

**GAGNON G.**

Ministère des transports du Québec, Canada

**Ouvrage en terre armée comme protection contre la mer****Sea-wall constructed in reinforced earth**

Highway 132 in the Gaspé peninsula of Quebec is built at the foot of a cliff, directly on the beach of the St. Lawrence River. While looking for possible solutions to protect the highway against the action of the water we decided to try the *reinforced earth* technique. We thus built a prototype section 3.2 km in length. In this project the *reinforced earth* fulfills two functions: a retaining wall and a seawall. Besides the usual constraints connected with this technique, we had to contend with other constraints caused by the presence of the water: the tides, the sea-swell, the salinity of the water, and the ice-floes. On the conceptual level, we had to take into account the hydrostatic pressures which influence the general stability of the works and the bond between the metal reinforcing strips and the earth. We also had to take into account the problems caused by the corrosion of the metal reinforcing strips and the earth. We also had to take into account the problems caused by the corrosion of the metal reinforcing strips in a salt-water environment as well as the problems caused by the sucking action of the tides and waves on the finer particles of the land-fill. As far as the technology is concerned, these particular conditions gave rise to the concept of self-stabilizing, heavy concrete panels and influenced the carrying-out of the work, especially in regard to tidal conditions.

INTRODUCTION

Au cours de l'été 1978, le ministère des Transports du Québec a construit un mur en terre armée pour permettre la rénovation d'un tronçon de la route 132, à Mont St-Pierre, en Gaspésie. A cet endroit, la route est adossée à une falaise et est fondée sur l'estran même du fleuve St-Laurent. C'est ainsi que l'ouvrage est soumis à l'action de la houle et de la marée.

A plusieurs endroits à travers le monde, des ouvrages en terre armée ont été construits en site aquatique. Cependant c'est la première fois à notre connaissance que cette technique est réalisée dans les conditions suivantes: fondation sur socle rocheux, action de la houle, exposition à la marée et construction sans batardeau.

Le choix de la terre armée:

En 1971, le ministère des Transports avait planifié la reconstruction de la route 132 sur une distance de 100km, dont environ 50km étaient défendus, côté mer, par un vieux mur de bois.

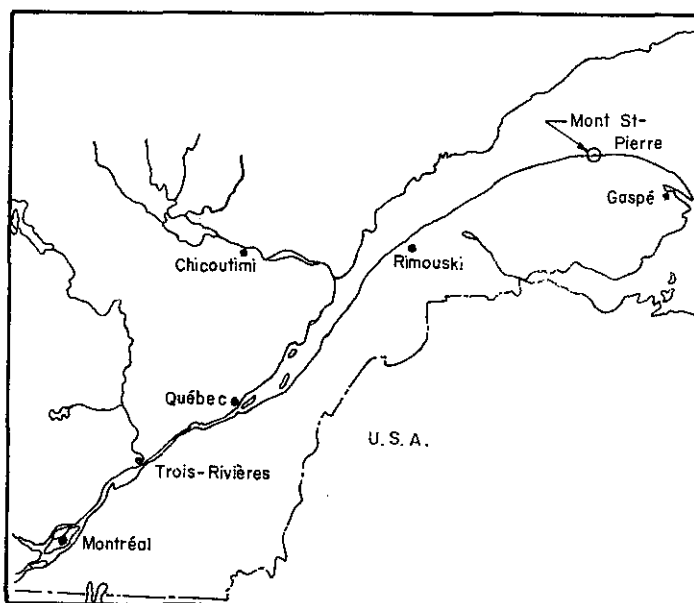


Fig. 1- Plan de situation.

Lors de l'étude préliminaire (1) du projet, deux types de protection du remblai furent considérés: un mur à paroi verticale et un talus protégé par un enrochement ou par des blocs artificiels. D'une façon générale, les talus en enrochement s'avèrent plus économiques que les murs à paroi verticale. Cependant, pour certains tronçons de cette route à Mont St-Pierre, la pierre de qualité et de grosseur adéquate n'est pas disponible dans un rayon de transport économique. Nous avons donc étudié quatre différents types de mur, soit le mur en béton armé, le mur massif en béton, le mur de bois (*caisson lesté de pierres*) et le mur en terre armée.

Cette dernière technique nous est apparue très attrayante par son coût, son esthétique, la disponibilité des matériaux et la rapidité d'exécution. Comme d'autre part plusieurs contraintes de conception et de réalisation nous étaient inconnues, nous avons décidé de construire un mur prototype pour nous permettre de vérifier ces exigences. C'est ainsi, qu'en collaboration avec la société canadienne de Terre Armée, nous avons construit le mur de Mont St-Pierre.



Fig. 2- Mur de Mont St-Pierre

#### CONDITIONS HYDROGRAPHIQUES

La pente des fonds marins devant l'ouvrage varie entre 0 et 2%. Le niveau géodésique de la marée haute de vive-eau est 1,73 m et celui de la marée basse -1,36 m. D'après une étude de houle effectuée par le Laboratoire d'Hydraulique Lasalle (1), l'amplitude significative de la houle centenaire probable serait de 4,50 m et sa période inférieure à 10 secondes. Cependant l'amplitude maximale de la houle qui peut atteindre l'ouvrage sera toujours limitée par les fonds marins. En effet, le mur est fondé à une élévation variant de 0,6 m à -0,90 m; dans ces conditions, l'amplitude maximum au déferlement atteindra 2,30 m.

#### Efforts dus à la houle

Lors des déferlements la houle peut produire des pics de pression très élevés et de très courte durée, c'est l'effet de *gifle*. On ne peut assimiler la *gifle* à une pression statique à cause de sa durée de l'ordre de quelques centièmes de seconde. Cependant on doit s'interroger sur les conséquences de son action sur les ouvrages. La houle déferlante produit des pressions d'une durée beaucoup plus grande, c'est l'effet de *bourrage*. Les calculs de stabilité exigent la prise en compte de ces pressions. Lors de l'étude de notre projet nous avons évalué ces efforts en suivant la méthode de Minikin: l'effort maximum calculé se chiffra à 4,70 MN.

#### Problème des glaces

Des observations sur les murs en bois érigés 30 ans auparavant nous ont conduit aux mêmes conclusions que l'on trouve dans le "Shore protection manual" (2): *Normally, shore structures are subject to wave forces comparable in magnitude to the maximum probable pressure that might be developed by an ice sheet.* En effet les glaces n'ont causé aucun bris de pièces ni laissé de traces d'érosion du matériau normalement très vulnérable à leur action.

De l'avis des riverains, lorsqu'un couvert de glace se forme sur l'estran, il se fixe très rapidement sur le socle rocheux. Ce couvert demeure immobile jusqu'au printemps alors que les grandes marées l'arrachent et l'emportent vers le large.

Suite à des observations sur le site au cours de l'hiver 1976-1977, nous avons constaté que le phénomène d'ancrage du couvert de glace sur l'estran se produit dans la zone où le niveau moyen de la marée haute est de 2,0 à 2,5 m. Par plus grande profondeur, le couvert devient mobile et, projeté contre les structures, peut induire des efforts assez importants.

Pour le projet de Mont St-Pierre, l'ouvrage est fondé à environ 2,0 m de profondeur par rapport au niveau de la haute mer de vive-eau, de sorte que les ouvrages seront protégés pendant l'hiver par le brise-lames naturel du couvert de glaces.

Au début de l'hiver, lorsque l'épaisseur du couvert est d'environ 200 mm, une tempête est susceptible de le projeter contre les structures. Ce couvert se fractionne alors en plusieurs glaçons qui risquent de s'empiler contre le mur. Cependant, à cause du

peu d'épaisseur de la glace, les efforts induits sont plutôt faibles.

### Gel

A notre connaissance, il n'existe aucune étude concernant le mode de pénétration du gel dans un remblai correspondant aux conditions rencontrées. Cependant, à cause de la nature des matériaux constitutifs du massif de terre armée, nous croyons que son influence sur les contraintes dans les différents éléments de l'ouvrage sera mineure. Afin de mieux cerner ce problème, nous avons prévu des essais qui permettront de répondre aux interrogations relatives à ce problème.

### DIENSIONNEMENT

La hauteur des ouvrages de protection contre la mer doit être déterminée en tenant compte des conditions hydrographiques locales et de leurs caractéristiques.

### Cote d'arase des ouvrages à la mer

A cause de l'importance de la hauteur des ouvrages, nous avons décidé d'étudier ce problème dans un canal à houle, au Laboratoire d'Hydraulique Lasalle. Pour un ouvrage soumis à l'action de la houle déferlante, la détermination de la cote d'arase n'avait jamais fait à notre connaissance l'objet d'une étude systématique.

Les essais ont été faits sur un talus en enrochement, sur un mur à paroi verticale sans déflecteur chasse-mer et sur un mur surmonté d'un tel déflecteur. Nous avons également vérifié la stabilité de ces éléments. Les résultats sont consignés dans un rapport synthèse préparé en avril 1976 (3).

La figure 3 illustre le type de résultat obtenu. Les courbes en traits discontinus représentent la cote d'affleurement pour un mur à paroi verticale en fonction de l'amplitude de la houle au large, tandis que celles en traits pleins correspondent au cas d'un talus en enrochement.

Il faut noter que les cotes d'affleurement données par ces courbes sont légèrement plus élevées que celles généralement mentionnées dans les ouvrages traitant de ce problème. Les courbes établies pour un mur à paroi verticale nécessiteraient des cotes d'arase d'ouvrage beaucoup plus élevées que pour un talus en enrochement. C'est pourquoi nous avons étudié le comportement d'un élément supplémentaire ajouté au sommet du mur: le

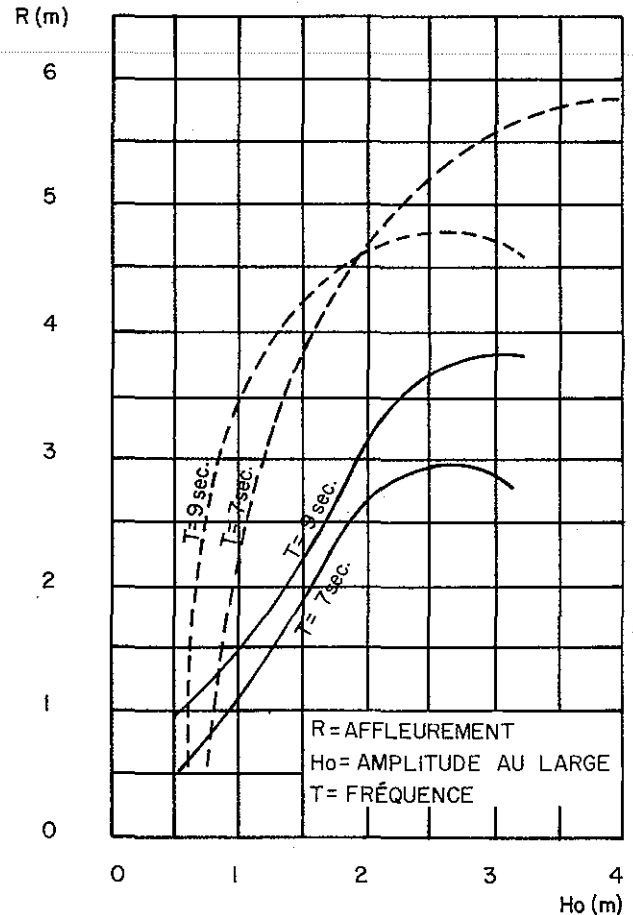


Fig. 3- Affleurement maximum contre un talus en enrochement et contre un mur vertical.

défecteur chasse-mer.

### Déflecteur chasse-mer (Fig. 4)

En 1975, nous avons analysé, en canal à houle, un mur en béton armé présentant un problème de réflexion des vagues. Son sommet comportait une surface courbe pour retourner les lames vers la mer. Dans son rapport (4), l'ingénieur Richard Boivin mentionnait que ce type d'ouvrage limitait de façon spectaculaire les franchissements. D'autre part, dans le manuel "Shore Protection", on rencontre le commentaire suivant: *Where the structure crest is to be used for a road, promenade or other purpose, this design (of concave curved or reentrant faced structures) may be the best shape for protecting the crest and reducing spray.*

Pour obtenir cette capacité de rejet des lames vers la mer, nous avons donc imaginé un élément préfabriqué, profilé suivant ce principe, pouvant être assujéti à n'importe quel type de structures à paroi verticale.

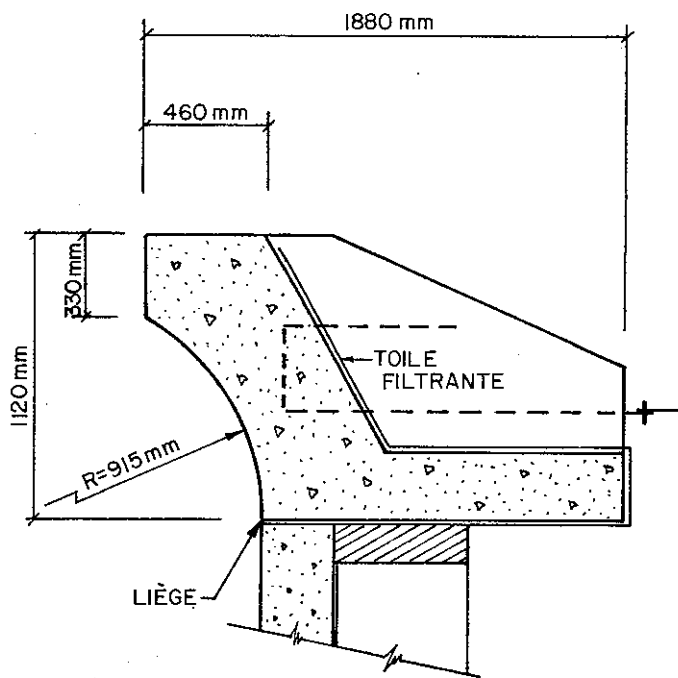


Fig. 4- Déflecteur chasse-mer

C'est ainsi que nous avons vérifié sa performance hydraulique et sa stabilité lors des essais en canal à houle. Les résultats sont consignés dans le rapport de l'étude (3).

En résumé, et ne tenant compte que des valeurs pertinentes à notre projet, les essais ont été démontré qu'au niveau des affleurements un calage de 2,5 m conviendrait aux pires conditions de tempête. Par comparaison avec les cotes d'affleurement illustrées à la figure 2, nous constatons qu'un tel mur peut être construit plus bas que la cote d'arase d'un talus en enrochement. Le poids de ce déflecteur, pour être stable, doit se situer aux environs de 2 MN/m. En utilisant ce principe, nous avons donc préparé un projet de mur dont une section type est représenté à la figure 5.

#### TECHNOLOGIE

Comme dans tout ouvrage de ce genre, la société canadienne de la Terre Armée a fait les calculs de stabilité interne du massif.

Sans entrer dans les détails, qu'il me suffise de mentionner les contraintes de conception suivantes:

- Le niveau maximum de l'eau dans le massif ne dépasse jamais celui de la cote de haute

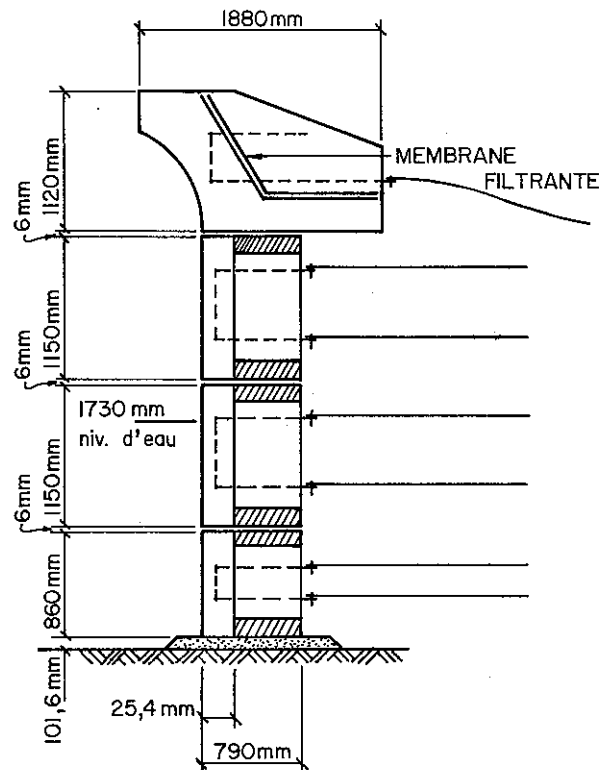


Fig. 5- Coupe type du mur

mer de vive-eau. Le massif est suffisamment drainant pour que le niveau d'eau à l'intérieur suive le niveau externe avec un décalage maximum du quart de l'amplitude. Dans ces conditions, le coefficient de sécurité à l'adhérence doit demeurer supérieur à 2.

- A titre de vérification, on a étudié l'hypothèse d'un massif complètement submergé (haute mer de vive eau) lorsque l'extérieur de la fondation est à sec. Suivant cette hypothèse, le coefficient de sécurité à l'adhérence doit demeurer supérieur à 1. Le taux de travail des armatures ne doit pas dépasser la limite élastique du métal.

Il est important de vérifier ces hypothèses par des essais *in situ*. S'il s'avérait qu'elles sont pessimistes, il y aurait alors des économies à réaliser pour de futurs projets.

#### Les armatures

En présence de l'eau saline, nous avons décidé d'utiliser des armatures en acier doux. Pour contrer les effets de la corrosion, tout en s'assurant d'une durée de vie de plus de 50 ans, le choix a porté sur une augmentation de l'épaisseur des armatures de terre armée de 1,5 mm sur chaque face. Nous croyons cette surépaisseur sécuritaire car

le Laboratoire central des Ponts et Chaussées recommande "pour les ouvrages définitifs à la mer" d'ajouter 1 mm de part et d'autre des armatures pour une durée de vie estimée à 30 ans (5).

La température moyenne de l'eau de mer à Mont St-Pierre est beaucoup plus basse qu'en France, ce qui ajoute à la durée des armatures. Donc nous avons mis en place des armatures de 6 mm d'épaisseur sur une largeur de 90 mm ou de 120 mm dépendant des niveaux.

### La terre

Le matériau de remblai spécifié dans l'appel d'offres répondait aux critères généralement admis pour les ouvrages en terre armée. De plus on avait prévu derrière le parement une cheminée drainante constituée d'un matériau grossier. Lors de la réalisation, vu la granularité étalée du matériau constitutif du massif, cette cheminée drainante fut éliminée.

### Les écailles

Si nous considérons l'agressivité du milieu, nous comprendrons l'attention que nous avons portée à la conception des écailles, surtout si nous prenons en considération les méthodes de réalisation d'un tel ouvrage. En collaboration avec les ingénieurs de la société Terre Armée, nous avons dessiné des écailles spéciales illustrées à la figure 6.

*Épaisseur des écailles:* Tandis que des écailles de béton standard mesurent 180 mm d'épaisseur, celles utilisées dans ce projet ont 254 mm. Cette surépaisseur offre la garantie d'une couche d'usure pour tenir compte de l'effet abrasif de la houle et des glaces. L'inertie additionnelle constitue également un facteur de résistance aux efforts ponctuels de très courte durée (quelques centièmes de secondes) produits par la gifle du déferlement.

*Matériau des écailles:* Il est évident qu'un béton à haute résistance est nécessaire pour assurer la durabilité des éléments de parements de l'ouvrage, c'est pourquoi sa valeur a été fixée à 35 MPa. Comme cet ouvrage est construit au Québec, on a ajouté des aciers d'armature pour tenir compte des effets de la variation de température sur la fissuration du béton, d'autant plus que les murs sont relativement minces.

*Forme des écailles:* (Fig. 6) En créant cette forme particulière d'écailles, que l'on peut qualifier d'auto-stables, les avantages recherchés étaient leur mise en place sans étaieage et leur capacité de résister à une agitation moyenne de la mer. Au départ nous avons cherché à éviter la construction d'un batardeau qui, en plus d'augmenter les coûts, aurait été très difficile à étancher. Les contreforts ajoutés à cette écaille assuraient donc la stabilité requise. Cette forme particulière nous permettait en même temps d'augmenter l'inertie de l'élément.

Pour faciliter la mise en place d'écailles très lourdes, nous avons abandonné la forme cruciforme pour adopter celle représentée en élévation sur la figure 6.

### REALISATION

La fabrication des écailles et des armatures a débuté en février 1978. L'usine de fabrication était située à Matane, soit à 145 km du chantier. La mise en place de cet ouvrage en terre armée a été réalisée entre le début de juin et la mi-septembre, soit sur une période d'environ 15 semaines, ce qui représentait plus d'un mois d'avance sur l'échéancier prévu de 20 semaines.

La belle température de l'été 1978 a sûrement apporté un élément déterminant dans ce résultat. Cependant il convient de signaler que les avantages reliés à l'utilisation des écailles auto-stables ont également contribué à ce succès.

### Avantage de l'écaille auto-stable

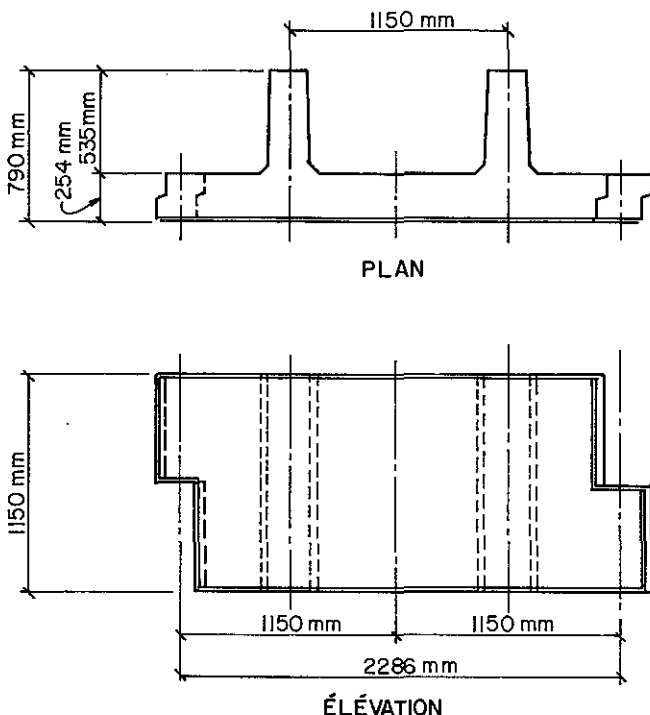


Fig. 6- Ecaille auto-stable.

En plus des avantages recherchés lors de la conception, l'écaille auto-stable a permis la mise en place des éléments sans utiliser de coins en bois pour assurer la verticalité ni de serre-joints pour obtenir un affleurement parfait avec les écailles adjacentes.

En général, la deuxième rangée d'écailles était mise en place avant le remblaiement de la première rangée. Il est inutile de préciser que cette procédure accélérerait le travail sur le chantier. Cependant une tempête survenue au moment où plusieurs écailles n'étaient pas remblayées a provoqué la chute d'une dizaine d'unités. De l'avis de l'entrepreneur, les désavantages d'un tel accident sont largement compensés par l'accélération du chantier.

#### Manutention des écailles

Les 15 écailles chargées sur un camion étaient déchargées et immédiatement déposées en une seule opération à leur position définitive. Cette technique est un autre facteur ayant influencé l'échéancier des travaux.

#### ESSAIS

Il est certain que lors de la préparation d'un tel projet, le concepteur est obligé d'utiliser des marges de sécurité plus grandes pour tenir compte de certaines hypothèses pessimistes. La conséquence peut être une enflure sensible des coûts de l'ouvrage. C'est pourquoi, le ministère des Transports du Québec a autorisé la réalisation d'un programme de recherche à Mont St-Pierre.

Pour vérifier les hypothèses de conception on a réalisé le programme suivant:

1- *Variation des niveaux d'eau:* Des piezomètres à réponse rapide de type pneumatique *glotzl* ont été installés au niveau de la fondation, soit sous l'élévation 0.0, à des distances de 0,3, 1,0, 1,8, 3,7, 7,3 et 14,6 mètres du mur, sur une des deux sections transversales instrumentées. Ces piezomètres nous indiqueront les variations de niveau d'eau à l'intérieur du massif en fonction des marées.

2- *Modification de l'état de contraintes sous l'action de la houle:* Sous l'action de la houle il pourrait se produire, des inversions d'efforts dans les armatures, conduisant à des bris par fatigue. Pour vérifier cette hypothèse nous avons installé des jauges de déformation sur les barres d'armature tout près des amorces. Deux nappes de

tirants (12) sont ainsi instrumentées à l'aide de 48 jauges.

3- *Déformations du mur suite aux efforts:* 7 repères ont été installés sur le déflecteur et combinés à des cibles de bronze au niveau de la grève. Par des observations régulières on vérifiera les déformations éventuelles du mur.

4- *Résistance des barres en traction:* Le but de cet essai est de vérifier la friction effective le long d'une barre d'armature en regard de l'état des contraintes à différentes profondeurs dans le massif. On se propose donc d'effectuer 3 essais de traction sur des barres placées à cet effet dans le massif.

5- *Etude de la corrosion des barres d'armature:* Vingt-quatre éprouvettes, fabriquées avec les armatures du projet, ont été placées dans le remblai. Tous les deux ans, on retirera deux éprouvettes pour analyse.

6- *Etude de la pénétration du gel:* Afin d'évaluer la pénétration du gel, nous avons installé dans le massif 48 thermocouples. Les résultats nous permettront de vérifier l'influence de la marée sur ce facteur.

#### CONCLUSION

Le Québec possède 2,500 km de côtes influencées par la marée. En général nous évitons de construire dans la zone de marnage. Cependant nous devons parfois protéger certains ouvrages contre l'action de la houle.

La construction du mur de Mont St-Pierre vient d'ajouter la terre armée aux alternatives classiques. La conception de 2 nouveaux éléments a contribué au succès de cette réalisation: le déflecteur chasse-mer a réduit d'une façon spectaculaire la hauteur du mur et les écailles auto-stables ont permis une grande rapidité de mise en oeuvre et l'élimination des bardeaux.

#### BIBLIOGRAPHIE

- (1) Boivin Richard, Protection contre la mer de la route 6. LHL-548 Février 72.
- (2) U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, 1973.
- (3) Boivin Richard, Détermination des cotes d'arase des ouvrages. LHL-665 Avril 76.
- (4) Boivin Richard et Galiana G. Mur littoral de Rimouski LHL-636, 1975.
- (5) Laboratoire central des Ponts et Chaussées, La Terre Armée. Note d'information technique, Avril 1973.