
RECHARGEMENT DES BARRES DU LITTORAL UNE MÉTHODE DE PROTECTION DES PLAGES

B. B. Karakiewicz, W. Romanczyk, X. Yang, J.L. Bona et A. L. Mercier
Université du Québec, ISMER, Rimouski, Québec, Canada.
University of Texas, Department of Applied Mathematics, Austin, Texas, USA.
Almerco inc., Gatineau, Québec, Canada.

Madame Barbara Boczar-Karakiewicz est professeur-chercheur en océanographie physique à l'INRS-Océanologie à Rimouski. De 1957 à 1975, elle a complété des études universitaires à l'École Polytechnique puis à l'Institut d'hydrotechnique de l'Académie des sciences à Gdansk, en Pologne. Il est intéressant de mentionner qu'elle parle français, anglais, allemand, polonais et russe.

Depuis 35 ans, madame Karakiewicz poursuit des recherches sur les processus d'interaction des vagues avec les fonds sableux des littoraux et des plates-formes continentales. Ses travaux de recherche sont consacrés à la modélisation mathématique et numérique. Ces modèles originaux décrivent, expliquent et quantifient la formation et la dynamique des barres littorales et des rides à grande échelle des plates-formes continentales. La présente recherche a nécessité des collaborations de niveaux national et international, avec des agences gouvernementales, des industries et des universités (Canada, USA, Angleterre, Allemagne, Pologne, France et Australie). Les résultats de la modélisation ont été appliqués dans le cadre de projets de protection des littoraux sableux en Allemagne et en Australie. Actuellement, Madame Karakiewicz dirige un projet pour le Conseil National de Recherche du Canada dans le cadre d'un programme université-industrie, en collaboration avec l'Université du Texas (USA) et en partenariat industriel avec Almerco Inc. (Canada). Madame Karakiewicz participe à la formation des étudiants en maîtrise et en doctorat. Elle collabore également avec les stagiaires en études postdoctorales.

RÉSUMÉ

Nous proposons une méthode de protection des plages par la restauration de l'équilibre dynamique d'un système côtier dominé par les vagues et caractérisé par la présence de barres sableuses. Pour un site choisi, à partir de données de terrain (vagues et bathymétrie du fond marin) nos modèles mathématiques et numériques fournissent les résultats décrivant les effets des interactions fond-vagues. L'analyse de ces résultats permet de définir les recommandations de rechargement des barres d'avant-côtes pour la protection des plages. La quantité de sédiment placée sur les barres doit équilibrer le déficit qui occasionne l'érosion des plages. Grâce au transport du sable par les vagues elles-mêmes, une partie du sédiment du rechargement est déposée sur la plage visible. Les barres rechargées forment également des brise-lames sous-marins qui protègent la côte avoisinante. La méthode proposée utilise les forces de l'environnement marin pour la restauration de son équilibre dynamique. L'inconvénient de cette méthode - la nécessité des rechargements périodiques du site en question (tous les 4-6 ans). L'application de rechargement de barres en Australie (1990) a démontré l'efficacité de notre méthode de protection. En 1998, le gouvernement de la Tunisie a accepté, après un concours international, la réalisation des projets de protection des plages tunisiennes les plus prestigieuses, par la méthode de rechargement proposé par notre équipe.

INTRODUCTION

Nous proposons une méthode de protection des plages par la restauration de l'équilibre dynamique d'un système côtier dominé par les vagues et caractérisé par la présence de barres sableuses. Pour un site choisi, à partir de données de terrain (vagues et bathymétrie du fond marin), nos modèles mathématiques

et numériques fournissent les résultats décrivant les effets des interactions fond-vagues. L'analyse de ces résultats permet de définir des recommandations de rechargement des barres d'avant-côte pour la protection des plages.

LES BASES DU MODÈLE MATHÉMATIQUE

Le modèle mathématique de formation des barres d'avant-côte se décompose en quatre modules qui décrivent successivement :

- la propagation des vagues de surface;
- l'hydrodynamique de la couche limite du fond;
- le transport des sédiments dus aux vagues;
- la déformation du fond sableux.

La partie essentielle du modèle, c'est-à-dire la description de la propagation des vagues de surface, est basée sur la théorie de vagues non linéaires de Boussinesq (Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1995).

Le modèle numérique, dont un schéma est présenté en figure 1, est initialisé par les paramètres des vagues incidentes et par un fond moyen ou par une pente moyenne du fond de la zone côtière.

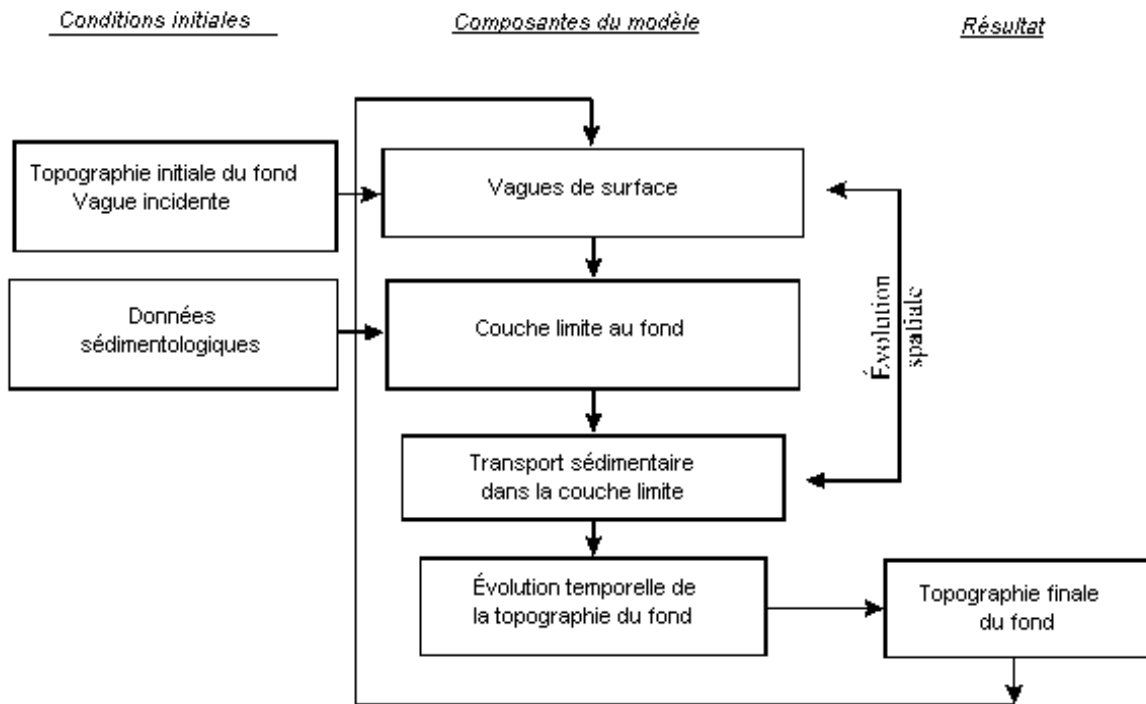


Figure 1. Schéma du modèle numérique.

Les résultats de la modélisation sont présentés à la figure 2.

À partir d'un fond initialement uniforme, le modèle simule, en deux dimensions spatiales (distance horizontale perpendiculaire à la plage et profondeur), l'évolution temporelle de ce fond vers un système de barres d'avant-côte. La topographie du fond se transforme, en réponse à l'évolution temporelle et spatiale des vagues de surface.

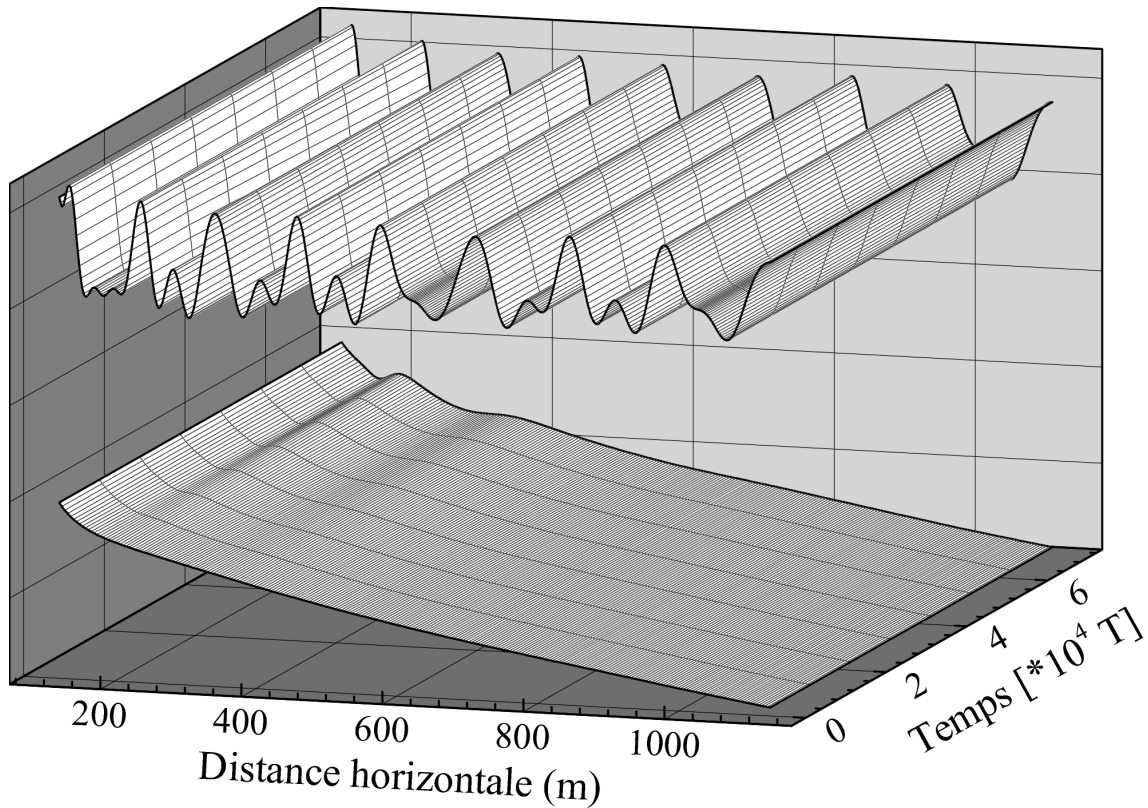


Figure 2. Formation d'un système de barres sous l'action des vagues de surface.

LA FORMATION ET LA STABILITÉ DES BARRES D'AVANT-CÔTE

Les résultats de la modélisation mathématique et numérique (figure 2) et les vérifications de ces résultats avec les mesures de terrain (effectuées sur 15 sites différents, Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1995) ont démontré que :

- la formation des barres est universelle dans les zones côtières sableuses caractérisées par les pentes moyennes à faibles (qui ne dépassent pas la valeur de 2-3 %) et où l'apport de sédiments est abondant;
- les paramètres des barres (leur nombre, la distance qui les sépare et leur distribution spatiale dans la zone côtière) sont déterminés par les paramètres des vagues incidentes et par la pente moyenne de la zone côtière (figure 3);

- la dynamique des systèmes de barres est contrôlée par la variabilité des conditions hydrodynamiques, spécifiques à chaque site considéré, en fonction du climat local, des vagues, des marées et des surcots.

Les conclusions de la modélisation mathématique et les vérifications expérimentales ont permis de prédire la dynamique des systèmes de barres d'avant-côte déterminée par les conditions climatiques locales, comme illustré à la figure 4, pour un site particulier choisi (Gold Coast. Australie, voir Boczar-Karakiewicz et Jackson, 1991, Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1997).

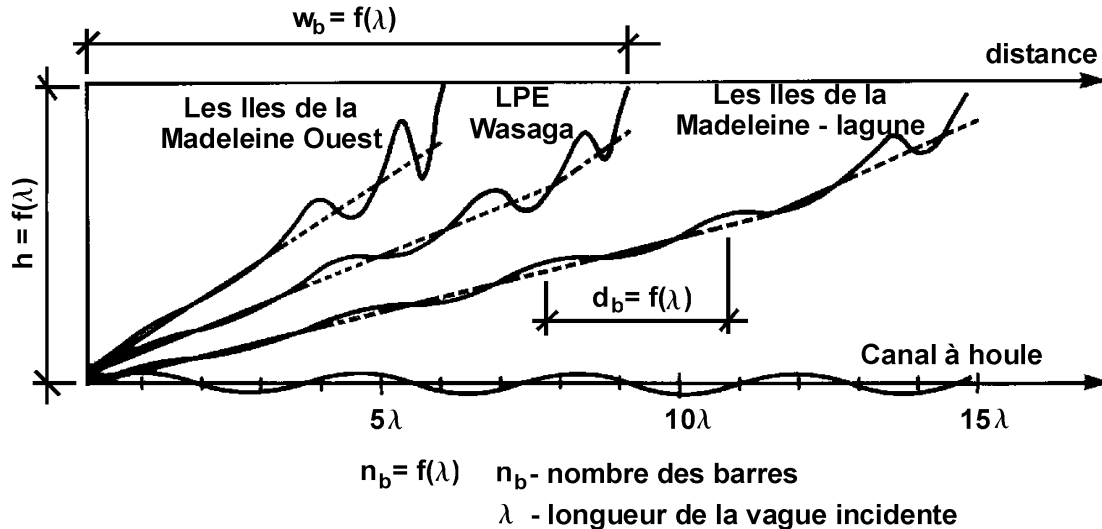


Figure 3. Distribution spatiale et nombre de barres dans un système en fonction de la pente moyenne du fond de la zone côtière.

LES BARRES SABLEUSES ET LA PROTECTION DES PLAGES

L'érosion des plages occasionnée par différentes causes (changements climatiques, développements urbain et balnéaire, construction de ports, urbanisation des dunes côtières, etc.) résulte du déficit de sédiments dans les zones côtières. Ce déficit peut être équilibré par le rechargement. Par opposition aux rechargements de la plage visible, nous proposons le rechargement de la partie sous-marine de la zone côtière.

Les résultats de la modélisation effectuée pour le site de Gold Coast en Australie, illustrée aux figures 4 et 5, ont conduit à recommander de placer une certaine quantité de sédiments sur la barre d'avant-côte existante.

Les mesures de terrain effectuées quelques mois après l'opération de rechargement ont démontré que, grâce au transport de sable par les vagues elles-mêmes, une partie des sédiments du rechargement a été déposée sur la plage visible.

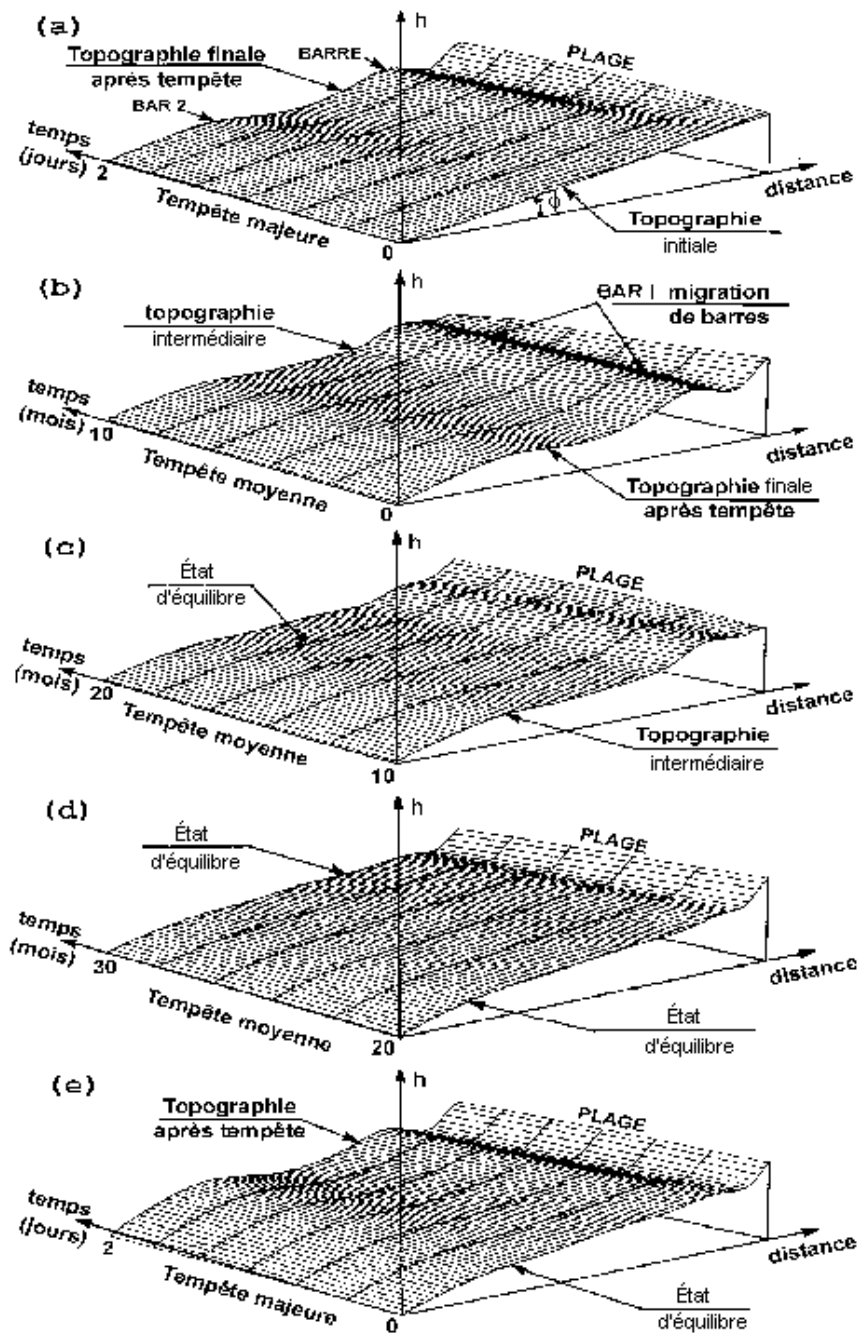


Figure 4. Dynamique des barres sous l'action des vagues pendant une période de 18 mois (comportant deux tempêtes majeures séparées par 10 mois de tempêtes modérées) : (a) formation du système des barres sous l'action d'une tempête majeure (b) formation d'une topographie d'équilibre sous l'action des tempêtes modérées (c) reformation des barres sous l'effet de la tempête majeure récurrente.

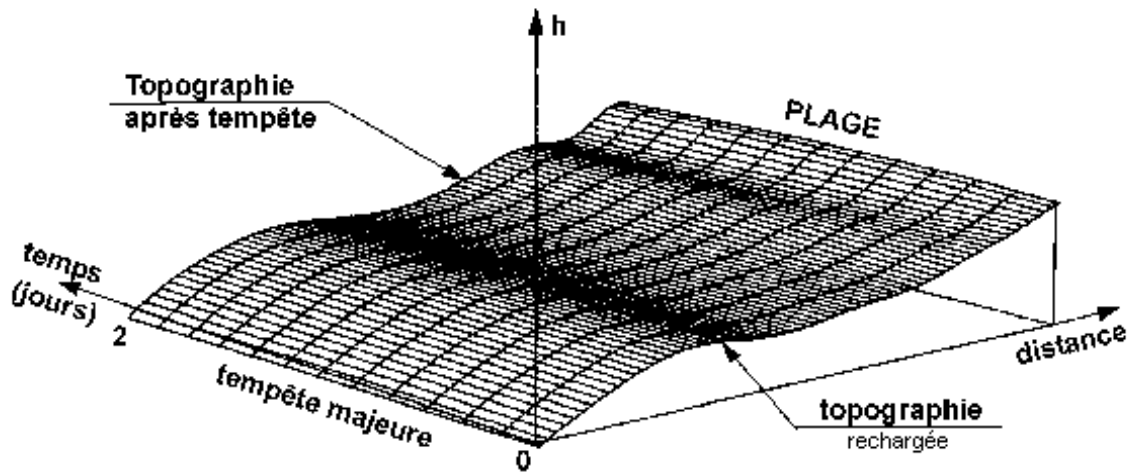


Figure 5. Localisation des sédiments pour le rechargement de la barre côtière à Gold Coast (Australie).

La barre rechargée a formé également des brise-lames sous-marins qui protègent la côte avoisinante pendant les tempêtes majeures.

La méthode de protection des plages par le rechargement des barres d'avant-côte utilise les forces de l'environnement marin pour la restauration de son équilibre dynamique. L'inconvénient de cette méthode, comme de toutes les méthodes de rechargement, consiste en la nécessité de rechargements périodiques du site en question (tous les 4-6 ans).

L'application du rechargement de barres en Australie (1990) a démontré l'efficacité d'une telle méthode de protection (Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1995 et 1997). En 1998, le gouvernement de Tunisie a accepté, après un concours international, la réalisation des projets de protection des plages tunisiennes les plus prestigieuses, avec la méthode de rechargement proposée par notre équipe.

Actuellement, nous sommes en négociations avec le gouvernement marocain et avec la Banque Mondiale pour la réalisation du rechargement des plages de Tanger et d'Agadir (Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1995 et 1997). Sur ces sites, les protections antérieures : épis et brise-lames, n'ont pas apporté les résultats escomptés (Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1995 et 1997).

REMERCIEMENTS

La recherche présentée a été subventionnée par le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada à travers un projet de collaboration entre l'Université et l'Industrie réalisé en partenariat avec Almerco Inc. et l'Université du Texas.

BIBLIOGRAPHIE

- BOCZAR-KARAKIEWICZ, B., D.L. FORBES AND G. DRAPEAU. 1995. *Nearshore bar development in the Southern Gulf of St. Lawrence*. *J. Waterways, Port, Coast. & Ocean Eng.*, ASCE, 129 : 49-60.
- BOCZAR-KARAKIEWICZ, B. & L.A. JACKSON. 1990. *The analysis and role of bars on the protection of a beach system, Gold Coast, Queensland, Australia*. *Proc. 22th Int. Conf. Coast. Eng.*, Delft, The Netherlands : 2265-2278.
- BOCZAR-KARAKIEWICZ, B., W. ROMANCZYK & J.L. BONA. 1997. *Sand bar dynamics and offshore beach nourishment*. *Proc. Int. Conf. 'Coastal Dynamics '97*, Plymouth, UK : 873-882.
- LONG, B., L. BENCHEIKH, B. BOCZAR-KARAKIEWICZ, A. MERZOUK & W. ROMANCZYK. 1999. *Réhabilitation de plage de Tanger par rechargement du haut de plage, entre Gandori et le port*. *Can. Coast. Conf.*, Victoria, BC, Canada (compte rendu sous presse).

PÉRIODE DE QUESTIONS

Question Bonjour Mme Karakiewicz...
Je me pose une question à propos du rechargement de la barre. Est-ce que le sable sur la barre doit être mobile ou s'il est possible de penser qu'on puisse durcir la barre, je ne sais de quelle façon, pour la rendre solide, pour qu'elle reste en place ; ou bien est-ce que le sable doit demeurer mobile pour aller nourrir la plage en sable, si cette plage est trop basse?

B. K. Si j'ai bien compris votre question, vous voulez savoir si on peut construire une barre qui est rigide ? Ça dépend. Ce dont on parle ici ne peut servir de recette générale. Chaque site est très spécifique. Donc, la réponse à votre question est la suivante : si le système de barres sur le site choisi est stable, on peut construire une barre relativement stable. Mais si les barres, comme sur la côte est d'Australie, sont très dynamiques, on peut faire plus de mal que de bien avec une barre stable. Dans ces cas-là, il faut rajouter du sable, de manière à permettre au système de réagir. Ce que je n'ai pas dit et qui est important, c'est qu'il faut qu'il y ait une zone de dunes disponible, car la barre que l'on construit est un réservoir de sable sous-marin. Maintenant, une partie de ces sédiments va se déplacer vers la plage, va rester sur la plage, alors qu'une autre partie sera encore érodée. Il ne faut donc pas construire très proche, il faut s'éloigner de la plage et prévoir une zone où il y aura des échanges dynamiques. Donc, en principe, il faut éviter les barres stables, sauf si la zone est extrêmement stable. On pourrait même penser à une barre faite de sacs de sable.

Je vais vous donner un exemple. En Tunisie, l'an dernier, on a construit ce genre de brise-lame, sous-marin ou légèrement visible, et la côte a érodé. C'est toujours à long terme, après 10 ou 15 ans, que le désastre apparaît. Maintenant, les Tunisiens sont obligés d'enlever ces brise-lames et c'est encore plus coûteux que de les mettre en place. Donc, je pense qu'on doit utiliser les méthodes les plus douces possible, parce que si on voit qu'on a brisé l'équilibre du processus naturel, on pourra corriger la situation à moindre frais.

Question *A priori*, c'est intéressant, ce que j'appelle les « nutri-barres » pour les plages, c'est très bon. J'ai cependant deux questions. La première concerne les coûts. C'est inévitable dans les choix technologiques. Quand on parle d'un dragage en milieu hydraulique, ça se situe entre 20 \$ et 30 \$ par mètre cube, ici au Canada.

B. K. Non, non, 10 \$.

Question Non, je ne pense pas. Madame Verreault ne fait plus ça depuis longtemps, 10 \$ du mètre cube, surtout que c'est un dragage hydraulique, ce n'est pas fait avec des clams. Combien a coûté l'expérience en Australie, par mètre cube ?

Ma deuxième question, parce que le client nous le demande souvent ; seriez-vous prête à garantir votre travail ? Si oui, on vous engage.

B. K. La réponse à la première question.

Question En dollars US s'il vous plaît.

B. K. Oui, c'est une question importante, qu'on pose toujours. Les coûts sont aussi spécifiques à chaque site, parce que ça dépend où vous pouvez trouver votre sable. En Australie, ils en ont prélevé une partie au large et une partie dans la rivière. Donc, c'était 10 \$ du mètre cube, c'était moins cher que ce que vous dites. Aux États-Unis aussi. Même en Australie, c'était 10 \$ australiens, ce qui est beaucoup plus bas. C'est environ comme le dollar canadien. C'est pas US. Aux États-Unis, c'est 10 \$. Ils ont évalué ça en Californie, par mètre cube, mais ça dépend.

Question Mais ça dépend du nombre de contracteurs qui font ce travail. Ici, il y en a seulement deux. Vous n'aurez pas ça à 10 \$ ici, mais quand même, à 20 \$ ce n'est déjà pas si mal.

B. K. Mais dans certains endroits, ils sont tellement désespérés, par exemple au Maroc, de ne pas avoir de source de sable, qu'ils sont prêts à utiliser la roche pour en faire du sable. Donc, vous savez, les coûts, c'est toujours relatif. C'est très très cher, mais le coût relié à la perte d'une plage est souvent plus élevé que le coût exigé pour y amener du sable.

Et maintenant votre deuxième question. Est-ce que je peux garantir ? Non, personne ne peut garantir. Tous les rechargements de plages visibles, car on a beaucoup d'expériences de rechargements visibles et relativement peu de rechargements au large, démontrent que la première année, les pertes de sable sont énormes. Mais si on répète régulièrement le rechargement, les pertes sont de moins en moins grandes et ça devient de plus en plus rentable.

Donc, la manière dont le conseil municipal est arrivé à couvrir les coûts, c'est en taxant les propriétaires des hôtels et les touristes. On paye une taxe supplémentaire. Cela leur apporte un revenu supplémentaire pour régulièrement recharger les plages. C'est donc, je pense, uniquement une question de gestion. En Australie, ils sont peut-être très vulnérables. Huit cents kilomètres plus au nord, il y a eu un cas où la gestion du littoral a causé la perte d'une plage. Donc, on a complètement perdu deux ou trois kilomètres de plage très touristiques, qui sont restés sur un lit de roches brunes (bed rock) très dur et très laid. Donc, je ne sais pas si on peut parler du coût de cette perte. À cause de cela, le coût est très relatif. Mais je ne peux pas garantir que ça va marcher à cent pour cent. Par ailleurs, les murs de protection, les pierres, les épis... Est-ce que quelqu'un a garanti ... ? Oui, il y a 15 ans peut-être, mais maintenant après 15 ans, on voit que ça n'a pas marché.