REMPIETEMENT DES MURS DE QUAI : QUELQUES TECHNIQUES

J.P. LEVILLAIN
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées - 23 avenue de l'Amiral Chauvin - BP 66 - 49130 LES PONTS DE CE

1. Pourquoi des rempiètements de quai ?

Dans les ports de commerce on assiste à une augmentation du trafic, tant de marchandises diverses que de produits agro-alimentaires. Parallèlement, à la suite de travaux d'amélioration des profondeurs réalisées, au cours des dernières décennies, on assiste à une évolution de la taille des navires et de l'importance des cargaisons unitaires déchargées.

On constate une diminution sensible du nombre de petits cargos (inférieurs à 5000 tpl) et à une augmentation importante du nombre de gros porteurs.

Cette croissance des cargaisons unitaires, provoque une baisse des coûts ce qui est favorable au commerce en général.

Cette évolution de la taille des navires conduit à améliorer les caractéristiques nautiques des chenaux et des ouvrages portuaires.

Les ports de pêche de la côte Atlantique (Bretagne - vendée) mais vraisemblablement des côtes de France et des autres pays sont généralement des ports d'échouage construits au siècle dernier pour la majorité de ceux-ci. Situés dans des abris naturels, les ouvrages d'accostage ou de défense de défense, en maçonnerie, sont fondés directement sur le substratum rocheux subaffleurant ou sur les alluvions.

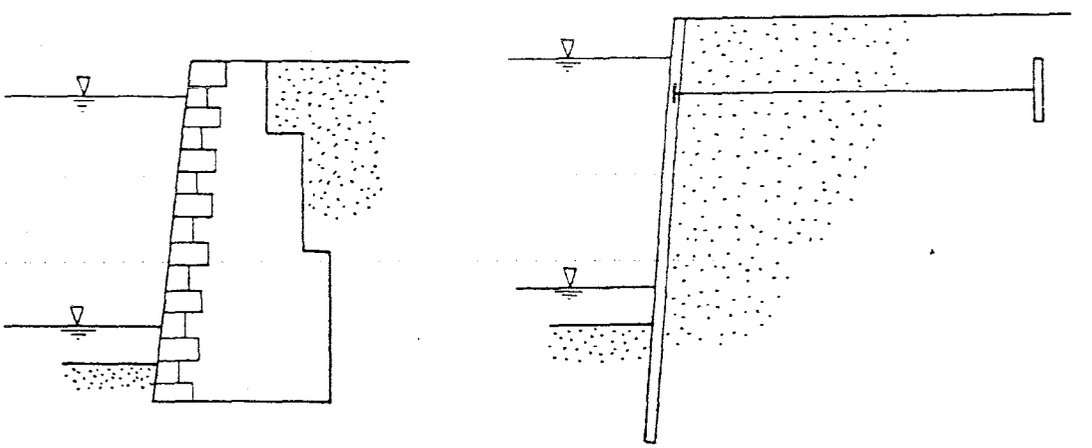
La modernisation actuelle des conditions de travail conduit les chambres de commerce et d'industrie à faire réaliser des approfondissements des ports pour permettre un accès aux unités de pêche quelque soit l'heure de la marée. Le creusement des chenaux et des souilles devant les quais est à renouveller devant l'accroissement de la taille des bâteaux et de leur tirant d'eau. Des rempiètements sont alors à effectuer sur des hauteurs de 4 à 5m devant des murs de quai de maçonnerie de 6 - 8m de hauteur.

2. Les grandes orientations techniques des rempiètements

1. Les différents types de quai

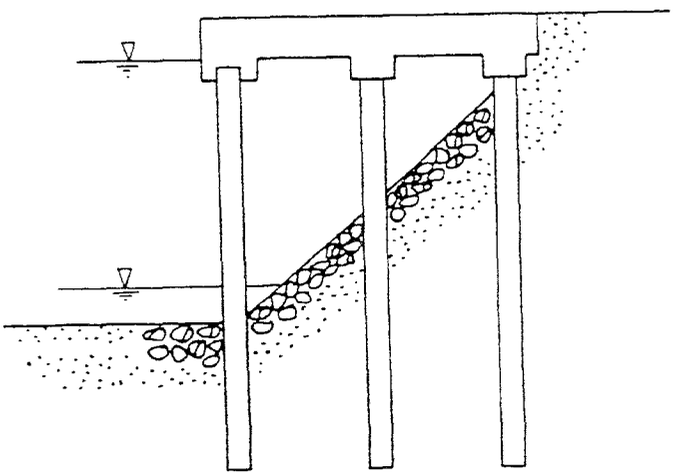
Schématiquement on peut considérer qu'il existe trois grands types de soutènement formant les quais :

- les quais en soutènement massif qui agissent par leur poids propre
- les quais de type paroi ou rideau ancré en tête à l'aide de tirants. Ces ouvrages sont relativement récents
- les quais, dit creux, constitués d'une dalle sur pieux, le remblai est alors taluté sous l'ouvrage et protégé par une carapace en enrochements



a) quai de type poids

b) rideau ancré



c) dalle sur pieux

Fig. 1 : Différents types de quai

Des variantes sont bien entendu observées par rapport à ces grands types d'ouvrages.

2. Les grands principes de rempiètements

Il convient de réaliser un approfondissement des sols devant l'ouvrage existant tout en conservant celui-ci et en garantissant sa sécurité.

On est ainsi conduit à exécuter un terrassement sous le niveau de fondation du quai sans mettre en péril la force portante des sols de fondation.

On peut classer les différentes orientations en fonction de leur action sur les fondations et la portance des sols de l'ouvrage existant , ainsi on peut distinguer vis à vis de la portance des sols les trois grands types de rempiètement suivants:

a) éloignement suffisamment loin du quai existant de manière à ne terrasser que dans les sols ou roches non interessées par la fondation de l'ouvrage à conserver - figure 2-.

b) terrasser devant l'ouvrage à conserver en mettant en oeuvre un soutènement qui reprendra les efforts appliqués - figure 3 -.

c) terrasser au droit du parement et même juste sous le parement et mettre en oeuvre un nouveau parement qui assure également une reprise en sous-oeuvre - figure 4 -.

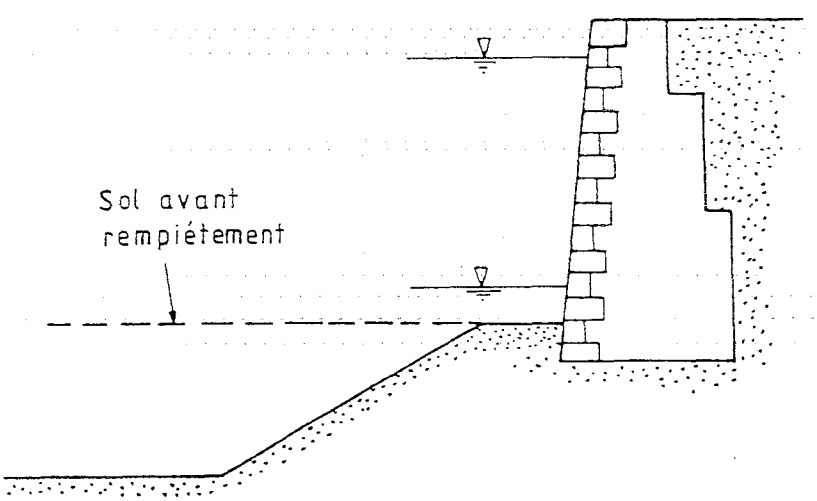


Fig. 2 : Rempiètement par éloignement du terrassement hors de la fondation de l'ouvrage

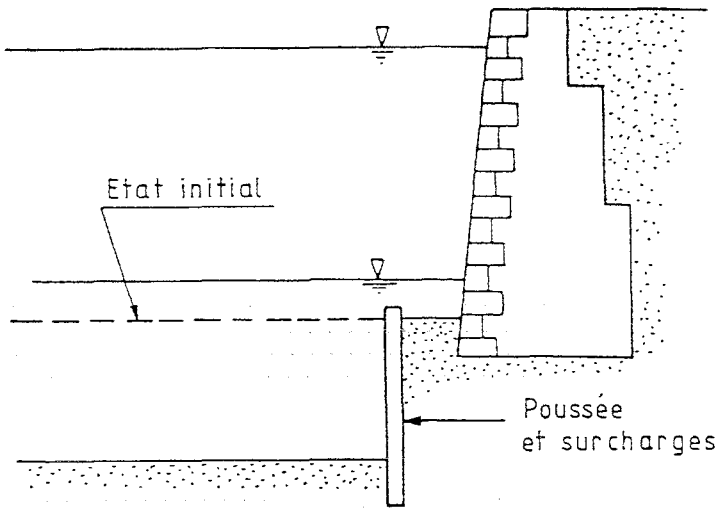


Fig. 3 : Terrassement et soutènement devant la fondation de l'ouvrage

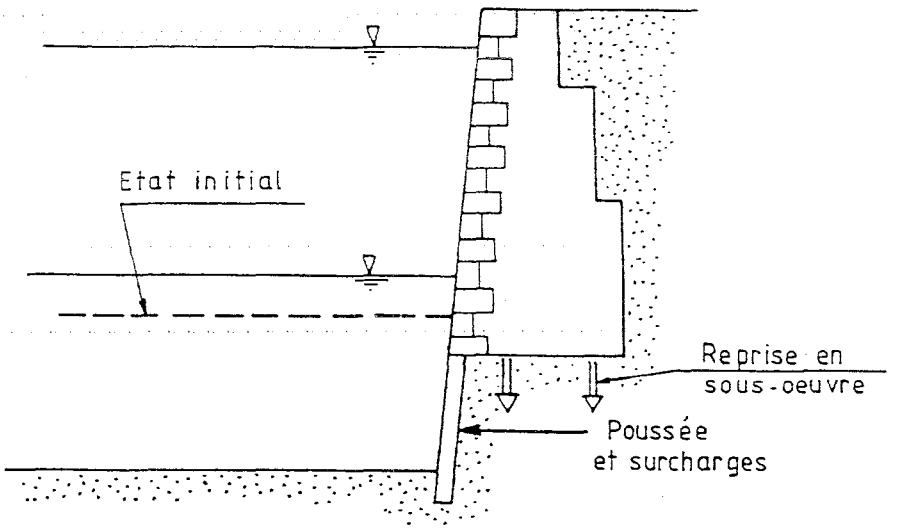


Fig 4 : Terrassement devant le front d'accostage et reprise en sous-oeuvre

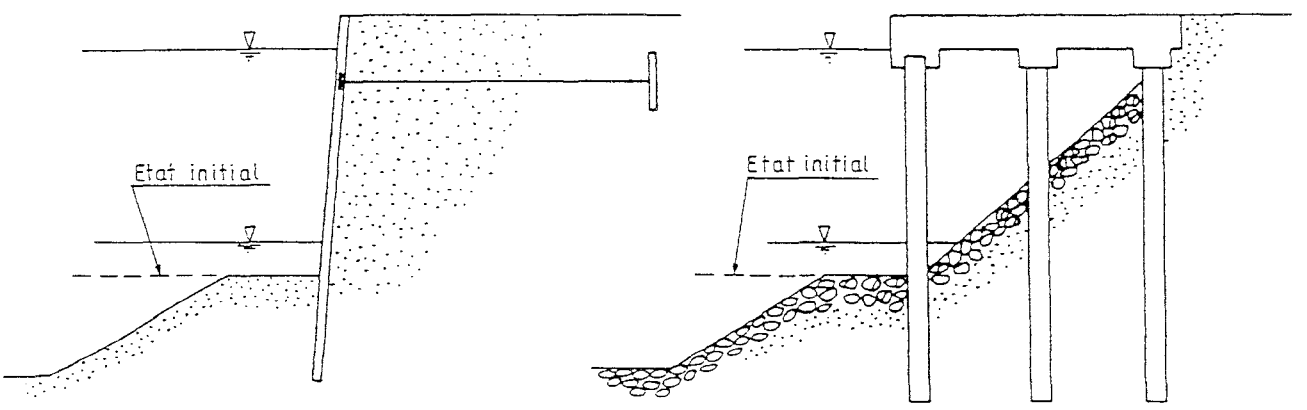


Fig. 5 : Talutage de la souille hors emprise de la fondation

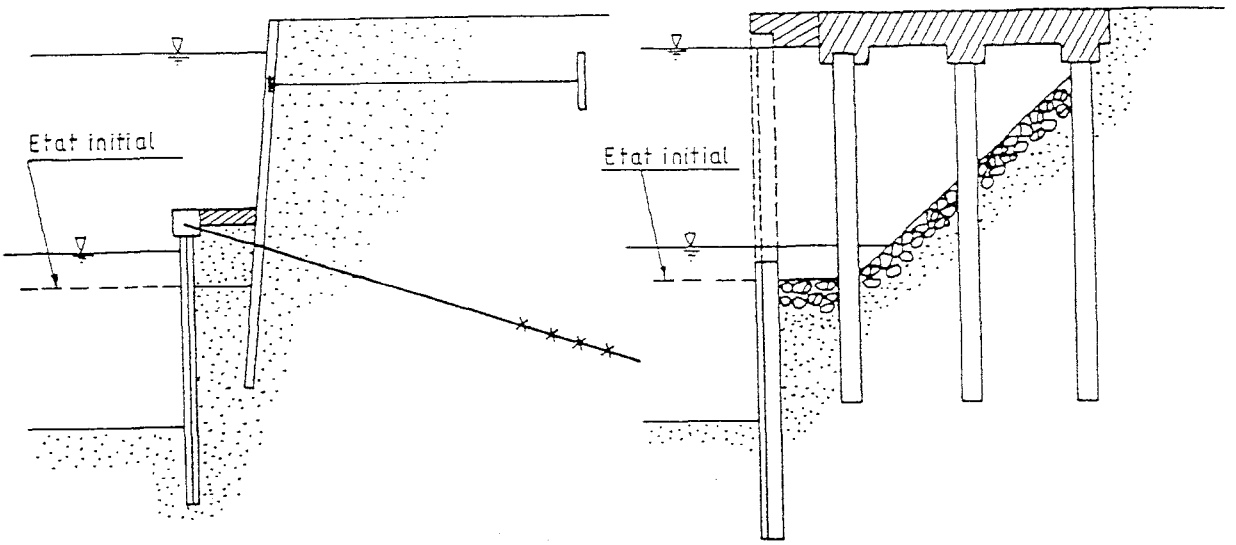
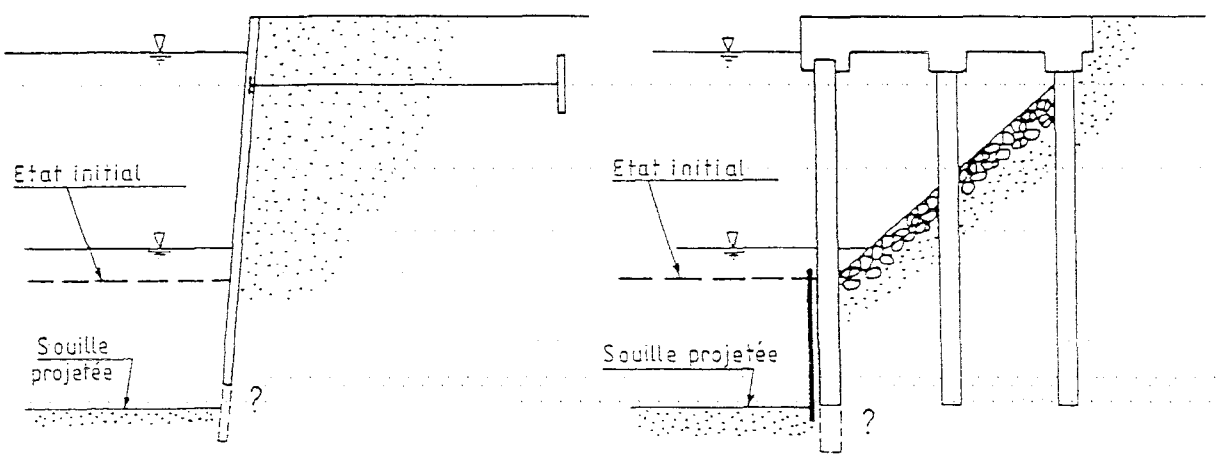


Fig. 6 : Rempiètement en avant du quai existant



Reprise en sous-oeuvre inadaptée

Reprise en sous-oeuvre délicate reconstruire les fondations

Fig. 7 : Rempiètement à l'aplomb du front d'accostage - solutions mal adaptées

La solution consistant à éloigner la souille en avant de la zone de terrain concerné par la fondation est une technique de rempiètement qui n'altère pas la portance des fondations de l'ouvrage. Elle nécessite par contre de réaliser un nouveau front d'accostage, ou de supprimer simplement l'accès des unités à fort tirant d'eau à ce quai conservé. figure 5.

Le rempiètement devant le front d'accostage nécessite de mettre en oeuvre un soutènement qui recevra la poussée des terres, surchargées par la fondation de l'ouvrage. Il convient dans ce cas de vérifier la stabilité d'ensemble au grand glissement ainsi que la portance du terrain situé sous la base des murs. Il y a interaction entre la nouvelle structure et l'ancienne -figure 6-. Cette solution recouvre de nombreuses variantes selon la nature et la portance des sols de fondation. Nous examinerons ci-après quelques cas.

Le troisième type de rempiètement permet de conserver intégralement le parement du quai existant, le parement inférieur à réaliser est situé dans le prolongement de l'existant. Cette formule est bien adaptée aux quais à parements maçonnés qu'il convient de conserver parce qu'ils sont en bon état, et surtout quand leur esthétique commande de les montrer. Par contre cette solution n'est pas adaptée aux quais constitués par un voile ancré qu'il conviendra de reconstruire de préférence quant aux quais sur pieux cette technique peut ne pas être adoptée pour conserver la portance des pieux de fondation - figure 7 -.

3. Rempiètement hors emprise de la fondation existante

1. Souille et soutènement éloignés de la fondation

Pour le rempiètement du quai Guynemer dans le port de Dieppe, il a été mise en oeuvre un rideau de soutènement en palplanches type L IIIS, à une distance de 6,50m du pied du mur de quai en maçonnerie. Entre les deux ouvrages il a été créé une berme en béton armé munie de tirants ancrés dans une poutre elle-même scellée dans le mur de quai. Ce sont des tirants passifs de 200 kN disposés tous les trois mètres qui ont pour fonction d'ancrer la tête du rideau de palplanches soumis à la poussée des terres. La hauteur libre du rideau est de 7,50m - figure 8-.

Pour reprendre l'effort appliqué au mur par l'ancrage du rideau ou par sécurité pour le mur de quai en maçonnerie, il a été mis en oeuvre des tirants actifs de 1 200kN tous les 3 mètres. Ces tirants sont inclinés de 22°30 sur l'horizontale.

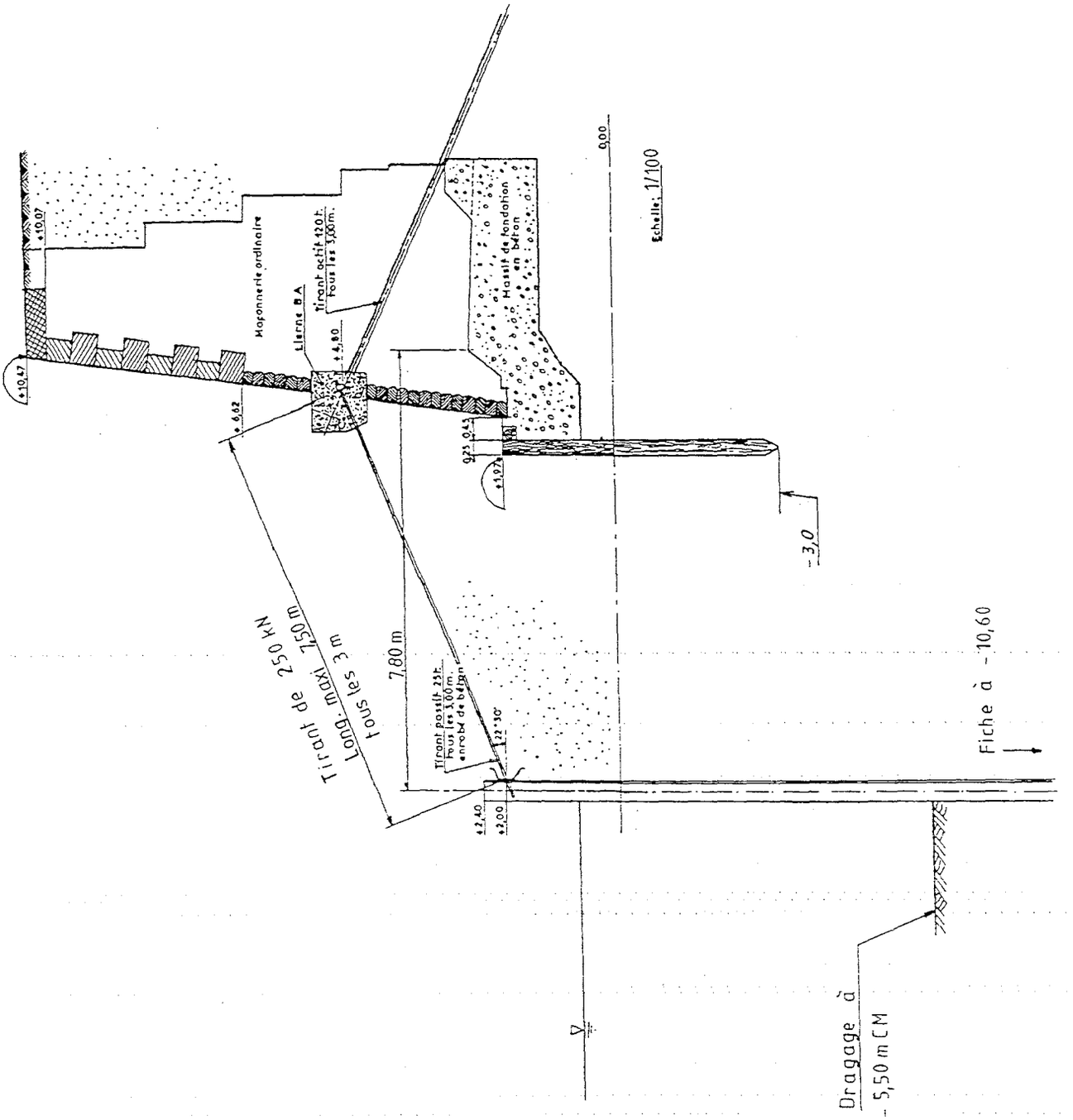


Fig. 8 : Rempiètement du quai Guynemer

Port de Dieppe

2. Création d'un nouveau quai en avant du précédent - quai de la glacière à Port Joinville-Ile d'Yeu

La solution du nouveau quai en avant présente l'avantage d'augmenter la surface du terre-plein, mais elle peut de ce fait ne pas être envisageable dès lors que le front d'accostage ne peut être modifié. Elle conduit à réduire la superficie du bassin, à modifier l'alignement des postes voisins et à réduire la zone de manoeuvre.

C'est une solution qui conserve l'ouvrage existant mais qui conduit à le masquer partiellement ou totalement. Il convient donc de s'assurer de sa qualité de son état et de son vieillissement éventuel.

La figure 9 présente un quai réalisé sur pieux en avant du mur de quai ancien. Il s'agit du quai de la criée dans le port de Port-Joinville - Ile d'Yeu - Vendée.

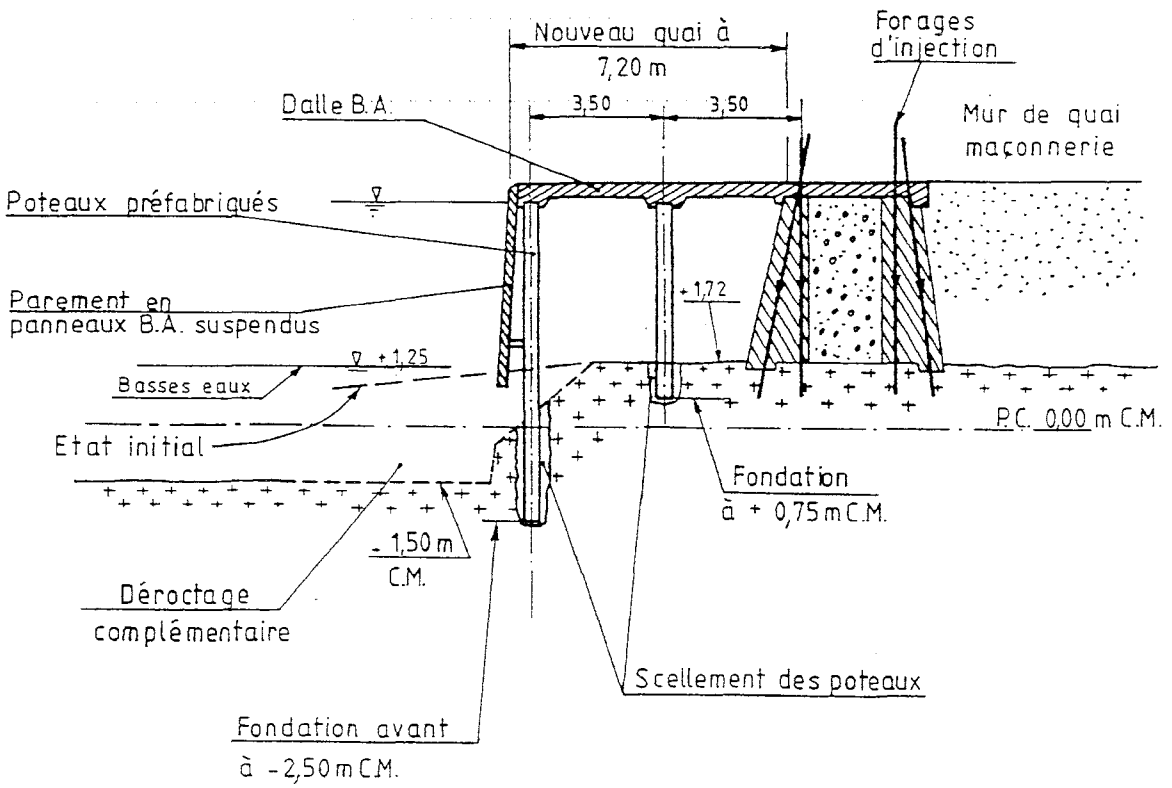


Fig. 9 : Ile d'Yeu - Port-Joinville. Rempiètement du quai de la criée par un nouveau quai

Le quai ancien en maçonnerie a été conforté par un rejointoiement général de son parement et les maçonneries ont été injectées. Ce quai constitué d'une dalle sur pieux a été réalisé en avant des maçonneries, les pieux avant étant fondés dans le talus rocheux.

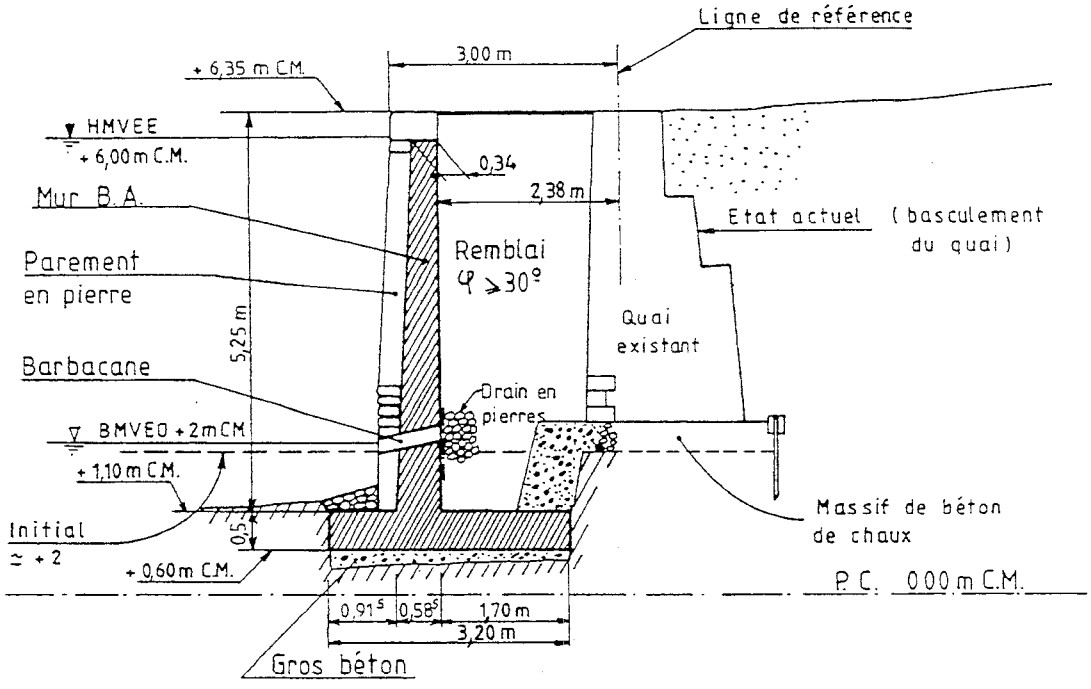


Fig. 10 : Port de Saint Gilles Croix de Vie (85)
Rempiètement du quai de Port-Fidèle

La figure 10 montre un exemple de reconstruction d'un nouveau quai en avant du quai ancien conservé. Le quai constitué d'un mur en maçonnerie avec parement de pierres de taille présentait un déversement du fait de la dégradation du massif de fondation réalisé au XIXème siècle dans un rideau de vannage en bois . La présence d'un substratum subaffleurant et le déroctage sur une faible épaisseur ont permis d'envisager puis de réaliser la construction d'un nouveau mur de conception traditionnelle en béton armé pour assurer ce rempiètement.

Au début des travaux, un blocage en béton a été réalisé sous la maçonnerie du quai conservé de manière à garantir sa stabilité pendant les travaux.

Rempiètement de la jetée Est du port de Dieppe

De même dans le cadre de cet ouvrage -figure 11-, on a construit un nouveau terre-plein en élargissement du précédent.

Le rempiètement est constitué par un nouvel ouvrage de type paroi verticale ancrée en tête. Il a été mis en oeuvre un soutènement en palplanches type LARSSEN IIIS de 22,80m de longueur. Les ancrages sur deux niveaux sont assurés par le mur de quai ancien.

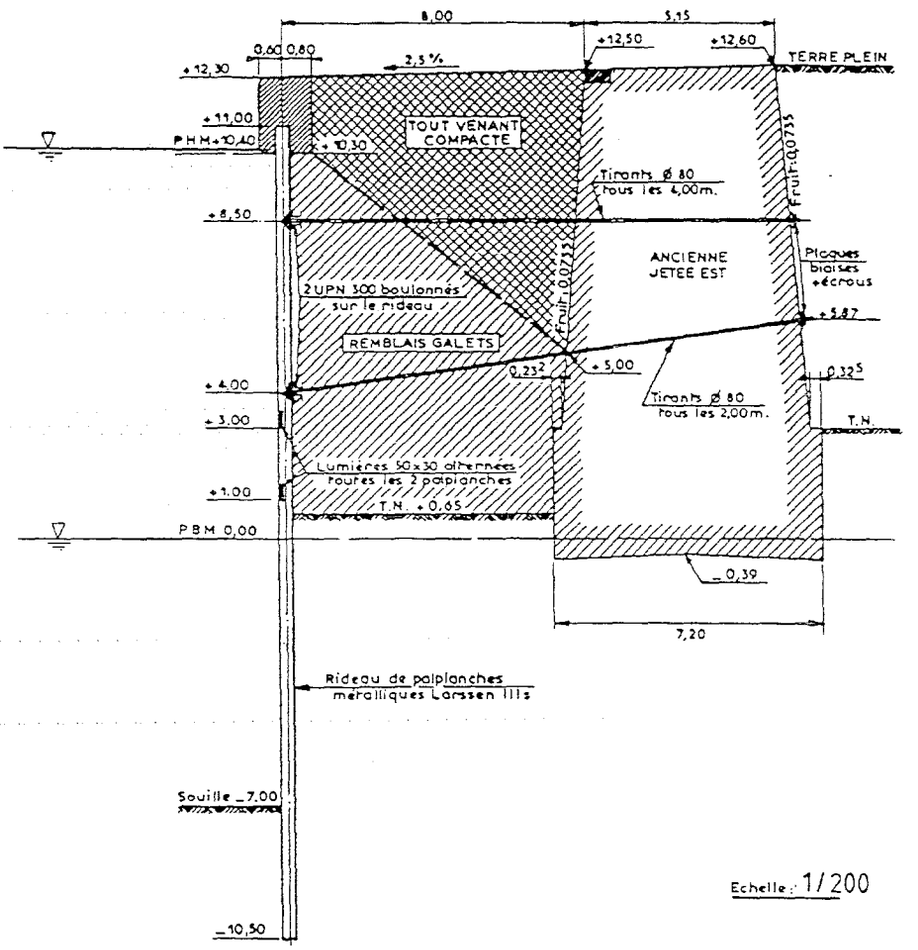


Fig. 11 : Quai de la jetée Est de Dieppe
Rempiètement par un nouvel ouvrage en palplanches

Ajout d'une travée à un quai sur pieux

Lorsque la profondeur d'eau est très grande, de l'ordre de 10m à marée basse, les ouvrages d'accostage sont souvent constitué d'une dalle sur pieux d'autant que les sols de fondations sont des alluvions meubles.

A Bassens sur la Gironde le rempiètement a été assuré par la construction d'une travée supplémentaire établie sur des pieux colonnes de diamètre 2000mm. Le talus sous l'ouvrage est soutenu par un rideau de palplanches LIIIS avec caissons L.P. IIIS incorporés.

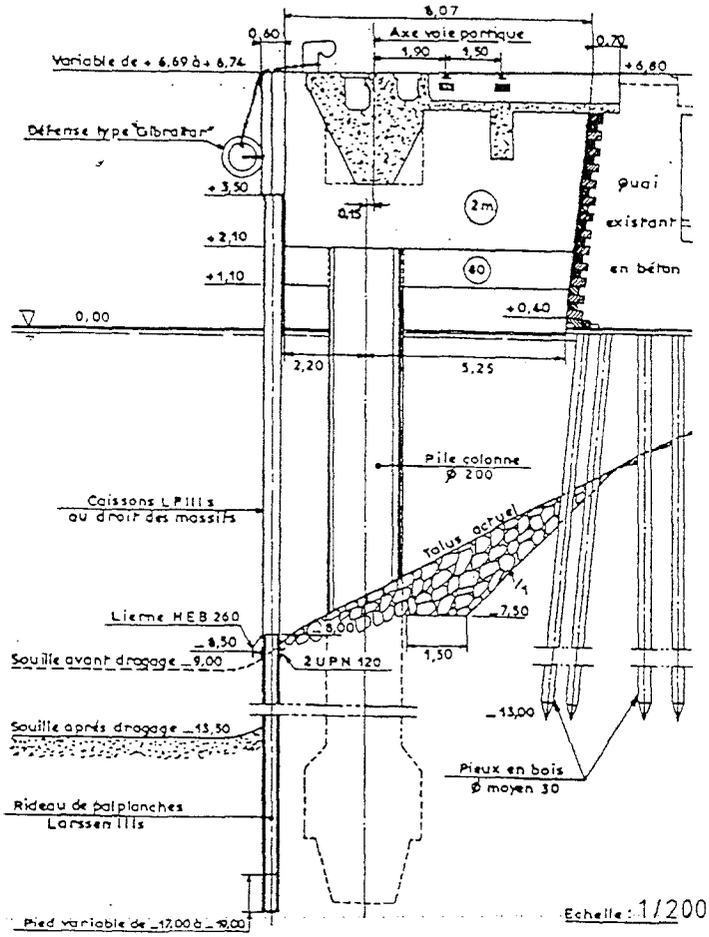


Fig. 12 : BASSENS sur la Gironde - ajout d'une travée au quai sur pieux existant

Le rideau est fiché en pied sur une hauteur de 5,50m et maintenue en tête par la dalle du quai qui forme le tirant. La longueur des profilés est de 25,70m

4. Rempiètement intervenant sur l'emprise de la fondation

1. Action exercée sur le soutènement -méthode de calcul

Ce type de rempiètement est réalisé en avant de la fondation de l'ouvrage existant mais a proximité immédiate du parement dans un horizon sollicité par l'action de la fondation. Il nécessite de mettre en oeuvre un soutènement qui outre la tenue des terres aura à reprendre les actions exercées par la fondation du quai. Une difficulté particulière que rencontre le projeteur est de définir les actions exercées sur ce soutènement à créer.

La démarche est la suivante :

- calcul des actions exercées par le quai existant sur sa base
- transfert des actions sur le soutènement à créer
- calcul des actions sur le soutènement (diagramme des poussées)
- dimensionnement du soutènement (fiche-inertie - ancrage...)

Le calcul du mur de quai

Si la démarche est classique il n'en demeure pas moins que le choix des hypothèses de calcul est prépondérant - choix d'une théorie de poussée - il est préférable d'adopter les tables de CAQUOT-KERISEL - choix d'un parement arrière réel ou fictif - inclinaison de la poussée - niveau de la nappe, ...

Une seconde difficulté concerne le choix ou non d'une butée devant l'ouvrage.

Les actions exercées étant connues ou choisies on obtient la résultante des efforts sur la fondation - figure 13 -

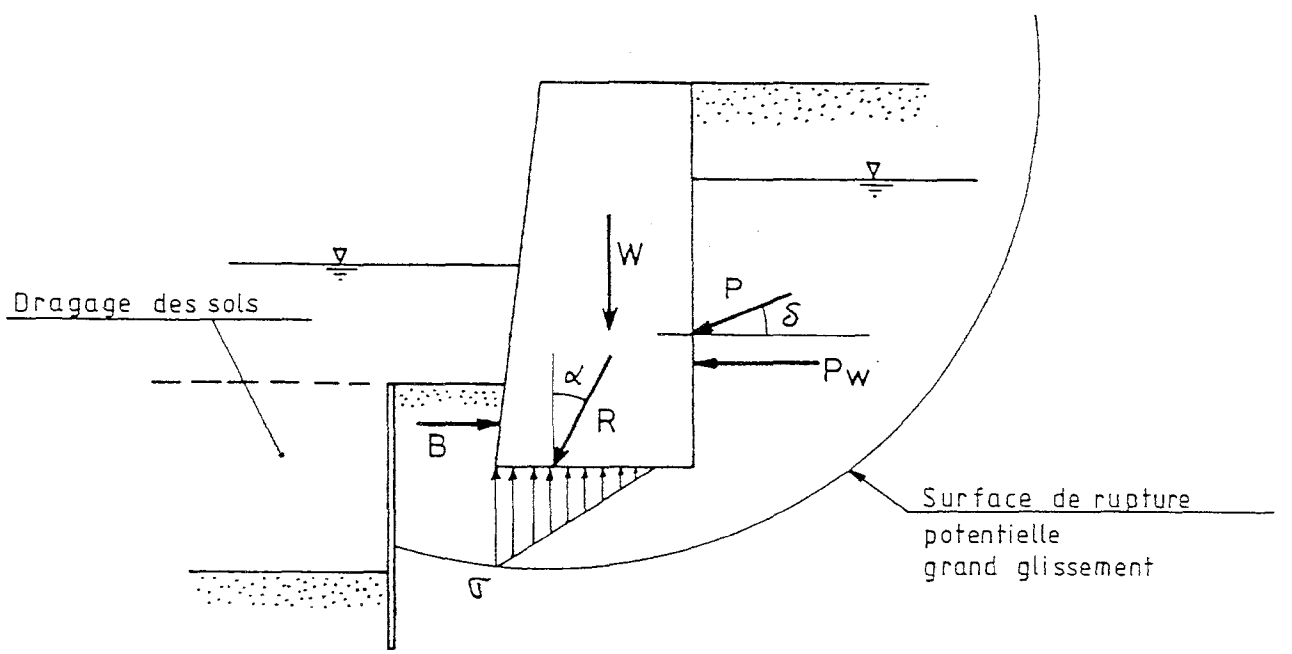


Fig. 13 : Actions exercées sur un mur de quai-diagramme dse pressions sur le sol.

La résultante R est inclinée de α sur la verticale. L'obliquité doit être inférieure à φ angle de frottement de la base sur le sol

L'étude de stabilité du mur consiste à vérifier :

- le non glissement sur la base
- le non poinçonnement sous l'arête avant
  (zone des contraintes maximales)

Le critère de tassement différentiel n'est pas à vérifier en principe dans la mesure où le quai est en bon état et présente un bon comportement.

Au cours du rempiètement les deux critères de non glissement et de non poinçonnement ne doivent pas être modifiés. On doit donc s'assurer au cours des différentes phases des travaux - dragage- mise en oeuvre du soutènement - exploitation de l'ouvrage - que ces conditions sont toujours vérifiées. Du fait de l'enlèvement des matériaux devant l'ouvrage il y a lieu de vérifier la stabilité au grand glissement. Tout ou partie de la charge R sera transmise au soutènement à réaliser.

Report des charges sur l'ouvrage de rempiètement

Bien que les règles de transfert des surcharges soient connues, vis à vis du nouveau soutènement, on peut obtenir des diagrammes de pression différents selon que l'on prenne en compte ou non la butée B devant le quai - figure 13-.

a) Cas où la butée est négligée

On vérifie la condition de non glissement du mur en adoptant un coefficient de sécurité tel que F soit supérieur à $tg\varphi / tg\alpha$. Ceci va dans le sens de la sécurité pour le mur. Mais il n'en sera pas de même sur le nouveau soutènement qui n'aura à reprendre que l'action de la surcharge triangulaire et horizontalement l'effort $P_{\cos \delta} + P_W$. Ces efforts sont appliqués en dessous de la fondation du mur.

b) Cas où la butée est prise en compte

La résultante des actions sur la base présente une composante horizontale telle que $P_{\cos \delta - \beta}$. Le diagramme des contraintes est différent, l'obliquité de la résultante (α) est plus faible, mais également le rempiètement est soumis à un effort B dont le point d'application est situé notablement plus haut.

En fait il faut prendre en compte la manière dont les différents éléments (mur, sol de fondation, rempiètement, ancrage...) sont susceptibles de se déformer ou de se déplacer. Ce sont les conditions de déformation qui vont guider le projeteur vers un report des charges. Ainsi le report est différent pour un rempiètement rigidemment lié au mur de telle sorte que l'on a un ouvrage monolithique ou au contraire que les liaisons sont relativement lâches pour des éléments pouvant se déplacer de manière importante.

Diagramme des poussées sur le soutènement

Le soutènement est soumis à la poussée des terres dans un massif de sol pesant soumis à des surcharges quelconques. Ces surcharges appliquées sont triangulaires et inclinées sous le mur de quai. Il existe des règles empiriques permettant de calculer les poussées résultant d'un tel système de charges, en particulier pour déterminer les zones d'influence des charges. Par contre, les charges inclinées ne sont pas traitées aisément et on se heurte au problème de la non superposabilité du diagramme correspondant à chaque surcharge élémentaire.

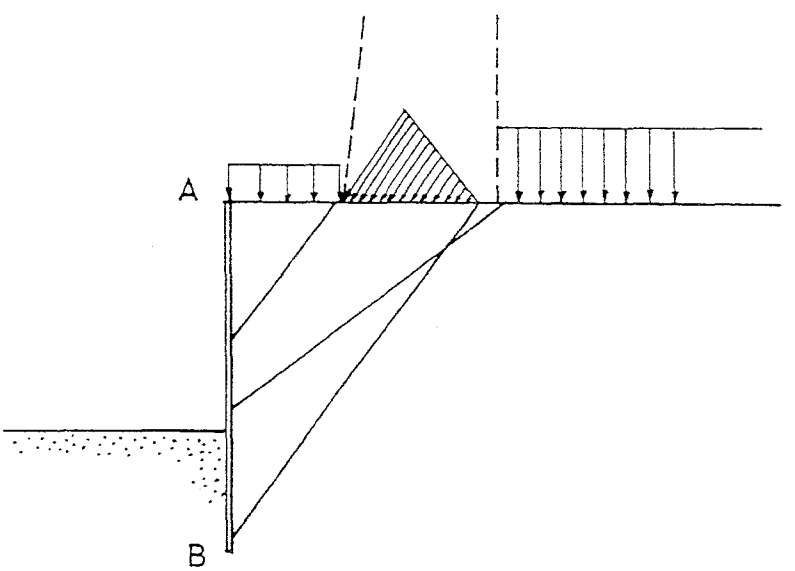


Fig. 14 : Répartition des efforts de poussée et des surcharges sur l'écran

Le projeteur est donc conduit à choisir entre différents modes de répartition en adoptant une théorie de poussée des terres et en respectant ses hypothèses.

Mais on notera que deux projeteurs, ou plus, peuvent obtenir des diagrammes de poussée différents sur le soutènement.

Dimensionnement du rempiètement

L'ouvrage est dimensionné selon les méthodes classiques de calculs des parois encastrées ou butée en pied et ancrées ou non en tête.

Ces méthodes sont cohérentes avec le fait que l'on calcule les diagrammes de pression à partir des états limites de poussée et de butée. Ceci suppose que l'on soit partout à la rupture et que les déplacements soient suffisamment importants pour que le sol puisse être considéré comme entièrement plastifié.

Remarque générale - Evolution des méthodes

Les difficultés de dimensionnement du soutènement à partir des méthodes dites "classiques" de poussée et de butée viennent du fait que le problème n'est pas traité d'une manière globale.

On dimensionne un soutènement soumis à un diagramme de pression donné ; pour calculer celui-ci on introduit des surcharges équivalentes dont la détermination résulte elle-même d'un calcul classique de mur de soutènement.

On s'oriente actuellement vers des méthodes globales de calcul des poussées sur l'écran en considérant l'équilibre de portions de massifs de sol de formes complexes. Le calcul est effectué en recherchant des surfaces de rupture défavorables.

Une autre méthode consiste à se donner une loi de comportement pour le sol (relation contrainte - déformation) et à traiter le problème par la méthode des éléments finis. On peut prendre en compte le phasage des travaux ainsi que la flexibilité du soutènement et la raideur de l'ouvrage. Cette méthode nécessite une bonne connaissance du sol et de ses caractéristiques ce qui en limite la portée, outre le fait de faire appel à un modèle nécessitant le recours à un spécialiste.

A partir de la théorie pressiométrique et de l'évaluation d'une courbe de réaction donnant une relation entre les pressions et les déformations ($p = ky$), on peut utiliser un programme de calcul élasto-plastique qui tient compte de la raideur de l'ouvrage et de la flexibilité du rideau. Il existe plusieurs versions de programmes de calculs - DENEBOLA mis au point au LCPC, ou le programme PAROI 3.

2. Rempiètement d'un quai en maçonnerie

La figure 15 montre le cas du mur des quais, Nord et Est du bassin à flot du port des Sables d'Olonne en Vendée.

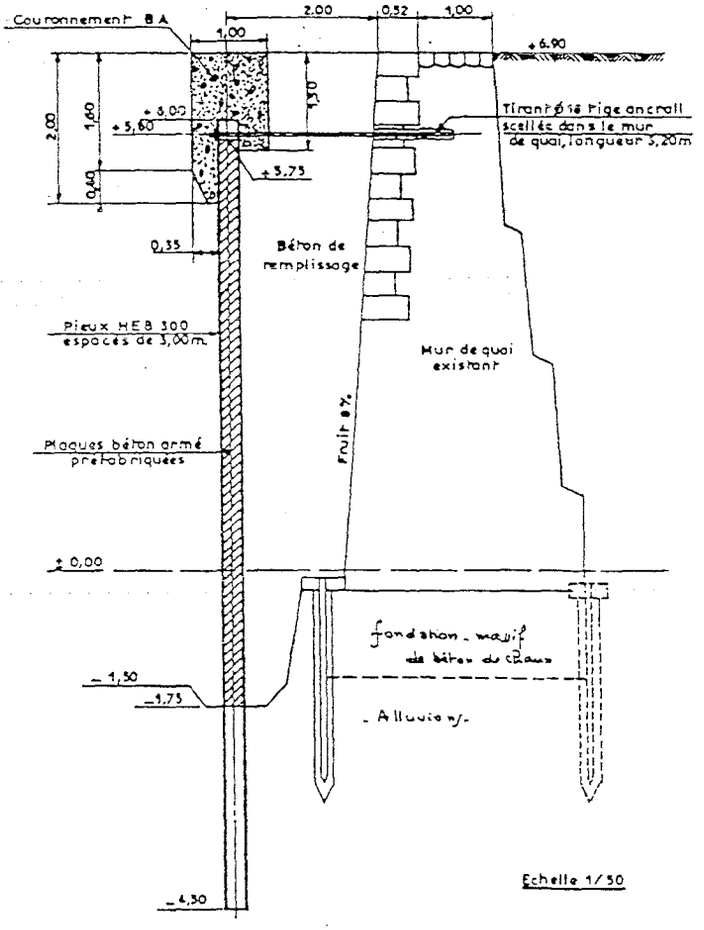
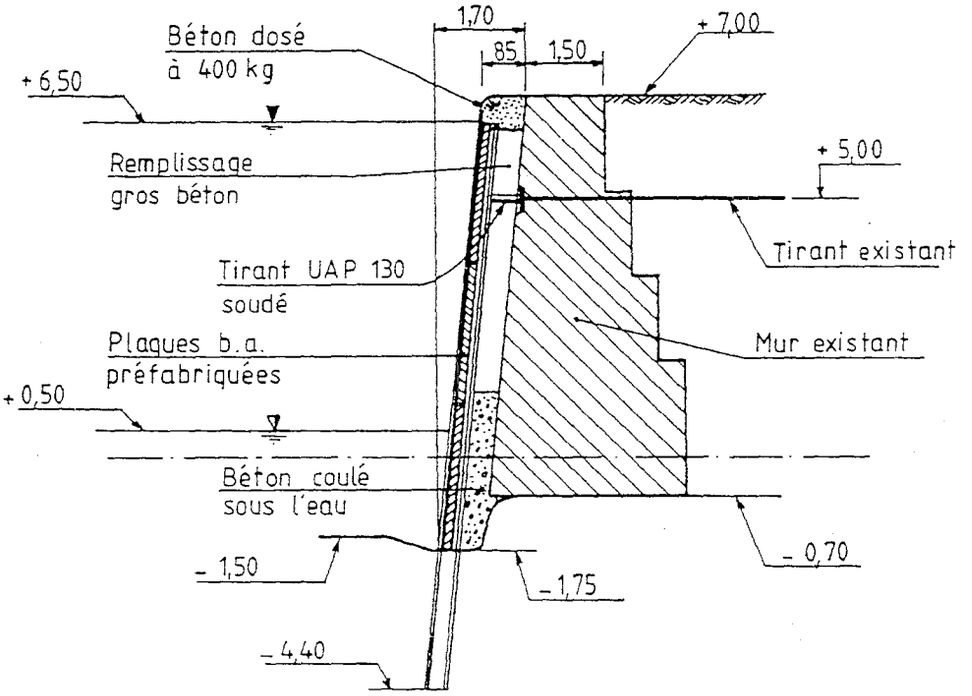


Fig. 15 : Port des Sables d'Olonne (85)
Rempiètement des quais Nord et Est du bassin à flot

Il a été mis en oeuvre un soutènement constitué de pieux HEB 300,fichés dans les alluvions compactes et le substratum de schiste décomposé. Des plaques de béton armé préfabriquées viennent s'intercaler dans les ailes des profilés.

Ce soutènement est ancré en tête et encastré en pied. Un autre exemple est donné figure 16.



COUPE TRANSVERSALE

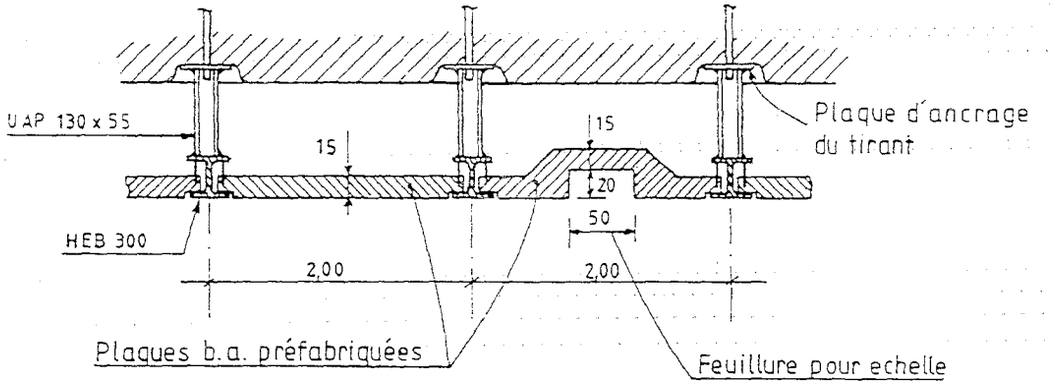


Fig. 16 : Exemple de remplètement d'un mur de quai par des profilés, métalliques et des plaques de béton préfabriquées.

Des variantes peuvent être envisagées comme la réalisation de poteaux en béton armé scellés en profondeur dans des forages et de géométrie adaptée à la mise en oeuvre de plaques préfabriquées en béton armé.

Un autre exemple est donné figure 17, où il est mis en oeuvre des panneaux préfabriqués de 12,20m de longueur et de section en U pour améliorer leur inertie. Ces panneaux sont scellés en pied dans une souille terrassée après minage préalable du rocher.

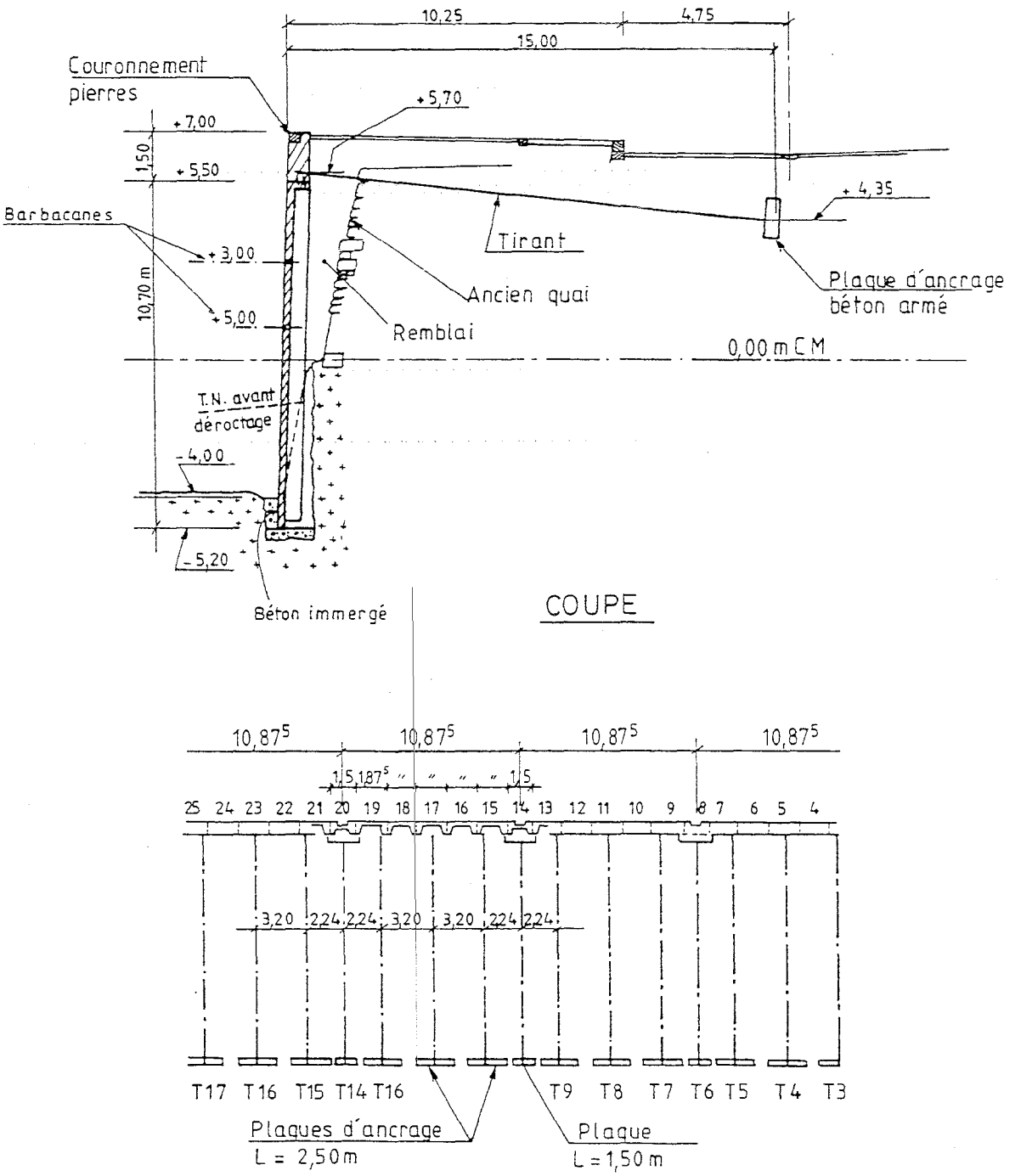


Fig. 17 : Rempiètement de quai des canonnières

Pour des ouvrages de type dalle sur pieux, le rempiètement consiste généralement à mettre en oeuvre un rideau de palplanches recevant la poussée des terres en talus. La figure 18 donne un exemple de rempiètement de quai où le rideau de palplanches a une hauteur limitée pour 2 sur 3. Tous les trois profilés le rideau est ancré en tête dans la poutre de couronnement.

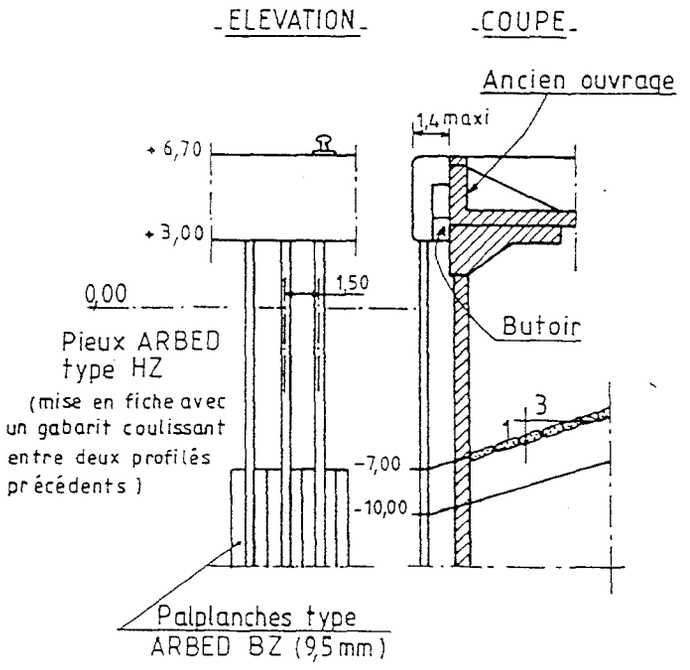


Fig. 18 : Rempiètement d'un quai sur pieux

3. Cas des ouvrages au rocher

Lorsque le quai est établi directement sur le rocher compact, le rempiètement consiste dans ce cas à protéger le talus rocheux - figure 18 - le parement doit être dimensionné, cependant pour reprendre les efforts de poussée du massif rocheux.

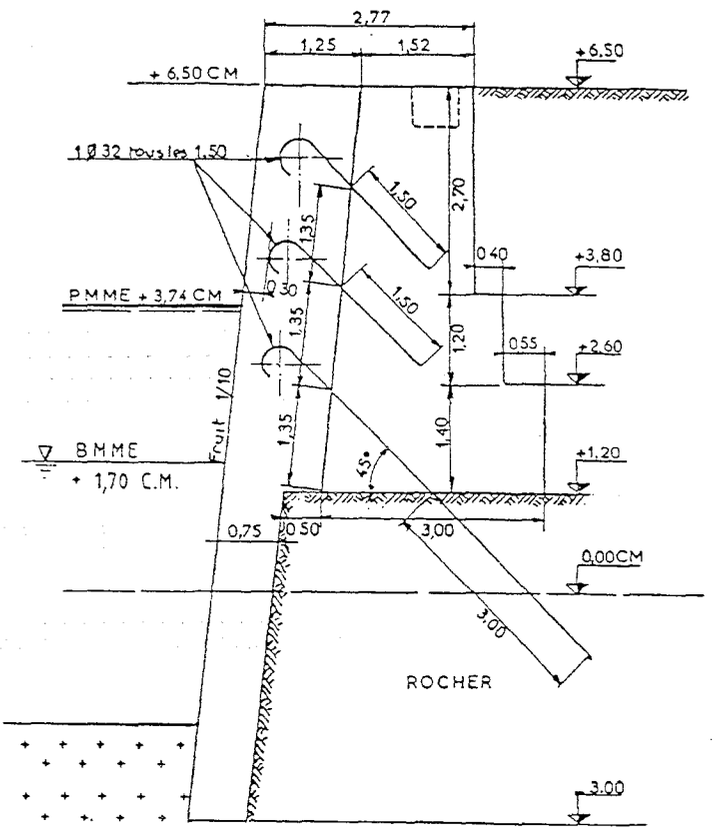


Fig.19 : Exemple de rempiètement d'un ouvrage établi sur le rocher compact

5. Rempiètement par reprise en sous-oeuvre

1. Cas des ouvrages établis sur les alluvions modernes

La reprise en sous-oeuvre permet de conserver le quai existant en améliorant les conditions de fondation.

Ainsi l'exemple de la figure 20 traite le cas du quai n°7 de Waalhaven du port de Rotterdam où la réception des cargos porte-containers nécessitait un approfondissement du tirant d'eau de 1,85m. Le dragage sous le niveau de fondation du quai aurait mis la stabilité de celui-ci en danger. La solution réalisée a consisté en des injections des sols de fondation à partir de pontons de manière à pouvoir s'adapter au trafic maritime et de limiter la partie du quai inaccessible aux navires - figure 20-.

Les sols de type sables et graves ont été traités par une injection de coulis de ciment bentonite puis par une injection de gel de silicate de soude

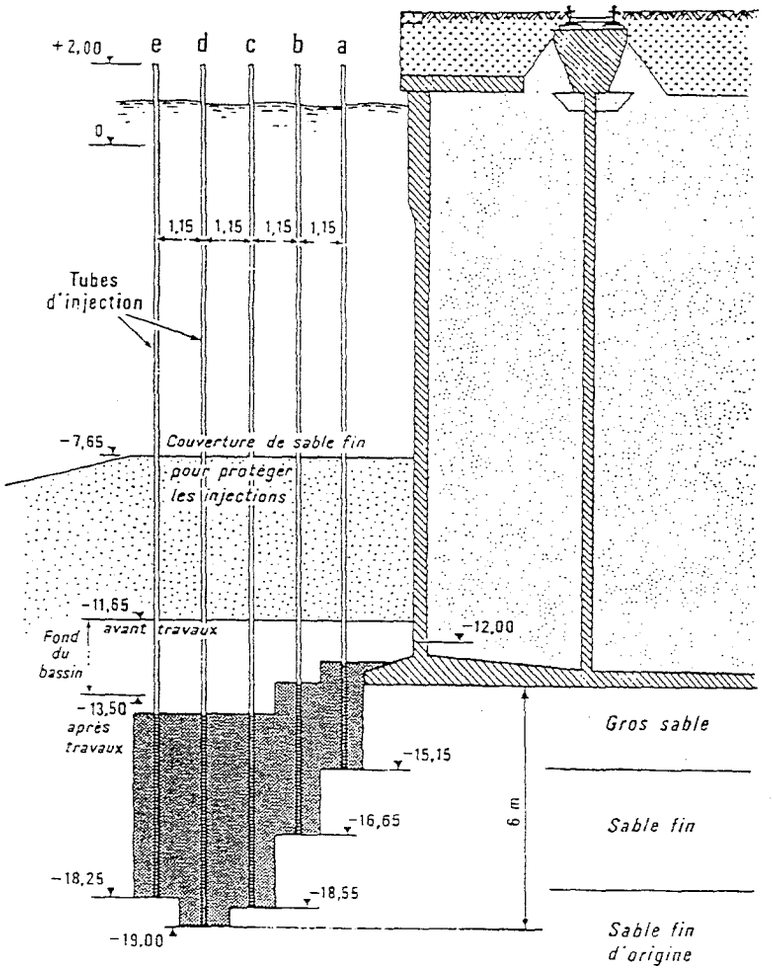


Fig.20 : Rempiètement d'un quai de type caisson établi sur les alluvions par une injection des sols préalablement aux terrassements

Un autre exemple est donné figure 21 où le quai est respris en sous-oeuvre par des files de micro-pieux avant de mettre l'ouvrage à sec et réaliser le terrassement. Une paroi en béton armé coffré est coulée en sous-oeuvre pour protéger et soutenir les alluvions.

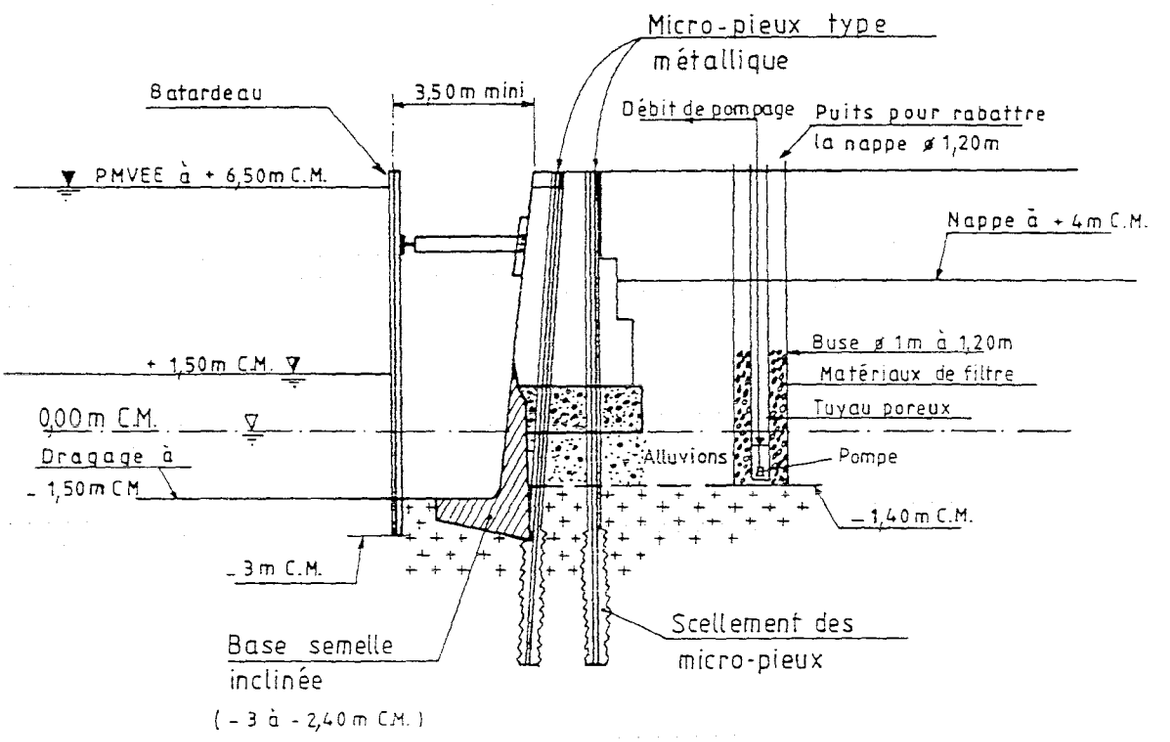


Fig.21 : Reprise en sous-oeuvre d'un quai par micro-pieux avant terrassement

2. Cas des quais établis sur le rocher

Les reconnaissances

La reconnaissance des quais et du sous-sol est entreprise à partir de sondages carottés de grand diamètre avec prélèvement d'échantillons intacts en continu et réalisation d'essais d'eau (LUGEON). Une observation complète des quais est assurée avec le relevé des affleurements rocheux, à marée basse dans le port.

Les travaux de reconnaissance doivent permettre de définir le pendage des couches, la fissuration de la roche, sa densité, l'orientation des plans, les propriétés mécaniques des joints et permettre de dresser une expertise sur l'état et la stabilité propre des quais en maçonnerie.

Etude de stabilité

La stabilité est à assurer en phase de travaux quand le port est mis à sec derrière un batardeau, et en phase d'exploitation avec surcharges sur les quais ; deux calculs sont successivement conduits avec des paramètres différents et adaptés aux conditions de fonctionnement du quai.

Les études de stabilité sont conduites sur un bloc rocheux limité par des surfaces planes qui correspondent aux surfaces de fissuration, et aux diaclases de la roche avec les pendages correspondants.

Un exemple de découpage de bloc rocheux étudié est donné sur la figure 22. On considère que le bloc rocheux se détache sous l'action des efforts extérieurs exercés et sous l'action de son poids propre, des quais et des surcharges d'exploitation si besoin on tient compte de la pression interstitielle dans les joints, fonction des différents niveaux de la nappe et d'autre part de la résistance au cisaillement mobilisée dans les joints. Cette dernière valeur est difficile à appréhender même avec quelques essais sur les carottes de roches. Elle est choisie également en fonction du type de comportement étudié (court terme avec la valeur du frottement de pic, long terme avec une valeur résiduelle).

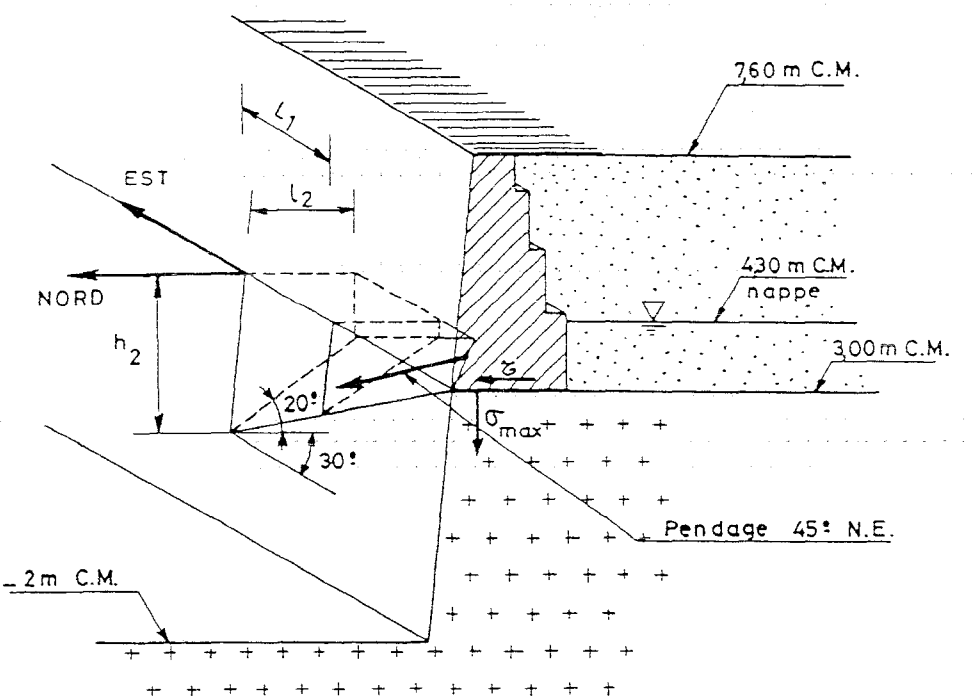


Fig. 22 : Etude de stabilité du bloc rocheux sous un mur de quai en maçonnerie

En faisant varier les dimensions du bloc un à un, (hauteur, longueur, profondeur), on recherche la géométrie qui présente la sécurité la plus faible dans les deux hypothèses de court et de long terme. Le coefficient de sécurité est défini à la rupture comme le rapport des efforts moteurs aux efforts résitants.

Selon la direction des pendages de la roche et des efforts exercés on est amené à prévoir un ancrage pour assurer la stabilité des blocs rocheux sous le quai.

Les travaux de rempiètement

Ayant déterminé l'effort horizontal à appliquer pour assurer la stabilité du massif rocheux, on considère que la répartition des pressions exercées sur le voile en béton de rempiètement est uniforme. Ce voile est considéré comme buté en pied dans le rocher, ancré en tête par un tirant et soumis par la roche à une pression uniforme.

On met en oeuvre des tirants passifs répartis en moyenne tous les deux à trois mètres et selon une ou deux rangées horizontales. Le terrassement est effectué en deux phases, la première à mi hauteur permet de réaliser les tirants, et après scellement de ceux-ci, le terrassement est terminé sur toute la hauteur à rempiéter en toute sécurité.

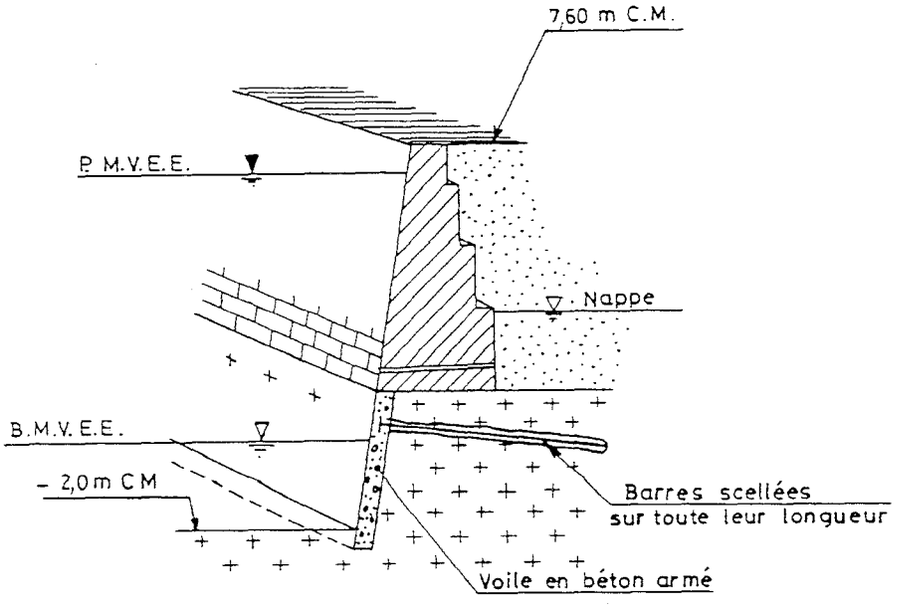


Fig. 23 : Rempiètement de quai fondé sur la roche. Cas du quai de l'Herbaudière

Cette technique présente l'avantage de conserver au mur de quai tout son aspect et son cachet, ce qui est très important dans les sites historiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) J. P. LEVILLAIN "Etude de rempiètement de divers quais dans les années 1985-1991" documents internes
- Quais ouest de l'Herbaudière - Noirmoutier (85)
- Quai Sud et quai Est de l'Herbaudière - Noirmoutier (85)
- Quai de Port Fidèle à Saint Gilles Croix de Vie (85)
- Quais de la darse n°1 à Saint Gilles Croix de Vie (85)
- Quai d'allégement du port des Sables d'Olonne (85)

(2) D. GOUVENOT, Rotterdam, Port de Waalhaven - môle N° 7 - "Approfondissement du bassin et rempiètement du mur de quai par injections" Revue TRAVAUX, nov. 1972.

(3) P. ARISTAGHES "Calcul des rempiètements de quai", Annales des Ponts et Chaussées, 1° - 2° trimestre 1990.