

Durabilité, résilience et changement de régime en modélisation et simulation participative

Raphaël Duboz^{a,c} Etienne Delay^{b,c,d}
raphael.duboz@cirad.fr etienne.delay@cirad.fr

^aUMR Astre, Université de Montpellier, Cirad, France

^bUMR Sens, Université de Montpellier, Cirad, France

^cIRD, UMMISCO, Dakar, Sénégal

^dUCAD, Dakar, Sénégal

Résumé

Nous entamons une réflexion sur l'utilisation des concepts de durabilité, résilience et changement de régime dans le cadre de la modélisation et simulation participative et des approches Com-Mod. Sur la base d'une proposition récente pour le calcul des différents régimes d'un modèle stochastique, et après avoir vérifié notre implémentation, nous appliquons la méthode à un modèle Multi-Agents de pêche de lac de Guiers au Sénégal. Ce modèle n'étant à ce jour pas validé quantitativement, les résultats sont présentés qualitativement. Enfin, nous discutons des défis liés à l'utilisation du calcul des régimes dans un processus décisionnel participatif, par exemple si les résultats conduisent à des recommandations difficiles, comme l'arrêt temporaire de la pêche.

Mots-clés : *Changement de régime, point de bascule, modèles stochastiques, modélisation d'accompagnement*

Abstract

We are currently investigating the use of the concepts of sustainability, resilience and regime shifts in participatory modeling and simulation (mostly ComMod approach). Based on a recent proposal for calculating the different regimes of a stochastic model, and after verifying our implementation, we apply the method to a Multi-Agent model of a fishery on Lac de Guiers in Senegal. As this model has not yet been validated quantitatively, the results are presented qualitatively. Finally, we discuss the challenges of using regime calculations in a participatory decision-making process, for example, if the results lead to difficult recommendations, such as temporarily closing the fishery.

Keywords: *Regime shift, tipping points, stochastic models, participatory modeling*

1 Introduction

Les concepts mathématiques de viabilité, de résilience et de changements de régime définissent un cadre rigoureux pour étudier la durabilité des systèmes naturels et sociaux [1]. La viabilité s'appuie sur des conditions mathématiques qui définissent la capacité d'un système à rester dans un espace d'états qualifiés de viables sur le long terme [2]. La résilience est quantifiée par des mesures de distance dans l'espace des états, évaluant la capacité du système à revenir dans un état viable après une perturbation [3]. Les changements de régime sont décrits par des transitions soudaines d'un régime à un autre, c'est-à-dire par le passage du système d'une portion de l'espace des états à une autre [4].

Ces différents concepts ont été définis dans le cadre des systèmes dynamiques continus et déterministes, en considérant que le système étudié ne change jamais de structure ni de propriétés. Des travaux récents ont étendu l'utilisation de ces concepts aux systèmes stochastiques à horizon fini, c'est-à-dire en définissant un intervalle de temps durant lequel la structure et les propriétés du système considéré ne changent pas, rapprochant ainsi le cadre théorique d'une utilisation concrète pour des systèmes naturels et sociaux, évolutifs par nature mais pouvant être considérés comme stables sur une certaine période [5].

Nous présentons ici un travail en cours sur l'utilisation des concepts de durabilité, de résilience et de changements de régime dans le cadre de la modélisation et de la simulation participative. Il s'agit d'une toute première étape d'implémentation des calculs de régimes pour deux modèles discrets stochastiques qui permet d'identifier les possibilités et les limites de cette approche lors-

qu'elle sera mobilisée avec des acteurs de terrain.

2 Méthode

2.1 Définition des régimes

Nous repartons des définitions de J.D. Mathias et al [5]. Nous y ajoutons une référence à l'ensemble des personnes qui participent à la modélisation (modélisateurs, experts du domaine, personnes concernées, etc.) avec le terme « parties prenantes ». Les limites satisfaisantes du système correspondent à des seuils de satisfaction définis par les parties prenantes. Le seuil de durabilité et le seuil de résilience correspondent aux durées proposées respectivement pour définir le temps dans lequel le système reste dans un même régime et le temps maximum pour que le système passe d'un régime à un autre. Les différents régimes sont les suivants :

- **Satisfaisant durable**
Ensemble des états du système qui restent à l'intérieur de limites satisfaisantes pour un seuil de durabilité donné. Limites et seuil sont définis par les parties prenantes.
- **Résilient satisfaisant durable**
Ensemble des états du système jugés non satisfaisant au départ, mais dont la trajectoire passe dans le régime satisfaisant durable pour un seuil de résilience donné défini par les parties prenantes.
- **Non satisfaisant durable**
Ensemble des états du système qui restent à l'intérieur de limites non satisfaisantes pour un seuil de durabilité donné. Limites et seuil sont définis par les parties prenantes.
- **Résiliant non satisfaisant durable**
Ensemble des états du système jugés satisfaisant au départ, mais dont la trajectoire passe dans le régime non satisfaisant durable pour un seuil de résilience donné défini par les parties prenantes.
- **Ensemble de bascule**
Ensemble des états initiaux du système pour lesquels il n'est pas possible de statuer sur leur devenir au regard des seuils de durabilité et de résilience choisis, ainsi qu'en raison de la nature stochastique du système. Le terme bascule renvoie à la possibilité du système de passer d'un régime à l'autre.

2.2 Implémentation du calcul des régimes

À partir des définitions précédentes, nous implémentons les algorithmes de calculs des régimes décrits dans l'article de J.D. Mathias

et al [5]. Pour vérifier notre implémentation, nous codons un exemple de cet article, celui de l'exploitation d'intensité h d'un écosystème défini par sa biomasse totale B modélisé par l'équation 1 suivante :

$$B(t+1) = B(t)[g(K - B(t)(B(t) - \alpha) - hB(t)]\Delta t + \sigma_t \epsilon_{t+1} \Delta t \quad (1)$$

À tout instant, la biomasse $B(t)$ de l'écosystème dépend de l'intensité d'exploitation h , de sa capacité g de régénération, de la capacité de charge maximale K de l'écosystème, et d'un mécanisme dépensatoire critique α . ϵ correspond à des tirages indépendants dans une distribution normale unitaire, et σ_b est l'écart-type du bruit pour la biomasse $B(t)$. Nous remettons la valeur de la biomasse à zéro lorsqu'elle devient négative (si $B(t) < -\epsilon$ quand $\epsilon_{t+1} < 0$). La satisfaction est définie $\forall B(t) > 1$.

Une fois notre implémentation vérifiée¹, nous disposons des algorithmes de calcul permettant d'identifier les différents régimes.

Nous appliquons ensuite ces algorithmes aux résultats de simulations d'un modèle de pêche au lac de Guiers, Sénégal, implémenté dans le paradigme des Systèmes Mutli-Agents (SMA) et dont le code et la description *Overview Design concepts and Details* (ODD) sont également disponibles sur github². Le SMA est spatialement explicite et représente l'activité de pêche sur le lac par un ensemble de bateaux qui effectuent des sorties journalières pour prélever une certaine quantité de poissons, représentée par une biomasse. Les pêcheurs se déplacent aléatoirement sur le lac et ont une capacité de capture maximum. Ils sont également limités par la biomasse disponible là où ils pêchent, qui dépend du renouvellement de la biomasse et des prélèvements des autres pêcheurs. Chaque sortie augmente le capital des pêcheurs s'ils ont ramené du poisson et diminue leur capital par le coût de sortie journalière. Ce modèle est une déclinaison du modèle donné par l'équation 1 en y ajoutant quelques variables et paramètres contextuels permettant une discussion entre parties prenantes, ici les pêcheurs et les modélisateurs.

1. Le code implémenté en Julia est disponible sur github, dépôt ReproTippingSet.

2. Code et ODD du SMA modélisant une pêche, dépôt ElCep/viabFishSng

3 Résultats

La figure 1 illustre les résultats obtenus avec le modèle d'exploitation utilisé dans l'article de J.D. Mathias et *al.*

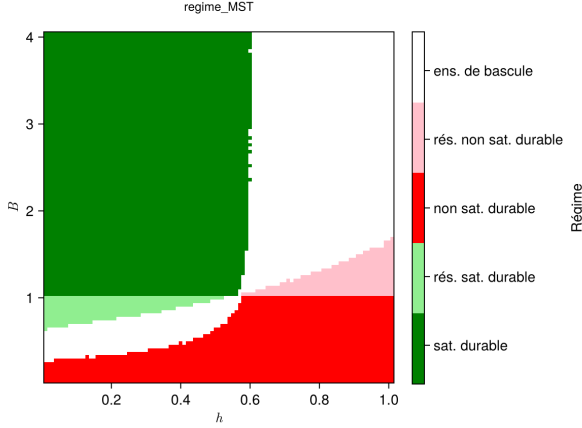


FIGURE 1 – Résultat reproduit à partir de l'article de J.D. Mathias et *al.*, 2024 considérant l'exemple de l'exploitation d'intensité h d'un système naturel défini par sa biomasse totale B avec un seuil de satisfaction $B(t) > 1$. Les différents régimes ont été calculés avec le temps moyen de séjour dans un régime donné (« Mean Sejour Time », MST).

La figure 1 illustre des résultats attendus, typiques du cas général pour un écosystème exploité. Par exemple, si la biomasse totale au départ n'est pas suffisante, alors il est impossible de l'exploiter. Si la biomasse au départ est suffisante, mais que l'exploitation est trop intense, alors l'écosystème s'effondre. Nous voyons qu'il existe des régimes satisfaisants, durables et résilients durables qui permettent une exploitation de l'écosystème. Nous voyons également qu'il existe des ensembles de bascules, qui correspondent à des biomasses initiales pour lesquelles nous n'allons pas pouvoir décider de la durabilité ou non du système. La taille de ces régimes dans l'espace état/paramètre dépend de valeurs seuils qui doivent être définies de façon consensuelle entre parties prenantes.

Les figures 2 et 3 illustrent les régimes de satisfaction calculés pour des simulations du SMA avec respectivement comme critère de satisfaction le capital des pêcheurs et un minimum de biomasse acceptable du point de vue de l'agent des pêches qui a participé aux ateliers de modélisation participative. Dans les deux cas, les valeurs de biomasse et le nombre de bateaux sont purement arbitraires, ainsi que les valeurs

de paramètres utilisés dans le modèle, ceux-ci n'étant toujours pas calibrés à l'heure actuelle. Les résultats doivent donc être discutés avec les acteurs impliqués. La discussion portera sur la validité qualitative dans un premier temps, en attendant d'avoir accès à des données réelles.

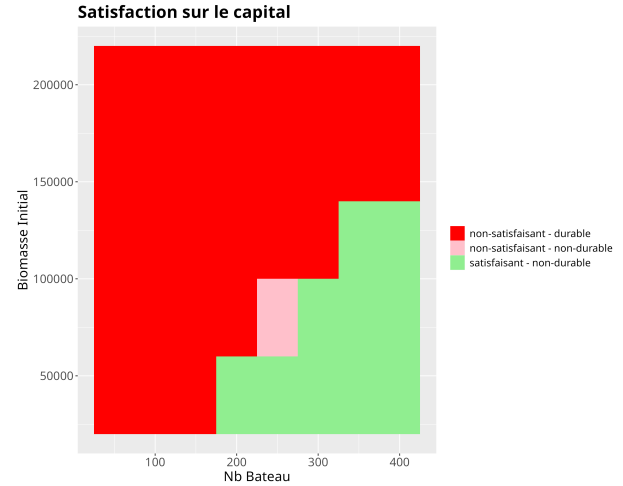


FIGURE 2 – Exemple de régimes de satisfaction calculés à partir des simulations du SMA, avec pour critère de satisfaction le capital des pêcheurs.

Pour ce qui concerne une satisfaction basée sur le capital, nous voyons qu'il n'existe pas une situation satisfaisante et durable. Dans tous les cas le système évoluera vers une situation non satisfaisante. L'absence de régime de bascule peut s'expliquer par l'horizon temporel choisi (10 ans ici), suffisamment grand pour que les trajectoires du système soient toujours dans un régime déterminé (voir [5] pour des explications plus approfondies).

Lorsque nous considérons une biomasse minimum comme critère de satisfaction, la situation semble encore pire, l'espace état/paramètre est presque totalement non satisfaisant, durable, et s'il est satisfaisant, il est non durable. Ici encore, les résultats sont purement illustratifs et ne disent rien de l'évolution potentielle de la pêche du lac de Guiers au Sénégal. Nous utilisons ces résultats ici comme base de discussion sur l'utilisation du calcul de régimes en modélisation et simulation participative.

4 Discussion

Les travaux de J.D. Mathias et *al.* offrent une base très stimulante pour introduire les concepts de durabilité, résilience et changement de régime dans des ateliers de modélisation et simulation

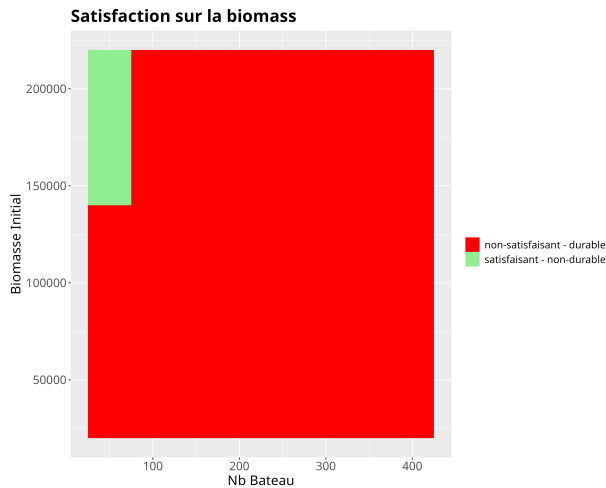


FIGURE 3 – Exemple de régimes de satisfaction calculés à partir des simulations du SMA, avec pour critère de satisfaction la biomasse de poisson présent dans le lac.

participative et la modélisation d'accompagnement. En effet, il est possible de rendre compte de ses différents régimes avec des figures relativement simples à expliquer et interpréter dans un collectif. Leurs travaux permettent de mobiliser des concepts a priori abstraits pour des cas concrets, comme celui de la pêche au lac de Guiers au Sénégal. La qualité des résultats sera dépendante des connaissances sur le système et des discussions entre parties prenantes qui permettront de donner des valeurs aux paramètres clés de l'approche, à savoir l'horizon temporel, les seuils de satisfaction des variables d'intérêt et la valeur des seuils de résilience et de durabilité.

Non seulement il est impossible de statuer sur la nature de l'évolution du système au-delà de l'horizon temporel choisi, mais la stochasticité des systèmes considérés, impliquant de la variabilité dans les résultats, oblige à une vision statistique des domaines d'existence des différents régimes. L'implication pratique est qu'il est donc nécessaire de faire un grand nombre de simulations pour obtenir des trajectoires moyennes. À ceci s'ajoute le calcul des frontières entre régimes qui devient prohibitif pour des modèles en grande dimension (i.e. avec un grand nombre de variables d'états). Ceci contraint les parties prenantes à construire un modèle le plus parcimonieux possible.

En considérant l'exemple du modèle de pêche illustré par les figures 3 et 2, et en imaginant que les ordres de grandeur pour les valeurs des variables et des paramètres soient cor-

rects (ce qui, pour rappel, n'est pas le cas ici), nous avons l'illustration de la position délicate dans laquelle peuvent se retrouver des modélisateurs travaillant avec des acteurs tels que des pêcheurs. Pour de tels résultats, les pêcheurs devraient arrêter leur activité pendant un certain temps avant de pouvoir peut-être la reprendre dans un contexte durable. Ceci pose la question de la place de la modélisation et de la simulation participative dans la prise de décision et l'accompagnement des populations locales. Question complexe déjà largement débattue au sein de collectifs comme celui de la modélisation d'accompagnement par exemple [6].

Les prochaines étapes du processus vont donc consister à restituer aux participants les résultats des simulations abordés conjointement d'un point de vue « viabilité » et d'un point de vue « SMA » en cherchant à expliciter les points entre les deux approches. Nous faisons en effet l'hypothèse que les acteurs ont plus de facilité à discuter autour du SMA du fait de son expressivité. Le processus de traduction vers la formalisation mathématique étant réalisé a posteriori.

Remerciements. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet Santé & Territoires (site web) financé par l'Agence Française de Développement (AFD) et de l'initiative Européenne Development Smart Innovation through Research in Agriculture (DeSIRA).

Références

- [1] *Viability and resilience of complex systems : concepts, methods and case studies from ecology and society*, Guillaume Deffuant, Nicolas Gilbert, Springer ed., pp.233, 2011.
- [2] *Viability Theory*, Aubin J.P, Birkhauser, 1991.
- [3] *Resilience and stability of ecological systems* Holling C.S., Annu. Rev. Ecol. Syst., 4, pp. 1-23, 1973.
- [4] *Defining tipping points for social-ecological systems scholarship—an interdisciplinary literature review*. Milkoreit M., Hodbod J., Baggio J., Benessaiah K., Calderón-Contreras R., Donges J.F., Mathias J.-D., Rocha J.C., Schoon M., Werners S.E., Environ. Res. Lett., 13 (3), 2018.
- [5] J.D. Mathias and G. Deffuant and A. Brias, From tipping point to tipping set : Extending the concept of regime shift to uncertain dynamics for real-world applications, *Ecological Modelling*, Vol. 496, 110801, 2024.
- [6] *La modélisation d'accompagnement : une démarche participative en appui au développement durable*. Etienne M. (coordinateur), QUAE éditions. 367 p., 2010.