

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Ter-voile : Derniers développements

V. Curt – président du T.V. Géotechniques Inc.

RÉSUMÉ: La présente communication donne un aperçu général du procédé TER-VOILE, les principaux types de structures et leur applications. Un nouveau concept technique est introduit, spécifique au procédé, appelé "indice de butée". Dérivé du procédé un nouveau élément structural est présenté sous le nom de "ROCDALLE". L'application du TER-VOILE pour les travaux dans l'eau a généré la mise au point des "batardeaux cellulaires type TER-VOILE", également décrits.

ABSTRACT: The present paper gives an overview of the TER-VOILE design as a retaining structure. It submits the main types of assembly which can be used to meet each particular case. A new technical concept is introduced, specific to this design called "passive pressure index". A new pattern is also proposed under the name of "ROCDALLE". The used of this design in underwater construction has led to the development of TER-VOILE cellular caissons which are also described.

1. PRINCIPES DU PROCÉDÉ

Le procédé TER-VOILE est une GEOSTRUCTURE cellulaire conçue pour le soutènement des terres. Sa stabilité est assurée par une étroite interaction entre la masse à retenir et les éléments structuraux. L'ensemble forme un massif monolithique, un ouvrage poids de type cellulaire.

La cellule structurale est un voile mince en forme de cylindre (Fig. 1.1), coupé suivant une génératrice verticale, ce qui permet d'obtenir une cellule structurale ouverte vers le massif à soutenir. Une alternative consiste à enlever sur le cylindre le surplus de matière vers le massif à soutenir. De cette manière nous obtenons une cellule fictivement fermée qui apporte une économie de matière structurale considérable (Fig. 1.2).

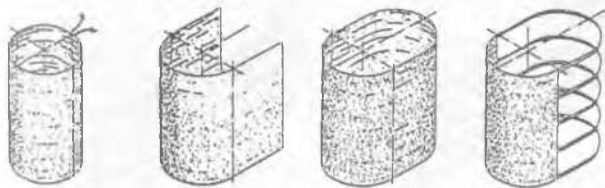


Figure 1.1 Cellule ouverte Figure 1.2 Cellule fermée

La cellule TER-VOILE se caractérise par un parement (la façade) et des encastremets.

Les éléments du parement peuvent être:

- des voiles minces, élastiques et courbes en tôle ou en treillis,
- des voiles sous forme de panneaux ou poutres en béton armé préfabriqués, ou bois.

Les parements sont associés:

- soit à des voiles d'encastrement plans, verticaux, en tôle ou en treillis, l'ensemble formant alors des cellules ouvertes vers le massif à soutenir,
- soit à des éléments en forme de bandes attachées à leurs deux extrémités au parement, appelés étriers, l'ensemble formant alors des cellules dites fermées,

- soit à des voiles verticaux réalisés en déblai par la technique du clouage (tirants), ou la technique de jet-grouting, permettant de réaliser des cellules ouvertes.

Dans tous les cas, par la juxtaposition des cellules ouvertes ou fictivement fermées, nous réalisons la structure cellulaire TER-VOILE. L'interaction entre les éléments structuraux et le remblai se réalise par des effets de voûte en plan horizontal pour les cellules ouvertes et par un effet de confinement (fretage) du sol avec les étriers pour les cellules fermées.

L'acier, l'aluminium et leurs alliages, le béton, l'amiante-ciment, le bois, les matériaux synthétiques sont utilisables dans le procédé TER-VOILE. La durabilité des ouvrages TER-VOILE est fonction des matériaux utilisés et de leur protection contre la corrosion.

Le choix des matériaux et leurs combinaisons permettent d'effectuer une gamme architecturale très variée. La végétation, élément paysagiste et écologique, peut être intégrée au procédé TER-VOILE.

Le procédé TER-VOILE permet de réaliser des structures parfaitement étanches ou totalement perméables.

Les ouvrages TER-VOILE peuvent être réalisés:

- en remblai avec les méthodes conventionnelles,
- en déblai en faisant appel à la technique du clouage ou de jet-grouting.

2. STRUCTURES TER-VOILE

2.1 Structures TER-VOILE TÔLE ou TREILLIS

La juxtaposition des cellules en forme de "U" forme une structure en voiles minces ouvertes (Fig.2.1) ou fictivement fermées par des étriers (Fig.2.2). Les ouvertures et les étriers sont placés du côté du massif à soutenir. Les voiles minces peuvent être en tôle ou en treillis.

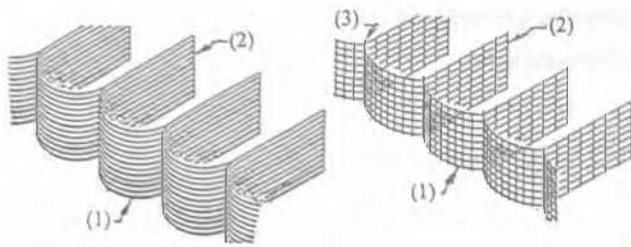


Figure 2.1 Structures cellulaires ouvertes

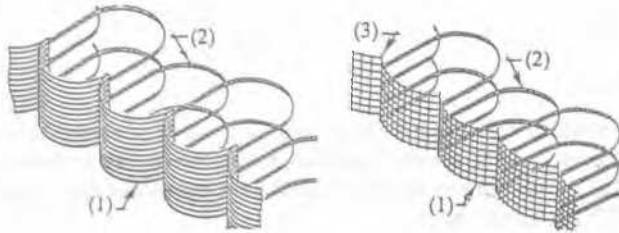


Figure 2.2 Structures cellulaires fermées

Le profil du parement (1) des ouvrages en tôle et en treillis est une courbe appropriée aux sollicitations en traction. Le parement se prolonge dans la terre avec les encastresments (2). Ceux-ci sont attachés directement, ou par l'intermédiaire des tiges d'encastresment (3). Ces structures s'adaptent très bien aux déformations du terrain de fondation.

Le parement des structures (en tôle ou en treillis) peut être recouvert d'un produit esthétique de protection en couche mince, type peinture, ou en couche épaisse type béton projeté. On peut également utiliser le recouvrement avec blocs architecturaux ou panneaux préfabriqués.

2.2 Structures avec parement en béton préfabriqué

A. Structures avec parement ajouré

Le parement (1) est constitué d'une suite d'éléments linéaires, constituant une façade ajourée. Les éléments structuraux du parement sont appelés modules principaux. Ces modules assemblés avec les encastresments (2) en étriers permettent d'obtenir les cellules TER-VOILE fictivement fermées (Fig.2.3). La réalisation des cellules TER-VOILE AJOURÉ avec encastresments plans verticaux est aussi possible.

Le montage des éléments, qui forment le parement, se réalise à l'aide de tiges d'assemblage (3) où les modules principaux sont assemblés :

- en quinconce par le chevauchement à leurs extrémités, ou
- bout à bout, avec comme élément intercalaire les modules secondaires (4).

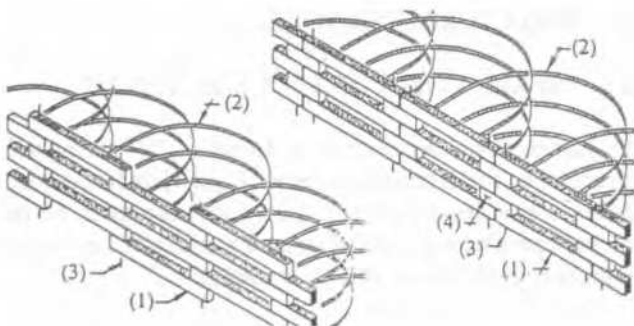


Figure 2.3 Structures TER-VOILE ajourées (Assemblage en quinconce et bout à bout)

La stabilité de chaque élément structural (le module principal) est assurée par deux points d'appui, matérialisés par les étriers d'encastresment (Fig.2.3).

Les espaces laissés libres dans le parement peuvent être obstrués par des panneaux arrières ou par des blocs normalisés. Dans certains cas, les espaces libres sont aménagés pour permettre à la végétation de se développer.

B. Structures avec parement plein

Les structures avec parement plein (Fig.2.4) sont constituées avec des éléments linéaires (modules dalle), assemblés sans espaces libres à l'aide des tiges d'assemblage (3), ou des panneaux de grandes dimensions assemblés côte à côte.

Pour former la structure cellulaire, les parements (1) sont prolongés dans les massifs à soutenir par les encastresments (2)

Les parements de ces structures (Fig.2.4) peuvent être montés parfaitement étanches.

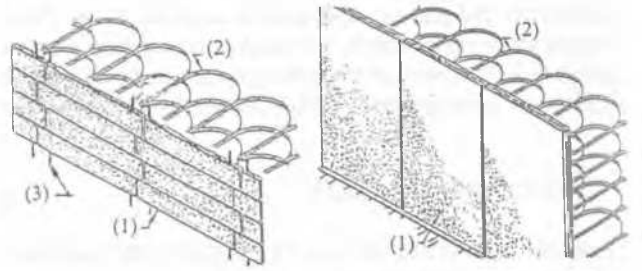


Figure 2.4 Structures TER-VOILE avec modules dalles ou panneaux

2.3 Structures TER-VOILE BOIS

En façade, le parement (1) est constitué de madriers en bois (Fig. 2.5), montés par le chevauchement des extrémités ou bout à bout, de manière à obtenir une façade ajourée. Les vides sont obturés avec des panneaux en arrière, empierrement ou blocs de béton.

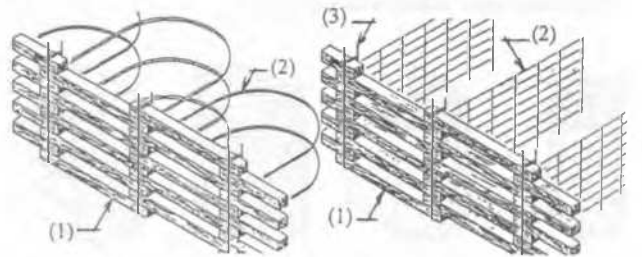


Figure 2.5 Structures TER-VOILE bois

Les encastresments (2) sont des étriers ou des plans verticaux en treillis. Pour éviter au montage les trous dans les madriers, on peut utiliser une double tige d'assemblage (3).

2.4 Structures TER-VOILE en combinaison avec d'autres technologies.

Les structures clouées résultent de la combinaison des principes TER-VOILE avec la technique de clouage de sol (Fig.2.6).

Ces structures peuvent être aussi appelées TER-VOILE en déblai. Tous les types de parement (1) TER-VOILE peuvent être utilisés. Par contre, les encastresments (2) sont constitués de clous (tirants passifs) ou par des tirants actifs. Ces éléments d'encastresments sont concentrés en plans verticaux, formant ainsi, avec les parements, les cellules structurales ouvertes.

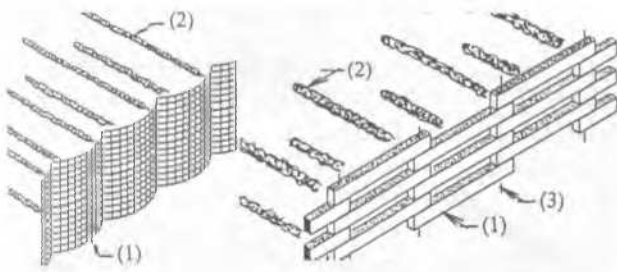


Figure 2.6 Structures TER-VOILE clouées

D'autres combinaisons sont possibles comme:

- structures TER-VOILE avec géosynthétiques.
- structures TER-VOILE en tranchées de bentonite
- structures TER-VOILE en Jet-grouting.

3. JUSTIFICATION PAR CALCUL

3.1 Généralités

Un ouvrage TER-VOILE en général est un massif composite de type poids dans toutes ses variantes, les géométries de base pouvant être celles montrées à la figure 3.1 a ; b ou c.



a) Triangulaire b) Trapézoïdal c) Rectangulaire
Figure 3.1 Massif structural TER-VOILE

À part ces trois exemples de base on peut avoir des ouvrages avec le parement incliné ou en gradins ou encore des ouvrages à plusieurs niveaux.

La stabilité externe (glissement à la base, poinçonnement, renversement), la stabilité d'ensemble (glissement profond) et les déformations se calculent comme pour tout ouvrage poids avec les méthodes courantes de la géotechnique.

Les calculs de stabilité interne sont spécifiques au procédé TER-VOILE et ils sont différents pour le deux cas, les cellules ouvertes et les cellules fermées.

Les calculs de stabilité externe, qui précèdent les calculs de stabilité interne, déterminent la géométrie d'ensemble, le volume du massif. Ensuite, la stabilité interne sera vérifiée pour chaque type de structure.

3.2 Poussée des terres - Interaction sol-structure

Pour la stabilité externe nous sommes dans le cas d'un massif de sol demi-infini, homogène et isotrope, à surface horizontale ou inclinée avec divers type de surcharges. Pour cela la méthode de Coulomb est généralement appliquée.

À l'intérieur d'une cellule TER-VOILE, le massif n'est plus homogène et les sollicitations des éléments structuraux sont dues à la poussée des terres en espaces limités.

Pour les cellules TER-VOILE fictivement fermées par les étriers d'encastrement, nous avons instrumenté deux ouvrages

réels et nous avons fait des essais en laboratoire sur modèle à grande échelle. Les résultats de ces trois ouvrages sont montrés à la figure 3.2

On peut constater que les résultats sont assez groupés et ils ne suivent pas la poussée des terres d'un massif homogène. Ces résultats s'approchent assez bien de la poussée des terres dans un silo ou dans un caisson.

Une analyse approfondie de ces résultats nous amène à constater que la valeur maximale de T_0/S est de 0,40 à 0,48

$K_a \gamma H$. On doit faire la remarque que sur les branches rectilignes des étriers la valeur de T_0 est pratiquement constante (Matane et Tours) et à LaSalle les parties rectilignes de l'étrier ont été introduites dans des tubes. Dans son analyse de ces résultats, le professeur François Schlosser tire les conclusions suivantes:

"Ces valeurs de T_0/S et leur répartition sont tout à fait différentes de ce que l'on peut connaître et observer dans les murs en TERRE ARMÉE, qui ont fait l'objet de multiples instrumentations et expérimentations. En effet dans les murs en TERRE ARMÉE la répartition de T_{max}/S dans les armatures est à peu près triangulaire en fonction de la profondeur "z" avec une valeur maximale située à environ un tiers de la hauteur à partir de la

base et qui peut être évaluée à: $(T_{max}/S)_{max} = 0,8$ à $1,1 K_a \gamma H$. Ainsi, si l'on considère que dans un mur TER-VOILE $T_0 = T_{max}$, les efforts de traction aux états de services dans les étriers TER-VOILE sont environ à 50% inférieurs aux efforts de traction dans les armatures des murs en TERRE ARMÉE. Sur le plan du dimensionnement, cela conduirait à adapter pour les murs en TER-VOILE la répartition Trapézoïdale des tractions, très différente de celle des murs en TERRE ARMÉE."

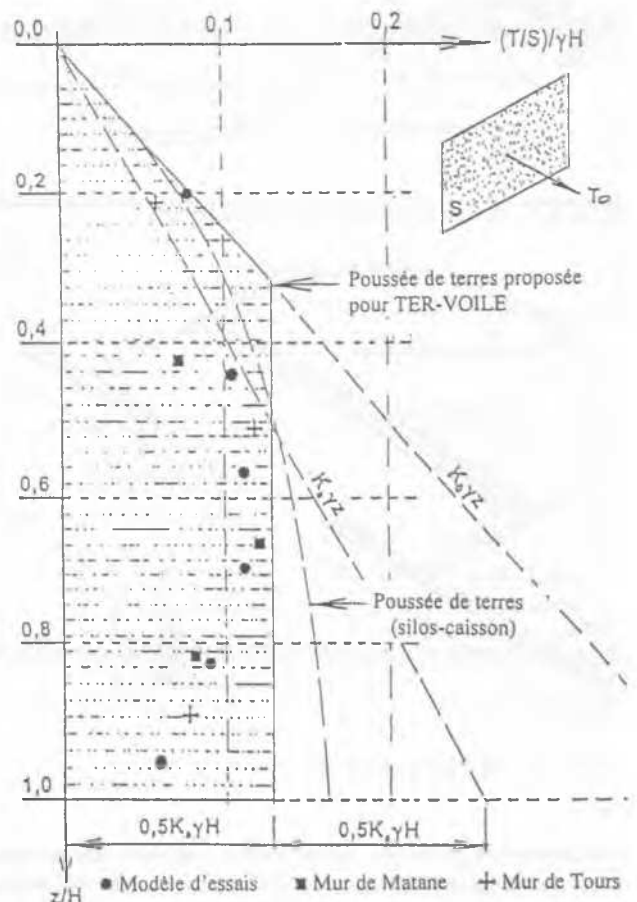


Figure 3.2 Distribution probable des poussées à l'intérieur d'une cellule fermée

La conclusion de cette comparaison c'est que le TER-VOILE est très différent de TERRE ARMÉE, aucune comparaison ou similitude entre les deux procédés ne peut être faite.

Il est bien connu que l'interaction sol-inclusions développant la butée est bien supérieure au frottement généralisé, ce qui explique les résultats de la figure 3.2.

La transmission des sollicitations d'un parement TER-VOILE à ses encastresments est montrée à la figure 3.3. L'interaction sol-structure par le développement de la butée est montrée à la figure 3.4. Dans un cas on a des étriers étroits (Fig.3.3) et dans l'autre on a des étriers élargis (Fig.3.4), mais les problèmes de transmission et de butée sont les mêmes.

Le comportement des structures cellulaires type ouvertes est très différent. On sait que les cellules ouvertes développent les voûtes en plan horizontal mais pas plus. Les voûtes ont été mesurées aux chantiers et confirmées en laboratoire.

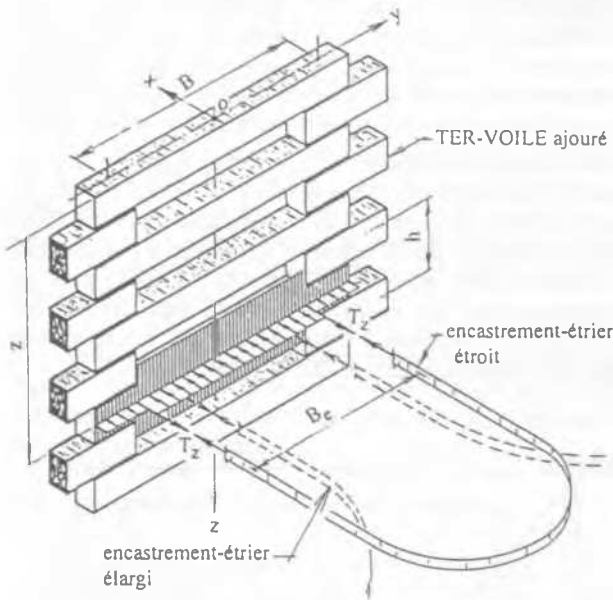


Figure 3.3 Interaction sol-structure, cellules fermées

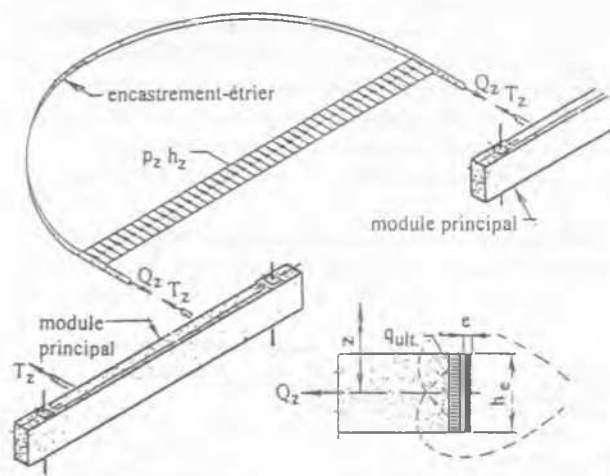


Figure 3.4 Développement de la butée, cellules fermées

Dans le cas des cellules ouvertes pour la stabilité interne, à ce stade des connaissances, nous considérons la poussée des terres sur le parement comme pour un massif homogène et l'interaction sol-structure est représentée à la figure 3.5.

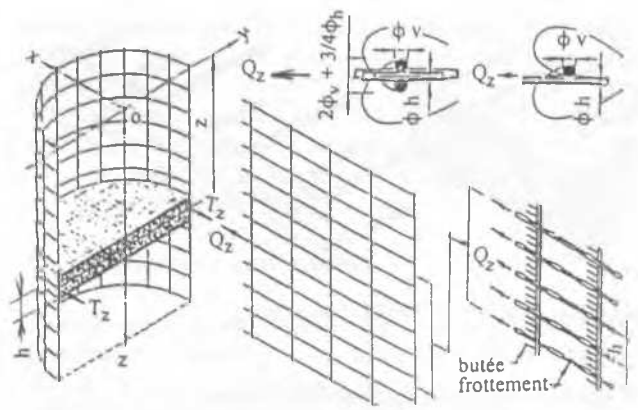


Figure 3.5 Interaction sol-structures, cellules ouvertes

3.3 Indices de butée

Pour faire un parallèle sur l'interaction sol-structures, on prend en considération les inclusions dans le sol pour les sols renforcés qui sont du type linéaire ou en nappes (Fig.3.6 a) et b) et qui travaillent en frottement ou en frottement-butée.

De manière symbolique, ce type d'interaction sol-structures est représenté par le diagramme de la figure 3.6 c).

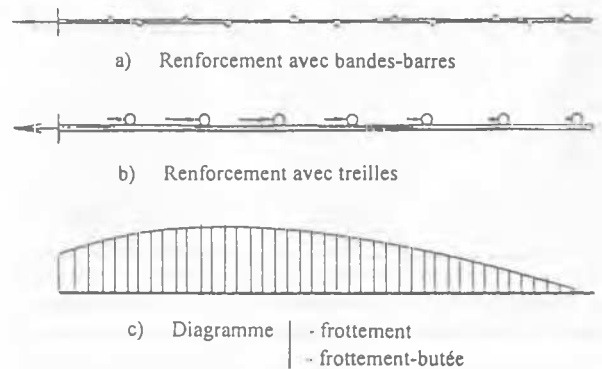


Figure 3.6 Renforcement linéaire ou plan

Pour TER-VOILE les inclusions dans le sol sont en forme de "U" (encastrement-étriers), qui mobilisent un très faible frottement sur les branches rectilignes de l'"U", pratiquement négligeable. Par contre la partie demi-circulaire de l'"U" mobilise la butée. Ainsi, dans le cas du TER-VOILE on peut parler de la butée intégrale.

De manière schématique, l'interaction sol-structure dans le cas de TER-VOILE est montrée à la figure 3.7.

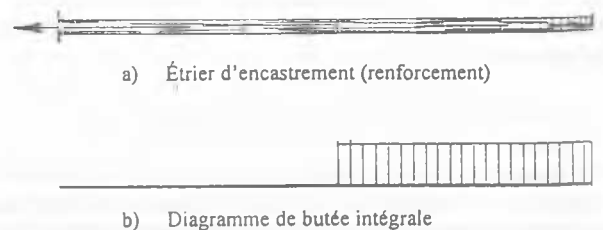


Figure 3.7 Renforcement par confinement, étriers

Dans le cas du TER-VOILE, la distribution des étriers dans le massif à soutenir a une très grande importance, d'une part pour

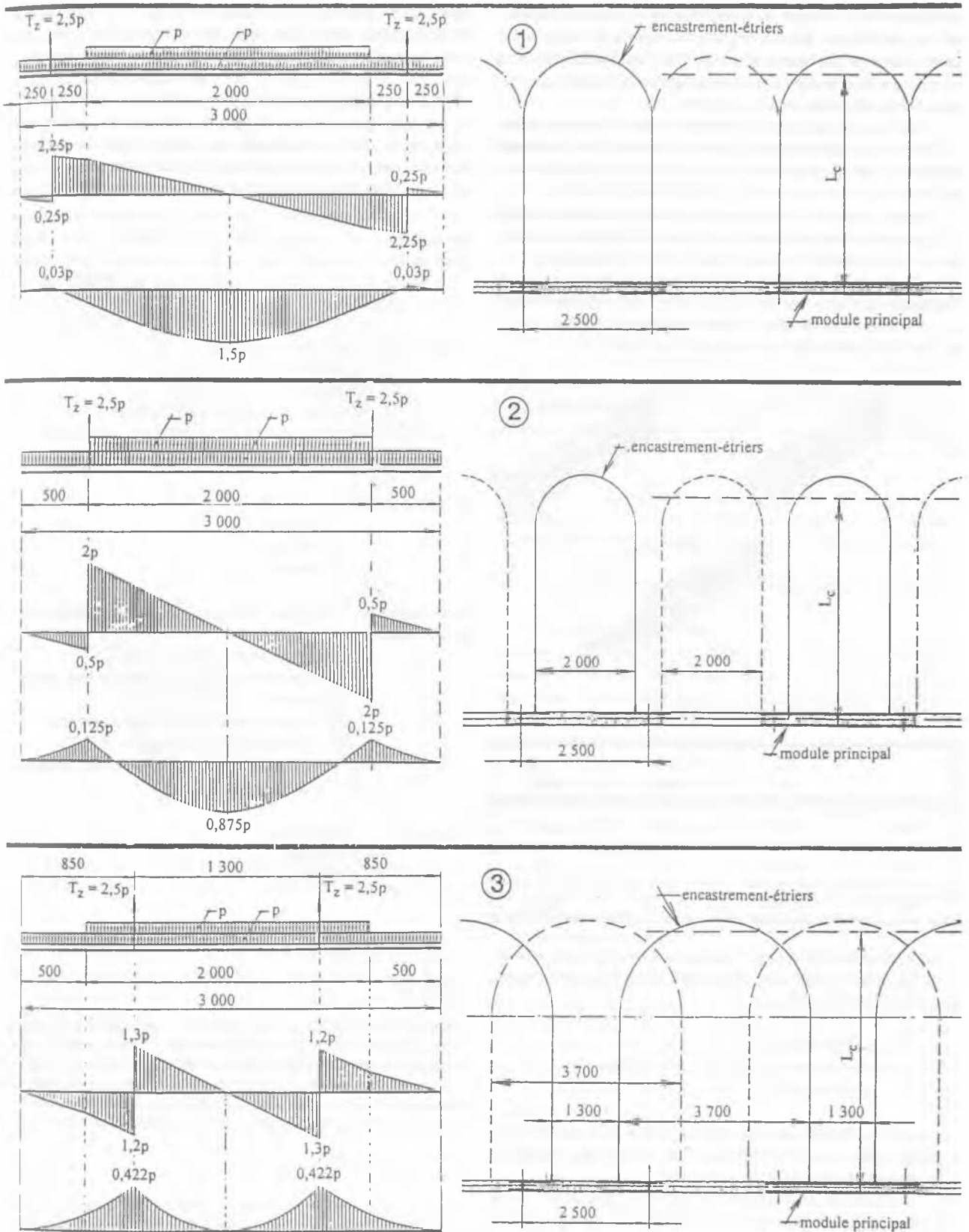


Figure 3.8 Sollicitations des modules , distribution des étriers

la sollicitation des modules et d'autre part pour le confinement du sol et le développement de la butée.

Pour mieux comprendre le problème, nous présentons à la figure 3.8 trois cas d'ouvrages réalisés. Pour l'explication, il faut

suivre les trois cas en parallèle: distribution des étriers-sollicitation des modules. On peut constater que dans le 3e cas on a la meilleure combinaison.

Les étriers élargis entrelacés produisent le meilleur

confinement du sol avec un grand diamètre pour la butée ainsi qu'une sollicitation équilibrée pour le module en béton armé. Dans ce cas le fait que le moment fléchissant positif dans le module est zéro est un grand avantage pour la durabilité du module (face exposée en compression).

Dans tous les cas, pour la surface en butée de chaque étrier correspond une surface de confinement (surface plane verticale) afférente. Comme mesure de comparaison du confinement, on arrive à introduire la notion de "INDICE DE BUTÉE".

L'indice de butée "I" est une notion spécifique à TER-VOILE, elle représente le rapport entre la surface diamétrale en butée de l'étrier et la surface verticale (plan droit) de confinement du massif à soutenir. La surface diamétrale en butée "A_{be}" est matérialisée par le produit entre la hauteur de la section de l'étrier et le diamètre de sa courbure. La surface de confinement "A_{br}" pour les structure ajourées est montrée à la figure 3.9

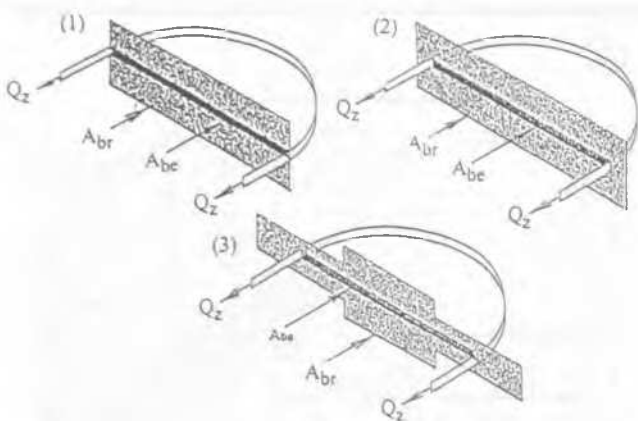


Figure 3.9 Surfaces pour l'indice de butée

	A _{be} [m ²]	A _{br} [m ²]	I [%]
Cas 1	0,125	1,875	6,67
Cas 2	0,100	1,875	5,33
Cas 3	0,185	1,875	10,00

Avec les essais de laboratoire réalisés en Avril 1998, nous avons constaté que nous avons une très grande sécurité à l'arrachement, pour un indice de butée:

$$I = \frac{A_b}{A_c} = \frac{0,74 \times 0,012}{1,15 \times 0,30} = 0,0257 - 2,57 \%$$

On peut observer que dans le cas trois (décrit auparavant), l'entrelacement des étriers produit un indice de butée très grand; cela veut dire une sécurité très importante.

Actuellement pour assurer une sécurité très élevée nous imposons un indice de butée I ≥ 5%; même à moitié on a encore une grande sécurité.

4. DOMAINES D'APPLICATION

En général les structures TER-VOILE AJOURÉ sont très polyvalentes, s'adaptant aisément à tous les types de soutènement. Elles peuvent être très élastiques (TER-VOILE TREILLIS ou TÔLE), s'accommodant avec les sols déformables,

mais elles peuvent être aussi très rigides (TER-VOILE PANNEAUX). Entre les deux se retrouvent les structures réalisées en éléments rigides (TER-VOILE AJOURÉ), lesquelles dans leur ensemble peuvent être très déformables. Le TER-VOILE AJOURÉ peut être en béton ou en bois.

A partir des structures légères comme pour l'aménagement paysager, jusqu'aux structures de grande capacité portante, comme culées de ponts, fondations de bâtiments, murs de quai, etc., le procédé TER-VOILE a des réponses à tous ces problèmes.

Toutes les structures TER-VOILE peuvent être étanches, perméables ou contenir de la végétation. Les étriers d'encastrement peuvent être en acier ou en matières synthétiques.

En ce qui concerne les domaines d'application on peut résumer comme suit:

- | | |
|-------------------------------|---|
| Transport | <ul style="list-style-type: none"> - Murs de soutènement - Culées de pont - Ponceaux - Ponts de petite et moyenne portée - Murs de quai (structure montées dans l'eau) - Murs contre les fortes vagues |
| Environnement | <ul style="list-style-type: none"> - Ouvrages contre l'érosion - Étangs - Bassins - Réservoirs |
| Aménagements hydroélectriques | <ul style="list-style-type: none"> - Dignes, barrages (étanchéité et/ou soutènement) - Barrage déversoir en terre - Renforcement pour la sécurité des barrages en terre - Réhabilitation des ouvrages existants - Parement pour barrages en B.C.R. - Aménagement de micro et mini centrales - Canaux |
| Bâtiments | <ul style="list-style-type: none"> - Commerciaux - Industriels - Habitations |

5. ROCDALES

Définition

L'appellation ROCDALE est donnée à un élément structural constitué d'une dalle en: treillis empierré; béton armé troué ou plein; béton armé alvéolaire empierré. Ces dalles sont mises en oeuvre verticalement ou inclinées, elles sont encastrees à la partie inférieure dans le sol et retenues à la partie supérieure par des encastremets type TER-VOIE, appelés étriers.

5.1 Introduction

Les rocdalles sont des éléments structuraux résistants, conçus pour être utilisés dans l'eau comme éléments de soutènement et protection des rives. La mise en place se réalise à partir de la terre ferme, sans l'aide d'un batardeau.

Leur principale caractéristique réside dans le fait que ces éléments dérangent le moins possible le milieu aquatique.

Les rocdalles peuvent être utilisés aussi dans le domaine des aménagements hydroélectriques comme seuil déversant ou comme éléments de protection au pied des ouvrages déversants. Ils peuvent être des éléments de résistance, étanches ou non, pour

les canaux, pour les digues et même pour les bassins. Le rocdalle est un élément structural auto-stable qui peut être utilisé seul ou en combinaison avec d'autres structures, notamment les structures TER-VOILE (Fig.5.1).

Selon les spécialistes dans le domaine de l'environnement, la détérioration des milieux riverains par l'érosion avec des répercussions écologiques et économiques d'importance est manifeste. En plus des pertes foncières, l'érosion présente un danger réel pour les espaces fauniques et floristiques.

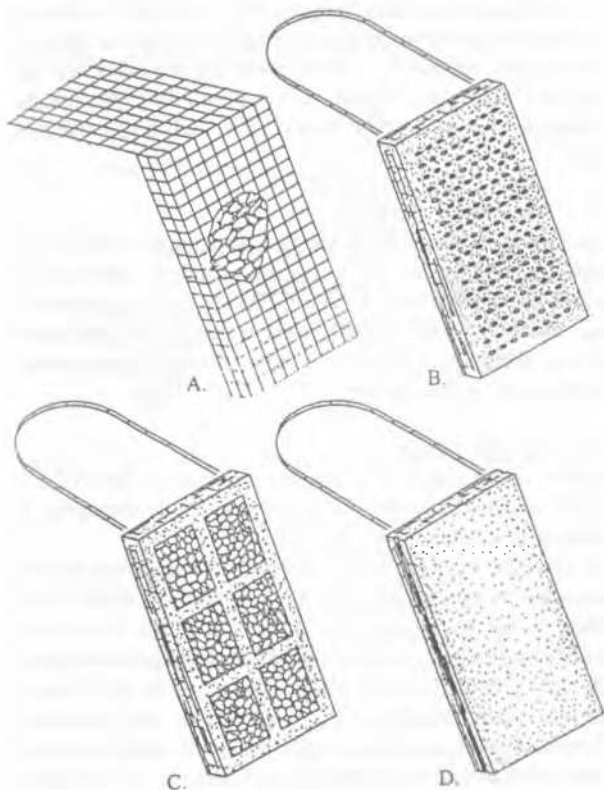


Figure 5.1 Types de rocdalles

A. Rocc dalle en treillis empierré B. Rocc dalle en béton armé troué
C. Rocc dalle en béton alvéolaire D. Rocc dalle en béton armé plein

Prenant en considération les problèmes engendrés par l'érosion, nous avons adapté la technologie TER-VOILE pour lutter efficacement contre cela. Tenant compte du but recherché nous avons développé un nouveau produit, que nous appelons ROCDALLE, qui est compatible et se complète avec TER-VOILE, tel que nous allons le montrer plus loin dans le présent document.

Bien entendu nous sommes au courant de tous les moyens de "restauration naturelle" basés principalement sur les végétaux. Ces moyens naturels sont destinés à l'érosion de moindre envergure; ils sont les moins chers et limités dans leurs applications.

Sans contredire ou mettre en cause la "restauration naturelle", on peut dire que la technologie TER-VOILE la complète en allant beaucoup plus loin. Ainsi, la technologie TER-VOILE avec les rocdalles permettent de lutter contre l'érosion, surtout l'érosion de grande envergure, et en même temps réaliser la stabilisation aux glissements du sol de surface ou profond. Contre le glissement, TER-VOILE et les rocdalles peuvent s'associer avantageusement avec d'autres techniques comme: les pieux / micro pieux et le clouage de sol.

Les végétaux utilisés pour la "restauration naturelle" peuvent

être incorporés dans les ouvrages TER-VOILE / ROCDALLE.

Il faut noter que dans notre concept les rocdalles et les structures TER-VOILE TREILLIS respectent l'environnement et l'écologie. L'utilisation de ces éléments ne crée pas un écran étanche, infranchissable, entre la terre ferme et l'eau. La végétation peut traverser ces structures et surtout la migration (eau-terre / terre-eau) de certains organismes n'est pas affectée.

Avec la technologie que nous présentons, en plus de lutter contre le glissement des terres et l'érosion, on peut récupérer des grandes surface de terres perdues par l'érosion, on peut aussi réaliser des ouvrages sur les rives balayées par des fortes vagues.

Dans les aménagements au bord de l'eau la stabilisation sous le niveau d'eau doit se faire avec rocdalles pour déranger le moins possible le milieu aquatique. Ensuite à la partie supérieure on peut réaliser toute autre sorte de structure.

Au bord de l'eau la combinaison rocdalles, sous le niveau de l'eau avec une structure TER-VOILE au dessus, représente des avantages incontestables. Les rocdalles placés sous le niveau d'eau respectent l'écologie et l'environnement et pour la partie supérieure la structure TER-VOILE a une hauteur réduite, tout cela veut dire économie. Il s'agit d'un système qui devrait être généralisé.

Les structures rocdalles seules ou en combinaison avec les structures TER-VOILE, dans certains cas spéciaux, peuvent être utilisées comme éléments de soutènement en dehors de l'eau.

5.2 Composants des ouvrages TER-VOILE / ROCDALLES

a. Structures TER-VOILE

Les structures TER-VOILE TREILLIS ou BÉTON avec cellules ouvertes ou fermées sont bien connues par leurs réalisations. Pour chaque type de structures il y a des critères de conception et de calculs avec exemples d'application. On doit mentionner que les structures TER-VOILE sont les plus polyvalentes, les moins chères et les plus performantes.

b. Techniques complémentaires

Les techniques complémentaires les plus susceptibles d'être utilisées avec TER-VOILE sont:

- pieux et micro pieux,
- clouage de sol,

Ces techniques sont bien connues et leur utilisation ne pose aucun problème particulier.

c. Structures Rocc dalles

Les rocdalles sont des éléments plans de 2 à 2,50 mètres de largeur (exceptionnellement plus que cela), de longueurs variables selon le projet et leur épaisseur est en fonction de la résistance demandée et des conditions de transport. La largeur de transport doit être en concordance avec les règlements sur les gabarits pour les trajets que le transporteur doit emprunter.

Dans le présent document nous présentons quatre types de rocdalles (Fig.5.1) A, B, C, D:

A. ROCDALLE en treillis empierré. Il s'agit d'une enveloppe en treillis soudé galvanisé, remplie de pierre concassée de dimensions appropriées. On peut aussi choisir la maille du treillis en fonction des dimensions de la pierre disponible. Le remplissage des enveloppes en treillis peut se faire dans une carrière ou même sur le chantier. Ce remplissage doit être réalisé avec un minimum de vides de sorte que le rocdalle présente une bonne rigidité en flexion.

B. ROCDALLE en béton armé troué. Il s'agit de dalles rectangulaires en béton armé avec un grand nombre de trous tronconiques. Une armature de résistance, pour la température et le transport, est prévue sur les deux faces.

C. ROCDALLE en béton alvéolaire. Il s'agit aussi de dalles

rectangulaires avec des vides importants. Elles sont remplies avec pierre concassée. Ces dalles peuvent être assimilées à des cadres en béton armé.

D. **ROCDALLE** en béton armé plein, comme le type "B", mais sans trous. Il s'agit d'éléments structuraux pour des ouvrages étanches.

Tous les types de rocdalles sont prévus, à la partie supérieure, avec un élément d'encastrement: soit une nappe en treillis soudé et galvanisé, soit des étriers type TER-VOILE.

Normalement l'encastrement d'un rocdalle se réalise à un seul niveau à la partie supérieure. Pour des cas particuliers, on peut prévoir l'encastrement en étriers à deux niveaux, toujours à la partie supérieure. La durabilité des structures rocdalles est la même que pour les autres structures TER-VOILE. Les structures ROCDALLES en béton avec étriers d'encastrement en matériaux synthétiques sont à l'abri de la corrosion.

Sur les rives des grandes étendues d'eau, on doit tenir compte de l'action dynamique et de l'érosion des vagues. Dans les endroits où il y a des fortes vagues il est préférable que à la partie supérieure l'étrier d'encastrement soit noyé dans une épaisseur de béton compacté au rouleau.

5.3 Hypothèses et méthode de calcul

5.3.1 Sollicitations

Les sollicitations qui interviennent sur un élément structural ROCDALLE sont illustrées sur la figure 5.2.

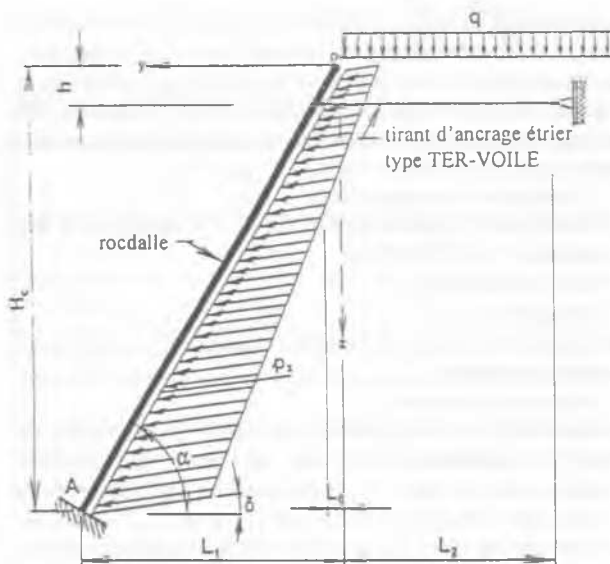


Figure 5.2 Sollicitations sur l'élément structural rocdalle

Généralement la sollicitation d'un ouvrage TER-VOILE sur sa fondation est diffusée vers le bas avec une pente 1H dans 2V ou sur un angle $\alpha \geq \pi/4 + \phi/2$, avec l'horizontale où ϕ est l'angle de frottement interne du sol sous le massif TER-VOILE.

Sur la figure 5.2 : "q" représente toutes les surcharges de la partie supérieure (remblai, ouvrage TER-VOILE, surcharges, etc.); "p₂" la poussée des terres sur le rocdalle; " δ " l'inclinaison de la poussée des terres et " α " l'angle d'inclinaison du rocdalle par rapport à l'horizontale. Les autres notations de la figure 5.2 sont les éléments géométriques de la structure ROCDALLE

Normalement le rocdalle appuie sur toute sa surface mais pour plus de sécurité on le considère comme un élément isostatique sur

deux appuis: en "A" et au niveau du tirant d'ancrage. Le tirant d'ancrage -l'étrier peut être placé au sommet du rocdalle ou à une certaine distance (Fig.5.2).

5.3.2 Stabilité externe

La stabilité externe au point de vue: renversement, glissement et poinçonnement, se réalise pour les Structures TER-VOILE selon les principes et les méthodes déjà connus.

L'ensemble de la structure ROCDALLE doit être stable au renversement par rapport au point "A".

L'encastrement, dans le point "A" doit être en mesure d'annuler de manière sécuritaire la réaction horizontale résultant de la poussée des terres. Normalement les rocdalles sont en dehors de l'angle de diffusion. Ainsi, les rocdalles ne sont pas affectées, ou très peu, par le massif TER-VOILE qui se trouve dessus.

5.3.3 Stabilité d'ensemble

La stabilité d'ensemble, ou glissement profond, peut affecter les rocdalles. Dans le cas de glissement profond important et portance insuffisante sous le massif TER-VOILE on prévoit des pieux, des micro pieux ou même du clouage. Tel que montré dans les exemples d'application qui suivront, les colonnes ballastées sont recommandées.

5.3.4 Stabilité interne

Le calcul de la stabilité interne pour le massif TER-VOILE BÉTON ou TREILLIS sera fait selon le guide de conception et de calculs pour chaque type de structure.

En principe, les rocdalles sur un sol ayant des bonnes qualités mécaniques ne sont pas affectées ni par le poids du massif TER-VOILE ni par la poussée des terres adjacentes. Sur un sol médiocre on peut avoir une certaine influence du poids du massif TER-VOILE et une certaine poussée des terres du sol adjacent. Cela est aussi fonction de l'inclinaison des rocdalles; structurellement les rocdalles sont des éléments rigides, capables de reprendre des sollicitations perpendiculaires sur leur plan. Statiquement, il s'agit d'un élément simplement appuyé à sa partie inférieure constituée par la fiche dans le sol et à la partie supérieure par l'encastrement treillis-étriers.

5.4 Applications

De manière générale, tel qu'il a déjà été mentionné, les rocdalles sont des éléments de résistance conçus pour l'aménagement et la protection des berges. Dans ce cas, les rocdalles sont mises en place à partir de la rive par simple immersion sur la pente du terrain préalablement nivelé.

Au pied des rocdalles on doit réaliser un bon encastrement avec une protection adéquate. En haut, ils sont retenus par des

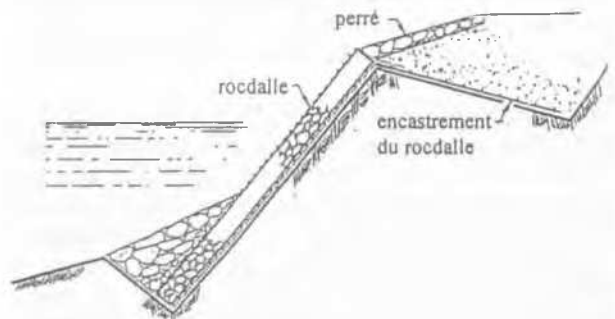


Figure 5.3 Rocdalle treillis-empierre-Coupe type

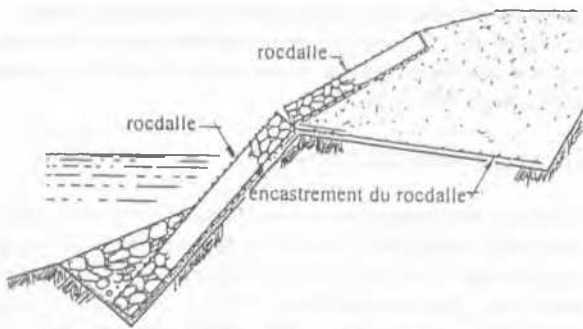


Figure 5.4 Rocdalle treillis empierré - Coupe type

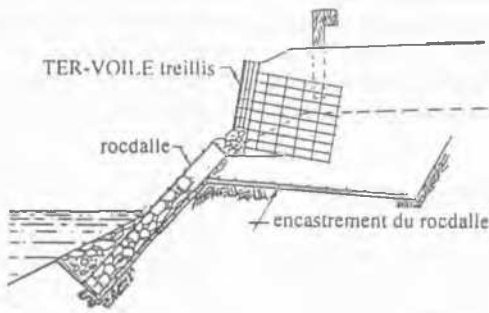


Figure 5.5 Rocdalle treillis et TER-VOILE treillis - Coupe type

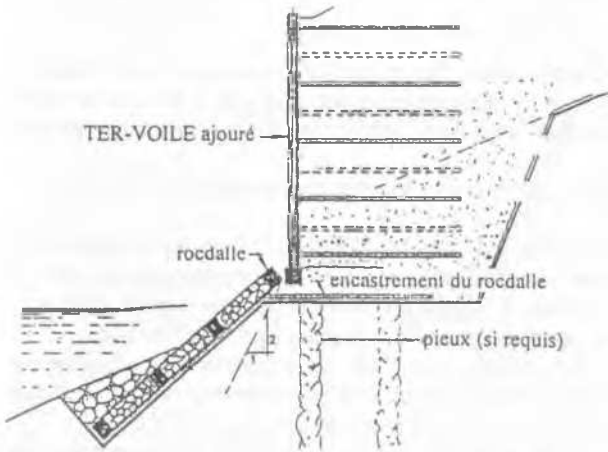


Figure 5.6 Rocdalle béton alvéolaire/TER-VOILE AJOURÉ-Coupe type

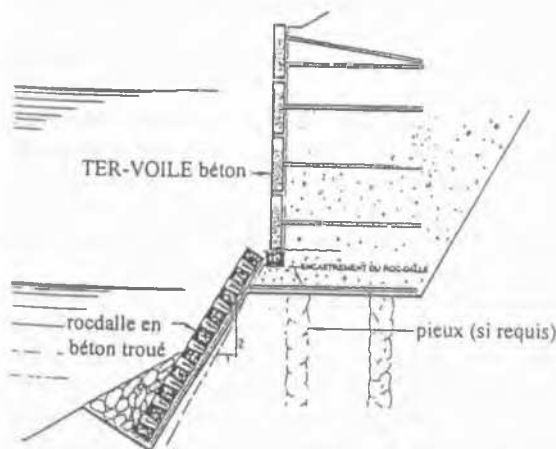


Figure 5.7 Rocdalle béton troué/TER-VOILE PLEIN-Coupe type

encastremets en étriers type TER-VOILE. Dans tous les cas, au bord de l'eau, les rocdalles doivent être perméables et peuvent être surmontées d'une structure TER-VOILE (Fig. 5.3 à 5.7).

Pour une digue de protection contre les crues la pente de la digue sera protégée avec rocdalles en béton qui résistent mieux à l'érosion (Fig. 5.8 et 5.9). Pour des crues avec une grande récurrence, dans des zones habitées ou de villégiature, on peut utiliser les ROCDALLES TROUÉS végétalisable.

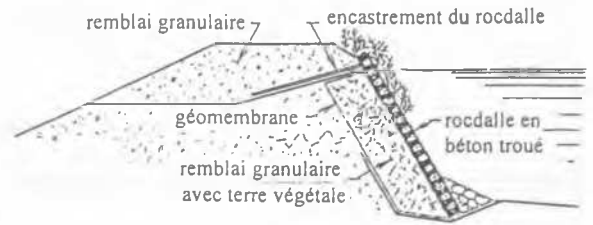


Figure 5.8 Structure rocdalle béton troué végétalisée-Coupe type

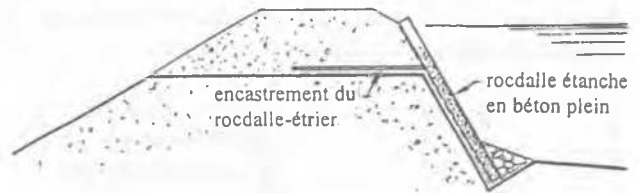


Figure 5.9 Structure rocdalle béton plein étanche - Coupe type

Avec ROCDALLES ÉTANCHES (Fig. 5.9) on peut réaliser des canaux et des bassins. Pour les canaux en déblai une attention particulière doit être donnée au drainage arrière. Les canaux pour l'adduction d'eau potable peuvent avoir une toiture. Ces canaux seront enterrés ou non. De la même manière on peut réaliser des collecteurs pour les eaux usées.

Il est bien connu que l'érosion des rives, surtout en bordure des voies navigables, enlève des grandes surfaces de terrain. Pour reprendre ces surfaces on peut avancer dans l'eau avec une digue exécutée par déversement de remblai et protégée avec des rocdalles, pendant le niveau d'eau inférieur (Fig. 5.10). Ensuite on construit par dessus un ouvrage TER-VOILE avec un remblai tout venant. Le creux qui se forme entre TER-VOILE et la rive peut être comblé par remblayage ou même par dragage.

Sur la figure 5.11 on voit la partie supérieure d'un barrage déversant type TER-VOILE avec le seuil en rocdalles. Les rocdalles trouées éliminent la possibilité de la formation de sous-pression. Les encastremets des rocdalles (les étriers type TER-VOILE), placés en amont, assurent la stabilité des rocdalles, annulant ainsi la force tractrice due à la nappe déversante qui agit sur les rocdalles.

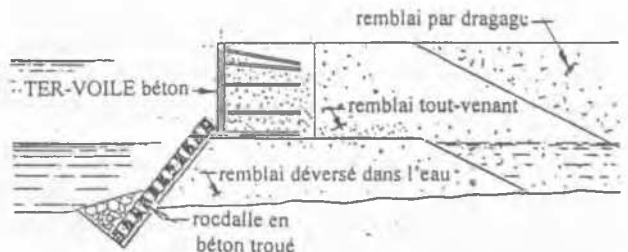


Figure 5.10 Récupération du terrain érodé - Coupe type

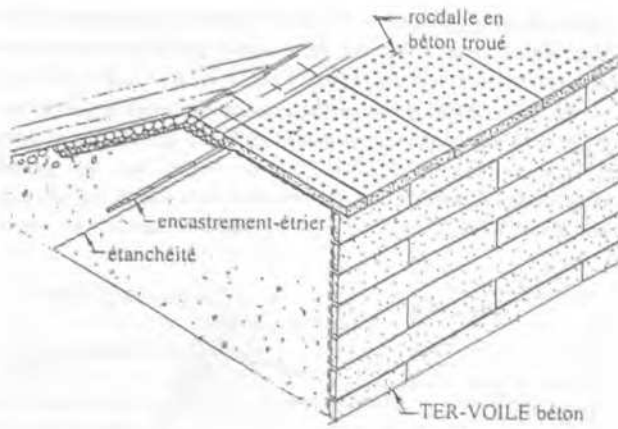


Figure 5.11 Seuil déversant, rocdalle béton troué-Coupe type

Diverses autres applications en milieu non humide, non immergé, sont possibles. Prenons un exemple: pour réaliser des murs de soutènements d'une hauteur limitée où l'excavation pose des problèmes on peut utiliser des structures ROCDALES. La figure 5.12 montre une possibilité de réalisation.

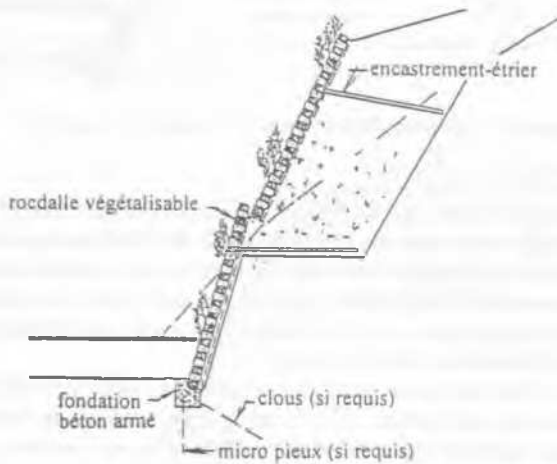


Figure 5.12 Soutènement avec rocdalles végétalisables - Coupe type

6. BATARDEAUX CELLULAIRES TYPE TER-VOILE

6.1 Généralités

Les batardeaux cellulaires en palplanches sont des structures bien connues depuis longtemps. En s'inspirant de ce principe et en utilisant des éléments TER-VOILE, nous avons créé les batardeaux TER-VOILE que nous présentons ici.

Le batardeau étudié est pour construire un chemin de travail nécessaire à la mise en place dans l'eau d'un mur de soutènement du type TER-VOILE d'un côté ou des deux côtés dans le but de créer un mur de quai. Avec l'ajout d'un élément d'étanchéité, le batardeau érigé peut servir à assécher une enceinte. Ce type de batardeau peut servir comme fondation pour supporter un ouvrage TER-VOILE.

Pour pouvoir réaliser le batardeau, le fond de l'eau doit être préférablement horizontal et le sol doit être capable de supporter le poids de celui-ci sans déformations, mais une certaine pente peut être acceptable. Les fonds vaseux sont exclus.

A travers les serrures, qui sont des tubes emboîtables, on peut réaliser des pieux ou introduire du béton pour créer des bases

élargies ou reprendre les irrégularités du terrain sous les colonnes (fond rocheux). Pendant la construction les vagues d'une certaine intensité peuvent empêcher la réalisation du batardeau et même de l'ouvrage TER-VOILE.

6.2 Type de batardeau étudié

Dans le présent exposé nous nous limitons à la présentation des principes du batardeau TER-VOILE comme chemin d'accès dans la réalisation d'un quai avec la structure TER-VOILE montée dans l'eau. Dans ces conditions il n'y a pas de différence du niveau d'eau, le batardeau TER-VOILE doit être stable à la circulation d'engins de construction et résister à la poussée des terres submergées y compris les surcharges. Le batardeau peut être un ouvrage provisoire ou permanent et de cela dépendra sa durabilité. Le choix sera surtout fait suite à un calcul économique. Le batardeau TER-VOILE comme chemin d'accès est montré dans une vue en plan, à la figure 6.1.

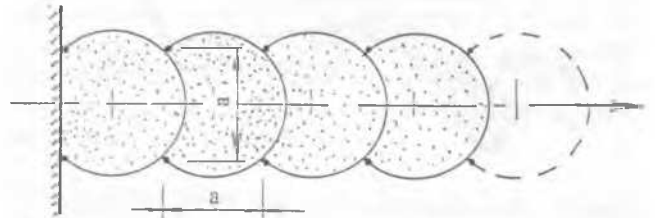


Figure 6.1 Vue en plan-batardeau cellulaire TER-VOILE

L'emboîtement des cellules (voir plus loin) est de largeur "a" (Fig.6.1). Exemple: pour une cellule de 5,00 m de diamètre on obtient $a = 3,60$ m, largeur plus que suffisante pour les travaux.

6.3 Structure de la cellule du batardeau TER-VOILE

Une cellule de batardeau TER-VOILE est une structure rigide en trois dimensions, constituée géométriquement du 3/4 d'un cylindre. Ces cellules s'emboîtent les unes dans les autres et avec le remblai forment un ensemble continu et très rigide.

Les trois quarts de l'enveloppe extérieure sont trois parements TER-VOILE TREILLIS (Fig.6.2) assemblés sur une charpente métallique tridimensionnelle et très rigide (Fig.6.3).

Les parements TER-VOILE TREILLIS correspondent à une cellule de largeur "a". En l'absence d'encastements TER-VOILE les parements en treillis sont attachés à la charpente métallique. L'attache (l'assemblage) se réalise comme pour une structure TER-VOILE, avec tiges d'assemblage (Fig.6.4). Les tiges d'assemblage sont des tubes emboîtables de diamètre et épaisseur appropriés.

Avant le lancement dans l'eau, sur la cellule du batardeau on installe à l'intérieur, sur le parement, un géotextile de manière à retenir les matériaux de remblai. Dans la partie inférieure le géotextile doit avoir une largeur suffisante pour être étendu à l'horizontale sur le fond de manière à empêcher la fuite des matériaux de remblayage à l'extérieur de la cellule.

Les quatre colonnes de la charpente métallique deux mâles et deux femelles sont telles que montrées à la figure 6.4, pour permettre l'emboîtement des cellules. Les unes comme les autres sont des tubes métalliques. Les colonnes femelles sont ouvertes sur toute la longueur, raison pour laquelle l'épaisseur du tube doit être suffisante ou elle sera renforcée pour ne pas s'ouvrir suite aux sollicitations du tube mâle. Ensemble ces tubes forment les colonnes de serrure du batardeau.

À travers les tubes de la serrure on peut réaliser des pieux et ou les remplir avec du béton.

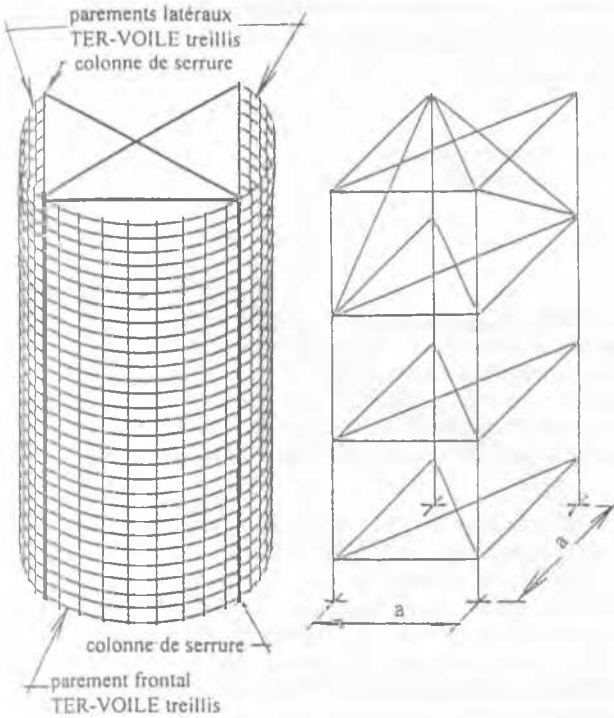


Figure 6.2 Enveloppe treillis

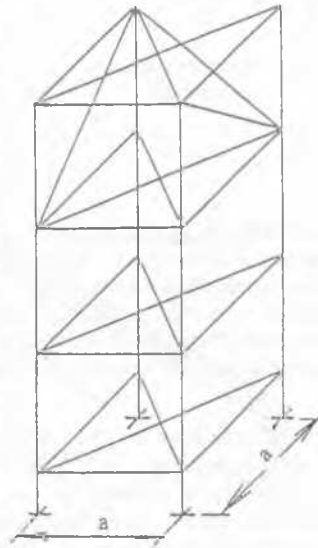


Figure 6.3 Charpente métallique

- la mise en place des deux murs TER-VOILE BÉTON par simple immersion
- le remblayage de deux murs, d'un côté et de l'autre du batardeau, sera fait au fur et à mesure du montage des éléments préfabriqués.

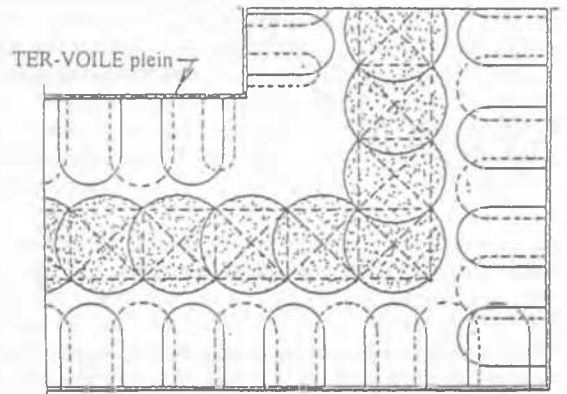
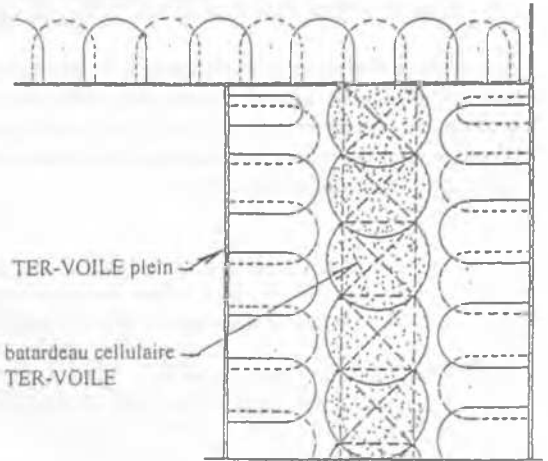


Figure 6.5 Vue en plan - Mur de quai

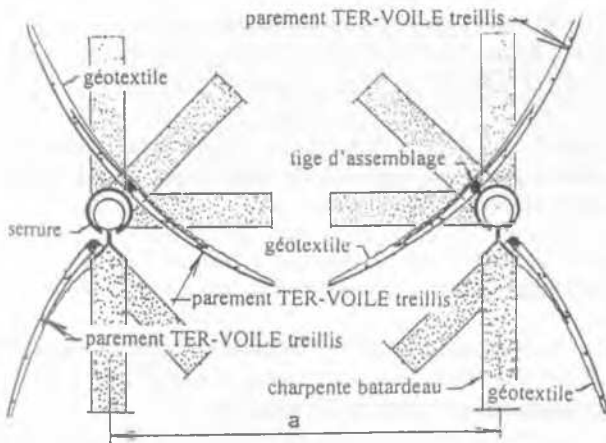


Figure 6.4 Détail d'assemblage

6.4 Applications

Dans le présent exposé une seule application est montrée, la réalisation d'un quai. À la figure 6.5 on montre une vue en plan d'un mur quai en forme de "L" et à la figure 6.6 une coupe transversale pour le même mur.

Pour réaliser cet ouvrage on procède de la manière suivante:

- on doit réaliser un nivellement général du fond,
- on construit le mur du fond en TER-VOILE BÉTON par l'immersion des éléments à partir de la rive
- on procède à la mise en place des cellules du batardeau et leur remplissage successive

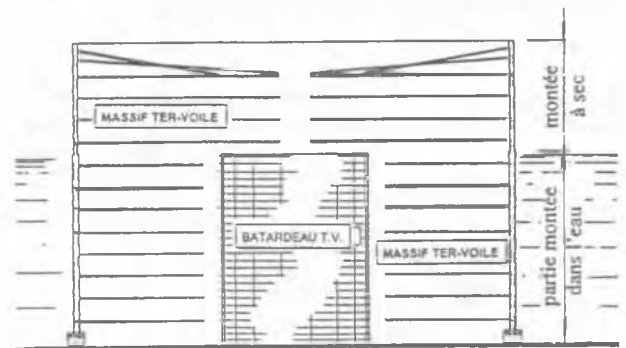


Figure 6.6 Coupe type - Mur de quai

Le remblayage du batardeau et des murs doit se faire avec matériaux drainants pour éviter les pressions interstitielles suite au variations de niveau.

Les matériaux pour la réalisation de l'ouvrage peuvent être apportés par camion ou par barges ou par les deux. Le remblayage peut se faire aussi par dragage.

Une attention particulière doit être accordée au compactage de la partie immergée de l'ouvrage. Il faut tenir compte que l'indice de compactage sera différent entre le remblai du batardeau et le remblai des murs.

Le drainage des ouvrage TER-VOILE est un élément important qu'on ne doit pas ignorer. Les joints verticaux et horizontaux ou seulement les joints verticaux entre les éléments préfabriqués peuvent servir de barbacanes.

7. STRUCTURES TER-VOILE MONTÉES DANS L'EAU

Pour éviter la réalisation des batardeaux avec leur action négative sur le milieu aquatique, nous proposons de réaliser les ouvrages de soutènement directement dans l'eau. Pour cette opération les structures avec parement en béton plein constituées de modules dalles sont les plus adéquates (Fig.7.1).

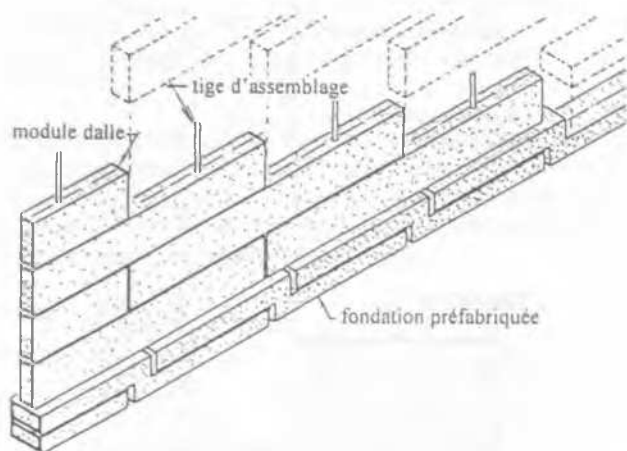


Figure 7.1 Structures TER-VOILE immergées

Toutes les opérations de réalisation de l'ouvrage se font à partir de la rive ou d'un batardeau cellulaires type TER-VOILE.

Préalablement, le fond de l'eau est nivelé selon des méthodes connues pour ce type d'opération, ensuite sont lancés dans l'eau les éléments préfabriqués de fondation (Fig.7.2).

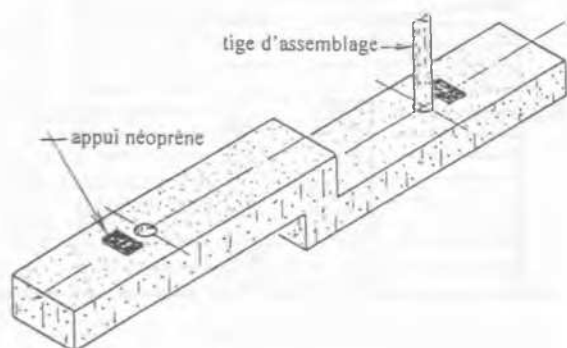


Figure 7.2 Élément préfabriqué de fondation

Chacun des éléments de fondation est prévu avec un trou pour enfiler la tige d'assemblage de l'élément suivant et une tige d'assemblage encastrée. La tige d'assemblage encastrée dans l'élément de fondation doit traverser celui-ci de manière à pouvoir envoyer du béton sous la fondation, si nécessaire. Au dessus de l'eau les tiges d'assemblage doivent être tenus dans la bonne position d'alignement avec des gabarits en bois ou métalliques.

Après la mise en place de la fondation préfabriquée on procède au lancement dans l'eau des éléments de façade, les modules dalles. Ces modules sont munis de leurs étriers d'encastrement, tenus en position verticale pendant l'opération de montage; et rabattus à l'horizontale au fur et à mesure que le remblai arrivera à leur niveau (Fig.7.3).

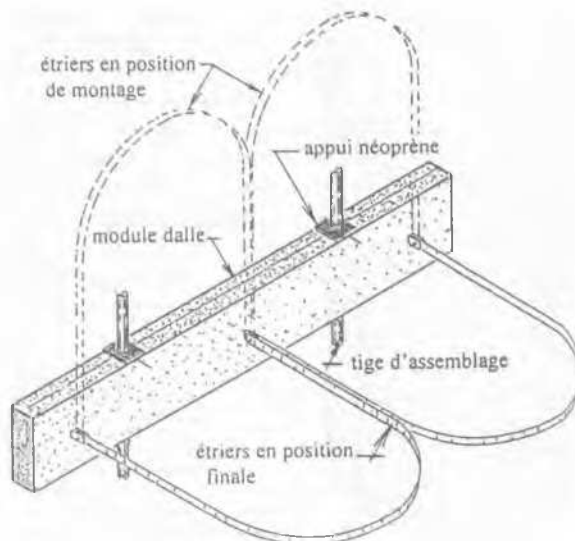


Figure 7.3 Élément structural immergé

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier particulièrement aux: Professeur Pierre La Rochelle de l'Université LAVAL-QUÉBEC; professeur François Schlosser de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris; Mr. Richard Boivin ing., P.D.G du Groupe Conseil LaSalle; aux anciens ingénieurs du Ministère de Transports du Québec et plus spécialement à M. Michel Gambin v.p. du Comité de Mécanique de Sol, France

RÉFÉRENCES

- La Rochelle, P., Curt, V., Schlosser, F., (2000). Terra-Link (Ter-Voile) Earth Retaining Process: A Model Test. 53e Conférence Canadienne de Géotechnique.
- Curt, V., Villeneuve, M., (1997) L'application du procédé TER-VOILE à la sécurité des barrages en terre. Annales du bâtiment et des travaux publics.
- Bourbonnais, J. 1994. Instrumentation et étude de comportement des murs de type Ter-Voile. Journée de formation sur les ouvrages de soutènement. Association Québécoise des Transports et de Routes du Québec.
- Duncan, J.M., William, G.W., Sehn, A.L. and Seed, R.D.(1991). Estimation Earth Pressures Due To Compaction. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol 117, No 12
- Morin, J.-P. et Curt V.(1989). Les ouvrages de soutènement Terre-Voile. Comptes-rendus du 12ième Congrès international de Mécanique des Sols et des travaux de Fondation, Rio de Janeiro, Brésil.
- Curt, V., Morin, J.-P. et Metulesco, A. (1987). Un nouveau concept de soutènement; le procédé Terre-Voile. Annales I.T.B.T.B. No 454.