



---

## 1. Introduction

La recherche sur les phénomènes d'érosion prend de plus en plus d'importance dans la communauté scientifique. En effet l'érosion marine concerne la majorité des côtes et est accentuée par la montée des eaux. L'évolution de tels systèmes est due majoritairement aux effets du vent, des vagues, des courants, du niveau de l'eau, du type de sédiments et de l'action humaine. Ces effets combinés peuvent fortement modifier l'environnement considéré. L'ingénierie côtière devient alors nécessaire pour la protection et la stabilisation des zones sensibles concernées, particulièrement les plages sableuses. Il est à noter que les dernières avancées sur les systèmes hydrodynamiques ou sur le transport de sédiments dans le milieu marin ne nous permettent toujours pas de répondre de manière efficace et universelle à des questions cruciales sur l'évolution du trait de côte [4]. En effet, l'étude de l'érosion côtière est complexe car le système considéré présente une variété d'échelles spatio-temporelles et de nombreuses interactions entre ses composants. L'objectif de ce papier, est de présenter une nouvelle approche de modélisation et de simulation de l'évolution côtière basée sur les systèmes multi-agents. Nous préciserons les concepts des modèles one-line pour en déduire la description d'une organisation d'agents pour modéliser le système littoral et simuler le phénomène d'érosion. Une première série d'expériences est menée afin de mettre en avant les avantages potentiels de cette méthode originale en montrant à partir d'un cas déjà étudié [11] que l'on peut obtenir de bons résultats avec un coût moindre et des perspectives d'extensions importantes.

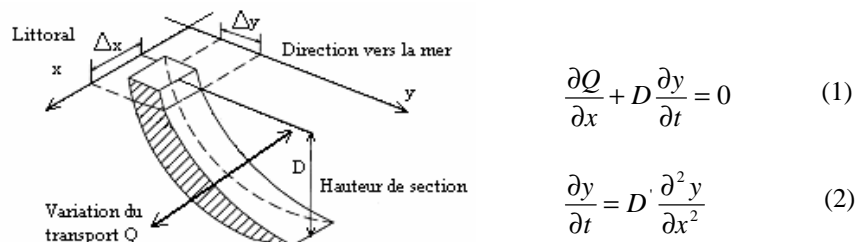
---

## 2. Evolution côtière

Une première étude [5] a permis une approche des problèmes d'érosion et a montré la faisabilité et les avantages d'une démarche de modélisation basée sur les systèmes multi-agents. Nous rappelons les grandes familles de modèles d'évolution côtière : les modèles de profile [9], one-line [6], [11], multi-line [8] et enfin les modèles 3D [13]. Dans la suite, nous allons nous baser sur l'étude des modèles one-line afin de montrer que certaines limites peuvent être contournées avec un modèle multi agents.

### 2.1. La méthode des modèles one-line

Ces modèles s'intéressent au déplacement du trait de côte qui est du aux différences spatiales et temporelles dans le transport longitudinal de sédiments et aux conditions aux bords de la zone étudiée. En s'intéressant au volume  $\Delta V$  perdu ou gagné par la section de la figure 1 et en appliquant le principe de conservation de masse, on obtient l'équation (1) qui régit l'évolution du trait de côte.



**Figure 1.** Section de plage, équation one-line (1) et équation de diffusion (2)

L'équation (1) d'évolution peut être résolue de manière analytique [7] mais pour plus de « réalisme » il faut la résoudre numériquement. Cela permettra d'inclure plus facilement la configuration de la côte, les données sur les vagues ou encore les structures d'aménagement. Un maillage (figure 2.a) est alors utilisé pour calculer à chaque pas de temps les différentes positions  $y_i$  des cellules et les quantités  $Q_i$  transportées. L'équation (2) de type diffusion dont on connaît bien les caractéristiques [3], est utilisée pour justifier de la stabilité de la résolution numérique de (1).

## 2.2. Les limitations des modèles one-line

La précision de la résolution numérique ne garantit pas celle de l'évolution du trait de côte. L'équation d'évolution à résoudre fait l'objet de nombreuses simplifications (suppositions, assimilation à l'équation de diffusion,...). Un autre inconvénient de la résolution numérique est le fait de ne pas pouvoir prendre en compte la chronologie des processus sur le littoral pendant un pas de temps. En effet, les méthodes de résolution, explicite ou implicite [3] utilisent un système d'équations pour obtenir les différents  $(y_i, Q_i)$  itérativement à partir des conditions aux bords. On risque de perdre une certaine précision du fait que les éléments du système évoluent simultanément pendant un pas de temps. La réflexion peut donc se tourner vers un système d'organisation basé sur les règles d'interactions des différents composants du système et non sur les lois (sous forme d'équation) du système. Aussi proposons nous dans cette étude une première approche de modélisation à base d'agents.

---

## 3. Modélisation par simulation à base d'agents

Nous pouvons distinguer deux manières de procéder pour concevoir un modèle d'un système; suivant les éléments eux même ou suivant des caractéristiques de ces mêmes éléments. On parlera alors respectivement de modèle à base de règles et de

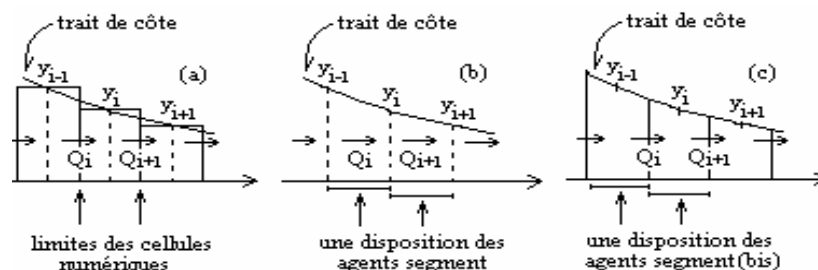
modèles à base de lois. Les systèmes physiques utilisent beaucoup les modèles à base de lois. Ces modèles consistent à considérer certaines caractéristiques des éléments comme des variables et à les étudier en formulant des équations qui décrivent les lois d'évolution du système en entier. Il en résulte des équations généralement continues de type équation différentielle ou équation aux dérivées partielles résolues par des méthodes numériques. On peut prendre l'exemple de l'écoulement de fluides où nous considérerons la hauteur d'eau, la vitesse, etc. Tel est aussi le cas pour nos équations (1) et (2). L'autre approche consiste à considérer le système de par ses éléments et à suivre son évolution suivant les règles qui lient les éléments. Tel est le cas pour les systèmes multi-agents. Des études ont déjà été menées dans ce sens pour des systèmes physiques, [10] dans la modélisation de dynamiques de flux par agents, [12] la modélisation des écosystèmes aquatiques et [1] dans la physique des milieux granulaires. Le but de ce papier est d'utiliser cette même approche pour les systèmes littoraux soumis à l'érosion. Un des grands atouts de la simulation SMA pour ce type de problème est la capacité de se représenter un environnement hétérogène et dynamique mais également de pouvoir faire cohabiter dans ce même environnement « n'importe quel type » (du moins plusieurs types) d'agents avec des comportements différents et des chronologies d'actions différentes. L'élaboration d'une équation pour régir l'ensemble du fonctionnement du système est un problème difficile, mais l'intégration des différents phénomènes (transport de sédiments, vents, courants, vagues...) que l'on peut suivre plus facilement quand ils sont pris séparément peut s'avérer intéressant.

### **3.1. Le système multi-agents**

Le trait de côte se présente comme une interface entre deux systèmes hétérogènes ; le système marin et le système côtier, d'où la nécessité de représenter ce couplage. Nous obtenons deux catégories; les éléments statiques et les éléments dynamiques. Les premiers sont considérés comme des objets (au sens informatique) et les derniers, à priori doué d'autonomie, comme des agents. Concernant les agents, nous avons considéré, pour cette première étude du phénomène de l'érosion, les agents vagues (et/ou courants), les agents boules de sables et les agents segments de trait de côte.

#### **3.1.1. Les agents segments de trait de côte**

Nous proposons la création d'entités virtuelles agents segment, comme pour la résolution numérique. Cette segmentation peut se faire dans notre SMA de manière uniforme, avec des portions de même longueur, ou par catégorie (types de sable, niveau par rapport à la mer...) pour une meilleure approche locale. A chaque pas de temps, l'agent segment pris individuellement se déplace suivant la quantité de transport obtenue



**Figure 2.** (a) schéma numérique, (b) et (c) disposition des agents segment de trait de côte

avec la formule du CERC [2]. Cette quantité nous permet de générer une boule de sable assimilée à un agent. Deux schémas sont proposés (figure 2.b, 2.c). Dans les deux schémas, les agents sont autonomes et ne dépendent pas d'un superviseur. La perception de chaque agent se limite aux deux agents segments voisins et aux agents boule de sables et boule de vagues contigus. Un autre concept important de cette modélisation à base d'agents est ce que nous appelons la « segmentation dynamique » qui sera appliquée tout au long de la simulation. Les agents sont supposés autonomes et adaptatifs, alors ils doivent se calibrer au mieux pour conduire à une solution stable ou convergente. On intervient dans l'organisation pour donner de l'autonomie aux agents afin qu'ils puissent se diviser à nouveau ou fusionner pour donner un seul segment suivant des critères (inclinaison, mémoire de déplacement, inactivité,...). Nous appliquons cette technique par soucis d'optimisation. L'agent dans l'organisation, en fonction du contexte, est capable de détecter un agent segment voisin qui a un même comportement, par exemple le déplacement ou le transport de sédiments, et se fusionner avec pour éviter d'effectuer le même traitement. L'agent peut aussi se segmenter pour parvenir à plus de précision avec deux agents segments plutôt qu'avec un seul. Ce procédé adaptatif permet de disposer d'une forme de « dynamicité » au niveau des agents segments et de suivre l'évolution du trait de côte de façon contextuelle (mêmes propriétés).

### 3.1.2. Les agents boule de vagues et boule de sable

Dans cette étude, nous supposons connus les agents vagues avec leurs caractéristiques à la cassure. A la cassure, une quantité de sable est générée suivant la formule du CERC et il y a création d'agents boules de sable. Ces agents boules de sable se déplacent tout au long du trait de côte et nous permettent de suivre le transport de sédiments pendant la simulation.

### 3.2. Expérimentations et résultats

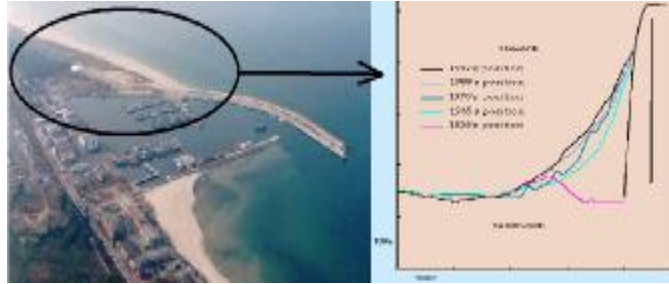


Figure 3. Site d'étude à gauche et différentes positions mesurées

Nous nous sommes basés sur une étude déjà menée autour d'un port (figure 3) en Pologne à Wladyslawowo [11] pour lancer, calibrer et vérifier notre modèle. Les données disponibles sont les conditions météorologiques (surtout les vagues) et les différentes positions du trait de côte pour les années 1936, 1965, 1976, 1988, 1997. La plage étudiée présente une tendance d'évolution dans le long terme et un même type de propriétés, nous avons donc utilisé au départ une segmentation uniforme avec des segments de même longueur. La portion étudiée est longue de près de 4150 mètres. Avec des segments de 50 mètres, nous obtenons un total de 83 segments et des pas de temps d'une heure de temps. Nous avons lancé des simulations (figure 4) : une première allant de la position de 1976 à 1988, une deuxième de 1976 à 1997. Les simulations effectuées montrent de très bons résultats pour la prédiction de l'évolution côtière.

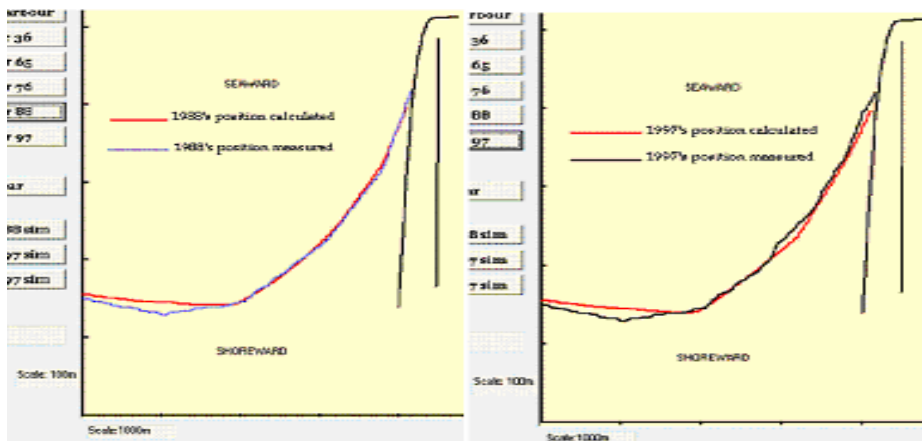


Figure 4. Les positions mesurées et calculées (en rouge)

Type de segmentation	Sans	Avec, si $l > 0$	Avec, si $l > 0.1$	Avec, si agent entre 0 et 2000m
Nombre d'agents	83	166	126	123
Agents dans [0,1000m]	20	40	20	40
Dans [1000, 2000m]	20	40	20	40
Dans [2000,3000m]	20	40	40	20
De 3000m à la fin	20	46	46	23
Temps de simulation	2min,21s	4min, 14s	3min,28s	3min, 13s
Distance	1643,5	1818,7	2142,3	1242,8

**Tableau 1.** Résultats avec la segmentation dynamique

Le concept de segmentation dynamique a ensuite été intégré. Un critère de division basé sur l'amplitude de déplacement  $l$  lors d'un pas de temps a permis d'obtenir une amélioration sur la simulation (tableau 1). La distance est obtenue avec la somme des différences au carré des positions calculées et mesurées. Un second critère de similitude entre deux agents permet de comparer les angles de deux agents voisins et décider de les fusionner ou non.

---

## 4. Conclusion

Il ressort de cette première étude que l'approche multi-agents pour modéliser le phénomène de l'érosion côtière est validée sur un certain nombre de cas, elle apparaît donc très prometteuse et mérite d'être approfondie. Les limites de la résolution numérique (complexité de programmation, manque de flexibilité,...) sont contournées par cette approche. Il est évident que certains problèmes comme le manque de données, les difficultés de calibration et de validation demeurent encore récurrents dans cette modélisation de systèmes physiques. Par contre, des améliorations peuvent être apportées quant à la formulation du problème et sa résolution. La description des interactions élémentaires entre éléments d'un système est donc une bonne piste pour suivre l'évolution globale de ce type de système. Ce premier modèle à base d'agents doit être amélioré pour justement donner à l'organisation la capacité de pouvoir changer d'échelle ou de dimension pour générer des structures stables et convergentes.

---

## 5. Bibliographie

- [1] **Breton, L.** “GranuLab: Un système d'aide à la découverte scientifique pour la physique des milieux granulaires”. Thèse de Doctorat. Université Paris 6. 2002.
- [2] **CERC.** “Shore Protection Manual”. U.S. Army Coastal Engineering Research Center. 1984.
- [3] **Crank, J.** “*The Mathematics of Diffusion, 2nd ed.*”, Clarendon Press, Oxford, U.K. 1975.
- [4] **Dean, R.G. and Miller, J.K.** “A simple new shoreline change model”. *Coastal Engineering* 51 (2004) 531–556. 2004.
- [5] **Dembele J.M., Cambier C., Lille D., Touraivane, Diaw T.** “A coupling of heterogeneous and spatial multi-agents models. Application to the Senegalese shoreline system.” In *MODSIM-05. International Congress of Modelling and Simulation*. Melbourne.2005
- [6] **Hanson, H. and Kraus, N.C.** “GENESIS - Generalized model for simulating shoreline change. Report 1”. Technical report CERC-89-19. Department of the army. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers.1991.
- [7] **Larson, M., Hanson, H., and Kraus, N. C.** “Analytical Solutions of the One-Line Model of Shoreline Change”. Technical Report CERC-87-15, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS. 1987.
- [8] **Pearlin, M. and Dean, R. G.** “Prediction of Beach Planforms with Littoral Controls”. In *Proceedings of 16th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, pp 1818-1838*. 1978.
- [9] **Roelvink, J.A. and Broker, I.** “Cross-shore profile models”. *Coastal Engineering* 2, 163-191. 1993.
- [10] **Servat, D.** “Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion”. Thèse de Doctorat. Université Paris 6.2000.
- [11] **Szmytkiewicz, M., Biegowski, J., Kaczmarek, L. M., Okroj, T., Ostrowski, R., Pruszek, Z., Rozynsky, G. and Skaja, M.** “Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data”. *Coastal Engineering* 40 119–139. 2000.
- [12] **Tranouez, P.** “Contribution à la modélisation et à la prise en compte informatique de niveaux de descriptions multiples. Application aux écosystèmes aquatiques.” Thèse de Doctorat. Université du Havre. 2005.
- [13] **XinJian., C.** “A Cartesian method for fitting the bathymetry and tracking the dynamic position of the shoreline in a three-dimensional, hydrodynamic model. ” *Journal of Computational Physics* 200 .749–768. 2004.