



Vers une approche « High Tech » du littoral

Jean-Michel Tanguy

Chef de la Division Recherche, Informatique et Modélisation. Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables. Compiègne

Résumé

L'approche traditionnelle utilisée par les ingénieurs pour traiter les problèmes littoraux comprend un certain nombre d'étapes bien identifiées. La recherche de solutions peut être approchée par des études sur plans, des essais sur modèles physiques ou encore des calculs avec des modèles numériques. Les progrès réalisés récemment dans un certain nombre de disciplines scientifiques et de technologies, notamment l'informatique, la physique et les méthodes de résolution rendent maintenant possible l'utilisation de modèles numériques sur le littoral. Au travers de deux études qui ont été conduites dans le cadre de projets européens, il est montré que leur utilisation devrait s'intensifier et devenir courante dans la prochaine décennie.

1. Approche traditionnelle des problèmes littoraux

La démarche traditionnelle utilisée par les ingénieurs emprunte trois étapes principales. B. BELLESSORT en donne une bonne description dans [1], que nous reprenons ici globalement.

1. Identification du problème et rassemblement des données existantes sur les houles, les courants, le transport de sédiments, les évolutions des fonds. Les études en nature vont permettre de compléter ces informations souvent partielles et peu corrélées : origine des sédiments, sens et direction du transport solide, évolution des flèches littorales, triage granulométrique et minéralogique, études par traceurs.

2. Si le problème le nécessite, établissement d'un diagnostic, qui va résulter d'une analyse quantitative et d'une synthèse des données.

L'analyse quantitative consiste à recourir à un mélange de règles empiriques, de connaissances théoriques, compilées dans un certain nombre de documents qui servent de référence [3], [5], [6], [7], [8], [9] et d'études pratiques, afin de comprendre les causes du phénomène.

A partir de ces documents, l'ingénieur utilise une méthodologie basée en premier lieu sur la compréhension des processus physiques, puis sur l'analogie, en se référant à des configurations schématiques ou si possible en recherchant dans la littérature un ou plusieurs cas se rapprochant du problème qu'il doit résoudre. Le fait de trouver un cas semblable au sien va lui permettre plus tard de vérifier que le comportement du milieu est bien appréhendé. Il va aussi avoir recours à des formulations empiriques ou théoriques, dont les domaines d'utilisation recouvrent son cas, qu'il ajustera en fonction des données disponibles.

Cette approche présente le gros avantage d'une mise en oeuvre rapide pour l'obtention de résultats qualitatifs et l'approche de comportements globaux. Elle présente néanmoins quelques inconvénients:

- elle peut cantonner l'ingénieur dans une approche par trop généraliste et même sommaire,
- elle est très vite limitée et nécessite d'être complétée par des expérimentations sur modèle physique ou sur modèle numérique et éventuellement par des avis d'experts,
- elle ne permet pas de prendre en compte toutes les spécificités du site, les divers processus physiques qui se développent et interagissent les uns sur les autres,
- les éléments quantitatifs les plus fiables ne peuvent résulter que de l'exploitation des mesures et observations faites *in situ*. L'extrapolation à une situation fortement modifiée peut-être très hasardeuse,
- certaines règles empiriques résultent quelquefois de travaux réalisés sur le continent nord américain par les américains eux-mêmes. Leur application en l'état à d'autres sites peut s'avérer non transposable.

3 - Après l'établissement d'un diagnostic, l'ingénieur va rechercher des solutions en ayant recours à des études sur plans qui ne permettent de résoudre que des cas extrêmement schématiques, ou à des modèles physiques et/ou mathématiques utilisés pour étudier la réponse du système, dans le temps et dans l'espace, aux modifications projetées.

A l'issue de toutes ces études, la nature des interventions sur le milieu peut alors être précisément appréhendée. Suit alors le dimensionnement des ouvrages éventuels ainsi que la mise en évidence des impacts du projet à court, moyen et long terme, dans l'environnement immédiat aussi bien qu'à plus grande échelle.

Dans la suite de cet article, nous nous intéresserons tout particulièrement au point 3 ci-dessus, en rappelant en premier lieu et d'une manière très synthétique les domaines d'utilisation des modèles physiques et numériques.

Modèles physiques et modèles numériques

Nous rentrons ici dans une problématique qui a fait et fait encore verser beaucoup d'encre. Sans rentrer dans une analyse détaillée des avantages et des inconvénients de chaque outil, qui est très bien décrite dans [4] et [11], précisons tout de même leurs grands domaines d'utilisation. Il faut en premier lieu signaler qu'aussi bien les modèles physiques que les modèles numériques constituent une représentation simplifiée et approximative de la nature.

Le modèle physique a pendant très longtemps, constitué le seul outil d'analyse et, à ce titre, a bénéficié de la faveur du public par son caractère très didactique.

On peut lui reprocher une emprise d'étude forcément limitée, mais à l'inverse son encombrement qui nécessite des halls de grande superficie. Il a par ailleurs une durée de vie limitée. Il est enfin assez coûteux.

Il s'avère par contre extrêmement précieux pour modéliser, sous réserve de pouvoir respecter un certain nombre de lois de similitude, des processus peu

connus ou caractérisés par des interactions fortes, des évolutions à proximité des ouvrages.

Il profite des récents progrès de la métrologie, qui permet d'ausculter d'une manière très fine les processus physiques et de reproduire en cuve des processus extrêmement complexes.

Le modèle numérique est apparu assez récemment. Il convient en premier lieu de distinguer le modèle mathématique, qui permet d'obtenir des solutions aux équations très simplifiées des processus physiques, du modèle numérique, qui permet de résoudre d'une manière approximative des équations beaucoup plus complètes par des techniques qui s'améliorent de jour en jour. Nous ne traiterons que de modélisation numérique dans cet article.

Le postulat à la base du modèle mathématique est qu'il ne peut résoudre que les équations pour lesquelles il a été conçu, qui correspondent donc par essence à des processus physiques bien connus. Traitant souvent un processus à la fois, il est limité par les interactions qui peuvent exister entre les processus.

Il excelle pour l'étude de problèmes sur de très grandes échelles (mer, partie d'océan), ainsi que pour des problèmes assez bien maîtrisés tels que l'hydraulique. Il est extrêmement pratique pour étudier des variantes dans des temps courts. Il est pérenne et peut être mis en oeuvre avec des coûts relativement faibles, une fois amortis les coûts de conception.

Nous dissèrerons ici sur ce dernier type d'outil qui est souvent décrié, mais est d'ores et déjà d'une utilisation qui ne cesse de croître.

2. Vers une approche « High-Tech » du littoral

Le principe général que nous allons développer ici est basé sur l'utilisation à grand rendement des modèles numériques. Ces dernières années ont vu un développement sans pareil de ces outils, rendu possible par l'essor de plusieurs disciplines scientifiques et technologiques.

- **l'informatique** tout d'abord, avec l'accroissement des mémoires centrales (on peut résoudre aisément des systèmes à 20000 points soit environ 50000 degrés de liberté avec des temps de calcul de quelques minutes sur station de travail), des capacités de stockage sur disques toujours plus importantes (pour une étude hydraulique le stockage atteint couramment plusieurs centaines de mega-octets), de la rapidité des processeurs, le passage aux architectures 32 puis 64 bits, l'apparition de machines parallèles (massivement pour certaines), qui traitent plusieurs informations simultanément.

- les **réseaux de communication**, tel qu'INTERNET, rendent possible la communication, l'échange des données et des programmes qui circulent maintenant sans frontières. Ces réseaux donnent aussi accès à des serveurs de calcul lourds. Il n'est donc plus nécessaire de disposer de telles ressources sur son poste de travail.

- le développement de **capacités graphiques** des ordinateurs qui rendent plus conviviale la présentation des résultats de calcul sous forme de courbes ou de surfaces colorées (isocouleurs), leur animation, dans le temps et dans l'espace, en 2 ou 3 dimensions, au sein de véritables modèles que l'on peut ausculter à loisir de

l'intérieur ou de l'extérieur. Le monde du Multimedia ouvre à la communication visuelle et auditive. La réalité virtuelle n'est pas loin de nous ouvrir ses possibilités de « vivre » la simulation numérique. De nouveaux métiers émergent pour transformer les anciennes séries de chiffres en paysages artistiques.

- l'amélioration de la connaissance des *processus physiques*, rendue possible grâce aux expérimentations sur modèles physiques de laboratoire, supportées par des mesures toujours plus précises. La métrologie a fait de sérieux progrès, par l'utilisation intensive du laser, de sondes radioactives ou acoustiques. Des appareils récents permettent de générer des processus complexes se rapprochant sans cesse de la nature (batteurs serpents pour produire des houles aléatoires multidirectionnelles)

- le développement de la *modélisation numérique*, avec l'apparition de nouvelles techniques de discrétisation, plus efficaces, plus rapides, mieux appliquées à des géométries complexes (méthode des éléments finis notamment), moins gourmandes en espaces de stockage et de méthodes de résolution précises.

La modélisation numérique bénéficie en fait des évolutions que subissent toutes ces disciplines, car elle y puise son savoir-faire et bénéficient des progrès qu'elles génèrent.

L'ensemble des recherches menées dans ces champs d'activité nécessite de mettre en place des programmes ambitieux, puis de thésauriser les connaissances afin de concevoir et mettre au point des outils de modélisation industriels utilisables dans le domaine de l'ingénierie maritime.

Cette démarche est très onéreuse. L'Union Européenne, consciente de la nécessité d'inciter les recherches dans ces domaines, a lancé plusieurs programmes de R&D qui limitent la collaboration au stade précompétitif et facilitent le rassemblement d'organismes très divers par leur statut (ministères, laboratoires parapublics et sociétés privées), par leur taille ou par leur implantation géographique sur l'ensemble de l'Europe.

Dans le domaine plus spécifiquement maritime, les programmes Marine Science and Technology (MAST) ont débuté en 1989 et se poursuivent par le troisième appel d'offres lancé au printemps de 1995.

Nous allons présenter ci-après le résultat de certaines recherches conduites par le STCPMVN depuis le début de ce programme et montrer tout l'intérêt de ce genre de collaboration pour une petite structure qui a commencé à s'impliquer dans la R&D depuis maintenant une dizaine d'années. Au début du programme, le STCPMVN ne disposait que d'un modèle de courant bidimensionnel et d'un modèle de réfraction de la houle. Le programme MAST lui aura donné l'opportunité d'un véritable saut technologique, favorisant la conception et surtout la mise en oeuvre d'une batterie de codes numériques intégrés dans un système cohérent de morphodynamique littorale.

Ce système comprend:

- **VAG** : un modèle de réfraction de la houle,
- **CURVI** : un modèle parabolique de réfraction-diffraction modérée de la houle, basé sur la résolution de l'équation de Rader par la méthode des différences finies en coordonnées curvilignes,
- **REFONDE**: un modèle elliptique de réfraction-diffraction-réflexion de la houle en eau peu profonde, basé sur la résolution de l'équation de Berkhoff par la méthode des éléments finis,
- **REFLUX**: un modèle de courantologie, qui résout l'équation de Saint-Venant par la méthode des éléments finis,
- **SISYPHE**: un modèle de transport de sédiments non-cohésifs, par charriage ou par transport total, avec évolution de fonds, qui résout l'équation de continuité des fonds par la méthode des éléments finis.

Dans le cadre de ce projet, la contribution du STCPMVN, qui oeuvre plus particulièrement dans le domaine de la modélisation numérique en collaboration avec l'Université de Technologie de Compiègne (Groupe d'Hydraulique Numérique), s'est faite sur le thème de la modélisation morphodynamique en plan, au travers de deux études de cas: l'évolution d'un chenal reliant un lagon à l'océan et l'évolution des fonds autour d'un brise-lames.

2.1. Evolution d'une barre littorale au Ghana

Le problème à résoudre était de simuler le comportement morphologique de l'embouchure d'un chenal reliant un lagon à la mer. Le groupe de travail était composé de Delft Hydraulics, Danish Hydraulic Institute, HR Wellingford et du STCPMVN. Le groupe a choisi un cas réel qui s'est posé à la ville de Keta au Ghana, implantée sur une barre littorale. La ville est inondée, durant la saison des pluies par le gonflement des eaux des lagons et au printemps par les fortes marées. Pour remédier à cette situation et à la demande du gouvernement du Ghana, Delft Hydraulics a réalisé un modèle réduit en 1982 en simulant l'ouverture d'un chenal perpendiculaire à la barre littorale. C'est sur cette base qu'ont été effectuées les simulations numériques.

Le domaine étudié correspond, en nature, à un rectangle long de 1500 m sur 1100 m. La houle est régulière, d'une amplitude de 1.96 m, de 8 s de période et inclinée de 15° par rapport au trait de côte. L'amplitude de la marée est de 0.98 m. Le diamètre moyen du sable constituant les fonds est de 0.54 mm. La durée du test est de 18 cycles de marée, soit approximativement de 45 h sur modèle physique.

Le STCPMVN utilisa pour reproduire la houle le modèle VAG côté mer, associé à un modèle de diffraction pure (épure de Wiegel) côté lagon, ce qui a permis de simuler l'effet de levée du plan d'eau. Le champ de courant de marée et de courant de houle, fut reproduit à l'aide du code REFLUX. Le transport littoral fut simulé avec le code SISYPHE. Le couplage fut des plus rustiques, sans autre stratégie qu'une boucle houle/courant/sédiment/évolution des fonds. Les résultats furent étonnamment bons, comparés d'une part aux résultats fournis par le modèle physique et d'autre part à ceux des autres laboratoires. Les figures 1 et 2 illustrent l'évolution de la bathymétrie du domaine, les figures 3 et 4 la déformation de la

houle causée par la déformation des fonds, et la figure 5 l'évolution du champ de courant à l'entrée de la passe.

La limitation de la simulation à 18 cycles s'explique par l'impossibilité de conduire des évolutions du domaine dans ces parties sèches, c'est-à-dire les parties qui étaient hors d'eau au début de la simulation, donc non maillées. La figure 6 illustre la déformation du profil en travers à l'entrée de la passe, qualitativement bien reproduite par le système morphodynamique.

2.2. Evolution des fonds autour d'un brise-lames.

Forts des résultats encourageants obtenus dans le cas précédent, le groupe « morphodynamique » se donna comme « challenge » le cas de l'évolution des fonds d'une plage autour d'un brise-lames. L'interaction houle/courant étant plus intime et plus complexe à reproduire, des essais ont été conduits dans un premier temps dans le canal à houle de la SOGREAH [2], très finement instrumenté (vélocimétrie laser) en vue d'obtenir des mesures précises et de qualité sur les paramètres de houles (amplitude), de niveaux d'eau et de vitesse (modules et directions).

La première étape a donc consisté à soumettre à la sagacité de chacun ces mesures en vue de leur simulation.

Le STCPMVN a utilisé son modèle d'agitation REFONDE couplé au modèle de courantologie REFLUX pour reproduire les phénomènes mesurés à l'échelle du modèle physique, dont les dimensions utiles sont de 30 m x 30 m. La houle, perpendiculaire au rivage, a une amplitude de 7.5 cm, une période de 1.69 s. Aucun courant de marée n'est généré et le fond du domaine est fixe.

Les résultats (figure 7 et 8) présentent une comparaison entre les champs de courants mesurés et ceux calculés. Ils montrent un bon positionnement du centre de la zone de recirculation ainsi qu'un patron de vitesse globalement similaire, avec par contre, des champs de vitesse qui diffèrent quelque peu en intensité en certains endroits.

La seconde étape a consisté à revenir à un domaine réel de 600 m sur 700 m, représenté sur les figures 9 à 12. Le brise-lames est long de 300 m, large de 20 m, son axe étant situé à une distance de 220 m du trait de côte. La période de houle, d'une amplitude de 2 m, est de 8 s. Le diamètre moyen des sédiments est de 0.25mm.

Pour la simulation, le modèle SISYPHE est couplé aux modèles précédents.

Les principaux résultats sont présentés respectivement sur les figures 9 à 12: le champ de houle initial, le champ de courant initial, les niveaux d'eaux initiaux et la bathymétrie obtenue après 400 h. La comparaison avec les autres laboratoires fait l'objet d'une communication soumise à publication. Globalement, les conclusions sont assez positives.

2.3. Conclusion sur les simulations effectuées.

Les deux simulations réalisées permettent de tirer quelques enseignements:

- les travaux menés en commun par des équipes d'origine et de cultures fort différentes, ont été menés à bien dans une ambiance de franche et amicale collaboration et dans un esprit de saine et stimulante émulation. Ils ont permis de mettre en commun de substantielles ressources financières, aidées en cela par l'Union Européenne. Ils ont consisté à tester et à comparer des modèles, des savoir-faire différents et facilité une meilleure compréhension des possibilités et des limitations des outils utilisés,
- l'identification des processus physiques inconnus ou mal connus doit faire l'objet de recherches complémentaires intensives: transport dans le profil, impact de la gravité, turbulence, etc.,
- les formulations numériques gagneraient à être complétées pour prendre en compte davantage de processus et d'interactions: effets du transport de la turbulence, interactions houle/courants dans les deux sens, etc.,
- la nécessité de conduire des études de sensibilité sur certains paramètres,
- les techniques de résolution et plus particulièrement les schémas numériques doivent faire l'objet de recherches pour accroître leur rapidité en assurant une précision maximale.
- des procédures d'évolution à long terme doivent être mise au point pour utiliser ces modèles dans des cadres opérationnels.

3. Conclusions

Nous avons rappelé l'approche traditionnelle utilisée par les ingénieurs d'études pour traiter les problèmes qui se posent sur le littoral. Cette approche passe par l'identification des problèmes et le rassemblement des données existantes, par la compréhension du milieu et l'établissement d'un diagnostic, pour finir par la recherche de solutions éventuelles. Ces dernières peuvent être approchées au travers d'études sur plans, d'essais sur modèles physiques et de calculs avec des modèles numériques.

L'approche que nous préconisons s'appuie sur une utilisation plus intensive des modèles numériques, qui est rendue possible par l'essor récent de l'informatique sous tous ses aspects: matériels et logiciels, les recherches sur la physique des processus et enfin sur les méthodes de résolution numériques.

A titre d'exemple, nous avons présenté deux études menées en collaboration avec des laboratoires européens, qui montrent, par les résultats encourageants qui ont été produits, que le recours à des batteries de codes homogènes peut être envisagée à plus grande échelle.

Les avantages de ces outils résident dans leur facilité d'utilisation, leur propension à dégrossir des solutions et d'étudier des variantes assez rapidement. Ils permettent aussi de conserver les résultats plus longtemps.

Les perspectives qui s'offrent à ces outils sont vastes. Cependant, avant de devenir des outils banalisés, leur mise en oeuvre va devoir être améliorée, ainsi que la

présentation de leurs résultats, qui utilisera toutes les possibilités technologiques pour les rendre aussi réalistes que possible.

Bien que nous en soyons encore actuellement au stade des premiers balbutiements, le chemin est maintenant tracé pour utiliser à plus grand rendement et à un terme rapproché, des modèles numériques en morphodynamique maritime. C'est dans cette optique que les méthodes d'étude des problèmes littoraux vont revêtir dans un futur très proche, un caractère de « haute technologie ».

Remerciements

Les travaux présentés ont pu être menés à bien grâce au soutien financier de la Commission de la Communauté Européenne, Directoire Général pour la Science, la Recherche et le Développement, par le contrat MAST n°MAS2-CT92-0027, ainsi que grâce aux fonds octroyés par la Direction des Ports et de la Navigation Maritimes du ministère de l'Aménagement du Territoire, des Transports et du Tourisme.

Bibliographie

- [1] BELLESSORT B. « L'ingénieur et les études d'aménagement du littoral. Les moyens d'études: de la nature aux modèles physiques et numériques ». Colloque Défense des côtes ou protection de l'espace littoral, quelles perspectives, Cahier Nantais n°41-42, p205-213
- [2] HAMM L., MORY M., « Coastal morphodynamics G8M: Project2; current hydrodynamics measurements around a detached breakwater in 3D wave basin », avril 1995, 16 p + annexes.
- [3] LALAUT Y., « Fonctionnement et efficacité des ouvrages statiques de protection des littoraux sableux », Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, mai 1992.
- [4] LATTEUX B., « Modélisation numérique et physique en sédimentologie côtière: deux approches finalement assez proches », rapport EDF 42/92.47, 38p
- [5] MANOUJIAN, « Influence d'un ouvrage maritime sur l'évolution du trait d'un littoral sableux », 18ième journées de l'hydraulique, SHF 09/84.
- [6] MIGNIOT C., « Etude de la dynamique sédimentaire marine, fluviale et estuarienne », Thèse de doctorat es-Sciences - Paris Sus, 1982.
- [7] MIGNIOT C., « Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion du littoral », STCPMVN-SOGREAH-LCHF, Tomes 1 et 2.
- [8] MIGNIOT C., « Moyens d'étude des phénomènes estuariens et fluviaux, STCPMVN-SOGREAH-LCHF, 1989, 104p.
- [9] Shore Protection Manual, US Army, Coastal Engineering Research Center, 3 volumes, 1973.
- [10] TANGUY J.M., ZHANG B.N., « Morphological modelling of the evolution of a breach connecting a lagoon to the sea at Keta-Ghana », Waves'94, Vancouver, Canada, 08/94.
- [11] VIGUIER J., « Modèles en hydraulique maritime », Les Techniques de l'Ingénieur C-182, 11/1982.

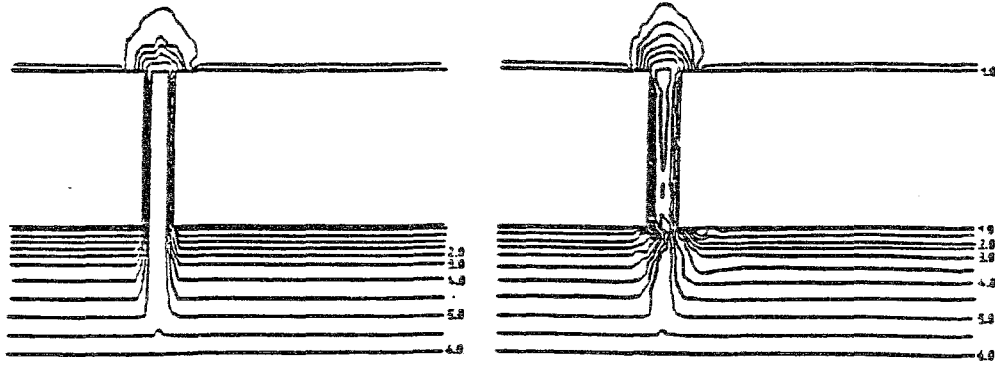


Figure 1 :
Modèle numérique : bathymétrie initiale.

Figure 2 :
Modèle numérique : bathymétrie après 45 h

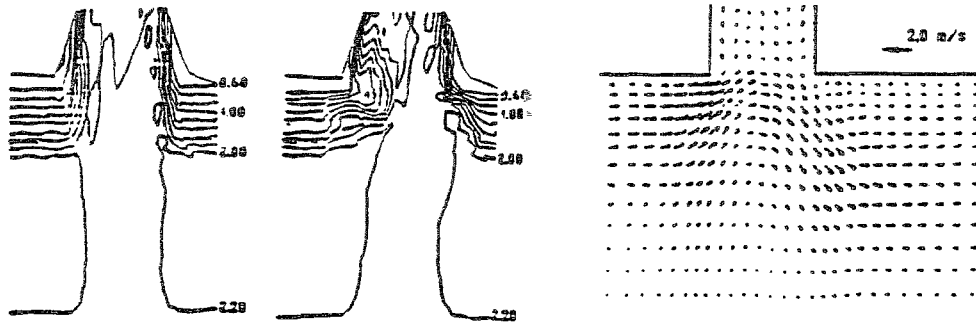


Figure 3 :
Hauteur de houle initiale.

Figure 4 :
Hauteur de houle après 45 h.

Figure 5 :
Champ de vitesse initial.

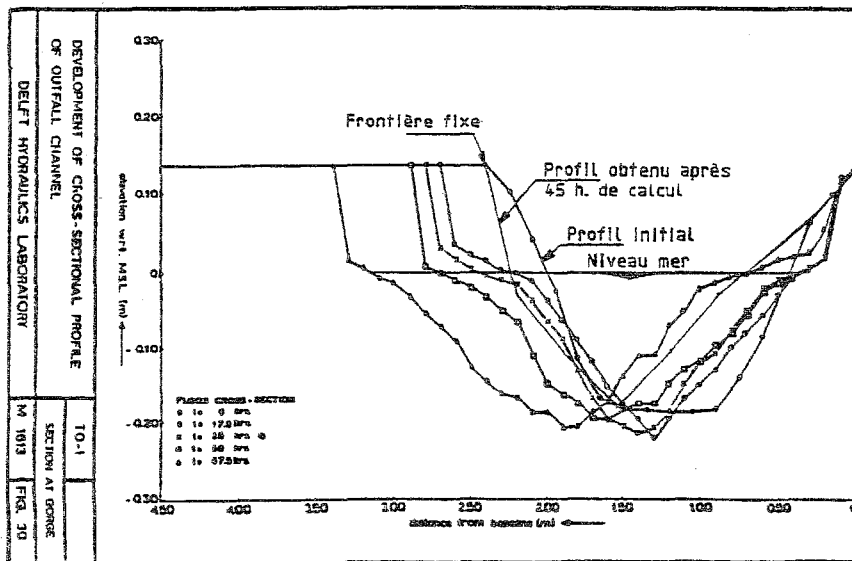


Figure 6 :
Evolution du profil aval du chenal.

- ESSAI EN CANAL -

MESURES

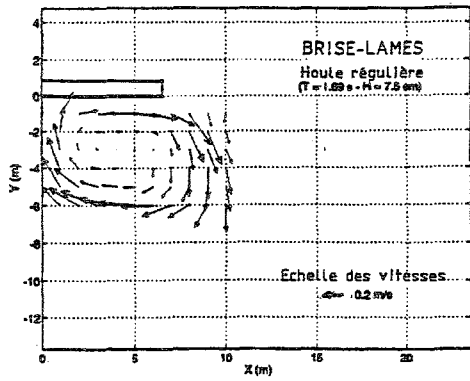


Figure 7

- ESSAI EN CANAL -

RESULTATS NUMERIQUES

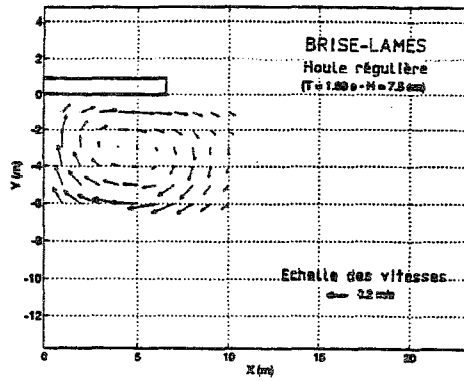


Figure 8

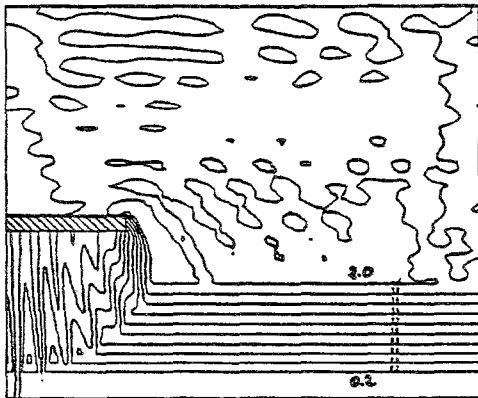


Figure 9 : hauteur de houle initiale.

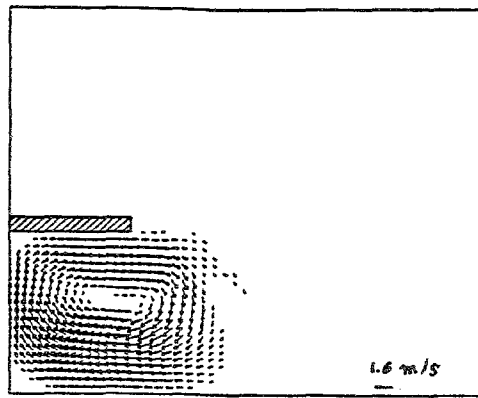


Figure 10 : champ de vitesse initial.

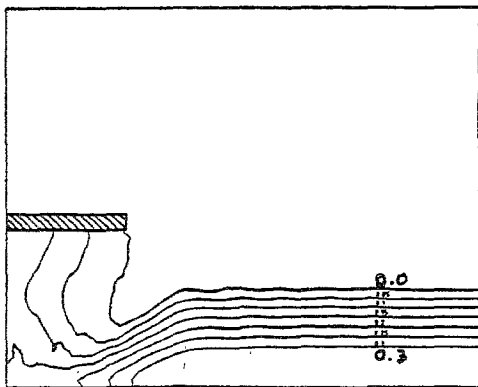


Figure 11 : niveaux d'eau initiaux.

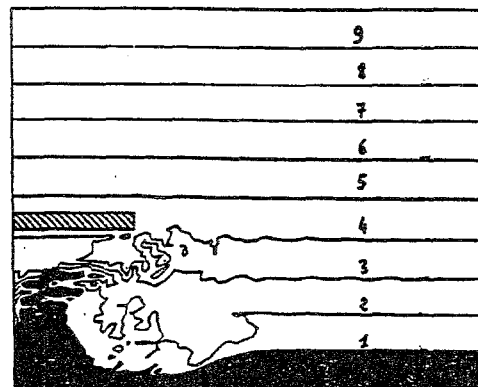


Figure 12 : bathymétrie après 400 heures.