

Analyse des modifications apportées par la reproduction.



Résumé—Grâce aux Agent-Based Models, nous avons pu concevoir un modèle simulant un système proie-prédateur. Dans cet article, nous analyserons donc les modifications apportées à la reproduction et ses effets sur la simulation. Cela dit, nous constaterons que le modèle n'est pas fiable car il omet toute une série de scénarios présents dans la nature.

I. INTRODUCTION

NOUS traitons dans cet article de la reproduction. Pour ce faire, nous regarderons en détail les effets du taux de reproduction, des tailles de portée et du nombre de périodes de reproduction sur le modèle. Ce modèle a été conçu dans le cadre du projet d'année 3 de sciences informatiques et constitue une approche de la façon dont les proies et les prédateurs évoluent dans un écosystème. Avant de parler du taux de reproduction et de son impact, il est nécessaire de définir en partie comment le modèle sur lequel seront basés nos différents résultats a été conçu.

Lors de la conception de notre modèle, nous avons passé un certain temps à nous informer sur ce qu'étaient les ABMs- *Agent-Based Models*. Les ABM permettent de simuler des scénarios à l'aide d'agents qui représentent des individus d'une population ou d'une espèce. Ses agents ont donc une série de caractéristiques communes dont les valeurs peuvent différer. Nous pouvons donc représenter des agents avec des âges et des niveaux de nourriture différents. Ils partagent aussi un comportement identique. De ce fait, nous pouvons modéliser la façon dont un agent va réagir en rencontrant un prédateur, en trouvant un autre congénère ou bien ce qui se passe une fois que l'agent est trop vieux/affamé. Pour ce faire, nous avons donc utilisé la librairie MESA de Python [1] afin d'implémenter nos ABMs. Cette librairie fournit une interface graphique, un collecteur de données et un framework pour la conception du modèle. La partie "Méthodologie" détaillera le modèle qui a été conçu.

Pour étudier la démographie d'une population, nous devons nous intéresser aux risques qu'elle encourt dans son milieu naturel et aussi nous intéresser à la façon dont celle-ci se reproduit. Le premier est représenté par *un taux de survie* et le second par *un taux de reproduction*. Ces taux fonctionnent de différentes façons et influencent tous les deux le nombre d'individus de la prochaine génération. En effet, la nouvelle génération sera impactée par le nombre

de survivants de la dernière génération et du nombre de nouveaux individus engendré par ceux-ci. En conséquence, *le taux de survie* regroupe un ensemble de facteurs tel que la disponibilité de la nourriture et le nombre de prédateurs dans l'environnement, ainsi que les maladies et les différents facteurs environnementaux/anthropiques. *Le taux de reproduction* regroupe un autre ensemble de facteurs dont font partie la taille de la portée, la proportion de mâles et de femelles au sein de la portée, le nombre de portées qu'un individu peut avoir sur une année, ...

Ces dernières années, nous parlons énormément de l'environnement et de la manière dont l'humain impacte son écosystème. Cette prise de conscience généralisée a eu des effets positifs sur certaines populations. On peut par exemple citer l'exemple de la tortue de Galapagos dont on ne comptait plus que 15 individus dans les années 1960 et qui en 2020, a dépassé le cap des 2000 individus.[2] Plus récemment, on citera la réintroduction du loup en Wallonie qui est le résultat d'un phénomène parfaitement naturel, poussé par des réglementations telles que la convention de Berne de 1979.[3] Ce n'est que par une compréhension approfondie de la reproduction de ces deux espèces et une mise en place de réglementations prenant en compte leur mode de reproduction que celles-ci ont pu retrouver en partie leur place dans l'écosystème dont elles font partie.

Pour maintenir les populations dans le temps, il est donc primordial d'avoir une bonne compréhension de ces paramètres. Cela permet d'assurer la réintroduction d'espèces d'animaux en voie d'extinction, de réguler le nombre d'individus de populations invasives ou simplement d'assurer la stabilité de certaines populations dans l'intérêt de l'écosystème et, d'une certaine manière, pour le compte de l'humain. Ainsi, comprendre l'enjeu qui se trouve derrière ces paramètres peut nous permettre d'établir des réglementations qui viseront à protéger l'environnement et les différents animaux présents en ce monde.

Avec toutes ces connaissances en notre possession, notre rapport ne se focalisera pas uniquement sur l'impact du taux de reproduction sur le modèle. Nous étudierons aussi l'impact des tailles de portées et l'importance du nombre de portées sur une année pour notre modèle. Nous testerons aussi le modèle de Lotka-Volterra qui constitue la première approche de modélisation d'un système proie-

prédateur et qui est toujours considéré aujourd'hui comme une base importante des simulations proie-prédateur. [4]

II. ETAT DE L'ART

Dans les écosystèmes naturels, les proies et les prédateurs sont des acteurs majeurs des dynamiques internes de ces systèmes. Les prédateurs sont définis comme étant des organismes qui tuent d'autres organismes, les proies, pour leur survie. Les proies et les prédateurs font donc partie d'un même tout et évoluent l'un en fonction de l'autre. Le prédateur se dote des outils nécessaires pour tuer la proie et celle-ci se dote des outils nécessaires pour éviter le prédateur.

Pour assurer leur survie, les proies sont donc en général plus nombreuses que les prédateurs dans leur écosystème. Les prédateurs font donc office de régulateur du nombre de proies dans leur écosystème. Le nombre de prédateurs n'augmentera que si le nombre de proies diminue et vice-versa.

Pour mieux comprendre l'évolution de ces populations de proie et de prédateur, de nombreuses études ont été menées sur les taux de reproduction de ces populations. Dans le cas des espèces invasives [5], il a été observé que les espèces qui feraient de bons candidats pour être considérées comme "invasives" sont celles qui présentent des reproductions rapides ou des modes de reproduction divers (par exemple, végétatif, à l'aide de graines, sexuées ou d'autres.). Dans le cas des espèces en danger, des études ont été menées pour développer des technologies tels que la reproduction in-vitro adaptée à ces espèces [6] et pour analyser les effets de certains programmes de défense des espèces sur la reproduction [7]. Un cas très particulier est aussi celui de la translocation des individus pendant la période d'accouplement et l'impact de cette translocation sur les taux de reproductions des espèces [8] [9]

Ainsi, pour modéliser tous ces cas, un très grand nombre de modèles ont vu le jour. Dans cet article, nous testerons uniquement le modèle de Lotka-Volterra mais il est néanmoins nécessaire de citer les travaux de Rosenweig-MacArthur et Arditi-Ginzburg. Rosenweig-MacArthur adapte le modèle de Lotka-Volterra en ajoutant la notion de croissance du nombre de proies en fonction de leurs densités[10] tandis que celui de Arditi-Ginzburg admet l'existence d'un ratio entre les prédateurs et les proies.[11]

III. MÉTHODOLOGIE

A. Hypothèses.

Nous réaliserons trois types de tests différents. Le but est d'avoir une bonne idée de comment le taux de reproduction, la taille des portées et les périodes de reproduction interagissent pour influencer la démographie des populations du système.

1) **Variation du taux de reproduction** : A priori, si le taux de reproduction des prédateurs est supérieur à celui des proies, les prédateurs auront plus de facilité à se reproduire que les proies. Étant donné qu'il y aura plus de prédateurs dans les premières années, le nombre de proies devrait diminuer. Il est possible que les populations de prédateurs et de proies ne comportent plus aucun individu vivant dans la simulation. Un autre scénario possible est que les prédateurs sont éteints mais qu'il reste encore quelques proies, capable d'assurer la survie de l'espèce dans le système. Celle-ci ne serait donc plus régulée par les prédateurs et se développerait sans limite. Par contre, s'il est inférieur, le nombre de prédateurs peinerait à augmenter et les proies seront toujours plus nombreuses dans le système.

2) **Variation de la taille des portées** : Si les portées de proies sont grandes, les prédateurs auront beaucoup de nourriture. En fonction de la taille de la portée, il est possible que les populations de proies se développent de façon tellement rapide que les prédateurs ne soient pas capables de réguler le nombre de proies. Le résultat serait une très faible population de prédateurs qui n'auraient aucun mal à survivre et une population de proie qui continuerait perpétuellement à augmenter jusqu'à ce qu'il n'y ait plus assez de nourriture pour que la population de proie puisse continuer à croître. On atteindrait donc un plateau au niveau du nombre de proies dans le système.

3) **Variation du nombre de périodes de reproduction** : Si les proies ont plusieurs périodes de reproduction pendant l'année, l'équilibre du système peut être menacé. En fonction des tailles de portée et du nombre de prédateurs dans le milieu, le système peut être complètement surchargé par le nombre de proies. Cependant, si les prédateurs ont plusieurs périodes de reproduction, toujours en fonction des portées des proies et des prédateurs, une double période de reproduction peut aider à garder le côté régulateur des prédateurs sur leurs proies ou alors, causer la mort du système, ce qui signifie que les proies et les prédateurs ne comptent plus aucun individu vivant dans le système.

B. Fondements mathématiques :

Pour modéliser des systèmes proies-prédateurs, nous parlerons notamment des équations de Lotka-Volterra qui sont la base théorique sur laquelle le modèle a été conçu. Ces équations sont non-linéaires et de premier ordre. Elles se basent sur le fait que :

- La population des prédateurs diminue intrinsèquement.
- La population des proies augmente intrinsèquement.
- Une plus grande population de proies mènera à une plus grande population de prédateurs.
- Une plus grande population de prédateurs mènera à une population de proies plus petite.

[12][4]

Les équations de Lotka-Volterra sont écrites de cette façon :

$$\frac{dx}{dt} = (\alpha - \beta y)x, \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = (-\gamma + \delta x)y, \quad (2)$$

Avec [12][4] :

- x et y sont les effectifs en proies et en prédateurs respectivement.
- α représente le taux de reproduction des proies. Ce taux est constant et indépendant du nombre de prédateurs.
- δ représente le taux de reproduction des prédateurs en fonction des proies mangées.
- β représente le taux de mortalité des proies dû aux prédateurs.
- γ représente le taux de mortalité des prédateurs. Ce taux est constant et indépendant du nombre de prédateur.
- $\frac{dx}{dt}$ et $\frac{dy}{dt}$ représentent l'évolution de l'effectif des populations dans le temps.

Dans le modèle qui a été conçu, nous avons décidé que les taux de reproduction, α et δ , allaient être des constantes. La seule contrainte de la reproduction dans notre modèle est le niveau de nourriture des agents. En effet, un agent affamé ne pourra avoir de petits étant donné qu'il aura du mal à les nourrir, ce qui est représenté par le fait qu'un agent répartit la moitié de son énergie entre les individus de sa progéniture de façon équitable entre ceux-ci.

Toujours dans le modèle, les taux de mortalité β et γ n'existent pas. Ces taux dépendent uniquement des valeurs générées dans l'itération précédente du modèle. Pour qu'un agent soit mort dans la simulation, il peut soit mourir de faim, de vieillesse ou dans le cas des proies, du fait d'un prédateur. Il n'y a donc pas de taux de mortalité à proprement parler, ce qui rend le système plus réaliste car il évolue à chaque itération en fonction de ce qui se produit dans le système.

Pour mieux comprendre ce qui se passe dans le modèle, voici les pseudo-codes qui modélisent le comportement des différents agents présents.

Algorithm 1: Comportement hors période de reproduction.

Result: Mouvement dans une case appropriée
if *a predator is near* **then**
 | move away from the predator ;
else if *food is near* **then**
 | move to the food ;
else
 | explore the map randomly ;
end

Dans le cas du prédateur, il recherche en priorité une proie, puis bouge aléatoirement. Il est possible que pendant sa course, un prédateur fasse un mouvement aléatoire, ce qui permet de représenter la fuite réussie d'une proie. Il peut être important de noter que l'on suppose que le prédateur se déplace beaucoup plus que la proie sur une même période de temps. Autrement, il serait impossible pour lui de rattraper la proie.

Algorithm 2: Comportement en période de reproduction.

Result: Mouvement dans une case appropriée
if *another prey is near* **then**
 | move to the prey to reproduce ;
else if *a predator is near* **then**
 | move away from the predator ;
else if *food is near* **then**
 | move to the food ;
else
 | explore the map randomly ;
end

Dans le cas du prédateur, il cherche un prédateur avec qui s'accoupler, puis cherche une proie pour la manger. Sinon, il explore la carte.

De plus, il est important de noter qu'à chaque mouvement choisi, la proie mange ou se reproduit s'il en a la possibilité. Ainsi, si un prédateur le fait fuir sur une case où une autre proie ou de la nourriture se trouve, il s'accouplera et mangera à sa faim.

C. Réalisation des tests.

Pour obtenir nos résultats, chaque test a été réalisé une dizaine de fois. Toutes les valeurs présentées sont donc une moyenne de dix itérations qui ont lieu sur une période de 5 ans dans le cas des taux de reproduction et de 3 ans pour les tests relatifs aux tailles de portées et au nombre de périodes de reproduction. De ces moyennes, nous tirerons un taux de mortalité moyen que nous utiliserons dans les équations de Lotka-Volterra. Les taux de reproduction et de mortalité du modèle de Lotka-Volterra sont donc considérés comme des constantes et ne dépendent d'aucun autre paramètre. Ceci sera effectué pour les 3 tests qui ont été cités dans la section "Hypothèse".

D. Instructions pour reproduire l'expérience.

Notre modèle est disponible à l'adresse <https://www.github.com/mmugrabi/CarrotsAndDragons-2020>. Pour obtenir nos résultats, nous ne prenons pas compte du temps de gestation ni du sexe des individus. Cela dit, les individus ne peuvent se reproduire qu'une seule fois par période de reproduction et ne peuvent se reproduire en dehors. Les populations suivent donc un comportement légèrement différent en période de reproduction tel qu'illustré par les pseudo-codes ci-dessus. Il est aussi important de noter que dans notre simulation, les proies peuvent manger des herbes. Ces herbes leur fournissent un taux de nourriture constant et réapparaissent après un certain nombre d'itérations (ou de *pas*) du système. Les prédateurs peuvent aussi se déplacer de deux cases tandis que les proies ne peuvent se déplacer que d'une. Ceci est nécessaire pour assurer qu'un prédateur puisse rattraper une proie.

IV. RÉSULTATS

Les tests ont tous été réalisés avec les paramètres par défaut suivants :

TABLE I: Paramètre par défaut des simulations

Carrot Regrowth Time	7
Initial Rabbit Population	300
Rabbit Reproduction Rate (Hors période)	0.0
Initial Fox Population	30
Fox Reproduction Rate (Hors période)	0.0
Fox Gain From Food Rate	14
Rabbit Gain From Food	2
Trees Ratio	0.2
Steps Per Year	80
Number Of Hunters	0

A. Test sur les taux de reproduction en période de reproduction

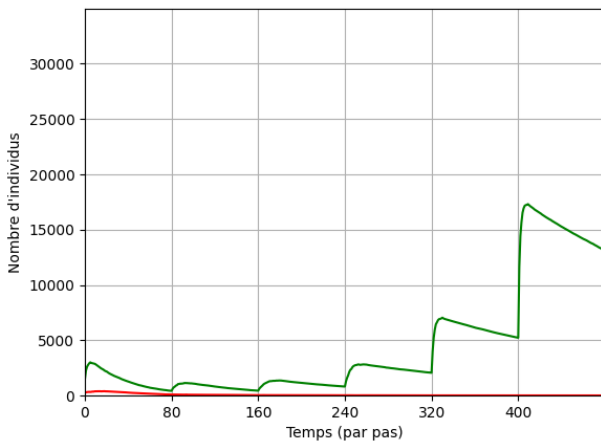


FIGURE 1: Test avec des taux de reproduction de 0.3 et 0.6 pour les proies et les prédateurs, respectivement. En rouge, les prédateurs et en vert, les proies.

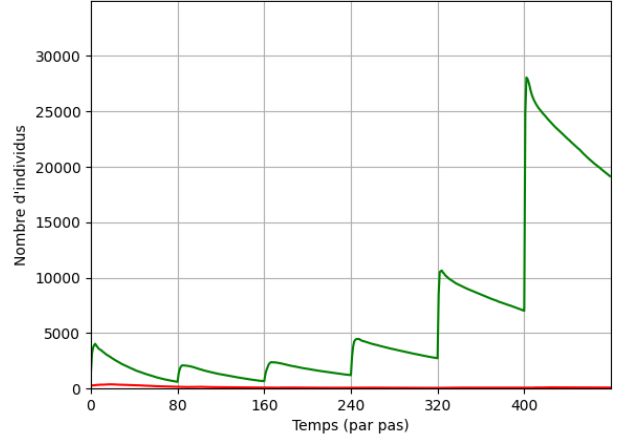


FIGURE 2: Test avec des taux de reproduction de 0.6 et 0.3 pour les proies et les prédateurs, respectivement. En rouge, les prédateurs et en vert, les proies.

Nous remarquons dans le graphique 1 que la population des proies diminue fortement les 2 premières années avant d'augmenter de façon importante tandis que dans le graphique 2, nous observons le même comportement mais avec des pics du nombre de proies beaucoup plus importants. Cela est dû au fait que si le taux de reproduction des prédateurs est haut, il y a beaucoup de prédateurs dans les premières générations et donc moins de proies. Tandis que dans le graphique 2, nous observons que le taux de reproduction des proies est élevé et celui des prédateurs faible donc les proies ont beaucoup plus de facilité à se reproduire. Les pics dans le nombre de proies sont plus élevés dans le graphique 2 car il y a environ le même nombre de prédateurs dans les deux graphiques mais vu que le taux de reproduction des proies est plus élevé dans le graphique 2, la population survivante des premières années se reconstitue plus rapidement, étant donné qu'à chaque interaction entre deux proies dans le système, celles-ci ont plus de chance de se reproduire.

Les pics observés après tous les 80 pas sont dûs au fait qu'on ne considère aucun temps de gestation. Ainsi, la population de proies, étant importante, n'a aucun de mal à se rencontrer et à se reproduire dès le début de la période de reproduction, créant ce pic en vert. Ceci sera observé dans tous les autres tests.

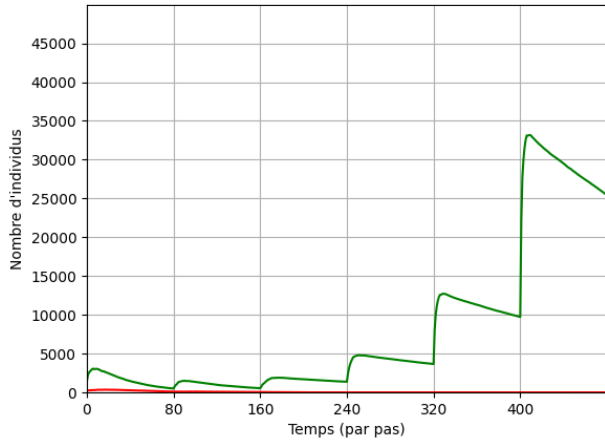


FIGURE 3: Test avec des taux de reproduction de 0.3 et 0.3 pour les proies et les prédateurs, respectivement. En rouge, les prédateurs et en vert, les proies.

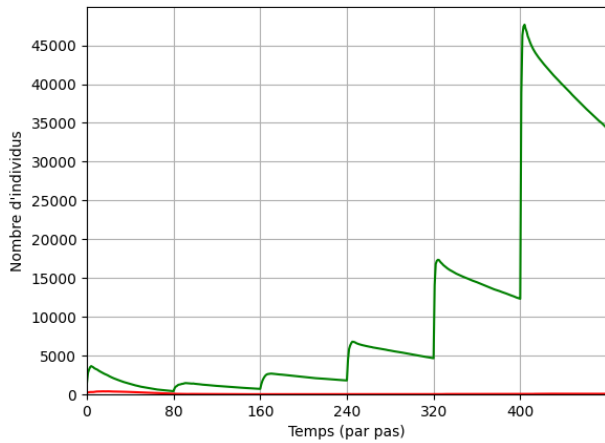


FIGURE 4: Test avec des taux de reproduction de 0.5 et 0.5 pour les proies et les prédateurs, respectivement. En rouge, les prédateurs et en vert, les proies.

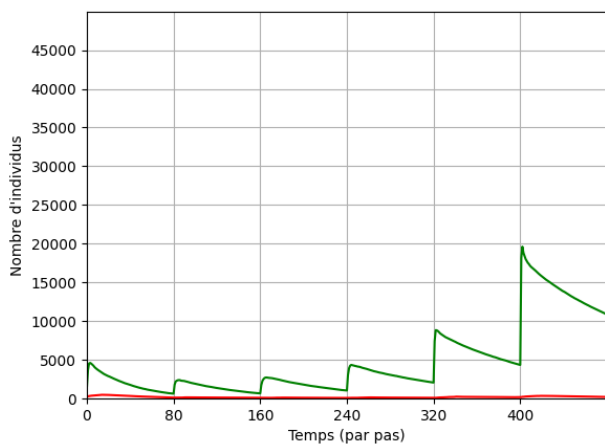


FIGURE 5: Test avec des taux de reproduction de 0.8 et 0.8 pour les proies et les prédateurs, respectivement. En rouge, les prédateurs et en vert, les proies.

Dans le cas des graphiques 3 et 4, les populations de proies n'ont aucun de mal à dépasser les 25.000 individus. Cela est dû au fait que la population de renards n'existe plus aux alentours du 240ème pas et ainsi, la population de proies n'est plus régulée.

Dans le cas du graphique 5, nous remarquons que la population de proies a du mal à passer la barre des 20.000 individus. Ceci est dû en partie au haut taux de reproduction des prédateurs. Le taux de survie des proies de la première année est donc très faible. De par le nombre inférieur de proies, celles-ci ont du mal à se rencontrer et à se reproduire. Cela dit, nous remarquons qu'après les 240 premiers pas, la population des proies croît sans trop de soucis. Cela est dû au fait que le nombre de prédateurs a diminué en raison du nombre réduit de proies les années précédentes. La conséquence est que les prédateurs régulent moins bien la population de proies, qui augmente les années suivantes.

B. Test sur les tailles des portées

Les taux de reproduction sont de 0.5 et 0.5 pour les proies et les prédateurs. Ces derniers ont toujours une portée de 2 à 4 petits.

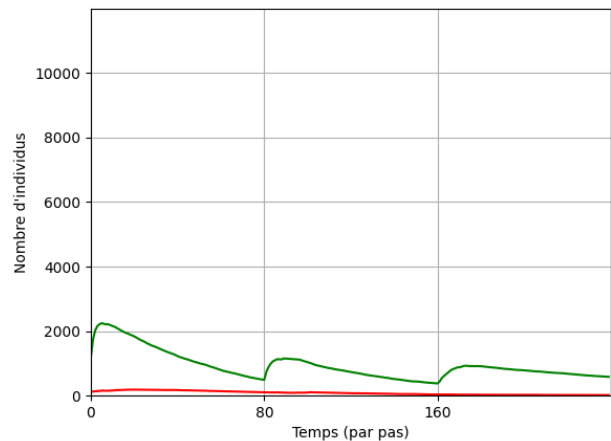


FIGURE 6: Test avec une portée de 2 à 4 petits pour les proies. En rouge, les prédateurs et en vert, les proies.

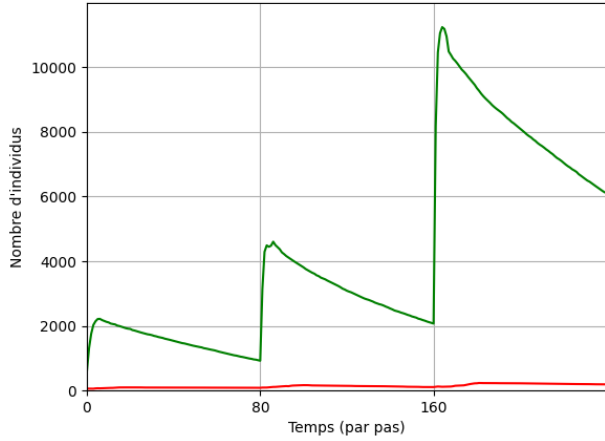


FIGURE 7: Test avec une portée de 6 à 8 petits pour les proies. En rouge, les prédateurs et en vert, les proies.

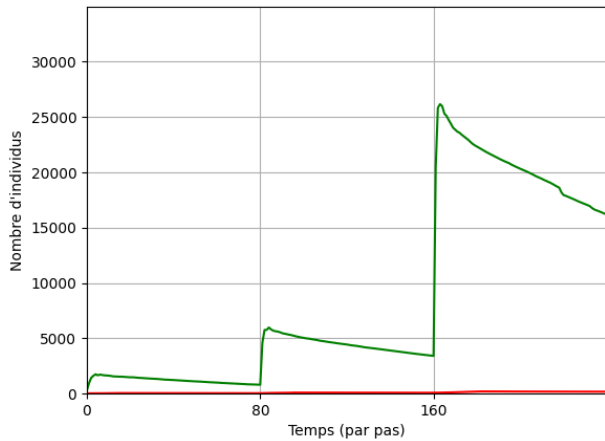


FIGURE 8: Test avec une portée de 10 à 12 petits pour les proies. En rouge, les prédateurs et en vert, les proies.

Dans le cas du graphique 6, nous observons le fait qu'il n'y a juste pas assez de proies pour reconstituer la population de proies année après année. Dès lors, nous constatons une descente les 3 premières années jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de prédateurs, ou, dans le pire des cas, de proies, ce qui signifierait la mort du système.

Dans le cas des graphiques 7 et 8, il y a suffisamment de nouveaux-nés pour observer une augmentation du nombre de proies et donc du nombre de prédateurs. Nous remarquons qu'année après année, la population de proies de l'année précédente, à son pic, est multipliée par la taille de la portée divisée par deux à l'année suivante, ce qui est logique étant donné qu'un couple de proies aura une portée de 6-8 ou 10-12 proies.

C. Test sur le nombre de périodes de reproduction

Pour tester l'impact du nombre de périodes de reproduction, nous prendrons la situation où les proies ont un taux de reproduction inférieur à celui des prédateurs et nous

verrons si, grâce à un nombre de périodes de reproduction plus important, le système proie-prédateur peut retrouver son côté stable.

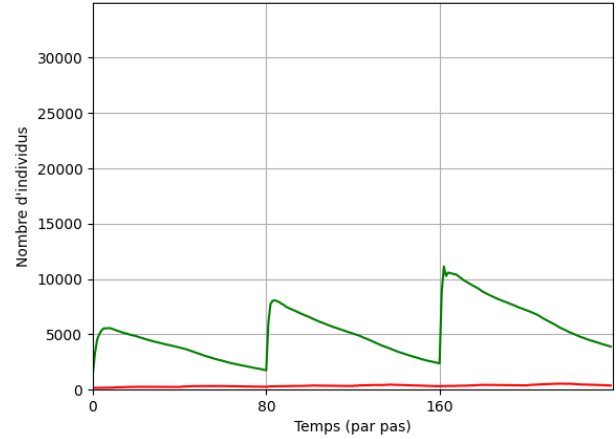


FIGURE 9: Test avec des taux de reproduction de 0.5 et 0.5 pour les proies et les prédateurs, respectivement et une portée de 10 à 12 petits pour les proies et 2 à 4 pour les prédateurs ainsi qu'une double période de reproduction pour les prédateurs sur une année. En rouge, les prédateurs et en vert, les proies.

Sur le graphique 9, nous observons une augmentation rapide du nombre de prédateurs, accentuée par le nombre de périodes de reproduction des prédateurs. Ce test est effectué dans les mêmes conditions que le test du graphique 8. Cependant, on remarque que le pic à chaque année passée n'est beaucoup plus bas que ceux du graphique 8. Ainsi, la troisième année, on passe de près de 26000 proies dans le graphique 8 à quasi 11000 dans le graphique 9 au 160ème pas.

D. Test de Lotka-Volterra.

La simulation de Lotka-Volterra a pour paramètres : α égale à 0.6, δ égale à 0.3, β égale à 0.14, γ égale à 0.16, x égale à 300 et y égale à 30.

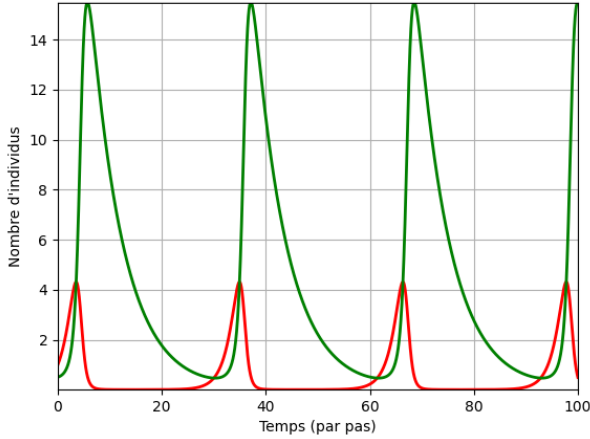


FIGURE 10: Test de Lotka-Volterra avec les paramètres r (taux de reproduction des proies) = 0.6, g (taux de mortalité) = 0.01

Sur le graphique 10, nous constatons que lorsque le nombre de proies augmente, cela produit une augmentation du nombre de prédateurs. Même chose lors de la diminution du nombre de proies, le nombre de prédateurs diminue aussi car ceux-ci n'ont plus de nourriture. Nous pouvons remarquer une similitude entre le graphique 10 et tous les autres graphiques issus de notre modèle. En effet, Lotka-Volterra nous décrit relativement bien les pics de croissance des populations de proies et de prédateurs et leur caractère périodique.

V. DISCUSSION

En partant des observations faites dans la section "Résultats", nous comprenons mieux le rôle des populations de prédateurs et de proies et les différentes interactions qui existent entre elles. Ainsi, dans le cas d'un système où il existe un trop grand nombre de proies, il est très intéressant d'avoir des prédateurs qui ont plusieurs périodes de reproduction sur la même année (cf figure 9.). Le nombre de prédateurs va augmenter plus rapidement et va donc ainsi réguler bien plus le nombre de proies. Celui-ci va s'en retrouver diminué les années qui vont suivre, comparé à s'il n'y avait pas de multiples périodes de reproduction pour les prédateurs.

Cela dit, il est évident d'après les graphiques sur les tailles de portée qu'un changement apporté au système peut avoir un très gros impact. En effet, à en croire les graphiques 6, 7 et 8, nous remarquons que la croissance du nombre de proies est incroyablement élevée alors que nous n'avons ajouté qu'un nombre limité de petits par portée.

En ce qui concerne les taux de reproduction, nous remarquons que ce n'est pas parce que les prédateurs ont un taux de reproduction très élevé ou égal à celui des proies que la population de prédateur va pérenniser. En effet, pour des tailles de portées similaires, d'après les graphiques 1, 3, 4 et 5, si le taux de reproduction des prédateurs est très élevé ou égal à celui des proies, il est fort possible que les premières générations de proies aient une énorme baisse de leurs effectifs à cause d'un surplus de prédateurs. Vu que ces populations diminuent dans le temps, les effectifs des prédateurs commencent aussi à diminuer malgré leur taux de reproduction élevé. Ceci est dû au fait que ceux-ci ne trouvent pas d'autres partenaires pour se reproduire et que dans le cas où il y a reproduction, les petits auront aussi les mêmes difficultés à trouver de la nourriture que leurs parents, rendant la tâche plus difficile pour toute la population de renards.

De plus, nous avons remarqué que le graphique 10 décrit les tendances de notre modèle assez fidèlement. Cela étant dit, on voit qu'il existe néanmoins des différences importantes dans la taille des pics/des creux des populations et le côté périodique du modèle de Lotka-Volterra rend une comparaison avec notre modèle quasi impossible de par le fait que les valeurs sont toujours les mêmes à chaque étape passée de la simulation.

VI. CONCLUSION

Nous avons appris des choses importantes concernant le taux de reproduction. Pour commencer, nous savons à présent que le taux de reproduction ne permet pas à lui seul de déterminer si une population sera pérenne ou non. Ce taux de reproduction est à voir dans un contexte plus élargi, qui regroupe : la taille des portées, qui est l'un des paramètres majeurs déterminant le nombre d'individus de la prochaine génération et le nombre de périodes de reproduction sur une année, qui détermine la vitesse à laquelle les nouvelles générations de l'espèce se suivent. Cette vitesse de reproduction amplifie l'effet d'un taux de reproduction élevé car ce taux rentre en compte plusieurs fois sur une même année.

En partant de ces résultats, les questions sont nombreuses. Comme expliqué plus haut, plusieurs aspects importants de la reproduction n'ont pas été abordés. Les temps de gestation sont inexistantes alors que ça constitue une différence importante entre les prédateurs et les proies, la durée de période de reproduction peut aussi impacter fortement un modèle, la proportion de mâles et de femelles au sein de l'espèce, les temps "d'apprentissage" avant qu'un animal soit capable de chasser ou d'acquérir sa nourriture par lui-même, ... Toutes ces différences font que notre modèle n'est pas réaliste.

Pour conclure, nous constatons toute l'importance de l'étude de la reproduction dans cet article. Comme expliqué dans l'introduction, ce paramètre impacte les écosystèmes de façon durable et implique tous les autres acteurs

participant à cet écosystème. Dans un cas réel, nous avons en plus de la compétition entre plusieurs espèces pour des accès à la nourriture et comme nous l'avons remarqué, le manque de proies ou de nourriture peut conduire à l'extinction d'une espèce, qui peut quant à elle, anéantir l'écosystème dans le pire des cas.

RÉFÉRENCES

- [1] Masad David and Kazil Jacqueline. Mesa : An Agent-Based Modeling Framework. Proceedings of the 14th Python in Science Conference. 2015.
- [2] James P. Gibbs, Elizabeth A. Hunter, Kevin T. Shoemaker, Washington H. Tapia, and Linda J. Cayot. Demographic outcomes and ecosystem implications of giant tortoise reintroduction to española island, galapagos. *PLOS ONE*, 9(10) :1–15, 10 2014.
- [3] Vinciane Schockert, Violaine Fichet, and A. Licoppe. Wolf plan wallonia. 06 2020.
- [4] Vito Volterra. Variations and Fluctuations of the Number of Individuals in Animal Species living together. *ICES Journal of Marine Science*, 3(1) :3–51, 04 1928.
- [5] Ann Sakai, Fred Allendorf, Jodie Holt, David Lodge, Jane Molofsky, Kimberly With, Syndallas Baughman, Robert Cabin, Joel Cohen, Norman Ellstrand, David McCauley, Pamela O'Neil, Ingrid Parker, John Thompson, and Stephen Weller. The population biology of invasive species. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32 :305–332, 11 2001.
- [6] Pierre Comizzoli, Pascal Mermillod, and Robert Maugé. Reproductive technologies for endangered mammalian species. *Reproduction, nutrition, development*, 40 :493–504, 09 2000.
- [7] Ken Norris and Neil McCulloch. Demographic models and the management of endangered species : A case study of the critically endangered seychelles magpie robin. *Journal of Applied Ecology*, 40(5) :890–899, 2003.
- [8] François Sarrazin and Robert Barbault. Reintroduction : Challenges and lessons for basic ecology. *Trends in ecology evolution*, 11 :474–8, 11 1996.
- [9] Aaron N. Facka, Jeffrey C. Lewis, Patricia Happe, Kurt Jenkins, Richard Callas, and Roger A. Powell. Timing of translocation influences birth rate and population dynamics in a forest carnivore. *Ecosphere*, 7(1) :e01223, 2016.
- [10] M. L. Rosenzweig and R.H. MacArthur. Graphical representation and stability conditions of predator-prey interactions. *American Naturalist*, pages 209–223, 1963.
- [11] Roger Arditi and Lev R. Ginzburg. Coupling in predator-prey dynamics : Ratio-dependence. *Journal of Theoretical Biology*, 139(3) :311–326, 1989.
- [12] Bob Carpenter. Predator-prey population dynamics the lotka-volterra model in stan. <https://mc-stan.org/users/documentation/case-studies/lotka-volterra-predator-prey.html>, 18 January 2018. [Online, accessed 25-April-2021].