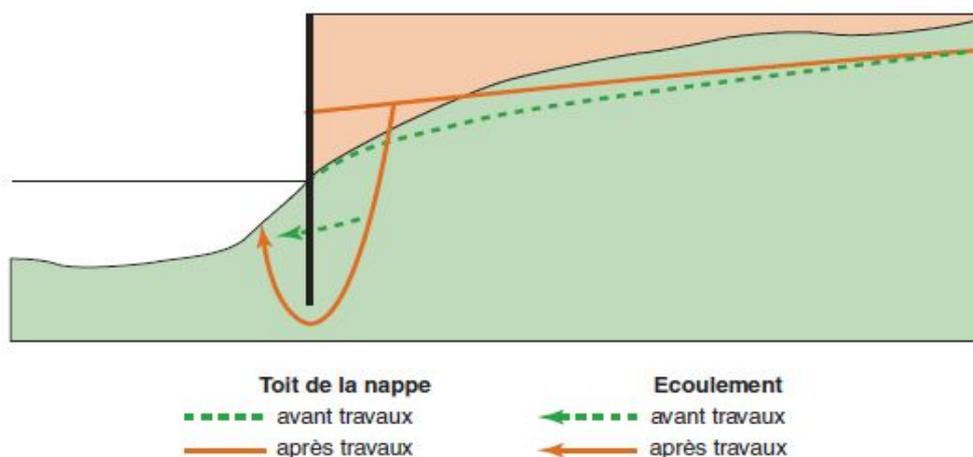


Fig. III.33.Effet de barrage d'un rideau de palplanches.

IX. Conclusion

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

I. Présentation du logiciel FLAC :

I.1- Introduction:

Le logiciel FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), développé par la société américaine ITASCA Consulting group, est spécialement conçu pour les problèmes de géomécanique en général, et pour les problèmes de mécanique des sols en particulier.

Le code de calcul FLAC^{2D} utilisé dans nos modélisations est basé sur la méthode des différences finies. Les concepteurs de ce code ont utilisé un concept appelé « méthode des éléments lagrangiens ». Il consiste en une application non traditionnelle de la méthode des différences finies explicites [Billiaux1993].

I.2- Principe de résolution numérique dans du logiciel FLAC^{2D}

FLAC est un logiciel de modélisation mécanique de problèmes géotechniques.

Contrairement à la plupart des autres codes basés sur la méthode des éléments finis, FLAC^{2D} utilise une formulation explicite en différences finies, nécessitant une faible puissance de calcul, peu de ressources mémoires ; mais un grand nombre d'itérations, (**Itasca Flac User's guide, [2005]**). Ce code a été développé pour traiter les problèmes non linéaires de la mécanique appliquée à la géotechnique, intégrant un mode de résolution explicite des équations de la mécanique.

La figure IV-1 illustre le principe de résolution numérique des problèmes géotechniques exploités dans le code de calcul.

I.3- Les différences finies :

La méthode des différences finies est l'une des plus anciennes méthodes de résolutions numériques d'un système d'équations différentielles avec conditions initiales et conditions aux limites. La plupart des méthodes utilisant cette technique adoptent une discrétisation du milieu en mailles rectangulaires exclusivement, [Desai & Christian1977].

L'approche des différences finies utilisée dans FLAC est basée sur la méthode de [Wilkins1964] et permet de formuler les équations des différences finies pour les éléments de forme quelconque. On peut donner n'importe quelle forme aux limites, et faire varier les propriétés d'un élément à l'autre. De ce point de vue, elle est donc aussi performante que la méthode des éléments triangulaires à 03 nœuds.

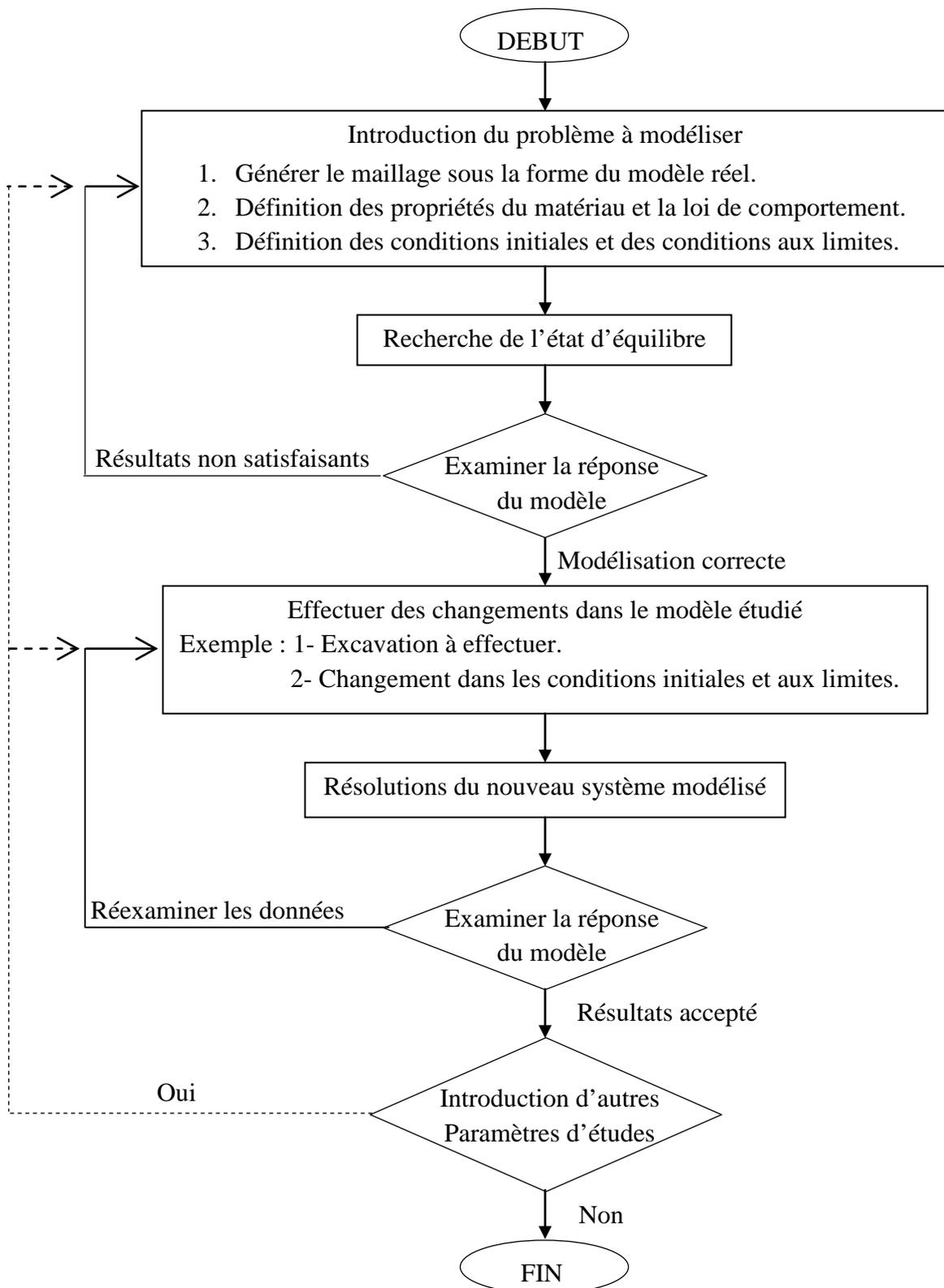


Figure IV.1. Procédé général de résolution des problèmes en géotechnique selon FLAC^{2D}.

I.4- Schéma de résolution explicite

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser uniquement au mode de fonctionnement. La méthode de résolution est décrite plus finement par [Marti & Candall.1982]. Basée sur le fait que dans la réalité, une partie de l'énergie de déformation accumulée par le système est convertie en énergie cinétique qui va se propager et se dissiper dans le matériau environnant, le schéma de résolution explicite intègre ce phénomène en prenant en compte les équations dynamiques du mouvement. L'objectif de la méthode aux éléments lagrangiens n'en reste pas moins la résolution d'un problème statique ou quasi-statique par l'intermédiaire de la dynamique. La figure IV-2 précise bien la séquence de calcul utilisée.

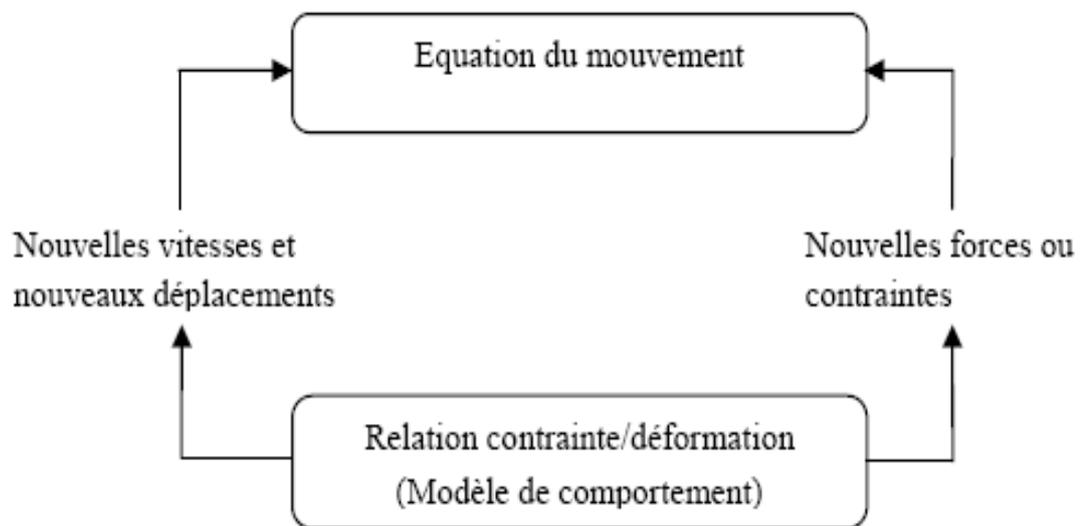


Figure IV-2: Séquence de calcul générale (Billiaux [1993])

I.5 Equations du mouvement

Les équations du mouvement sont utilisées pour calculer de nouvelles vitesses et donc de nouveaux déplacements à partir des contraintes et des forces en jeu.

L'équation de mouvement de Newton est donnée par l'équation (IV.1) ci après:

$$m \frac{du}{dt} = F$$

Qui est généralisée pour un corps solide continu, donnée par l'équation (IV.2):

$$\rho \frac{du_i}{dt} = \frac{\delta \sigma_{ij}}{\delta x_j} + \rho g_i$$

Avec,

ρ : Masse volumique

t : Temps

x_i : Composante du vecteur position

g_i : Composante de l'accélération gravitationnelle générée par les forces de volume

σ_{ij} : Composante du tenseur des contraintes

\dot{u} : Composante du vecteur vitesse nodale.

Alors, le taux de déformation est dérivé à partir du gradient des vitesses et la loi de comportement est utilisée pour calculer les nouvelles contraintes.

Le taux de déformation s'écrit comme suit :

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\sigma_n = F(\sigma_p, e, \lambda) \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

- ✓ σ_n nouvelles contraintes
- ✓ σ_p contraintes au cycle de calcul précédent
- ✓ λ paramètre d'écrouissage

Dans chaque boîte de calcul de la figure IV-2 on remet à jour toutes les variables à traiter à partir de valeurs connues qui doivent, elles, rester fixées durant les calculs dans cette boîte. Ainsi le calcul de nouvelles contraintes n'affecte pas les vitesses calculées dans la boîte précédente. Cette hypothèse est justifiée si un pas de temps, assez petit est choisi de manière à ce que l'information ne puisse pas passer d'un élément à l'autre au cours de cet intervalle de temps. Des éléments voisins ne pourront donc pas s'influencer pendant une période de calcul. Tout ceci se base sur l'idée que la vitesse de l'onde de calcul est toujours supérieure à celle des ondes physiques ce qui permet de figer les valeurs connues et utilisées pour la durée des calculs.

Toutefois le critère sur le pas de temps conduit nécessairement à un nombre de cycles de calcul importants, ce qui rend cette méthode peu performante pour les problèmes linéaires en petites déformations.

Il semble que le domaine de prédilection d'une méthode explicite soit l'étude de systèmes comprenant par exemple des non linéarités, de grandes déformations ou des instabilités physiques.

La prise en compte de la réelle complexité d'un site comportant de manière générale ce type de problèmes, la résolution explicite constitue donc une méthode bien adaptée aux types de difficultés auxquels nous nous sommes intéressés.

Le tableau IV-3 nous montre un comparatif entre la méthode implicite et la méthode explicite sur laquelle se base le logiciel « FLAC ».

Méthode explicite	Méthode implicite
Le pas de temps doit être inférieur à une valeur critique pour assurer la stabilité	Pas de restriction sur le pas de temps, au moins pour certains schémas de résolution
Peu de calculs par pas de temps	Nombreux calculs par pas de temps
Pas d'amortissement numérique significatif introduit pour les problèmes dynamiques	Amortissement numérique dépendant du temps pour les schémas inconditionnellement stables.
Prise en compte de lois de comportement non linéaires sans itérations supplémentaires	Nécessité d'une procédure itérative pour la prise en compte de comportements non linéaires.
Si le pas de temps est inférieur à sa valeur critique, une loi non linéaire est toujours suivie d'une manière correcte.	Il est toujours nécessaire de démontrer que la procédure est : (a) stable ; et (b) physiquement correcte, c'est-à-dire qu'elle permet de suivre un chemin de contraintes physiquement correct
Aucune matrice n'est construite. La mémoire nécessaire est minimum.	Une matrice de rigidité doit être stockée. La mémoire nécessaire est importante.
Aucune matrice n'étant construite, de grandes déformations et de grands déplacements peuvent être pris en compte avec quasiment aucun calcul supplémentaire	Des calculs supplémentaires sont nécessaires pour suivre de grandes déformations et de grands déplacements

Tableau IV.1: Comparaison entre les méthodes explicites et implicites (Candall [1981])

II. Modèles rhéologiques et éléments structurels :

Les matériaux géotechniques sont des matériaux complexes, dont le comportement peut être décrit ou simulé par des modèles eux-mêmes plus ou moins complexes. La réponse mécanique de ces milieux dépend essentiellement des lois de comportement qui lui ont été affectées. Il est donc très important de choisir le modèle rhéologique qui pourra reproduire avec une fidélité optimale la réponse du massif face aux sollicitations qui lui sont imposées et en fonction des résultats recherchés.

Après avoir présenté le code de calcul, nous allons maintenant décrire les modèles de comportement de sol, les différents éléments de structure et les éléments d'interface permettant d'introduire des non linéarités géométriques que nous avons utilisées au cours de notre travail.

II.1- Modèles de comportement de sol :

Le logiciel FLAC^{2D} intègre de nombreux modèles constitutifs, adaptables à un grand nombre de matériaux, géologiques ou non. Chacun d'entre eux nécessite l'apport de paramètres mécaniques spécifiques, descriptifs de la rhéologie du matériau, en plus de cela il permet aux utilisateurs de développer leurs propres modèles, (**Itasca Theory and Background, [2005]**).

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les différentes lois rhéologiques que nous avons adoptées pour la modélisation du comportement du sol. Les modèles inscrits dans FLAC^{2D} sont répertoriés en quatre groupes :

- Modèles vides : contient un seul modèle utilisé. C'est le cas où on représente une excavation. Toutes les propriétés de ce modèle sont nulles.
- Modèles élastiques : ce groupe contient deux modèles, le premier est le modèle élastiques isotrope où toutes les propriétés mécaniques du matériau sont les mêmes. Le second est le modèle anisotrope où toutes les propriétés mécaniques du matériau sont différentes suivant la direction considérée.
- Modèles plastiques : ce groupe contient huit modèles plastiques : Drucker- Prager, Mohr- Coulomb, Strain Softening/ Hardening, Double Yield, Modified Cam-Clay model, Ubiquitous- joint model et Bilinear Strain Softening/ Hardening Ubiquitous joint model.
- Modèle dynamique : un seul modèle est défini, c'est le modèle de Finn. Le critère de Mohr-Coulomb modélise seulement la dilatation à la rupture et non pas la densification durant le chargement cyclique à une contrainte au dessous de la rupture. Ainsi le modèle de Mohr-Coulomb a été modifié afin de modéliser le changement de déformation volumétrique pendant un chargement cyclique drainé ou la pression interstitielle pendant un chargement cyclique non drainé. Le changement dans les déformations volumétriques ou les pressions interstitielles ont été modélisés en utilisant le modèle de Finn, (**Itasca Optional Features, [2005]**).

II.2- Groupe des modèles élastiques :

Les modèles dans ce groupe sont caractérisés par des déformations réversibles sous chargement. Les lois de contrainte déformation sont linéaires.

II.2.a- Modèle élastique isotropique : Loi de Hooke

Dans ce modèle, la relation contrainte déformation, dans la forme incrémentale est exprimée par la loi de Hooke.

Dans le code FLAC, l'écriture des relations de comportement utilise les modules volumétriques et de cisaillement plutôt que le module de Young et celui de Poisson.

Les relations entre ces divers paramètres sont résumées dans le tableau suivant :

Couples de paramètres utilisés	Expression des paramètres			
	Module de cisaillement G	Module de Young E	Module volumétrique K	Coefficient de Poisson
G, E	G	E	$\frac{G \cdot E}{9G - 3E}$	$\frac{E - 2G}{2G}$
G, K	G	$\frac{9G \cdot K}{3K + G}$	K	
G, ν	G	$2G(1 + \nu)$	$\frac{2G(1 + \nu)}{3(1 + 2\nu)}$	ν
E, K	$\frac{3K \cdot E}{9K - E}$	E	K	$\frac{3K - E}{6K}$
E, ν	$\frac{E}{2(1 + \nu)}$	E	$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	ν
K, ν	$\frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$	$3K(1 - 2\nu)$	K	ν

Tableau IV.2: Relations entre les constantes élastiques

(D'après Leipholz [1974]).

II.2.b- Modèle élastique, transversalement isotrope :

Dans FLAC, le plan de l'isotropie lié à ce modèle de relation avec le plan xz

(Voir figure IV-3). Les constantes élastiques sont définies comme suit :

E_1 (ou E_x) : module d'élasticité dans le plan de l'isotropie ,

E_2 (ou E_y) : module d'élasticité dans le plan perpendiculaire au plan de l'isotropie,

G_{12} (ou G_{xy}) : module de cisaillement dans le plan de l'isotropie,

ν_{21} (ou ν_{yx}) : coefficient de poisson pour les déformations normales dans la directions des x
(Plan de l'isotropie) relié aux déformations normales dans la direction des y
(Plan perpendiculaire) dues à une contrainte uni axiale dans la direction des y.

ν_{31} (Ou ν_{zx}) : coefficient de poisson pour les déformations normales dans la directions des x
(Plan de l'isotropie) relié aux déformations normales dans la direction des z
Dues à une contrainte unie axiale dans la direction des z.

Un matériau élastique, transversalement isotropique est caractérisé par cinq constantes indépendantes.

Pour un corps transversalement isotropique, les relations seront :

$$E_3 = E_1 \quad (\text{ou } E_z = E_x)$$

$$\nu_{31} = \nu_{13} \quad (\text{ou } \nu_{zx} = \nu_{xz})$$

$$\nu_{23} = \nu_{21} \quad (\text{ou } \nu_{yz} = \nu_{yx})$$

$$G_{23} = G_{12} \quad (\text{ou } G_{yz} = G_{xy})$$

$$G_{13} = \frac{E_1}{2(1+\nu_{x1})} \quad (\text{ou } G_{xz} = \frac{E_x}{2(1+\nu_{zx})})$$

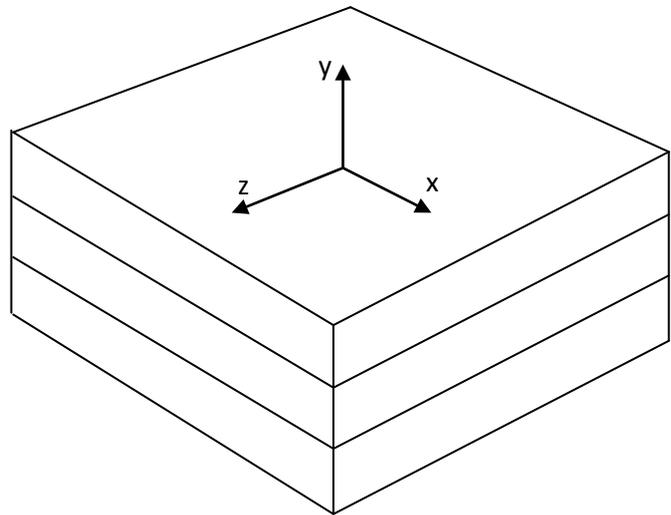


Figure IV-3: Direction xz - dans le plan de

II.3- Lois de comportement élastoplastiques :

Un comportement de type élastique linéaire ne peut être utilisé qu'en première approche car il ne permet pas de prendre en compte les déformations irréversibles. La plupart des matériaux sont élastoplastiques, leur comportement est caractérisé par l'apparition de déformations élastiques (ε^e) et, de déformations plastiques (ε^p) :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

Les modèles élasto plastiques sont basés sur trois notions fondamentales : la surface de charge, la règle d'écroutissage et la règle d'écoulement. Dans notre cas on se base sur le model de Mohr-coulomb car on a tous les paramètres nécessaires pour ce model.

❖ Le model élasto-plastique de mohr-coulomb

Le modèle élastique est le modèle de matériau le plus simple. Il est caractérisé par une relation linéaire, réversible et indépendante de l'histoire des sollicitations, entre la contrainte totale et la déformation (loi de Hooke).

En réalité, très peu de matériaux ont un comportement élastique parfait. Au-delà d'un certain seuil de contraintes, tout ou partie de la déformation additionnelle est alors irréversible.

En complément de la déformation élastique définie par la loi de Hooke, les modèles élastoplastiques intègrent ainsi un degré de déformation plastique permanente, caractérisé par une loi d'écoulement lorsque la surface de charge est atteinte.

Dans le modèle élastoplastiques de Mohr- Coulomb, l'incrément de déformation totale se décompose donc en deux parties, l'une élastique et l'autre plastique :

$$\Delta \varepsilon_i = \Delta \varepsilon_i^e + \Delta \varepsilon_i^p \quad \text{Avec : } i=1,3$$

Toutefois, la composante plastique n'est non nulle que durant l'écoulement plastique. Dans le cas contraire, l'incrément de déformation totale est égal à sa composante élastique, conformément à la loi de Hooke, qui s'écrit sous sa forme incrémentale:

$$\Delta \sigma_1 = \alpha_1 \Delta \varepsilon_1^e + \alpha_2 (\Delta \varepsilon_2^e + \Delta \varepsilon_3^e)$$

$$\Delta \sigma_2 = \alpha_1 \Delta \varepsilon_2^e + \alpha_2 (\Delta \varepsilon_1^e + \Delta \varepsilon_3^e)$$

$$\Delta \sigma_3 = \alpha_1 \Delta \varepsilon_3^e + \alpha_2 (\Delta \varepsilon_1^e + \Delta \varepsilon_2^e)$$

Dans les équations précédentes : $\alpha_1 = K + \frac{4G}{3}$ et $\alpha_2 = K - \frac{4G}{3}$ où K et G désignent respectivement les modules de compressibilité et de cisaillement du matériau, exprimés en pascals. Ils sont liés au module de Young et au coefficient de Poisson par les relations suivantes :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{ou} \quad E = \frac{9KG}{3K+G}, \quad \nu = \frac{3K-2G}{6K+2G}$$

Le domaine plastique, quant à lui, est défini par un critère de rupture associé à une loi d'écoulement plastique.

❖ Paramètres de la loi de Coulomb:

La loi de comportement élastoplastiques de Mohr-Coulomb est associée à une loi élastique linéaire, elle comprend donc au total sept (07) paramètres :

bulk_mod « K » : Le module d'élasticité volumétrique,

shear_mod « G » : Le module de cisaillement,

Cohésion « c » : La cohésion du matériau,

density « ρ » : La densité du matériau,

Friction « ϕ » : L'angle de frottement interne,

Dilatation « ψ » : L'angle de dilatation,

Tension « σ^f » : La contrainte de traction limite

III. Eléments de structures

- **Palplanche**, structure de soutènement, élément similaire à la poutre mais dont le critère de rupture repose sur les contraintes fléchissantes et l'effort latérale (poussée des terres et poussée hydraulique, butée, et charge verticale transmit).
- **Câble**, structure sans résistance à la flexion (clou, tirant à ancrage réparti ou ponctuel pouvant être précontraint).
- **Nappe**, élément qui représente le comportement de fines couches de renforcement encastrées dans un sol. Ces "bandes" ont un comportement similaire aux câbles mais elles sont dotées d'une résistance à la traction et elles peuvent simuler le comportement en cisaillement non linéaire qui se produit à l'interface sol-bande et qui est fonction de la contrainte de confinement.

IV. Type de sollicitations :

Le logiciel FLAC2D est doté de la possibilité de simuler le comportement des sols sous différentes sollicitations, à savoir :

- **Mécaniques**: c'est la simulation d'une excavation, d'un champ de contraintes, d'un chargement en surface...
- **Hydrauliques**: elles comportent :
 - La mise en place de pressions interstitielles pour le calcul de contraintes effectives (pas d'écoulement).
 - L'analyse hydro-mécanique non couplée (les pas de temps mécaniques se font une fois la perturbation hydraulique définie et l'équilibre hydraulique atteint).
 - L'analyse hydro-mécanique couplée (les processus inter-agissent au cours des pas de temps). On peut injecter des particules dans un champ d'écoulement et suivre leur déplacement au cours du temps.
 - L'analyse thermique : simulation des flux transitoires de chaleur dans les matériaux et des contraintes induites. Ces processus peuvent être couplés à des processus mécaniques et/ou hydrauliques. Ils peuvent être réalisés en conditions statiques ou dynamiques.
 - Fluage : c'est la simulation du comportement visco-plastique de certains matériaux.
 - Dynamique : c'est la simulation d'un séisme ou d'une explosion.

V. Déclaration des données dans le code FLAC^{2D}

Le logiciel FLAC^{2D} a été conçu pour opérer dans un espace bidimensionnel. L'utilisation de modèles bidimensionnels permet bien sûr de réduire considérablement les temps de calcul, mais rend surtout possible le raffinement géométrique des systèmes étudiés. En effet, pour de nombreux problèmes tridimensionnels, les maillages raffinés sont difficiles, voire impossibles à réaliser car la taille des systèmes matriciels peut très vite dépasser la capacité des ordinateurs utilisés, notamment pour des calculs non

linéaires complexes. Par conséquent, les maillages sont fréquemment plus grossiers dans le cas tridimensionnel que dans le cas bidimensionnel et la modélisation est plus approximatives, (D. Touitou, [2002]).

V.1/ Générations des grilles

La géométrie des problèmes dans FLAC est définie par des grilles et points nodaux. FLAC organise les grilles et les points nodaux en mode lignes et colonnes, ils sont dispensés dans la direction horizontale exprimée en termes de « i » et dans la direction verticale exprimée en termes de « j ». La génération graphique du maillage est exposée à la fin de ce chapitre.

V.2/ Conditions aux limites

Elles présentent la possibilité de fixer les vitesses, la saturation, les pressions interstitielles ou les températures.

Le gradient de contrainte peut-être appliqué en utilisant l'équation suivante :

$$S = S^{(s)} + \frac{X - X^{(s)}}{X^{(e)} - X^{(s)}} V_x + \frac{Y - Y^{(s)}}{Y^{(e)} - Y^{(s)}} V_y$$

Avec :

X et Y : Les coordonnées d'un point nodal dans un tracé.

$X^{(s)}, Y^{(s)}$: Les coordonnées initiales d'un point nodal.

$X^{(e)}, Y^{(e)}$: Les coordonnées finales.

V_x, V_y : Gradient de contrainte dans la direction des x et y respectivement.

$S^{(s)}$: La valeur initiale de la contrainte.

S : La valeur finale de la contrainte.

V.3/ Conditions initiales

Les conditions initiales sont les variables initiales qui sont prescrites au modèle avant n'importe qu'elle construction soit commencée. Elles permettent l'application de forces ponctuelles ou réparties, de déplacements, de vitesses, de pressions mécaniques, de contraintes, de pressions interstitielles, de températures, de flux d'échanges thermiques. L'état initial le plus adapté sera représenté par mesure sur le terrain (par des mesures in situ), en utilisant la commande « *INITIAL* ». Si aucune mesure sur le terrain n'est disponible, les efforts devraient être exécutés pour imiter les conditions au site.

V.4/ Simulation du comportement du sol marin sous ouvrages portuaires en palplanches métalliques ancrées.

Nous avons utilisé pour la détermination des contraintes et des déformations (déplacements) du site du port de Djendjen le logiciel FLAC^{2D}, version 5.0 (FLAC^{2D}, [2005]).

Nous avons choisi ce site car nous disposons de données suffisantes pour réaliser ce calcul numérique. Le modèle pris dans cette analyse est le modèle élastique.

Les paramètres de ce modèle sont définis à partir des résultats de l'étude géotechnique qui a été mise à notre disposition par le LEM (Laboratoire des Etudes Maritimes à Alger).

désignation	γ_d (t/m ³)	C (t/m ²)	Φ (°)	ν	G (Pa)	K (Pa)
Sol1: sable fin compact à dense	2.009	4000	40	0.3	2.34962E8	5.0983E8
Sol2: sable et gravier	1.813	1000	35	0.3	6.29692E7	1.36433E8
Sol3: galet et grès	1.715	1000	30	0.3	6.29615E7	1.36417E8

Tableau IV-3 : Paramètres géotechniques.

V.5/ Le maillage

Le profil du sol a été discrétisé en éléments rectangulaires de (50x30) m en coupe avec une excavation à gauche. La figure (IV-1) montre un exemple du maillage utilisé dans l'analyse numérique.

V.6/ Conditions aux limites et initiales

Les deux cotés sont fixés dans la direction horizontale (x), et les nœuds à la base du modèle sont fixés dans la direction verticale (y).

Les conditions initiales appliquées au modèle sont les contraintes présentes initialement dans le sol ; celles-ci diffèrent selon le type de sol utilisé dans l'analyse.

Dans notre cas, elles sont hydrostatiques causé par le poids de l'eau. Elles sont calculées à partir des relations suivantes :

$$\sigma_{yy} = \rho g h$$

$$\sigma_{yy} = k_0 \sigma_{yy}$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{xx}$$

La surcharge appliquée est une contrainte verticale, uniformément répartie sur la surface.

V.7/ Inclusion de la structure

La structure de notre exemple est un rideau de palplanches métalliques inclus jusqu'à la troisième couche du sol pour bien maintenir le massif du sol. Ce rideau est maintenu avec un tirant d'encrage du côté palplanche, il est fixé par système de boulonnage, et de l'autre extrémité est encré dans le sol.

VI. Résultats obtenus

Une fois le calcul lancé, les résultats obtenus par le Flac sont des courbes qui présentent les déformations (déplacements) du sol horizontales et verticales des couches du sol, ainsi que les contraintes dans les zones du contact sol-structure pour sol-palplanche et aussi pour sol-câble. Ils sont représentés par la suite.

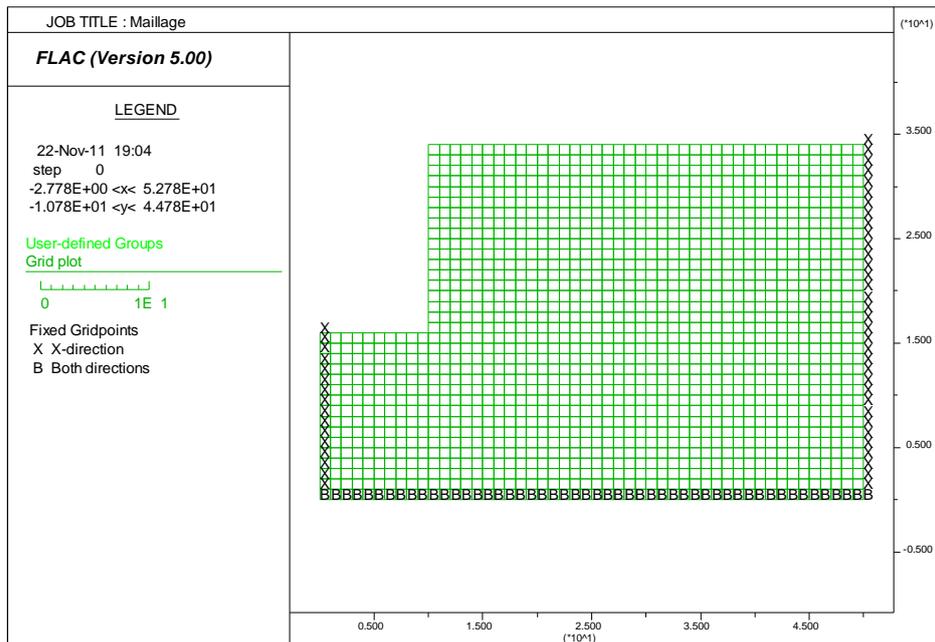


Figure IV-1 : le maillage utilisé pour la modélisation

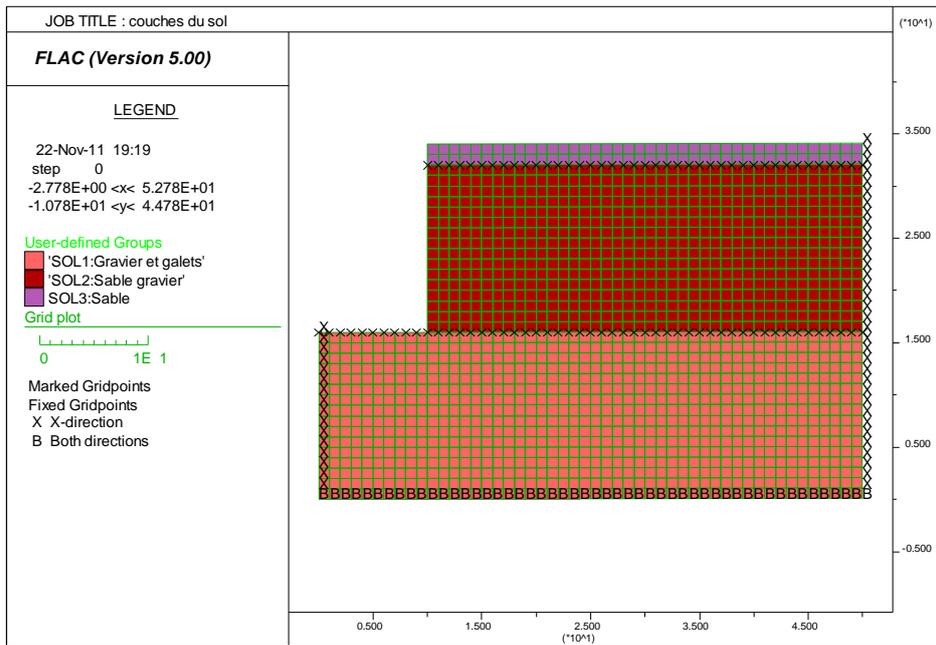


Figure IV-4 : les couches de sols de modèle choisi.

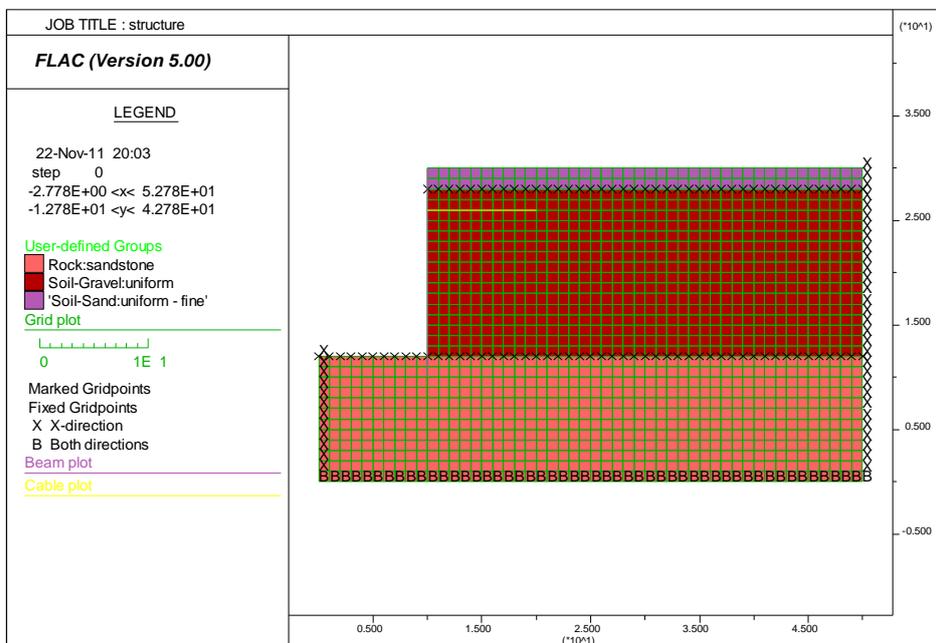


Figure IV-5. Le modèle après l'inclusion de la structure (la palplanche et le câble).

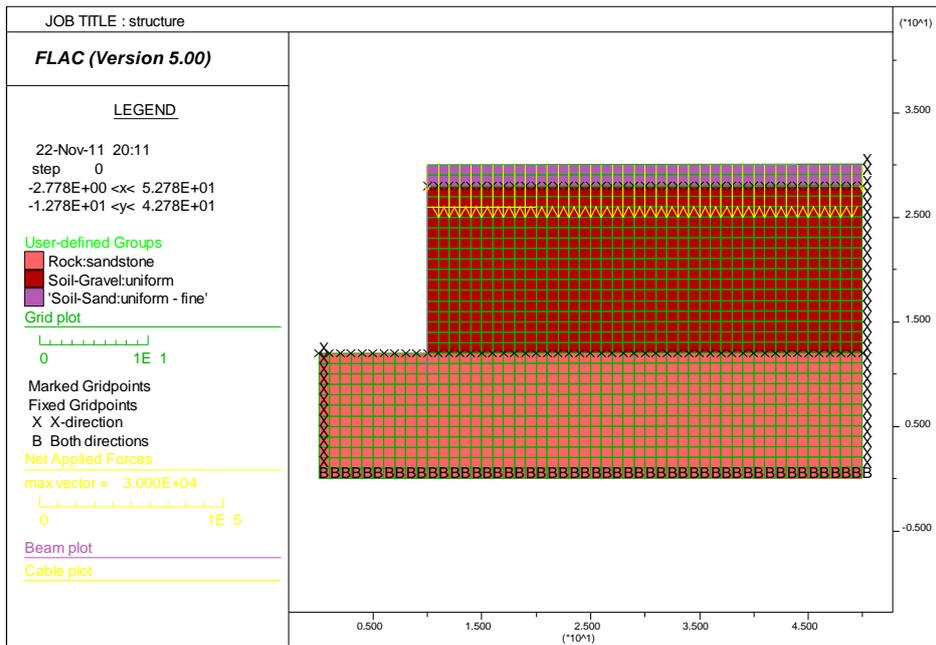


Figure IV-6. Le model après l'application des contraintes et la charge.

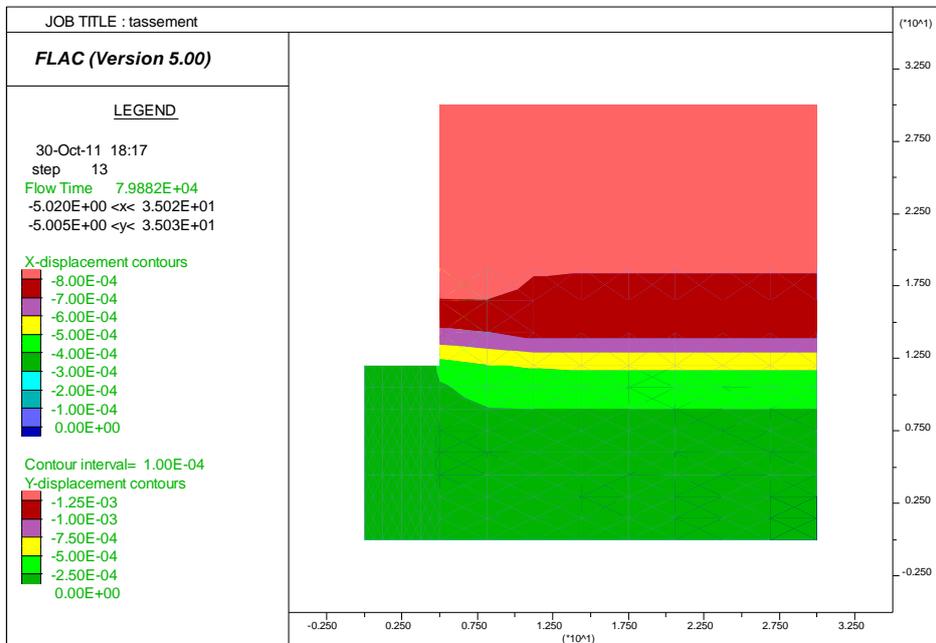


Figure IV-7. Les déplacements des couches de sol sous chargement

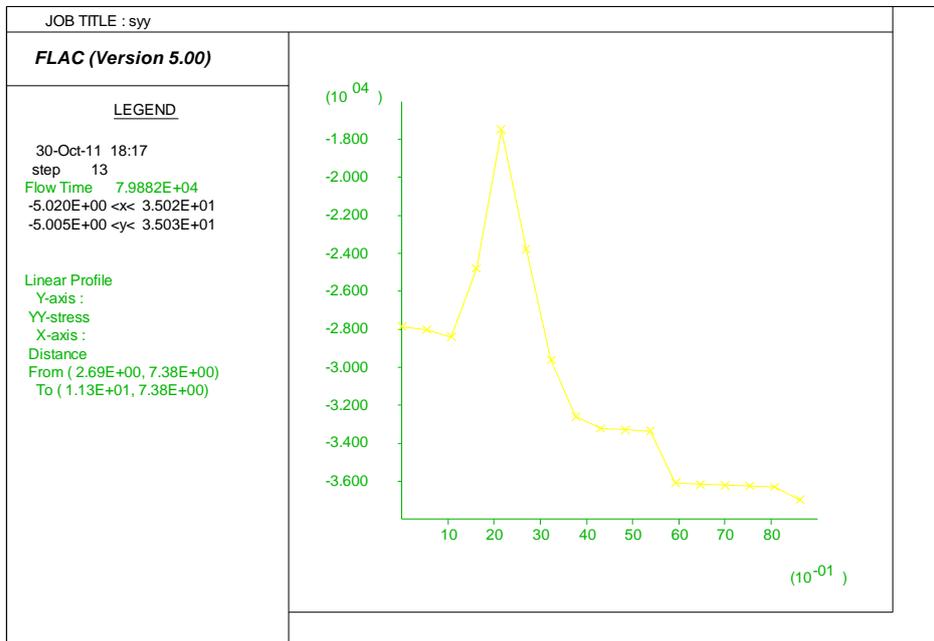


Figure IV-8. Les contraintes verticales du sol.

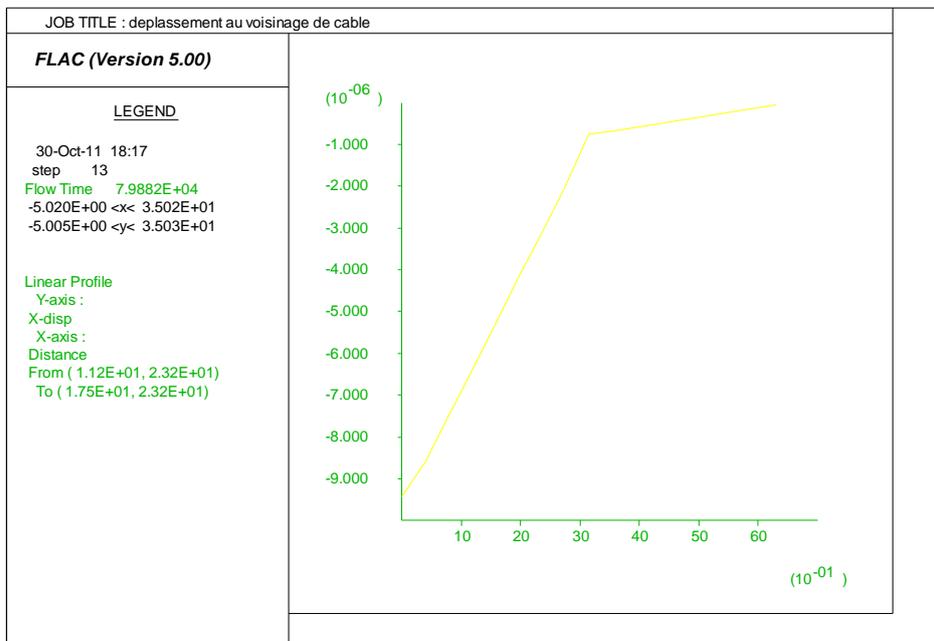


Figure IV-9 : le déplacement horizontal au voisinage du câble.

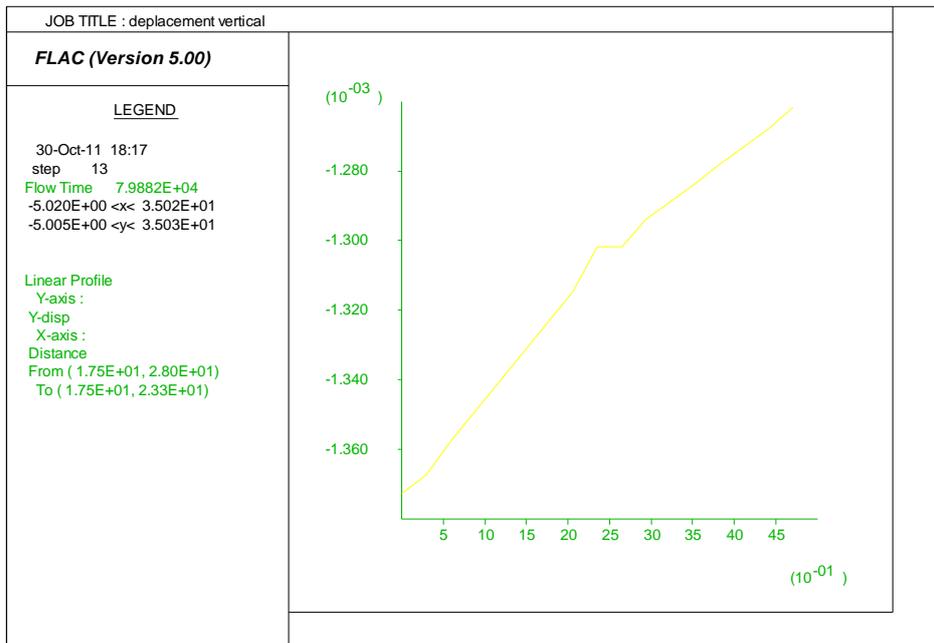


Figure IV-10 : a) le déplacement vertical au voisinage du câble.

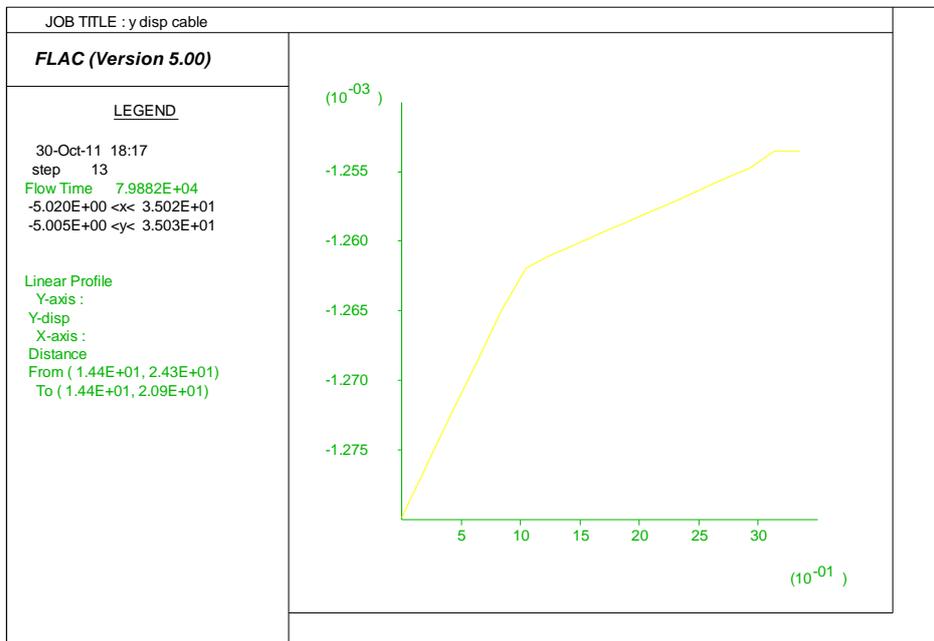


Figure IV-10 : b) le déplacement vertical au dessous du câble.

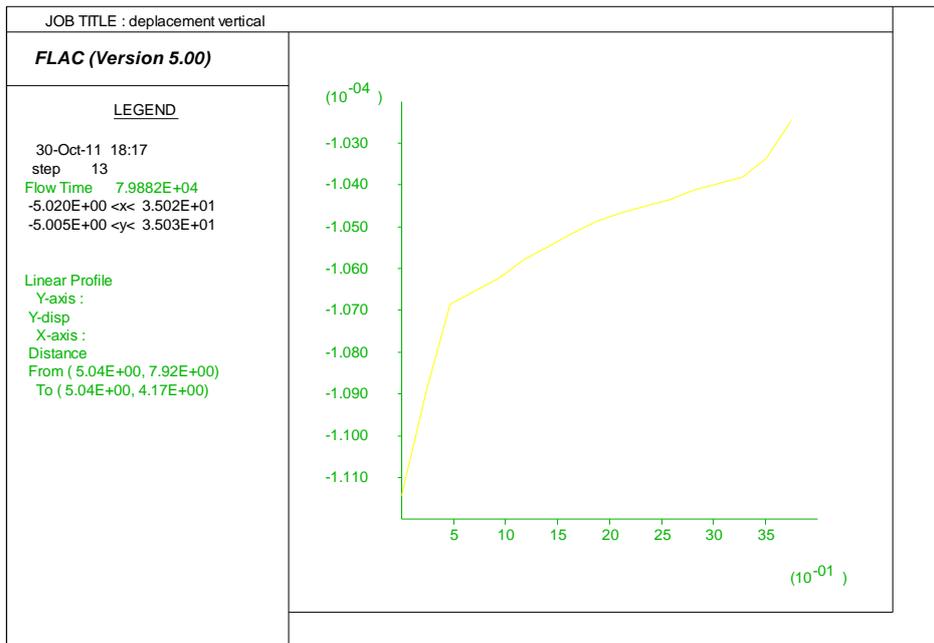


Figure IV-11: le déplacement vertical au dessous de la palplanche.

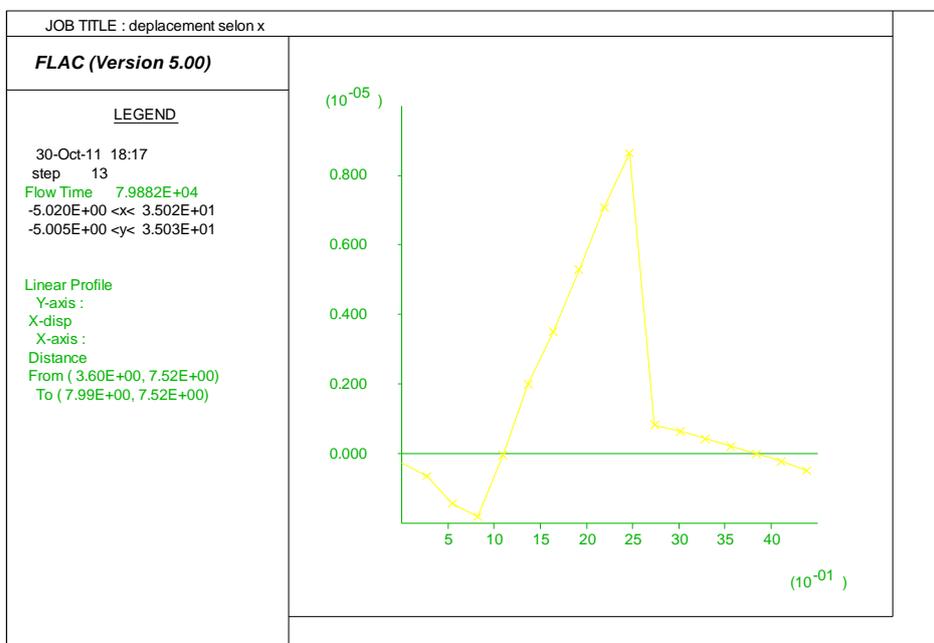


Figure IV-12: le déplacement horizontal au dessous de la palplanche.

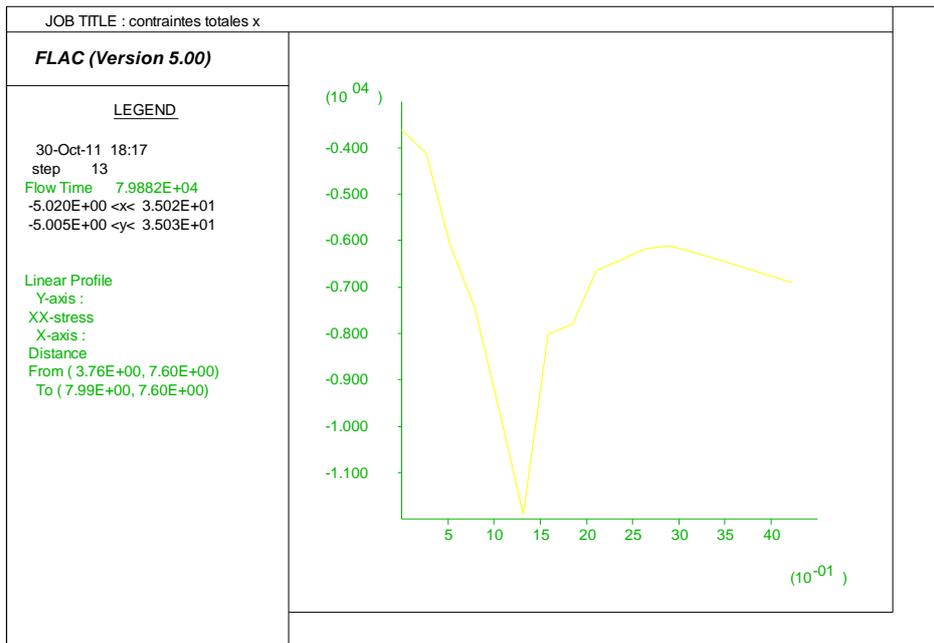


Figure IV-13: les contraintes totales x au dessous de la palplanche.

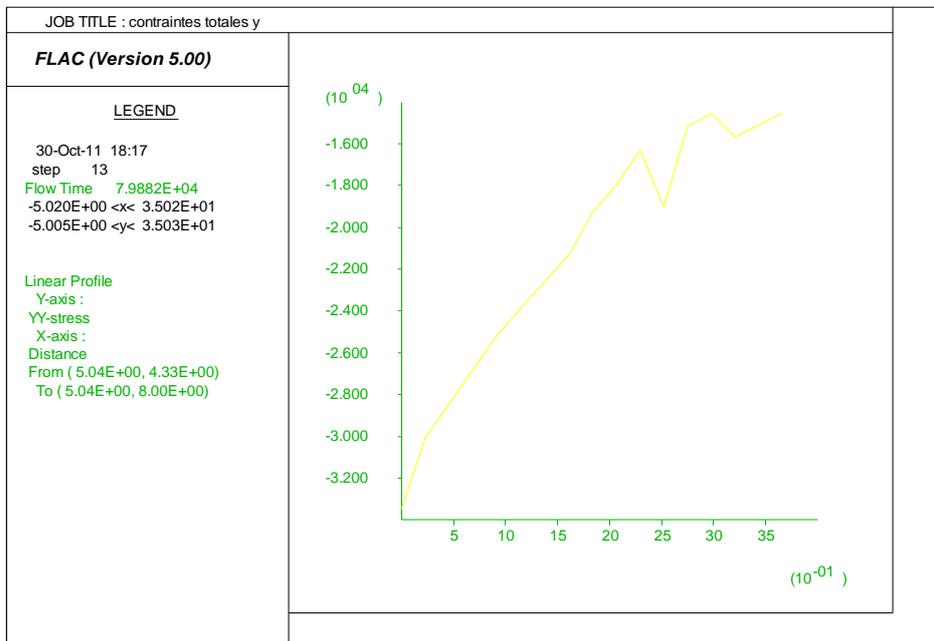


Figure IV-14: les contraintes totales y au dessous de la palplanche.

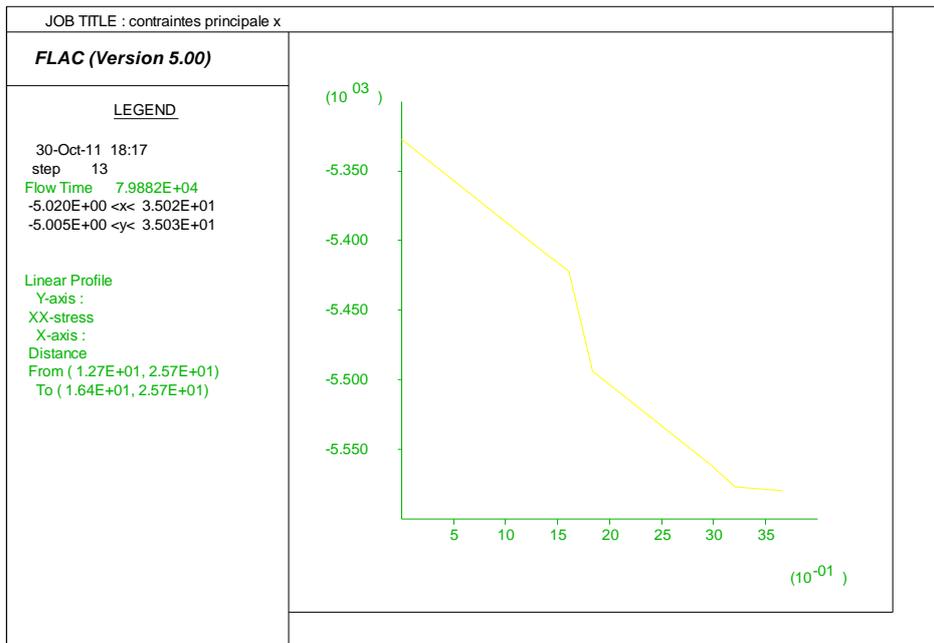


Figure IV-15: les contraintes totales x au dessous du câble.

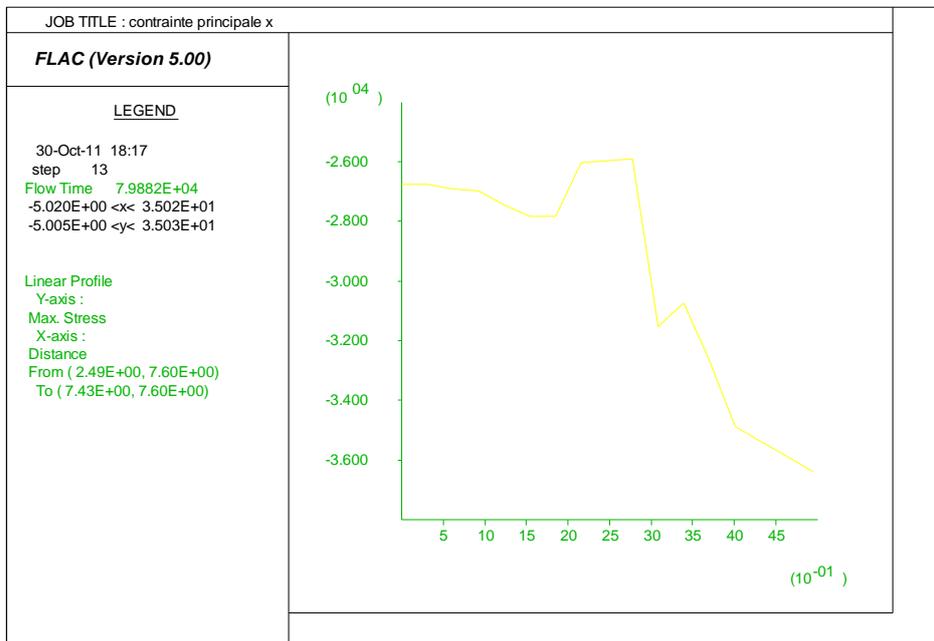


Figure IV-16: les contraintes principales x au dessous de la palplanche.

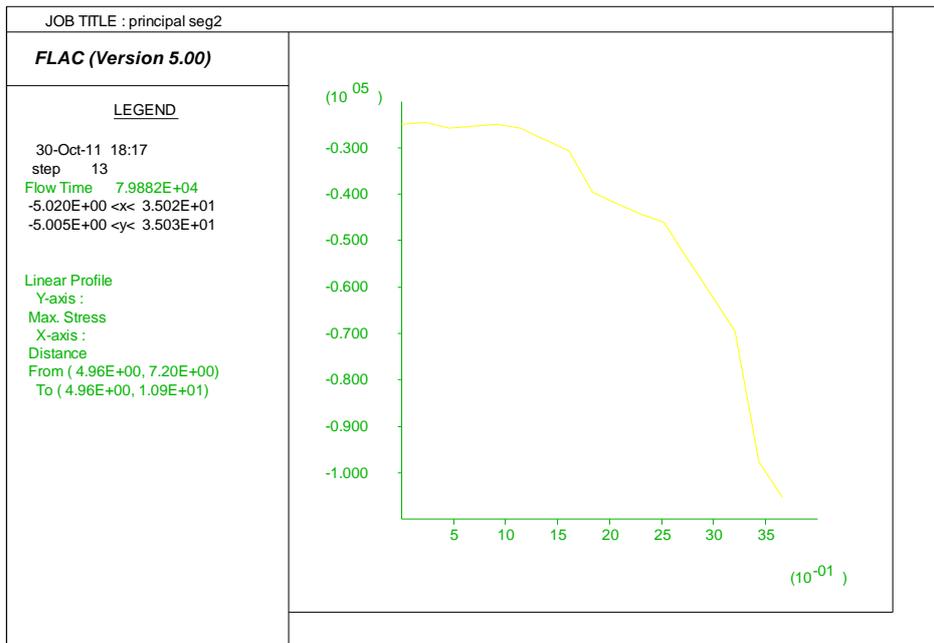


Figure IV-17: les contraintes principales y au dessous de la palplanche.

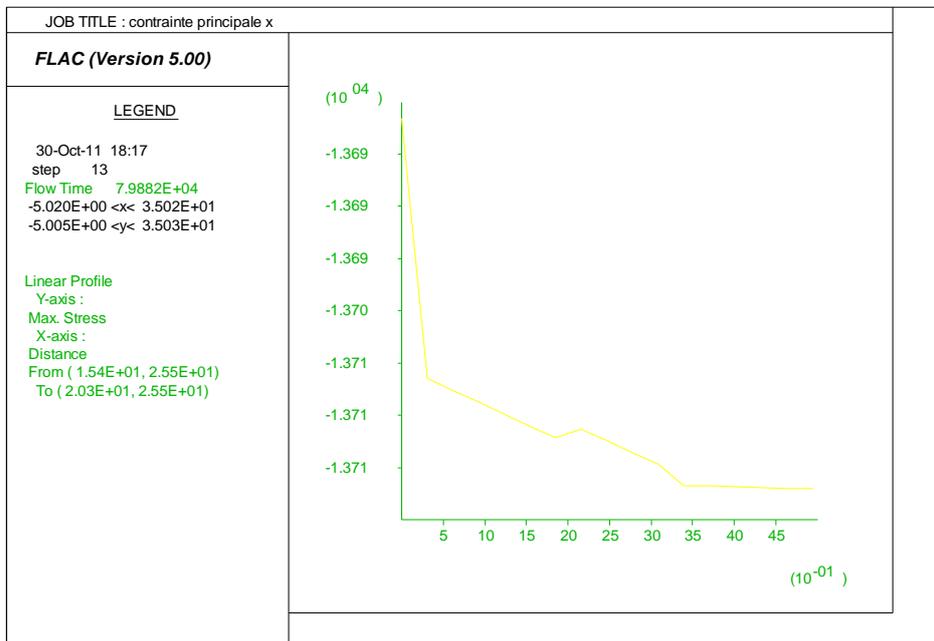


Figure IV-18: les contraintes principales x au dessous du câble (seg1).

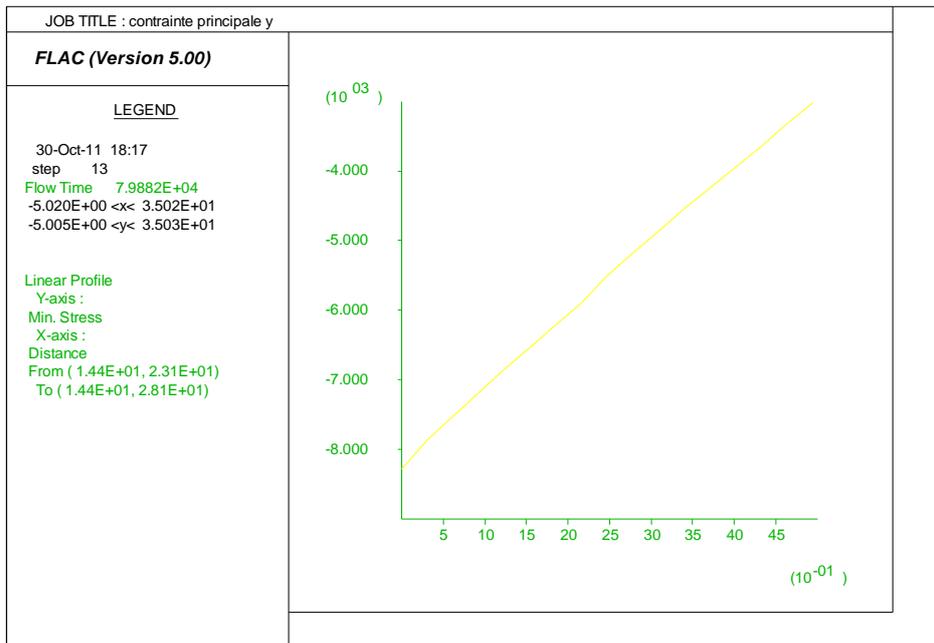


Figure IV-19: les contraintes principales y au dessous du câble (seg2).

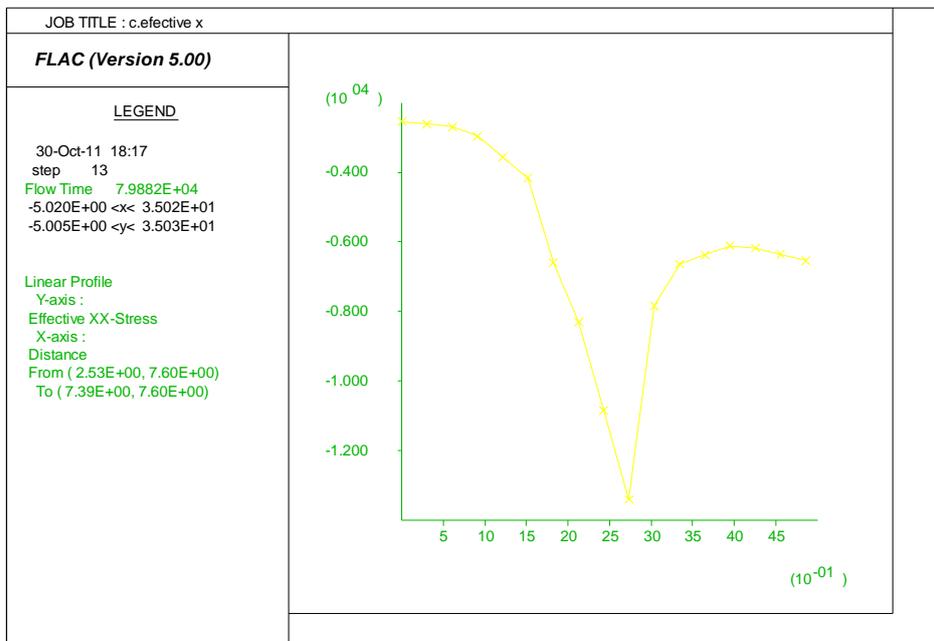


Figure IV-20: les contraintes effectives x au dessous de la palplanche.

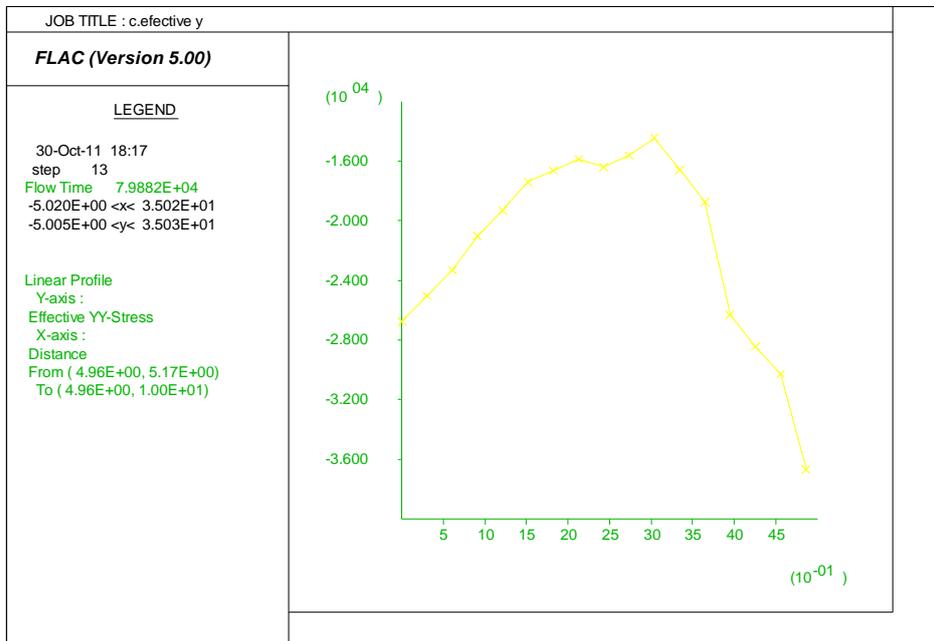


Figure IV-21: les contraintes effectives y au dessous de la palplanche.

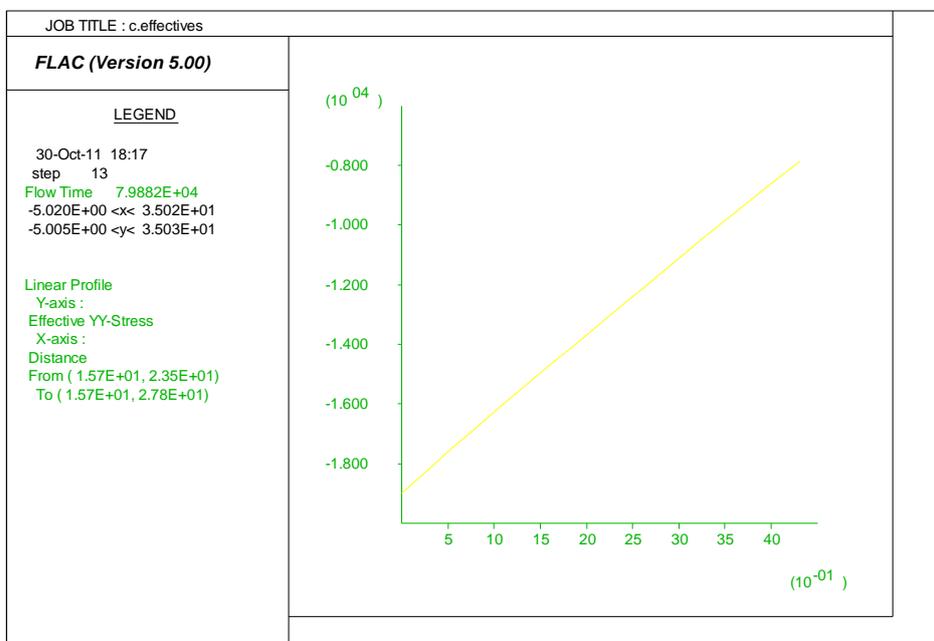


Figure IV-22: les contraintes effectives x au dessous du câble.

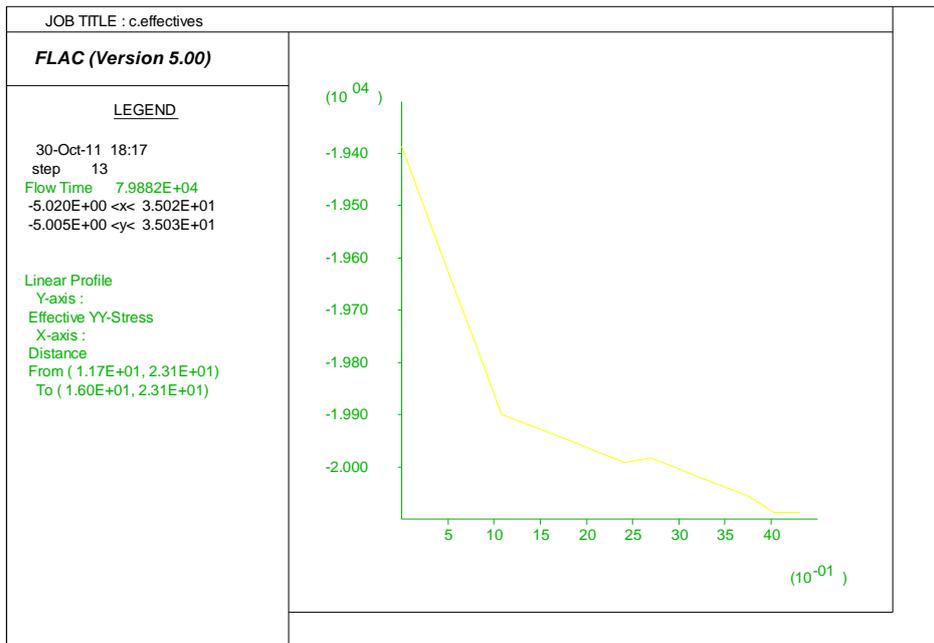


Figure IV-23: les contraintes effectives y au dessous du câble.

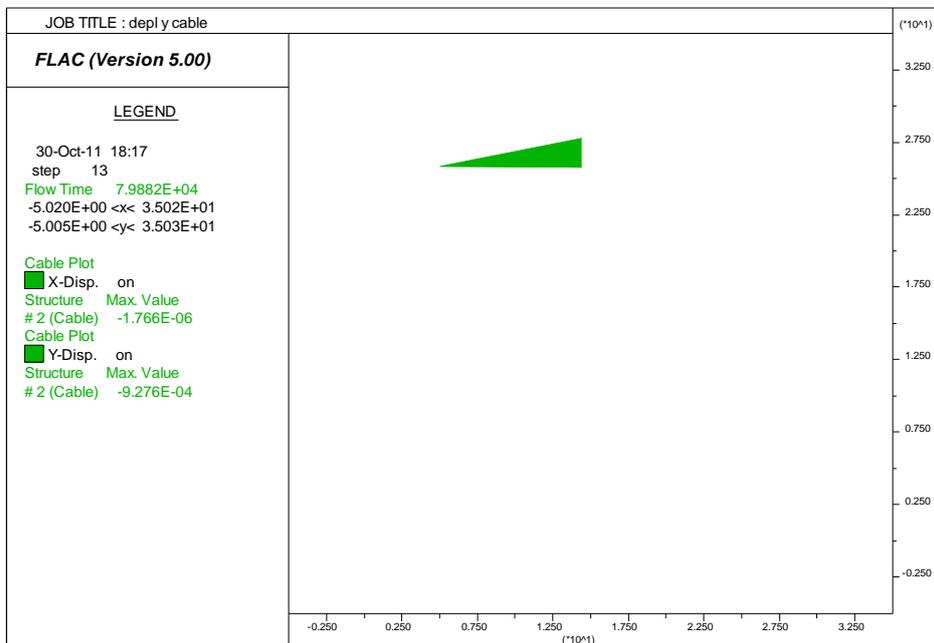


Figure IV-24: le déplacement vertical du câble.

VII. Interprétation des résultats

On a essayé de relever les résultats dans les parties importantes, pareil pour leurs interprétations; en cherchant toujours les résultats qui représentent le comportement de ce sol sous chargement c'est-à-dire les contraintes et les déplacements, en contact avec la structure (palplanche, câble).

Figure IV-8:

Les déplacements des couches du sol se sont apparus dans les deux sens horizontal et vertical, mais dans le deuxième sens est plus important que le premier, ce qui est dû au chargement (charge appliquée, contrainte verticale) plus important que les efforts latéraux (poussée, butée, et efforts hydrostatiques). Et on peut le voir clairement dans la dernière figure (fig IV-24) le déplacement vertical du câble, qui est nul du côté palplanche, et max du côté sol.

Figure IV-9:

Les déplacements verticaux sont faibles, juste au point de l'enfoncement de la palplanche, commencent à augmenter jusqu'au pic (déplacement max) qui signifie l'encrage de la palplanche et puis ils diminuent pour se stabiliser à la valeur très faible et zéro pour la couche inférieure.

Figure IV-10:

Les déplacements selon x au voisinage du câble d'encrage commencent par une très faible valeur et augmentent linéairement, mais juste au point de fixation du tirant d'encrage, la courbe change de pente (moins importante), et toujours linéaire car le sol et sous chargement uniforme.

Figure IV-11-a:

Le déplacement vertical commence par une valeur minimale et augmente linéairement du côté buté au point de la fixation du câble, puis continue en croissance sous le même chargement là où il n'y a pas de structure.

Figure IV-11-b:

Les déplacements du sol verticaux au dessous du câble (tirant) commencent de zéro (déplacements nuls), et augmentent sous l'effet du chargement (allure linéaire), à une certaine distance la courbe change de pente (inférieure), c'est le point de fixation du tirant, ce qui donne des déplacements moins importants sous le même chargement.

Figure IV-12:

L'allure du déplacement vertical est presque linéaire et croissant, et commence à partir d'une valeur minimale et augment linéairement avec une pente sous chargement uniforme, et puis elle devenue non linéaire, mais toujours en croissance.

On a essayé d'interpréter les résultats les plus importants (déplacement du sol), mais puisque on a fait un maillage raffiné on peut extraire les résultats à n'importe quelle zone dans ce sol.

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, après un rappel de quelques notions de mécanique des milieux continus, nous avons présenté le logiciel FLAC 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 marin sous ouvrages portuaires en palplanche métallique dans notre cas, à l'aide du logiciel FLAC passe par plusieurs étapes. La première étape est la récolte des données géotechniques nécessaires. Ces données sont obtenues par des essais in situ. 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. Les deux cotés sont fixés dans la direction horizontale (x), et les nœuds à la base du modèle sont fixés dans la direction verticale (y). Les limites en champs libre sont en plus assignées sur les deux cotés du modèle, de sorte que les ondes extérieures propagées à l'intérieur du modèle puissent être correctement absorbées par les bornes. Les conditions initiales sont les contraintes présentes initialement dans le sol. Dans notre cas, celles-ci sont les contraintes hydrostatiques causées par l'eau. L'avant dernière étape consiste en l'application des divers chargements. Enfin, vient la dernière étape qui consiste en l'extraction des divers résultats obtenus par l'application de ces chargements et leur interprétation.

Conclusion générale

Les méthodes expérimentales sont fiables, mais leurs difficultés, notamment en milieu marin et leur coût important ont fait qu'elles ne sont pas constamment sollicitées. Mais la puissance importante des ordinateurs, le développement de logiciel à base d'éléments finis ainsi que l'accès facile à ces machines ont accentué les exploits des bureaux d'étude et des laboratoires.

L'évolution des ouvrages portuaires a marqué sa place à l'échelle mondiale, vu le rôle important que joue un port dans l'économie d'un pays. Cette évolution englobe tous les types d'ouvrages maritimes ainsi que les différents éléments qui les constituent.

Pour le cas de l'Algérie, l'infrastructure portuaire est en progression, mais il est à signaler que malgré les efforts consentis par l'état algérien dans la rénovation, l'aménagement et la construction de nouveaux ports, il y'a encore énormément à faire pour rehausser l'infrastructure portuaire nationale au niveau des ports méditerranéens ou mondiaux.

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

La mise en œuvre d'un rideau de palplanches métalliques se fait par trois procédés différents: le battage, le vibrofonçage, ou la presse hydraulique. Pour le battage; le casque a plusieurs formes, il suffit de le changer et mettre en fiche la palplanche qui convient en gardant le même procédé.

Le vibrofonçage est un procédé très rapide, à l'aide des vitesses qu'on peut varier jusqu'à plusieurs mètres par minute.

La mise en place par presse hydraulique est la plus lente, mais ce système n'a pas de vibration, et peu de nuisances sonores.

Chacun de ces trois types de mise en œuvre présente des avantages par rapport aux autres selon le type de palplanche à utiliser, le nombre, et le lieu du chantier, et selon la tâche à effectuer: l'enclenchement, l'arrachage, et le recape des palplanches. Le point commun à tous ces procédés de mise en œuvre d'un rideau de palplanche est le changement du comportement du sol dans lequel il est enfoncé.

Il y a plusieurs facteurs qui influent sur l'interaction sol-palplanche, dont des facteurs géotechniques (paramètres du sol, nature du sol, présence de l'eau, poussée des terres), et d'autres structuraux (chargement, hauteur libre de l'écran, fiche de l'écran, type et l'installation de cet écran, et systèmes d'appuis). Ces facteurs nous ont permis d'étudier la stabilité interne et externe d'un rideau de palplanche à partir de poussée et butée de sol. D'autres facteurs ont une influence directe sur la palplanche tel que (le temps, la température).

La présente thèse est une simulation du comportement du sol sous ouvrages portuaires en palplanches métalliques avec le logiciel de calcul « FLAC^{2D} ». Elle consiste en l'application de différents chargements verticaux et horizontaux, et de connaître le comportement du sol.

La base du calcul numérique du logiciel est la formulation explicite de la méthode des différences finies où on formule les équations pour les éléments de formes quelconques, en précisant les frontières et l'état initial de l'élément choisi, pour avoir un modèle qui permet de lier les paramètres du sol entre eux.

Dans notre cas, on a opté pour le modèle de Mohr-Coulomb vu la disponibilité des données géotechniques ($G, E, K, \nu, C, \phi, \gamma$), fournis par le LEM, pour le maillage le plus fin, et on a fixé les frontières, et les conditions initiales.

Les résultats sont donnés sous forme de différentes courbes dans les zones où il y a interaction (sol-structure), soit l'interaction sol-palplanche, ou bien sol-tirant, considérant toutes les conditions initiales.

Les résultats obtenus dans le présente mémoire et concernant le site du port de djendjen à jijel sont du même ordre de grandeur de ceux obtenus au niveau du laboratoire des études maritimes (LEM) d'Alger. Ce laboratoire ayant réalisé l'étude du même port avec un autre code de calcul. La confrontation de nos résultats était satisfaisante et validée par les ingénieurs du LEM.

On espère que cette étude puisse avoir une continuité, avec application d'un chargement dynamique, ou on considérant d'autres lois de comportement du sol.

L'exemple étudié :

L'exemple traité dans ce mémoire est un projet d'aménagement de postes céréaliers qui se situe au port de Djen-Djen à Jijel.

La partie étudiée concerne le raccordement sud, en utilisant des rideaux de palplanches métalliques, sur une longueur en forme de L de dimension (53 x 24). Le projet est présenté dans la figure suivante :

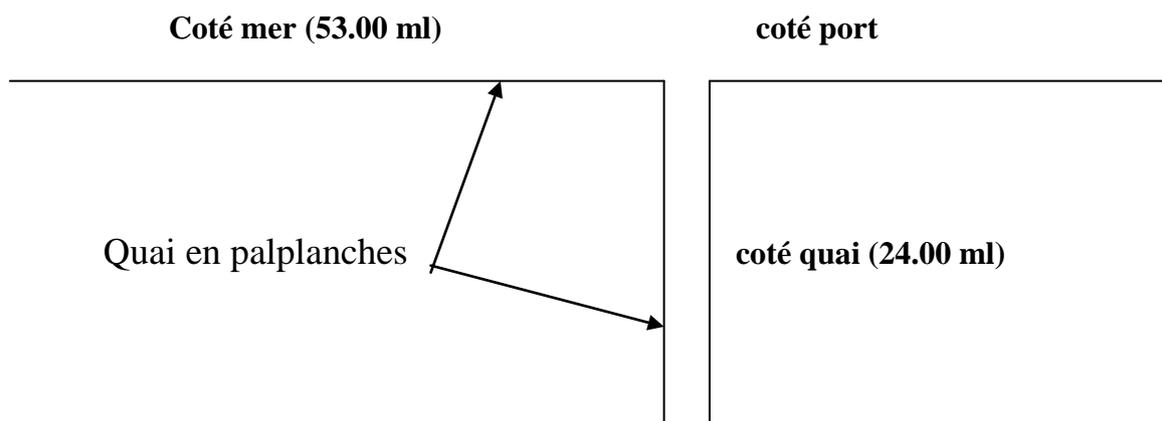


Fig. I. Vue en plan du projet.

1/ Les palplanches

A/ Coté mer :

Le rideau est enfoncé en escalier sur 5 profils, et chaque profil a ces détails qui sont figurés dans le tableau suivant :

Profil	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Profil 5
Nombre de Palplanches	20	20	20	20	26
Profondeur de palplanches (ml)	6,70	9,70	12,70	15,70	18,72
Largeur de palplanches (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Tableau 1 : caractéristiques des profils coté mer.

B/ Coté quai :

Le rideau de palplanche est enfoncé en 5 profils et aussi en escalier, les détails des profils sont représentés dans le tableau suivant :

profil	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Profil 5
Nombre de Palplanche	13	09	09	09	09
Profondeur de palplanches (ml)	6,70	9,70	12,70	15,70	18,72
Largeur de palplanches (m).	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Tableau .2 : caractéristiques des profils coté quai.

▪ **Caractéristiques :**

Palplanche de type LARSSSEN V_s en U. et caisson L.P

Avec une nuance E360 SP.

$$Re = 3600 \text{ kg/cm}^2.$$

$$E_p = 0,02 \text{ m.}$$

2/ Les tirants d'ancrage :

- Le coté mer est maintenu avec 3 tirants d'ancrage de 12,00 m de longueur, espacé de 21,00 m entre eux.
- Le coté quai est maintenu à l'aide de 2 couples de tirants d'ancrages :
1 couple de 8,00 m de longueur espacé de 8,00 ml.
1 couple de 12,00 m de longueur espacé de 9,00 ml.
Les deux cotés de tous les tirants sont maintenus, l'un sur la palplanche avec des boulons, et l'autre coté avec un système de fixation,
Sur 2.10m de hauteur par rapport au niveau de recepage.

▪ **Caractéristiques :**

Nuance : E25.2NE

$$Re = 2200 \text{ kg/cm}^2$$

Diamètre : \varnothing 80 mm.

3/ Les accessoires :

- Les liernes : 4PN 220
- Les boulons de fixation des liernes de \varnothing 60 mm de diamètre.

Annexe 2.

2- Description générale du logiciel FLAC-GIIC

2-1 Introduction

Le système FLAC est un progiciel, développé par le groupe américain ITASCA, destiné à modéliser et à analyser les problèmes de géo-mécanique en général et de mécanique des sols en particulier.

Il existe deux interfaces dans FLAC, la première qui se base sur l'introduction des données par commande ligne en utilisant le langage FISH, donc la modélisation et l'analyse sont réalisées grâce à un programme qu'il faut confectionner (vu au chapitre2). La deuxième interface est le GIIC « *Graphical Interface for Itasca Codes* », cette dernière est pilotée par des menus déroulants, des boîtes de dialogues et des barres d'outils développées pour aider les utilisateurs de FLAC. Parmi les caractéristiques de FLAC GIIC on peut citer :

- Définition du projet à modéliser en mode entièrement graphique.
- Possibilité de présentation graphique du domaine étudié et de la représentation à l'écran des différents types de résultats de calcul.
- Facilité d'effectuer une analyse statique et dynamique.
- Possibilité de composer librement les impressions.

Nous présentons dans ce qui suit un bref aperçu sur les composants de l'interface graphique de FLAC GIIC Version 5.0 utilisé pour préparer ce travail.

2-2 Le bureau de démarrage

Après avoir effectué l'installation du logiciel FLAC, une icône de démarrage apparaît sur le bureau de l'ordinateur. En cliquant dessus une fenêtre principale et une boîte de dialogue apparaissent sur l'écran comme indiqué sur la figure A2.1.

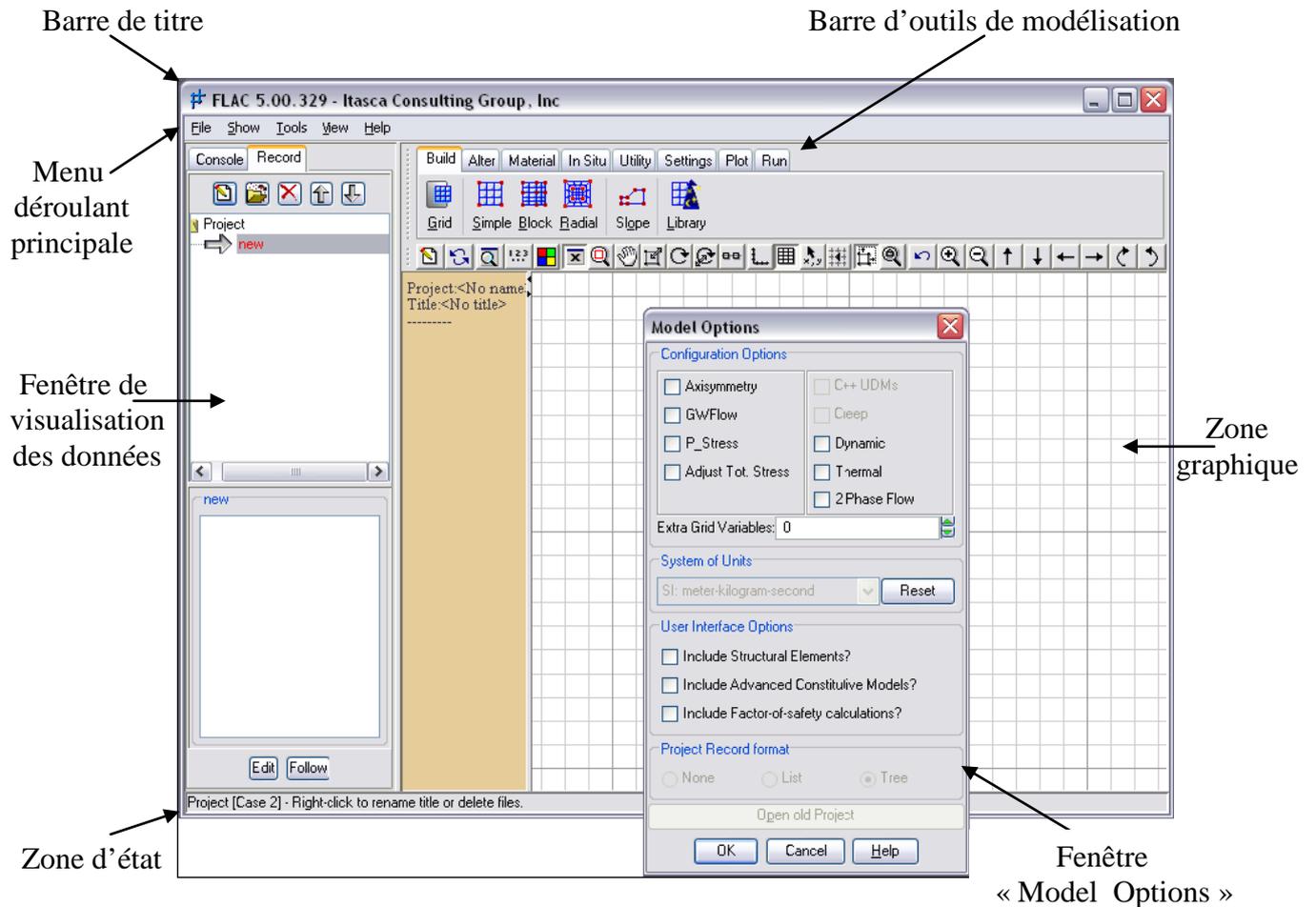


Figure 2-1 : Le bureau de démarrage dans la configuration graphique de FLAC 2D. GIIC.

2-3 Fenêtre principale

Les éléments importants de la fenêtre principale représentée sur la figure ci-dessus peuvent se résumer comme suit :

- Barre de titre : sur laquelle sont affichées les informations de base concernant le logiciel (nom, version ainsi que l'organisme qui a mis au point et développé ce logiciel.)
- Menu déroulant principal : grâce auquel on peut accéder à toutes les commandes de Flac.
- Fenêtre de visualisation des données : elle sert à visualiser le déroulement des calculs lors de l'exécution.

- Zone d'état : se trouvant dans la partie inférieure de la fenêtre principale, affiche les informations suivantes ; nom des fenêtres d'édition ouverte, coordonnées de la position du pointeur, unité utilisé...etc.
- Zone graphique : (fenêtre de l'éditeur graphique) qui sert à modéliser et visualiser le domaine discrétisé ainsi que tous les résultats de l'analyse.
- Barre d'outils : c'est un type de menu dans lequel toutes les options de modélisation sont représentées par des icônes, et grâce auxquelles on procède à la discrétisation et l'analyse du domaine à étudier.

2-2-1 Fenêtre de dialogue « Model Options »

La fenêtre de dialogue « Model Options » apparaît à chaque lancement du logiciel FLAC GIIC ou bien à chaque fois qu'on lance un nouveau projet, figure A2.2.

Cette fenêtre permet de choisir le mode et le type d'analyse selon le problème à résoudre (analyse dynamique, thermique, fluage, axisymétrique....etc.). On peut sélectionner aussi le système d'unité à utiliser tout au long de l'analyse, ainsi que les modèles de comportement définis dans FLAC GIIC. Des éléments structuraux peuvent être aussi inclus dans le modèle à analyser.

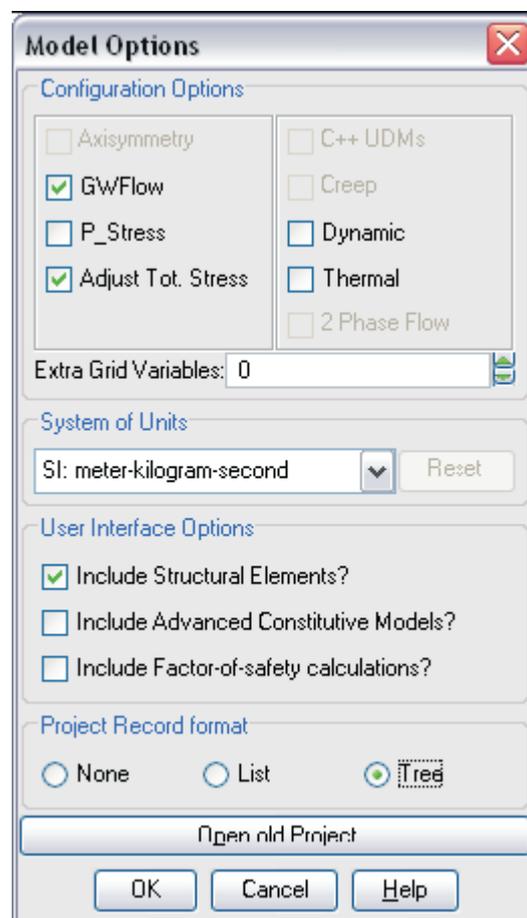


Figure 2-2 : Fenêtre de dialogue « Model Options » dans la configuration graphique de FLAC 2D GIIC.

2-3 Menus déroulants et les barres d'outils

2-3-1 Menus déroulants

Le menu déroulant principal contient cinq composants, figure (A2.3), il donne accès à toutes les commandes de FLAC GIIC. On peut les résumer comme suit :



Figure 2-3 : Menu déroulant principale dans la configuration graphique de
FLAC GIIC.

2-3-1-1 Menu File

Le menu déroulant File, figure A2.4, contient les composants suivants :

- *Model options* : il nous permet de retourner à la boîte de dialogue « Model Options Dialog » pour choisir les options d'interfaces de l'élément à modéliser.
- *Open Project* : il nous permet d'ouvrir un projet enregistré au préalable. Le nom du projet est identifié par l'extension '.PRJ'.
- *New Project* : cet élément du menu lance un nouveau projet. En cliquant dessus, la boîte de dialogue « Model Options Dialog » s'ouvre pour entamer un nouveau projet après avoir fermé le projet déjà existant.
- *Save Project* : pour effectuer automatiquement toute mise à jour ou modification d'un fichier en extension '.PRJ', on enregistre le fichier avec la commande *Save Project*, sous une extension '.SAV'.
- *Save Project As* : enregistrer un nouveau fichier en extension '.SAV' ou donner un autre nom pour un fichier déjà existant.
- *Import Record* : importer des fichiers en extension '.PRJ' formant un seul programme d'un projet. Les commandes sont lus par FLAC mais pas exécuter automatiquement.
- *Export Record* : son rôle est d'exporter des fichiers en extension '.PRJ' après avoir effectué des modifications.
- *Create Report* : un fichier HTML sera créé lors de la lecture de tous les fichiers en extension '.PRJ' formant le programme du projet.
- *Print Plot Setup* : cette commande permet de choisir le format d'impression de l'élément modélisé dans la fenêtre de l'éditeur graphique.

- *Print Plot* : cette commande permet d'imprimer directement sur une imprimante l'élément se trouvant dans la fenêtre de l'éditeur graphique.
- *Color Preference Settings* : cette commande contrôle tout le graphisme du logiciel FLAC GIIC ainsi on peut personnaliser les couleurs de toutes les fenêtres graphiques.
- *Preference Settings* : ce composant du menu nous permet de personnaliser le contrôle de quelques commandes de FLAC GIIC.
- *Save Preferences* : cette commande permet de sauvegarder toutes les modifications effectuées grâce aux deux dernières commandes citées ci-dessus.
- *Customer Title Information* : permet d'inscrire le nom de l'acquéreur du logiciel FLAC afin qu'il puisse apparaître dans tous les tracés imprimés.
- *Exit GIIC* : quitter le mode graphique de FLAC GIIC pour revenir au mode de commande ligne de FLAC.
- *Quit* : sortir du logiciel FLAC.

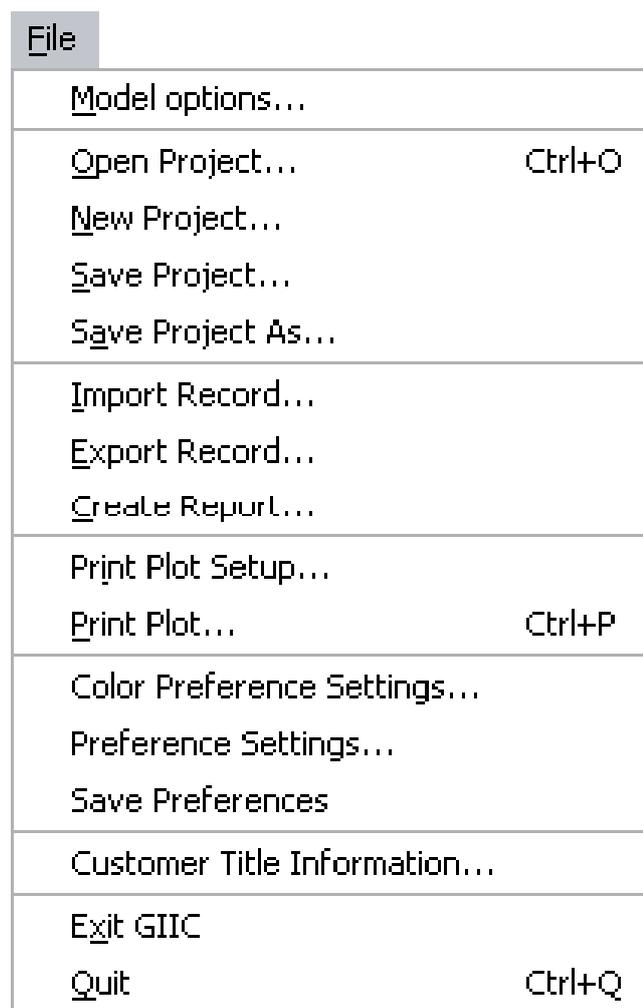


Figure 2-4 : Menu File dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-1-2 Menu Show

La fenêtre principale de FLAC GIIC est divisée en six composantes d'affichage : Main menu, Toolbar, Resources, Viewsbar, Statusbar et Fish Editor. Elles sont rassemblées dans le menu Show, figure A2.5, dans lequel on peut activer ou désactiver l'une des six composantes.



Figure 2-5 : Menu Show dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

Le menu Show contient les composants suivants :

- Tools : Cet élément permet aux outils de modélisation d'être visualisés dans une barre d'outil ou comme élément de menu. En outre, ils peuvent être présentés en tant que graphismes ou texte ou tous les deux. (Voir Menu Tools ci-dessous)
- Viewbar : Ses éléments peuvent être montrés comme un menu déroulant ou bien comme une barre d'outil qui peut être affichée ou cachée. (Voir Menu View ci-dessous)
- Resources : la zone de données de source peut être affichée ou cachée avec ces éléments.
- Views : la zone graphique peut être affichée ou cachée avec ces éléments.
- Statusbar : la zone d'état peut être affichée ou cachée avec ces éléments.
- Fish Editor : la fenêtre de Fish Editor peut être activée ou désactivée avec ces éléments.

2-3-1-3 Menu Tools

Le menu Tools contient toutes les commandes pour modéliser l'élément à étudier. Le menu Tools peut être sous une forme déroulante comme l'indique la figure A2.6, on peut aussi y accéder grâce à des barres d'outil, qu'on décrira dans la suite de cette annexe.



Figure 2-6 : Menu Tools dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-1-4 Menu View

Le menu View contient tous les outils de traçage et de vues utilisées dans le logiciel FLAC. Le menu View peut être sous une forme déroulante comme l'indique la figure A2.7, on peut aussi y accéder grâce à une barre d'outil, comme le montre la figure A2.8.

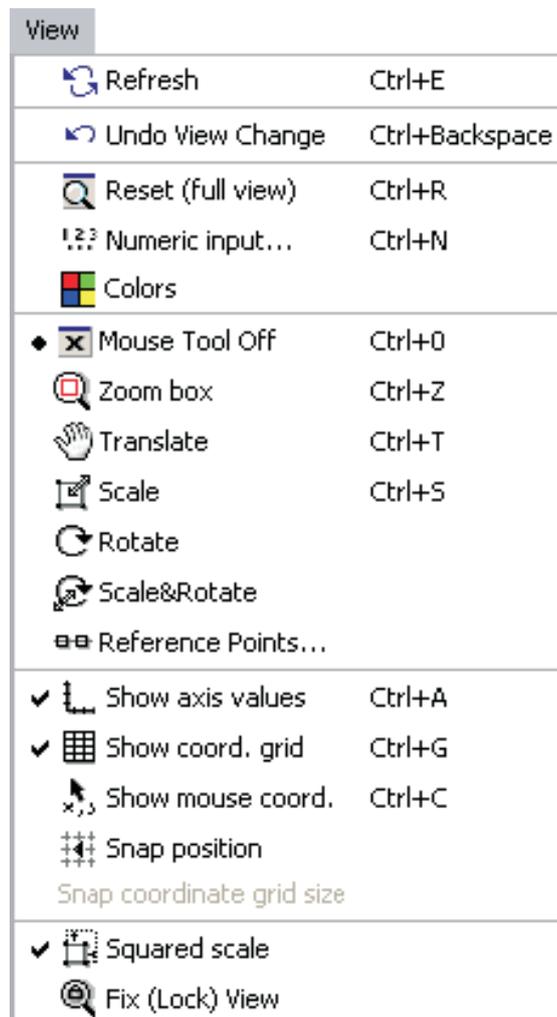


Figure 2-7 : Menu View dans la configuration graphique de FLAC GIIC.



Figure 2.8 : Menu View sous une forme de barre d'outils.

2.3.1.5 Menu Help

Le menu Help (Aide), figure 2.9, permet d'accéder aux instructions et aux questions fréquemment posées au sujet de l'interface graphique du logiciel FLAC « GIIC ».

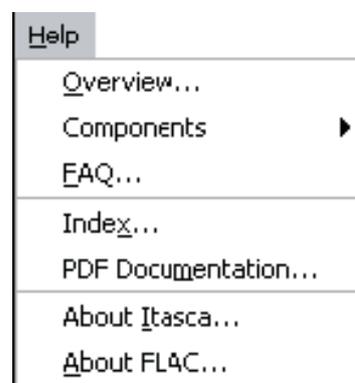


Figure 2-9 : Menu Help dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

Le menu Help contient les composantes suivantes :

- Overview : Vues d'ensemble sur le fonctionnement et les composants de FLAC GIIC.
- Components : contient des descriptions de toutes les commandes les barres d'outil ainsi que de tous les menus utilisés par FLAC.
- FAQ : liste des questions fréquemment posées.
- Index : Contient un recueil de tous les fichiers d'aide.
- PDF documentation : Ouvre la documentation en format PDF indiquée dans des configurations de préférence.
- About Itasca : Contient l'adresse de Itasca Consulting Group, Inc.
- About FLAC : Indique les références et la version du logiciel FLAC

2-3-2 Barres d'outils

Pour effectuer une analyse complète d'un problème avec le logiciel FLAC GIIC, un ensemble de commandes ont été élaborées afin de faciliter à l'utilisateur la modélisation et l'analyse d'un modèle. Ces commandes sont assemblées dans une barre d'outils, figure

A2.10, avec un ordre progressif et logique afin de résoudre le problème. On peut les résumer comme suit :

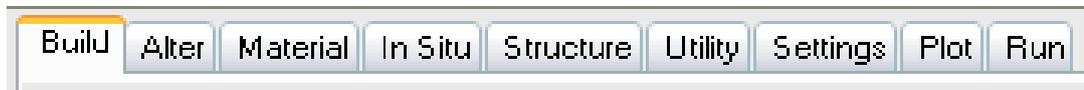


Figure 2-10 : Barre d'outil dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-2-1 Barre d'outils **BUILD**

Les outils de la commande BUILD permettent de donner une première forme générale du domaine à étudier. On peut trouver aussi des modèles déjà prédéfinis auxquels on fait appel.

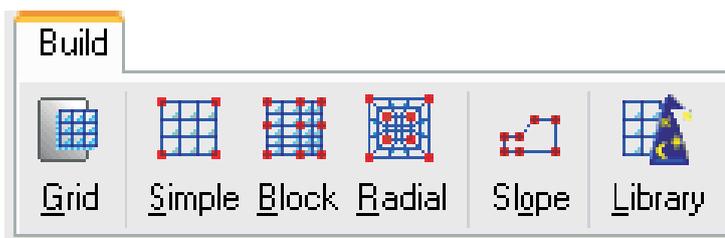


Figure 2-11 : Barre d'outil BUILD dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-2-2 Barre d'outils **ALTER**

Après avoir fait une modélisation approximative du domaine à étudier, on peut ajuster ce dernier pour le rapprocher de la réalité et cela en effectuant des modifications grâce aux commandes de la barre d'outils ALTER, avec lesquelles on peut par exemple subdiviser notre domaine en plusieurs régions, créer d'autres régions, élaborer une excavation, modéliser les surfaces de contact ou bien raffiner le maillage dans des régions où on juge que c'est nécessaire, figure A2.12.

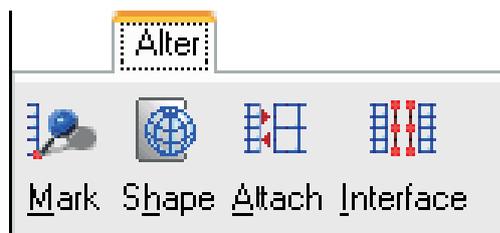


Figure 2-12 : Barre d'outil ALTER dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-2-3 Barre d'outils *MATERIAL*

Les lois de comportement (Modèles de comportement), ainsi que les propriétés des matériaux utilisées sont introduites dans la modélisation à l'aide de la barre d'outils *MATERIAL*. Parmi les lois de comportement qu'on trouve dans le logiciel FLAC on cite principalement : Mohr-Coulomb, Drucker Prager, Strain Softening/Hardening, Double Yield et beaucoup d'autres ; ajouter à cela la possibilité d'introduire de nouvelles lois de comportement programmé avec le langage FISH qui est un langage inclus dans le logiciel FLAC à base du C++.



Figure 2-13 : Barre d'outils *MATERIAL* dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-2-4 Barre d'outils *IN SITU*

En utilisant les commandes de la barre d'outils *IN SITU*, figure A2.14, on déclare les conditions initiales et les conditions aux limites de notre modèle à étudier.

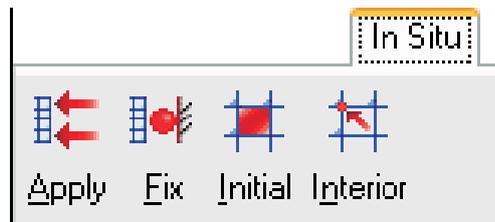


Figure 2-14 : Barre d'outil *IN SITU* dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-2-5 Barre d'outils *STRUCTURE*

Grâce aux commandes de la barre d'outils *STRUCTURE*, on peut modéliser n'importe quelle géométrie d'une structure qu'elles soient des poutres, des poteaux, des pieux, des câbles de précontrainte...etc. Comme l'indique la figure A2.15.

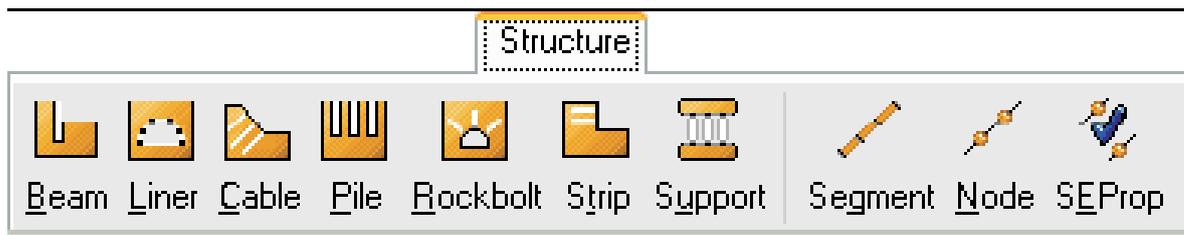


Figure 2-15 : Barre d'outil STRUCTURE dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-2-6 Barre d'outils UTILITY

Les commandes de la barre d'outils UTILITY permettent d'accéder aux utilitaires dans FLAC qui facilitent la génération, la surveillance et le contrôle du modèle. On peut aussi accéder aux variables du modèle afin de surveiller leur influence pendant les cycles de calcul. L'utilisateur peut introduire directement de nouvelles fonctions ou variables programmées par le langage FISH, inclus dans FLAC à base du C++ afin de compléter la modélisation du problème à résoudre ou enrichir la bibliothèque de FLAC GIIC.



Figure 2-16 : Barre d'outil SETTINGS dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-2-7 Barre d'outils SETTINGS

Pour effectuer des changements ou bien introduire des données afin de compléter la modélisation du problème à résoudre, on utilise les barres de commande fournies dans la barre d'outil SETTINGS. Grâce à ces dernières, on peut introduire la gravité, l'état de grandes ou petites déformations, les caractéristiques mécaniques de l'eau, le pas de calcul ainsi que les différents paramètres caractérisant une étude dynamique, de fluage ou bien thermique, figure (A2-17).



Figure 2-17 : Barre d'outil SETTINGS dans la configuration graphique de FLAC GIIC.

2-3-2-8 Barre d'outils *PLOT*

Les barres de commande fournies dans la barre d'outil *PLOT*, sont associées au traçage de tous les résultats obtenus après la résolution du problème modélisé. On peut ainsi obtenir toutes les courbes selon les besoins du problème.

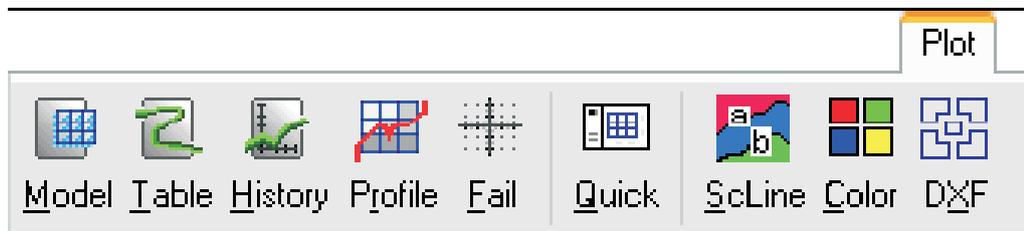


Figure 2-18 : Barre d'outil *PLOT* dans la configuration graphique de *FLAC GIIC*.

2-3-2-9 Barre d'outils *RUN*

Les barres de commande fournies dans la barre d'outil *RUN*, sont associées à la phase de résolution des problèmes modélisés avec *FLAC*, figure (A2.19).



Figure 2-19 : Barre d'outil *RUN* dans la configuration graphique de *FLAC GIIC*.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Itasca Consulting Group, Inc. (2005)**; « *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), Command Reference* ». Minneapolis; Itasca Consulting Group, Inc.
- [2] **Itasca Consulting Group, Inc. (2005)**; « *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), User's Guide* ». Minneapolis; Itasca Consulting Group, Inc.
- [3] **Itasca Consulting Group, Inc. (2005)**; « *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), Fish in FLAC* ». Minneapolis; Itasca Consulting Group, Inc.
- [4] **Itasca Consulting Group, Inc. (2005)**; « *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), Theory and Background* ». Minneapolis; Itasca Consulting Group, Inc.
- [5] **Itasca Consulting Group, Inc. (2005)**; « *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), GIIIC Reference* ». Minneapolis; Itasca Consulting Group, Inc.
- [6] **Itasca Consulting Group, Inc. (2005)**; « *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), Command and Fish Reference Summery* ». Minneapolis; Itasca Consulting Group, Inc.
- [7] **Itasca Consulting Group, Inc. (2005)**; « *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), Optional Feature* ». Minneapolis; Itasca Consulting Group, Inc.
- [8] **Itasca Consulting Group, Inc. (2005)**; « *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), Example Applications* ». Minneapolis; Itasca Consulting Group, Inc.
- [9] **Costet Jean & Sanglerat Guy (1983)**; « *Cours pratiques de mécanique des sols, Plasticité et calcul des tassements* ». Dunod, Paris.
- [10] **Costet Jean & Sanglérat Guy (1983)**; « *Cours pratiques de mécanique des sols, Calculs des ouvrages* ». Dunod, Paris.
- [11] **Chapon Jean (1975)**; « *Travaux maritimes:* ». Eyrolles, Paris.
- [12] **Chapon Jean (1975)**; « *Travaux maritimes: Les ouvrages intérieurs des ports maritimes- Dégagement des accès et plans d'eau des ports* ». Eyrolles, Paris.
- [13] **Marecel et André REIMBERI. (1990)**; « *Les ouvrages de soutènements* ». Eyrolles, Paris.
- [14] **Pierre MARTIN (2001)**; « *Géomecanique appliqué au BTP. 1* ». Eyrolles, Paris.
- [14] **Pierre MARTIN (2001)**; « *Géomecanique appliqué au BTP. 1* ». Eyrolles, Paris.
- [15] **Pierre MARTIN (2008)**; « *Géotechnique appliqué au BTP* ». Eyrolles, Paris.

- [16] **Henri CAMBEFORT (1980)**; « *Géotechnique de l'ingénieur et reconnaissance des sols* ». Eyrolles, Paris.
- [17] **Daniel CORDARY (1994)**; « *Mécanique des sols.1* ». Tec.Doc Lavoisier, Paris.
- [18] **Daniel CORDARY (1994)**; « *Mécanique des sols.2* ». Tec.Doc Lavoisier, Paris.
- [19] **Veronique DETRY (1978)**; « *Methodes des traitements des sols instables* ». Eyrolles, Paris.
- [20] **Roberto NOVA (2005)**; « *Fondement de la mécanique des sols* ». Tec.Doc Lavoisier, Paris.
- [21] **Vincent ROBITAILLE et Denis TERMBLAY(1997)**; « *Mécanique des sols* ». Modulo, Paris.
- [22] **Gérard Degoute & Royet Paul (1995)**; « *Aide mémoire de mécaniques des sols* ». Les publications de l'ENGREF.
- [23] **TALLAH Naoui (2008)**; « *Modélisation expérimentale et numérique du comportement des interfaces sol-structure* ». Mémoire de magister, Université de M'sila.
- [24] **MERKITOU Abderrahmane (2009)**; « *etat de contraintes et de deformations pour un ouvrage portuaire en caissons cylindriques* ». Mémoire de magister, Université de Mouloud Mammeri.
- [25] **MELBOUCI Bachir(2009)**; « *Methodes de calcul de stabilité des fondations des talus et des ouvrages de soutènement* ». Edition El-Amel.
- [26] **Salençon J. (1988)**; « *Mécanique des milieux continus* ». Ellipses.
- [27] **Mista P & Prat M. (1999)**; « *Ouvrages en interactions* ». Hermès Science Publications, Paris.
- [28] **Schlosser F. (1988)**; « *Eléments de mécaniques des sols* ». Presses de l'ENPC, Paris.
- [29] **Fascicule N°62. (1993)**; « *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages de génie civil* ». Eyrolles, Paris.
- [30] **Berlinov M (1990)**; « *Foundation Analysis and Design* ». Mir Publishers Moscow.S