

INFO-F308

Simulation d'un écosystème maritime en 2D

Groupe G2A:

Ze-Xuan Xu, Ibrahim Maatoug, Ali Bahja, Christopher Bilba, Zakaria Sabraoui

Dans ce rapport, nous présenterons notre projet concernant la simulation d'un écosystème maritime effectuée en deux dimensions (2D). Nous y reprendrons tout ce qui est nécessaire à sa compréhension, depuis le concept de simulation maritime jusqu'à sa réalisation au niveau informatique, en présentant divers concepts sous de multiples aspects.

I. INTRODUCTION

Les écosystèmes marins représentent un élément vital de la biosphère terrestre, jouant un rôle crucial dans la régulation du climat, la fourniture de ressources alimentaires et la préservation de la biodiversité. L'objectif principal de cette recherche est de développer une simulation informatique capable de modéliser les interactions complexes au sein d'un écosystème marin en deux dimensions.

Nous commencerons par voir les aspects méthodologiques qui poseront les bases afin de comprendre les aspects théoriques et techniques que nous reprendrons par la suite. Les aspects théoriques comprennent toute la partie logique de la simulation : quels sont les points qui ont été pris en compte afin d'effectuer les simulations et pourquoi. Enfin, les aspects techniques concerneront le niveau informatique, c'est-à-dire la structure et les détails de son implémentation.

II. ÉTAT DE L'ART

Il existe de nombreuses simulations disponibles pour un écosystème maritime et chacune ayant leurs particularités. Nous avons par exemple **Ecopath with Ecosim (EwE)**[1] qui est principalement utilisé pour les interactions trophiques.

Cependant, un modèle en particulier attire notre attention, celui du modèle proie-prédateur, également appelé équations de **Lotka-Volterra**[2]. Il s'agit d'un couple d'équations différentielles non-linéaires du premier ordre utilisées afin de déterminer les interactions entre une population de proies et de prédateurs :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt}(t) = x(t)(\alpha - \beta y(t)) \\ \frac{dy}{dt}(t) = \delta x(t) - \gamma \end{cases}$$

où :

- t est le temps
- $x(t)$ la population de proies
- $y(t)$ la population de prédateurs
- α le taux de reproduction des proies
- δ le taux de reproduction des prédateurs
- β le taux de mortalité des proies
- γ le taux de mortalité des prédateurs

Nous remarquons ici que α et γ sont indépendantes de l'autre population tandis que β et δ sont corrélées à cette autre population.

Nous pouvons linéariser ce système aux dérivées partielles afin d'obtenir une jacobienne :

$$J(x(t), y(t)) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dx}{dt} \right) & \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{dx}{dt} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dy}{dt} \right) & \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{dy}{dt} \right) \end{pmatrix}$$

Avec cette matrice, une étude des points d'équilibres peut être effectuée afin d'en tirer divers résultats en fonction des valeurs choisies ou recherchées.

Bien que ce modèle soit très répandu, son utilisation est relativement complexe tenant compte de l'envergure de notre simulation. La principale raison est que nous disposons d'un nombre relativement important d'espèces à la fois prédateurs et proies et que ces équations ne s'appliquent qu'à la relation entre deux populations. Il est tout à fait possible de les adapter au nombre d'espèces voulu, ce qui est fait dans de nombreuses autres simulations. Cependant, nous avons posé d'autres contraintes qui sont présentées dans les sections suivantes, telles qu'un taux de natalité plus limité, par un nombre maximum d'entités ou encore par une biomasse de planctons limitée, pour des raisons de praticité qui rendent relativement complexe l'application de ce modèle à notre simulation.

III. ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES

A. Description

Pour représenter les composants de l'écosystème marin, notre approche de modélisation repose sur une structure basée sur des entités. Chaque organisme marin est représenté individuellement en tant qu'une entité, avec ses propres attributs tels que **nom**, **l'âge**, **la faim** et **les caractéristiques comportementales**. Les interactions entre les entités, y compris la prédation, la compétition pour la nourriture et les comportements de reproduction, sont modélisées à l'aide de règles définies en fonction des connaissances écologiques existantes.

De plus, l'environnement marin est également modélisé dynamiquement tels que la disponibilité des ressources alimentaires et les rayonnements solaires. Ces variables environnementales peuvent influencer les comportements des organismes et les taux de survie, de croissance et de reproduction.

B. Techniques

Pour reproduire la dynamique temporelle et spatiale de l'écosystème en 2D, nous utilisons des techniques de simulation basées sur des *modèles individus-environnement*. Ces techniques reposent sur la mise à jour itérative des états des agents et de l'environnement à chaque pas de temps, en fonction des règles définies et des conditions environnementales actuelles :

- **Simulation à pas de temps discret** : Nous divisons le temps en intervalles discrets et mettons à jour les états des agents et de l'environnement à chaque pas de temps. Cela nous permet de capturer les changements dynamiques dans l'écosystème au fil du temps.
- **Modélisation spatiale en 2D** : Nous représentons l'espace marin en deux dimensions, en utilisant des coordonnées cartésiennes pour définir la position des agents et des cellules environnementales. Cette approche nous permet de tenir compte des interactions spatiales entre les organismes et leur environnement.
- **Algorithmes de déplacement et de recherche** : Nous utilisons des algorithmes de déplacement et de recherche pour simuler les déplacements des organismes marins dans leur environnement, ils sont utilisés pour la recherche de nourriture et éviter des prédateurs. En particulier, l'algorithme de recherche A* est utilisé afin de trouver le plus court chemin vers la proie que le prédateur décide de chasser.
- **Modélisation des interactions** : Nous définissons des règles spécifiques pour modéliser les interactions entre les agents ainsi qu'entre eux et l'environnement, telles que la prédation, la compétition pour les ressources et reproduction. Ces règles déterminent les conséquences des interactions sur les états individuels des entités.

C'est ainsi que nous reproduisons de manière simpliste la dynamique temporelle et spatiale de l'écosystème marin en 2D, en capturant les interactions complexes entre les organismes et leur environnement.

IV. ASPECTS THÉORIQUES

Lors de la modélisation de l'écosystème marin en 2D et de l'application méthodologique, plusieurs concepts écologiques fondamentaux guident notre approche. Ces concepts sont essentiels afin de cerner la dynamique complexe des interactions entre les organismes et leur environnement.

A. Cycle alimentaire et prédation

Nous avons dû implémenter la notion de faim et plusieurs espèces de poissons pour créer une chaîne alimentaire avec des relations de proie-prédateur entre chaque espèce pour s'assurer que le cycle alimentaire puisse fonctionner.

B. Compétition

Plusieurs espèces peuvent avoir la même proie, créant ainsi une compétition entre les espèces. Mais comme les entités de la même espèce ont toutes les mêmes proies, cela entraînera également une compétition entre les membres de l'espèce.

C. Cycle de vie

Chaque espèce a une durée de vie différente et les membres de la même espèce ne meurent pas au même âge. Nous avons donc imposé un intervalle de durée de vie reflétant la réalité pour chacune des espèces.

D. Reproduction

Comme les membres d'une espèce finiront tôt ou tard par mourir, il faut qu'ils puissent se reproduire pour que leur espèce puisse continuer à exister, ainsi, nous avons introduit la notion de reproduction dans notre code. Cependant, pour des raisons de clarté sur notre simulation, nous avons imposé certaines limites afin de restreindre le nombre d'espèces affichées et éviter une croissance exponentielle d'une des populations. Chaque entité doit donc attendre un certain délai avant de se reproduire à nouveau et ne peut se reproduire que si le nombre maximum d'agents de cette espèce n'est pas atteint.

E. Production de planctons

La lumière du soleil est utilisée par les planctons pour leurs photosynthèses. Cela influe donc sur leur nombre, et par effet de cascade sur la chaîne alimentaire, sur les populations de petits poissons et autres animaux marins. Dans notre simulation, les planctons se trouvent à la surface de l'océan, créant ainsi une dynamique de mouvement vers le haut des poissons et de leurs prédateurs.

V. ASPECTS TECHNIQUES

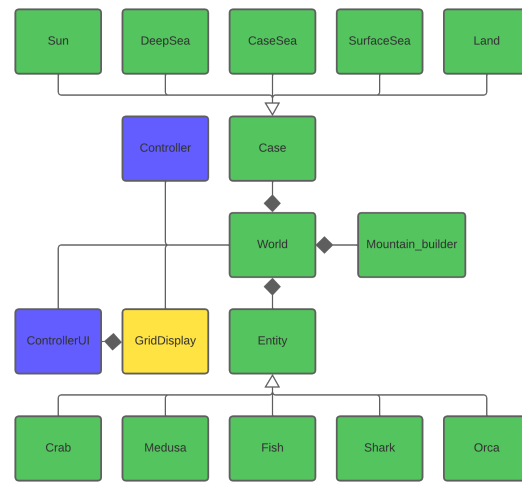


FIGURE 1. Modèle (vert), vue (jaune), contrôleur (bleu)

Notre code utilise l'architecture MVC tel qu'illustré sur la Figure 1 et se structure ainsi :

- **Modèle** : contient deux matrices *NumPy*. L'une sert à modéliser le background et donc l'affichage en arrière-plan, et l'autre modélise le foreground et donc la partie de l'écosystème avec les espèces aquatiques.
- **Contrôleur** : Lie la partie modèle à la vue afin de transmettre les informations à afficher et gère également les interactions pour la prédation et la reproduction.
- **Vue** : en fonction de la partie modèle, la vue affiche le background et le foreground. L'affichage de la simulation se fait à l'aide de la bibliothèque Pygame.

En suivant le diagramme de classes que nous venons de voir, nous reprenons sur le diagramme de séquence ci-dessous chaque étape du programme effectuée durant un pas de temps lors de la simulation.

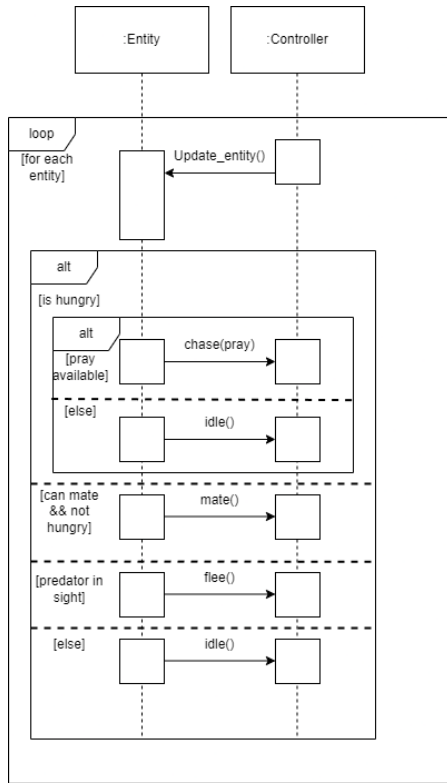


FIGURE 2. Interactions lors d'un pas de temps

VI. RÉSULTATS

Nous avons pu effectuer de nombreuses simulations en ciblant diverses particularités et obtenir des résultats nous permettant d'en tirer certaines conclusions. Par raison de simplicité, nous ne considérerons que la durée de la simulation ainsi que le résultat, principalement la dernière espèce en vie.

A. Extinction de l'écosystème

En plaçant un minimum de trois espèces afin de conserver le concept de chaîne alimentaire, nous avons effectué de nombreuses simulations simples pour essayer de causer l'extinction de

toutes les espèces. Le résultat optimal pour cet objectif est le suivant :

	Poissons	Requins	Orques
Entités	1	1	α
Durée de simulation	≈ 50 secondes		

Afin de tuer une espèce à coup sûr, le moyen le plus fiable est de couper toute source d'alimentation, c'est ce que nous faisons ici. Le fait de n'avoir qu'une seule entité des deux espèces les plus basses dans la chaîne alimentaire empêche leur reproduction et donc d'être une source abondante de nourriture pour les prédateurs absolus. Donc dans notre cas, les orques n'ont pas suffisamment de nourriture et finissent tous par mourir de faim.

Une de nos contraintes concernant la reproduction nous aide à terminer cette simulation au plus vite : un *cooldown*. En effet, la barre de faim des entités se vide plus rapidement que le *cooldown*, sans apport de nourriture, ils ne peuvent plus se reproduire avant de mourir de faim, ce qui empêche une seconde génération qui doublerait la durée de la simulation. Le résultat sera le même pour n'importe quel naturel α non-nul choisi.

B. Écosystème stable

Tout en gardant le concept de chaîne alimentaire, nous cherchons à faire perdurer l'écosystème de manière simple et nous obtenons ces valeurs intéressantes :

	Poissons	Requins	Orques
Entités	$\beta \geq 20$	1	1
Durée de simulation	continue		

Dans ce cas-ci, le comportement reste toujours le même : l'orque et le requin errent en se nourrissant des poissons proches de la surface jusqu'à ce que l'orque se mette en chasse près du requin pour le manger. Une fois qu'il ne reste que l'orque et une certaine quantité de poisson, la stabilité du système apparaît vu que l'orque remontera se nourrir de poissons dès qu'il en aura besoin tandis que ces derniers se reproduisent rapidement.

Un certain temps plus tard, l'orque finira par mourir de vieillesse en laissant un nombre considérable de poissons qui continueront à se nourrir de plancton et se reproduire sans arrêt. Sur notre simulation, nous avons posé une limite d'espèce qui est de 30 par souci de clarté visuelle, cependant ce cas de figure entraînerait une croissance exponentielle de leur population.

C. Simulation complète

Pour cette section, nous n'analyserons pas de données puisque celles-ci sont trop diverses et peu pertinentes. En effet, avec beaucoup plus d'espèces et d'entités, le comportement aléatoire est renforcé et donne un résultat différent à chaque simulation. De plus les changements d'environnement qui sont générés aléatoirement impactent l'écosystème de manière différente, ce qui nous contraint à rester sur des explications génériques, et ce, sans même prendre en compte les facteurs extérieurs sur lesquels nous pouvons interagir tels que la température ou la lumière.

En fonction de la position de départ, donnée aléatoirement à chaque entité, il est tout aussi probable que les orques mangent tous les requins puis finissent par chasser tous les poissons présents dans l'écosystème simulé, comme ils pourraient aussi manger des poissons petit à petit et mourir de vieillesse sans ne jamais s'approcher des requins.

Nous pouvons cependant remarquer des similitudes pour chacune des simulations. La première est celle qui induit les autres : *des bancs de poissons se forment à la surface*. En effet, le plancton se situe à la surface donc les poissons ont tendance à y aller dès que leur faim le demande, cependant puisque les prédateurs cherchent à se nourrir de poissons, ils remontent également vers la surface afin de s'en approcher. Si les prédateurs eux peuvent descendre plus profondément, ce n'est pas le cas des poissons qui eux doivent se nourrir assez fréquemment, cela mène à un comportement typique des prédateurs qui est de rôder en dessous des bancs de poissons et à passer au milieu afin de se nourrir dès qu'ils ont faim.

Bien que ce comportement soit assez présent, ce n'est pas toujours le cas pour chacune des simulations, il est néanmoins important afin de comprendre le comportement des entités et leurs interactions.

VII. CONCLUSION

Nous pouvons désormais conclure sur notre modèle.

Ce dernier est relativement simpliste comparé à d'autres modèles déjà disponibles, les interactions sont basées sur des comportements génériques, mais ne correspondent pas toujours à la réalité puisqu'il existe plusieurs déviants et facteurs externes non pris en compte, telles que la topologie, pollution ou encore l'activité humaine. Néanmoins, il n'est pas mauvais pour autant, que sa simplicité logique et visuelle permette une compréhension générale du fonctionnement d'un écosystème, qui peut parfois faire défaut à des modèles plus complexes ou spécialisés sur un seul aspect.

En résumé, nous avons effectué une modélisation simplifiée d'un écosystème maritime comprenant certaines espèces génériques afin d'en comprendre le fonctionnement.

RÉFÉRENCES

- [1] Ecopath official website. <https://ecopath.org/>, 2024.
- [2] Louis Goldstein. University of southern california. *The Lotka-Volterra model*, 2020.