

Apport de la simulation d'écologies synthétiques à l'articulation de connaissances multidisciplinaires sur les îles et les milieux insulaires

Pour une représentation intégrée des connaissances sur les éco- et éco-socio systèmes mélanésiens

[Curriculum vitae](#)

[Production](#)

Compétences, approche générale et motivation.....	1
Projet de modélisation	3
Insertion du projet dans les axes de l'UMR.....	8
Contribution au collectif de l'UMR (proposition)	10
Un environnement de travail particulièrement propice	10
Références citées	11
Annexe : Première étude de cas – proposition de contribution au projet ANR AIME	13

Compétences, approche générale et motivation

Écologue naturaliste de formation, ma carrière est consacrée à la modélisation et plus particulièrement à la **représentation intégrée et dynamique de connaissances composites (/pluridisciplinaires)**, le plus souvent de type end-to-end (du plancton au poisson dans l'assiette du consommateur, du gène à l'écosystème) et impliquant Nature et Société qui en use.

En poursuivant ce questionnement, j'ai pu effectuer deux changements assez radicaux de thématique : dans le cadre de mes recherches doctorales j'ai effectué cinq ans de recherches en **radioécologie marine** (conséquences biologiques de rejet d'eaux radioactives en mer) au sein duquel j'ai réalisé une chaîne de modèles mathématiques couplés d'hydrodynamique de type système de Saint-Venant (MARS2D), de trajectoires lagrangiennes, de dispersion et de piégeage sédimentaire de particules jusqu'à un modèle type à compartiment d'accumulation biologique de polluant au sein de bioindicateurs marins sessiles. J'ai consacré la part la plus importante de ma carrière à des travaux de modélisation de type "à base d'agents" en **halieutique** (pêche artisanale au Sénégal et au Chili, écosystème marin et filière pêche en Guinée, écosystèmes marins exploités au sein de l'actuelle UMR Marbec). J'ai dans ce cadre développé des recherches intégrées sur l'ensemble des composantes des filières halieutiques (écosystèmes démersaux et pélagiques, pêche, mareyage...) incluant des travaux sur les processus de décision, de gestion, les indicateurs de développement durable. Enfin, depuis 2007, j'ai poursuivi des travaux de modélisation en **milieu continental** sur les bioinvasions et les transmissions de zoonoses par les rongeurs en Afrique de l'Ouest à plusieurs échelles spatiales et temporelles.

Complexité

Dans tous les domaines que j'ai abordés je me suis intéressé à l'apport de la modélisation pour représenter de façon articulée les moteurs de dynamique intervenant simultanément au sein de domaines et de questions réputés complexes, c'est-à-dire qui impliquent trop de facteurs et de composants distincts pour pouvoir être appréhendés simplement.

Cette recherche s'inscrit dans une démarche méthodologique supposant la notion de système complexe et de complexité organisée représentative des objets explorés par les chercheurs de terrain dans leurs domaines thématiques. La complexité organisée émane de l'effet global d'interactions multiples et dynamiques entre acteurs diversifiés. L'émergence de patrons globaux à partir des comportements des acteurs en présence (Grimm et Railsback, 2005) constitue le fondement de l'approche. Dans cette logique, je m'intéresse principalement à trois signatures des systèmes complexes susceptibles d'être utiles dans la conduite de processus de gestion ou la compréhension des domaines abordés : (i) la diversité des entités et de leurs environnements, (ii) la nécessaire construction dans le temps des systèmes observés et, en combinant les deux, (iii) la singularité des multiples trajectoires individuelles et environnementales comme moteurs des patterns observés et des réponses adaptatives au changement.

En complément de cette approche mes travaux s'alimentent d'un questionnement plus général sur l'apport de la notion de système complexe et de ses multiples facettes⁽¹⁾ qui constituent autant d'architectures et de moteurs concrètement effectifs dans les systèmes et processus naturels et sociaux observés *in situ*.

Ce sont ces notions que je tente de transmettre dans le cadre de mon activité de formation et d'encadrement d'étudiants, le plus souvent du Sud, pour les former à la modélisation de systèmes complexes et à la représentation des connaissances.

Modélisation

Modélisateur, mon approche se fonde sur la construction de modèles dits mécaniquement riches (De Angelis et Mooij, 1997) et l'utilisation d'outils exploitant des formalismes informatiques tels qu'approche objet, systèmes à base d'agents, technologie Internet, systèmes d'information pour représenter de façon dynamique ou statique des connaissances pluridisciplinaires. Je suis préoccupé par la parcimonie, la répétabilité, la pérennité (robustesse) ainsi que la représentativité réelle des modèles de systèmes complexes que nous développons avec les étudiants que j'encadre et les chercheurs de terrain avec lesquels je collabore.

Enfin, je revendique une approche de modélisation ancrée dans le travail de terrain. J'accompagne le plus systématiquement possible les chercheurs thématiques avec lesquels je collabore dans leur travail d'observation *in situ* et je réalise moi-même divers protocoles d'acquisition de données bio et socio-économiques en mer (pirogues, bateaux de pêche, N/O) et à terre (enquêtes, recensements,

1 La complexité se structure en une diversité fonctionnelle et résulte en une idiosyncrasie (Pueyo, 2007) pour laquelle chaque élément est singulier et contribue à la dynamique générale. Cette organisation permet la résilience (Holling, 1973) des systèmes qu'elle constitue. Ces processus sont le plus souvent ontogéniques, c'est-à-dire qu'ils se construisent dans le temps. Ils aboutissent à des phénomènes d'auto-organisation (Von Foerster and Zopf, 1962), d'auto-adaptation (Gell-Mann, 1994), de synchronisation (Strogatz, 2004) et des propriétés telles que la criticalité (Bak, 1996) ou le positionnement à la frontière du chaos (Langton, 1990) qui sont essentiels à la persistance des systèmes constitués dans les environnements changeants dans lesquels ils évoluent.

observatoires) ce qui me paraît indispensable pour saisir les phénomènes à appréhender et la façon dont la recherche les aborde.

Développement d'outils

Mes travaux de recherche et d'ingénierie s'inscrivent principalement dans un questionnement concernant le développement d'outils permettant d'articuler des connaissances pluridisciplinaires pour les restituer de façon intégrée à destination (i) des chercheurs thématiques et (ii) de la société civile (acteurs, opérateurs, décideurs, institutions).

Changement thématique

Mon parcours professionnel a couvert par ordre d'importance l'halieutique, l'écologie marine, le milieu continental ce qui je pense me permet à présent d'appréhender les questions à la fois écologiques et sociétales avec leurs caractéristiques propres et/ou partagées et de contribuer notamment aux recherches liées aux continuums terre-mer ou à la co-viabilité Nature-Société, questions que j'ai déjà abordées en halieutique (Le Fur et al., 1999).

Lors des dix dernières années j'ai développé et mis au point une heuristique fondée sur l'intégration de questions de recherche diversifiées pour aboutir à un modèle général de représentation d'écosystèmes et de paysages (Le Fur *et al.*, 2017, 2021). Cette démarche de « construction itérative d'écologies synthétiques » permet d'intégrer de façon articulée de multiples facettes des systèmes naturels et sociaux à partir du développement de modèles locaux préluces à des généralisations. Les développements réalisés me paraissent à présent assez aboutis et je souhaiterais pouvoir éprouver la robustesse et la pertinence de ce résultat en l'appliquant à un domaine distinct de celui où il a été développé (validation par transposition) mais portant sur des milieux pour lesquels je dispose déjà de compétences, en l'occurrence l'activité bio-écologique en milieu océanique à faible profondeur (plateau continental, récif) et les dynamiques humaines développées autour de ces systèmes.

C'est cette approche que je souhaiterais proposer ici auprès de l'UMR Entropie pour rendre compte des questions complexes liées au milieu insulaire et à la connaissance fonctionnelle de la richesse de la Mélanésie. Mon expérience du milieu continental me permettrait aussi d'apporter un éclairage original et utile (*e.g.*, dynamique de paysages) dans la perspective de ce changement thématique.

Projet de modélisation

Cadre problématique

Dans le domaine couvert par l'UMR Entropie de nombreux phénomènes étudiés empruntent à la fois (i) à des forçages environnementaux et/ou anthropiques agissant de façon globale (axe 1) sur (ii) des habitats composites et changeants (axes 1 à 4), (iii) des entités biologiques actives (individuelles, populationnelles) dont l'évolution est liée à l'expression d'une diversité de traits de vie (axe 2), (iv) des systèmes complexes d'interactions entre entités diversifiées partageant de façon interdépendante (*e.g.*, réseaux trophiques, niches écologiques) les habitats étudiés (axe 3). Ces domaines complexes sont enfin associés (v) à des questions liées à leur gouvernance ou leur gestion (axe 4), questions qui sont difficiles du fait même de la combinaison de ces drivers.

Ces questions doivent souvent être abordées de façon disjointe du fait des différences d'échelles auxquelles elles s'expriment et des approches, méthodes et indicateurs, qui doivent être employés pour les aborder. Cependant, *in situ*, c'est bien l'effet de l'ensemble de ces facteurs combinés qui

s'exprime simultanément lors de l'observation d'un bivalve, un cétacé, une communauté récifale, un pêcheur à la position donnée et au moment particulier où il/elle est observé/e.

La problématique que je propose vise à produire un cadre formel, modeste mais à vocation « canonique », au sein duquel ces moteurs simultanément actifs d'une dynamique donnée pourraient être articulés.

Atteindre de façon formelle l'intégration exhaustive de cette grande variété de connaissances produites par les recherches de l'UMR Entropie est évidemment inaccessible mais chercher à l'atteindre peut conduire à des éclairages (scientifiques, méthodologiques) utiles et des avancées sur la façon dont ces domaines de variation concourent simultanément aux réalités observées, aux domaines à gérer.

Objectif scientifique général

L'objectif de ce travail est l'élaboration à moyen terme d'un modèle générique de type « écologie synthétique » conçu comme un réceptacle s'enrichissant de façon itérative des connaissances acquises à partir de divers questionnements dans le domaine des écosystèmes et éco-socio systèmes insulaires mélanésiens.

Cette étude vise à développer, en utilisant des paradigmes orientés objet de base, et en collaboration avec des thématiciens appartenant à plusieurs disciplines, des écologies synthétiques les plus complètes possibles sur les domaines liés à la connaissance des îles et milieux insulaires. Le modèle objectivé se construit itérativement à partir d'études de cas variées au sein d'un unique modèle. Les études de cas qui seront abordées répondent à des projets spécifiques et distincts mais qui se définissent tous conjointement au sein d'un même domaine d'application ou 'périmètre' que l'on peut idéalement définir comme l'ensemble des connaissances acquises dans le cadre des travaux de l'UMR et de ses partenaires sur le cas particulier et, il me semble, archétypal de la Mélanésie.

L'outil produit des simulations dynamiques au sein desquelles s'articulent des connaissances issues de thématiques pluridisciplinaires en sciences de la Nature (Bio-Écologie principalement, Océanographie) et de la société (Géographie, halieutique, Économie, Sociologie, Sciences des organisations) et décrivant autant de leviers qui conditionnent les dynamiques étudiées au sein des projets.

Le résultat **attendu** est la mise à disposition d'un outil adaptable et partagé avec lequel les spécialistes pourraient comparer les simulations avec la plupart des indicateurs et connaissances auxquels ils sont habitués. En conformant le simulateur aux domaines thématiques abordés, les projets réalisés au sein d'Entropie pourront confronter leurs connaissances à d'autres acquises et intégrées dans les travaux précédents ; le modèle s'enrichissant ainsi de façon continue.

Démarche / Heuristique : développer le modèle par accrétion itérative d'études de cas diversifiées

Des travaux antérieurs (Le Fur, 2013, 2014) ont montré que la complexité écologique ne permet pas de concevoir *ex nihilo* un simulateur capable de représenter la plupart des aspects d'une écologie synthétique. Suivant une approche déjà mise au point (Le Fur *et al.*, 2017, 2021), je propose, à titre d'heuristique, de faire 'croître' le modèle en formalisant successivement des études de cas concrets. L'architecture du modèle est progressivement développée et façonnée à partir de l'intégration d'études de cas successives et variées (acteurs, échelles, processus) répondant à une variété de questions dans le domaine d'application. Chaque nouvelle étude de cas apporte de nouvelles

facettes et de nouvelles contraintes à résoudre pour rendre compte des connaissances de terrain. L'intégration et la mise en cohérence itérative de différents cas permet ensuite de faire évoluer progressivement les structures, la fonction ainsi que les paramètres du modèle et d'avancer dans l'élaboration du modèle synthétique recherché.

Chaque étude de cas est choisie en premier lieu selon l'intérêt des chercheurs thématiques pour un modèle de ce type dans leur domaine. Au-delà, dans le projet de modélisation, nous essaierons de sélectionner des études portant sur des questionnements distincts afin d'éprouver la robustesse du modèle à différents contextes : chaque situation particulière ou cas d'utilisation, une fois intégré, constituera à son tour une contrainte pour les précédents et sera prise en compte dans le code.

Dans ce contexte, la contrainte majeure est la robustesse : A) Le modèle doit être effectivement le plus robuste possible à de multiples contextes pour rendre compte de façon intégrée des différentes sources de fluctuations en jeu dans les écosystèmes ou paysages étudiés et B) La robustesse permet également d'instancier un modèle qui pourrait être interrogé de plusieurs points de vue multidisciplinaires, c'est-à-dire fournir la variété d'indicateurs construits par les thématiques à partir de leurs observations. Enfin, C) l'accrétion de modèles sur plusieurs études de cas suppose une pérennité du modèle intégrateur, pérennité qui ne peut s'envisager sans une architecture qui résiste au changement (de paradigmes informatiques notamment).

Travaux antérieurs en lien avec le projet de modélisation

C'est cet objectif que j'ai particulièrement poursuivi et mis au point en partie lors de ces dix dernières années dans le domaine de la dynamique des populations de rongeurs ravageurs de culture ou réservoirs de zoonoses. Dans ce cadre, le même modèle a permis à ce jour de représenter des questions contrastées incluant des processus historiques, cellulaires, comportementaux, écologiques à l'échelle d'un pays, d'une région, d'une ville ou d'un laboratoire ainsi qu'une diversité d'êtres vivants en interaction :

- l'occupation d'un espace agricole dynamique par une population de rongeurs (collaboration projet interne INRAe)
- une expérience en laboratoire d'hybridation d'espèces jumelles (collaboration projet interne IRD),
- une expérience de capture-marquage-recapture et la réplique des indicateurs spécifiques à cette approche (projet de formation par masters couplés),
- l'histoire du transport commercial au Sénégal sur un siècle et ses conséquences sur l'invasion du pays par le rat noir (collaboration projet ANR Chancira),
- la diffusion de rongeurs invasifs via les marchés ruraux hebdomadaires du Sénégal (collaboration projet FRB Cerise)
- l'écologie de populations de rongeurs invasifs au Sahel incluant comportements, prédation, forçages climatiques, trophiques, environnementaux (collaboration projet FRB Cerise)
- les interactions entre hommes-tiques-rongeurs-bactéries à haute résolution spatiale et temporelle dans une commune sénégalaise dans le cadre d'un observatoire EcoHealth que j'ai conçu et développé (collaboration projet Univ G.Berger, Sénégal, réseau ObsMice)

Démarche formelle : le paradigme objet pour la construction d'écologies synthétiques "bio-inspirées"

L'approche la plus communément retenue en modélisation est de produire une représentation simplifiée d'une situation complexe (modèles stratégiques, Holling, 1966, Evans *et al.*, 2013). Dans le

cas de la modélisation bioécologique, cette approche peut toutefois restreindre chaque application de modèle au cas d'utilisation particulier auquel il est adapté ou sur lequel il est formé (Svoray et Benenson, 2009). Cela exclut notamment la perspective d'une description explicative nécessaire pour produire des prévisions pertinentes dans des systèmes complexes soumis à l'effet d'événements singuliers le plus souvent inattendus, de transitions de phase dans des contextes par nature changeants.

Pour répondre à ce besoin de robustesse l'approche dite des modèles tactiques (Holling, *ibid.*) vise à capturer les mécanismes qui régissent la dynamique du monde réel en développant des copies virtuelles fonctionnant de la même manière que le système objectivé (Svoray et Benenson, 2009). Cette approche visant à élaborer des écologies synthétiques rejoint celle dite des modèles mécanistiquement riches (DeAngelis et Mooij, 2003) au sein de laquelle on cherche à intégrer la plus grande part connue des facteurs produisant la dynamique naturelle étudiée.

Pour aller dans le sens de cet objectif, j'ai retenu comme principe que la Nature intègre de façon cohérente et fonctionnelle toutes les échelles, composantes, processus ; elle constitue de ce fait l'exemple unique d'architecture et de fonctionnement qui répond à la robustesse, à l'exhaustivité et particulièrement à la compatibilité des échelles recherchée. Ainsi, plus la fidélité au « modèle » naturel est grande, plus le gage de robustesse est grand. Je chercherai donc à reproduire les connaissances bioécologiques disponibles avec des schémas de modélisation les plus 'bio-inspirés' possibles (Le Fur *et al.*, 2021).

À la suite de Wirth (2006), j'ai retenu la Programmation Orientée Objet comme approche privilégiée pour développer un modèle le plus proche possible de ce que l'on connaît du fonctionnement de la Nature. Particulièrement, la mise en œuvre de simulations dites "à base d'agents"⁽²⁾ constitue la technique privilégiée pour appréhender cette complexité en utilisant les connaissances disponibles.

Nature du modèle

Le modèle auquel j'ai abouti lors de mes travaux antérieurs se présente comme un ensemble connecté de bibliothèques permettant de formaliser des écologies ou des paysages complexes de différentes natures. Je présente ci-après les caractéristiques de ce modèle déjà mis au point et qui est proposé pour réaliser le projet de modélisation.

Le cœur du modèle est la représentation du comportement animal (homme inclus) au sein duquel les agents prennent des décisions en fonction de leur perception de l'environnement simulé et de leurs désirs associés à leur état (alimentation, reproduction, fuite, compétition, repos, etc.). Ce modèle est construit selon une hiérarchie (approche objet) au sein de laquelle chaque agent hérite des caractéristiques des catégories supérieures (animaux pour la mobilité, gnathostomes pour la prédation, amniotes pour la gestation, ...).

Pour représenter de façon robuste et non limitée une variété d'organismes, les agents modélisés sont dotés de génomés simulés qui agrègent des paires de chromosomes héréditaires par reproduction simulée. Cette partie du modèle représente divers aspects liés à la génétique du vivant (gènes,

2 Un système à base d'agents est un ensemble composé par un environnement délimité par un espace et est utilisé fondamentalement dans l'intelligence artificielle. Cet environnement contient un ensemble d'objets situés et un ensemble d'agents actifs capables de percevoir et de délibérer sur les objets et les autres agents présents dans le milieu avec un rayon de perception défini selon l'agent. D'autre part les systèmes à base d'agents permettent de lier les agents par un ensemble de relations univoques (relations causales ou à sens unique), rétroactives (cycliques) ou interactives (à double sens) avec leurs voisins (*viz.* accointances).

allèles...) et permet de simuler les opérations liées aux génomes tels que méiose, ségrégation, fécondation. Les gènes codent divers traits d'histoire de vie issus de la littérature (rayon de perception, vitesse de déplacement, âge de première reproduction...) codés sous la forme de gènes transmissibles lors des actes de reproduction. Ces gènes sont hiérarchisés en une phylogénie qui exploite le principe d'héritage du paradigme objet pour instancier les traits des agents de façon héritable et cumulative jusqu'aux valeurs spécifiques aux espèces (exemple, Figure 1). Cette part de l'arborescence est considérée comme une base de connaissance utilisable par les agents concrets et permet (du fait de sa nature 'bioinspirée') d'assurer la robustesse nécessaire pour représenter de façon synthétique une diversité non limitée d'être vivants.

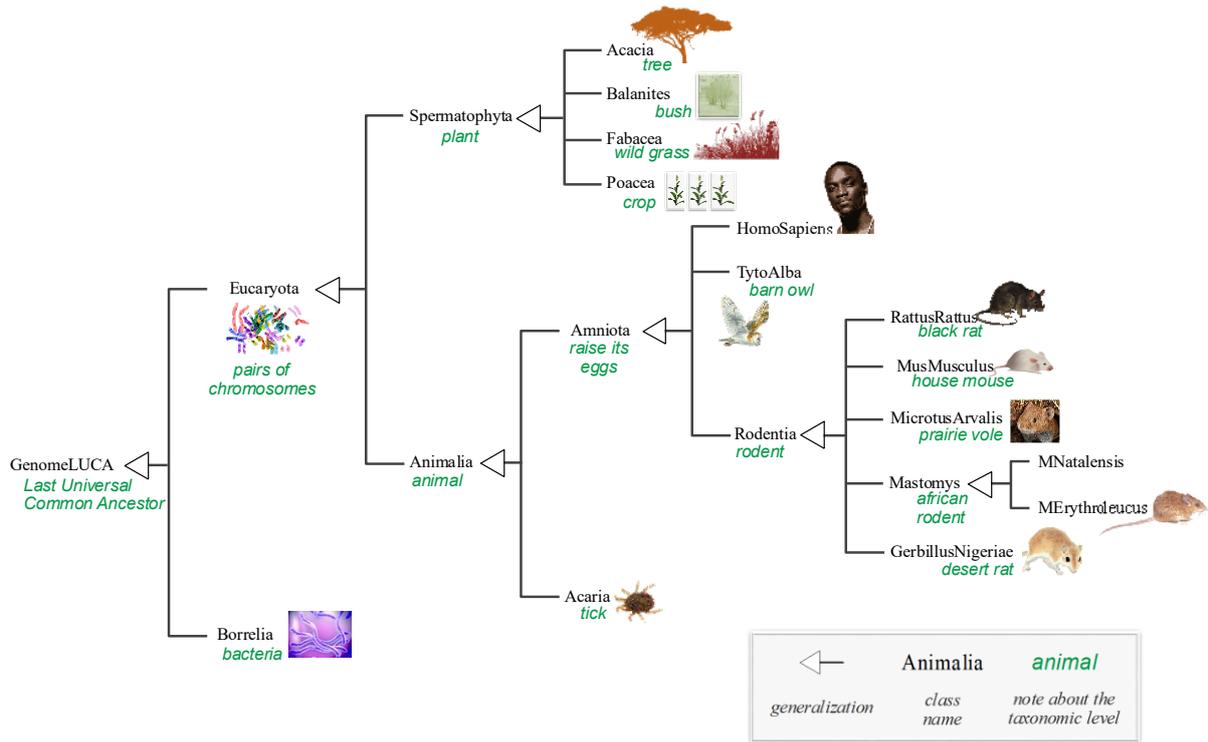


Figure 1 exemple : partie du modèle décrivant la phylogénie résultant de la seule compilation d'études de cas successives sur l'écologie des rongeurs sauvages (Le Fur et al., 2021).

Ces deux modules sont associés à un modèle de représentation de l'espace selon différentes modalités concomitantes : espace euclidien, graphe, grille ainsi que, particulièrement, un formalisme issu de l'approche système complexe pour lequel tout élément passif ou actif de l'univers représenté peut être à la fois un contenant et un contenu le long d'un gradient de granularité. Ce dernier formalisme permet de représenter avec flexibilité une diversité d'entités (voir exemples Figure 2)

- Bacteria —> Tick —> Rodent —> Nest —> Wall —> Household —> Village
- Human carrier —> Truck —> Road —> Trade area —> Country
- Rodent —> Owl —> Nest —> Tree —> Bush —> Savannah
- Embryo —> Rodent —> Cage —> Laboratory

Figure 2 Exemples de représentation emboîtée de composants constitutifs de divers univers modélisés dans l'étude des communautés de rongeurs (Le Fur et al., 2021)

Cet ensemble d'algorithmes est couplé avec diverses bibliothèques qui ont été développées pour représenter les fluctuations spatio-temporelles des environnements selon ici aussi plusieurs modalités. Il s'agit ici principalement (i) des fluctuations spatio-temporelles de paramètres géophysiques, climatiques... formatés par diverses couches géo-référencées permettant d'instancier

les espaces au sein desquels évoluent les organismes représentés ainsi que (iii) un système de gestion d'événements de toutes natures, présenté sous forme de chronogramme (par exemple dans le modèle actuel pluie, route, culture, entrée de nouveaux agents...). Ce dernier système a été développé spécifiquement avec un objectif de généralité (« quand, où, quoi, comment ») et permet de formater selon un même formalisme des connaissances de nature pluridisciplinaires. D'autre part, ce dernier formalisme permet de rendre certaines études de cas interopérables dans le sens où les sorties de simulation d'une instance du modèle peuvent être formatées pour constituer des ensembles d'événements qui peuvent être injectés dans un autre (modèles à plusieurs échelles, exemple [animation 1'33"](#)).

D'autre part, dans le principe, une écologie synthétique doit pouvoir restituer sans limitation les fluctuations des indicateurs utilisés dans les études disciplinaires et qui peuvent être élaborés à partir de l'observation des écosystèmes réels objectivés. Le modèle formalise pour ce faire divers agents chargés d'"enquêtes" au sein des écologies synthétiques et spécialisés, *e.g.*, en dynamique de population, génétique, énergétique, transport, piégeage... Chaque modèle génère ainsi "à la demande" des dynamiques pour une variété d'indicateurs qui peuvent être reconstruits, le plus souvent en collaboration avec les chercheurs thématiques, de façon à pouvoir être comparés avec ceux effectivement obtenus à partir des observations *in situ* ou des sorties d'autres modèles. On peut citer par exemple l'évolution des tailles de population, distances de dispersion, mortalité, natalité, apparemment génétique (FIS).

Chaque étude de cas met en œuvre ce même modèle mais est mise en œuvre séparément via la simulation d'un protocole virtuel dédié qui sélectionne et gère données et paramètres, espaces, agents, biogroupes, indicateurs. Cette approche comporte comme principal avantage d'enrichir en permanence les études de cas passées : l'approche retenue pour le développement du modèle fait que chaque étude de cas récente ou passée peut bénéficier des fonctionnalités développées pour d'autres études de cas. Le modèle s'enrichit ainsi progressivement au bénéfice de toutes les études de cas intégrées⁽³⁾.

Insertion du projet dans les axes de l'UMR

Domaines d'application : Les domaines au sein desquels l'apport du modèle peut être le plus significatif sont ceux au sein desquels on se préoccupe de l'effet des interactions entre une variété d'agents (faune, homme) mobiles réagissant de façon dynamique, et le plus souvent de façon cognitive, à la présence d'autres agents et aux caractéristiques changeantes de leur environnement (*viz.* habitat).

Ce questionnement couvre par exemple les questions liées à la biodiversité fonctionnelle (Guillemot *et al.*, 2011, Vigliola *et al.*, 2018), à l'effet des contextes et des forçages environnementaux (océanographie) et anthropiques (halieutique, tourisme, exploitation minière) sur la distribution spatio-temporelle des communautés et/ou des populations animales et humaines. Les applications de ce questionnement se retrouvent effectivement dans les questions liées à l'occupation des habitats (monts sous-marins, aires protégées, ...) et à leur conservation, à la réponse des

³ Par exemple dans la thématique rongeurs, le tout premier cas d'utilisation permettait en 2010 de représenter un ensemble réduit de désirs possibles (fourrager, se reproduire) utilisés dans le schéma de délibération des agents ; l'ajout des questionnements successifs conduit à présent le même simulateur à rendre compte de comportements liés à la fuite, la dispersion, la protection, l'allaitement. Au fil du temps, la pertinence des simulations pour chaque cas particulier augmente ainsi continuellement.

communautés aux changements de leur habitat, à la dynamique des interfaces terre-mer dans le cadre notamment des relations ressources-usages. Les représentations qui pourront être réalisées pourront servir de support aussi bien à la compréhension de stratégies comportementales d'occupation de l'espace (axe 2 et axe 3) qu'à la production de scénarios pour la planification des systèmes littoraux en appui à la gestion et à la gouvernance (axe 4), à l'étude des processus d'invasion biologique ou aux relations hôtes-parasites.

Ces axes potentiels de recherche pourront être connectés aux données et connaissances acquises dans la caractérisation des habitats et des forçages environnementaux (axe 1) ainsi qu'à la connaissance des traits d'histoire de vie (axe 2) qui peuvent être implémentés directement dans les agents formalisés pour atteindre lorsque nécessaire des représentations de type end-to-end déjà évoquées en introduction.

Enfin, la grande majorité des domaines couverts par l'UMR pourra être appréhendée aussi bien en termes d'habitats (récifs, lagons, monts sous-marins peu profonds, écosystèmes côtiers) que de faune marine (méga-faune, organismes benthiques, poissons, invertébrés) exploitée ou non.

Approche proposée : Le principe de l'insertion du projet dans les problématiques de l'UMR consistera à se mettre à disposition des divers **projets** qui y sont développés en fonction de l'intérêt des chercheurs thématiques pour une représentation intégrée des systèmes qu'ils étudient. J'associerai dans un premier temps cette disponibilité à une étude plus approfondie des thèmes développés (voir section «Contribution au collectif» ci-après) pour élaborer des propositions de collaboration avec les projets pour lesquels le modèle paraît pouvoir apporter des compléments profitables aux questions posées.

Dès à présent des pistes se dessinent pour proposer des collaborations sur les domaines complexes impliquant plusieurs types d'acteur dans des paysages composites (*GAIA*, *SeaMounts*) ainsi que différents leviers responsables d'une dynamique ou d'une situation observée (ex : humains, environnementaux, topographiques, écologiques – *SeaMounts*, *Laurent Vigliola*). Le modèle est je pense de même particulièrement approprié pour caractériser divers habitats et simuler leur usage (*Where*, *SeaMounts*, *Siren*). Il s'est de même montré apte à rendre compte de multiples emprises (avec la résolution correspondante) allant des milieux ouverts (système récifal calédonien - *Track Change*, *Mohsen Kayal*) qui peuvent être de grande emprise (ZEE calédonienne ou Océanie pour simuler par exemple les habitats et les interactions de grands migrateurs - *Where*) ou bien délimités (atolls semi-fermés – *Gaia*, monts sous-marins *SeaMounts*) pour lesquels une approche à haute résolution est pertinente. Dans ces situations contrastées les échelles caractéristiques de temps sont en général liées et aussi variées. L'échelle de temps est paramétrable dans toutes les fonctions dynamiques du modèle (déplacements notamment). Cela permet non seulement d'aborder différentes échelles pour différentes études de cas mais aussi de les modifier au sein d'une même simulation. Sur un autre plan les approches historiques de long terme peuvent être de même envisagées (*Track Changes*) ; elles ont par exemple été abordées avec profit via ce modèle en reconstituant dans le simulateur l'ensemble des événements liés au transport à l'échelle d'un siècle sur l'ensemble et des parties du Sénégal (Le Fur, 2021).

Suivant cette approche, et à l'initiative de Morgan Mangeas, une collaboration sur le projet AIME peut être d'ores et déjà proposée (voir annexe p.13) comme une première étude de cas qui pourra constituer un socle sur lequel se développeront les travaux sur d'autres projets de l'UMR.

Relation avec l'Université : le modèle que j'ai développé a jusqu'à présent constitué un support pour la **formation d'étudiants** en modélisation/informatique, activité pour laquelle je me suis majoritairement investi. En fonction du nombre et de la qualité des étudiants qui pourraient

s'impliquer dans le projet il sera possible d'envisager le développement en parallèle de plusieurs études de cas.

Contribution au collectif de l'UMR (proposition)

Parallèlement à mon activité de modélisation dynamique je poursuis depuis vingt ans des recherches sur la représentation (statique) de la pluridisciplinarité. J'ai dans ce cadre développé et déposé une application dite "Centre d'Informations (CI)" qui permet d'élaborer des systèmes d'information thématiques au sein desquels de petits ensembles d'informations, documentées avec le plus grand soin suivant un circuit qualité, sont interconnectées via la construction d'un réseau de mots-clés qui les caractérisent. Sept instances du CI ont été développées (accès sur <http://centreinfo.science>) jusqu'à présent dont trois exemples permettent d'illustrer son potentiel (Figure 3).

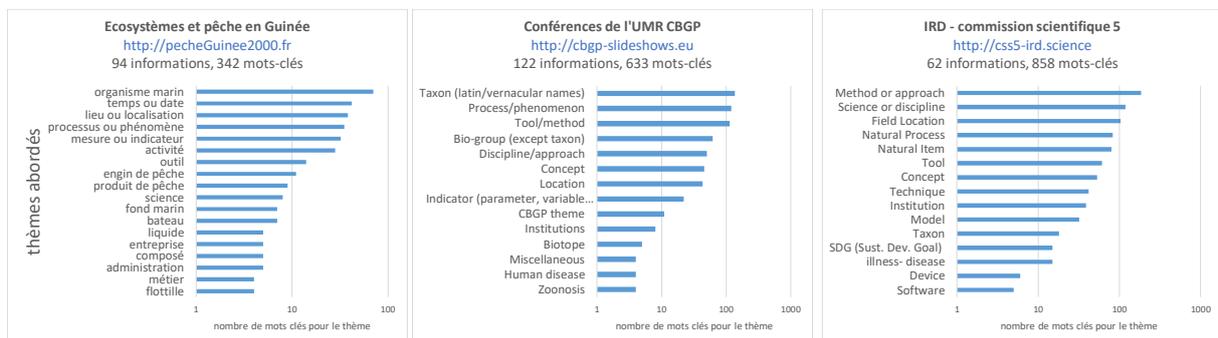


Figure 3 Trois exemples de domaines de connaissance illustrant l'application Centre d'Informations (CI)

Je propose de développer un centre d'informations dédié à la représentation et l'articulation des projets de recherche passés, en cours (et à venir) développés au sein de l'UMR. Ce travail consisterait à caractériser chaque projet en termes de domaines, taxons, questionnements, méthodes, production... La mise en relation produirait progressivement, par émergence, une description du domaine couvert par l'UMR

Cette initiative permettrait de constituer, simultanément :

(i) une base de référence évolutive au sein de laquelle la dynamique des projets de l'unité pourraient être présentée de façon intégrée via la mise en relation des descripteurs et informations clés propres à chaque projet et partagées entre projets.

Les caractéristiques du CI seraient ici particulièrement adaptées à la taille du corpus de projets à documenter (une quarantaine en régime courant selon le [portfolio de l'UMR](#)) ainsi qu'à la nature de l'information à représenter (voir exemple d'informations pour les [compétences métiers de la CSS5](#), la [pêche en Guinée](#), les [conférences de l'UMR CBGP](#)).

(ii) pour la recherche que je propose, une entrée particulièrement adéquate pour aborder et me familiariser, via des entretiens avec les acteurs des projets, avec le panorama des compétences, ressources, recherches de l'UMR.

Un environnement de travail particulièrement propice

Selon les informations dont je dispose l'UMR Entropie regroupe de façon remarquable les éléments qui sont nécessaires au développement d'un tel projet.

Il s'agit tout d'abord d'une couverture très complète des éléments et compétences thématiques importantes à la construction des écologies synthétiques objectivées : l'océanographie, la biologie des populations pour l'implémentation de tous les facteurs de forçage, physiques, traits de vie..., les connaissances sur les interactions au sein des communautés multispécifiques qui seront formalisées ou encore les relations Nature-Société et l'étude des processus intervenant aux interfaces terre-mer. Enfin les initiatives existantes pour le développement d'approches inclusives pourront constituer une base pour développer la valorisation des résultats de recherche auprès des acteurs de la société civile concernés.

Ces corpus de connaissance sont supportés par de nombreux jeux de données exploitables au sein de l'UMR et plus généralement des unités de recherche calédoniennes et les moyens d'y accéder (SIG, portails de données).

D'autre part, l'UMR rassemble une variété de compétences méthodologiques, en modélisation particulièrement, qui offre des possibilités d'interaction riches avec chercheurs et ingénieurs sur une étendue de formalismes (réseaux de neurones, algorithmes génétiques, approches individus centrées, mathématiques, approches bayésiennes).

Du fait de l'implantation en Nouvelle Calédonie, il me sera possible de bénéficier d'un appui de proximité avec les ressources et compétences en informatique qui sont pour moi capitales pour le développement de mes approches (cluster, gestionnaire de version, machines virtuelles, serveurs internet) tant au sein de l'UMR qu'avec un Service Régional des Usages Numériques Innovants (SRUNI) consistant et de qualité, ce qui est aussi décisif.

Le partenariat établi au sein de l'UMR avec l'université de Nouvelle Calédonie constituera de même un atout majeur pour la formation d'étudiants en lien avec la problématique que je souhaite développer ; l'encadrement de masters et de thèse constituant jusqu'à présent une des principales modalités utilisée pour le développement du modèle et des études de cas objectivés.

Enfin, l'UMR Entropie est implantée au cœur du domaine qu'elle aborde, ce positionnement est extrêmement approprié pour l'établissement de la connexion modèle-terrain que je recherche.

Références citées

- Bak, P. (1996). How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. New York: Copernicus. ISBN 0-387-94791-4.
- DeAngelis, D.L., Mooij, W.M., 2003. In praise of mechanistically rich models. In: Canham, C.D., Cole, J.J., Lauenroth, W.K. (Eds.), Models in Ecosystem Science. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, pp. 63–82.
- Gell-Mann, M. (1994). The quark and the jaguar: adventures in the simple and the complex. San Francisco: W.H. Freeman. ISBN 0-7167-2581-9.
- Grimm, V. and S. F. Railsback (2005) Individual-based modelling and Ecology. Princeton University Press, 428p.
- Guillemot Nicolas, Kulbicki Michel, Chabanet Pascale, Vigliola Laurent. (2011). Functional redundancy patterns reveal non-random assembly rules in a species-rich Marine assemblage. Plos One, 6 (10), p. e26735. ISSN 1932-6203.
- Holling, C.S. (1966) The strategy of building models of complex ecological systems. In Systems Analysis in Ecology (Watt, K.E.F., ed.), pp. 195–214, Academic Press

- Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Ann. Rev. Ecol. Systematics*, 4: 1-23 DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245
- Langton, G.C. (1990). Computation at the edge of chaos. *Physica D* 42. doi:10.1016/0167-2789(90)90064
- Le Fur, J., Cury, P., Laloë, F., Durand, M.H. et C.Chaboud (1999) [Co-viabilité des systèmes halieutiques](#). *Nature, Sciences, Sociétés*, vol.7, no2, pp.19-32.
- Le Fur J. (2013) [A formal computer framework for linking multidisciplinary multiscale knowledge. A case study on rodent population dynamics and management](#) In: European Conference on Complex Systems (ECCS), Lisbon, sept 2013
- Le Fur, J. (2014) [De l'éclatement des disciplines à la recomposition d'une réalité partagée. Élaboration d'une structure de modélisation dédiée à l'intégration de connaissances disciplinaires](#). XXIe journées de Rochebrune: "Multi-trans-interdisciplinarité" - Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels - 19-25 janvier 2014. Rochebrune, France
- Le Fur, J., Mboup, P.A. and Sall, M. (2017) [A Simulation Model for Integrating Multidisciplinary Knowledge in Natural Sciences. Heuristic and Application to Wild Rodent Studies](#). 7th Internat. Conf. Simul. and Model. Method., Technol. and Applic. (Simultech), Madrid, July 2017, 8p.
- Le Fur, J., Mboup, P. A. (2021) [Use and Adequacy of Computer Paradigms to Simulate Bioinspired Synthetic Landscape Ecologies](#). Proc. 11th Internat. Conf. Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications: 154-162. DOI: 10.5220/0010601101540162
- Le Fur, J. (2021) Modélisation de la diffusion nationale et centennale. In: Handschumacher P., Lombard J., Diallo M., Duplantier J. et al. (2021) Atlas des relations homme - rat noir - zoonoses au Sénégal : contribution interdisciplinaire à l'approche One Health. Aubervilliers : PRODIG, 2021, 55 p. ISBN 978-2-901560-87-6
- Pueyo, S. (2007) The maximum entropy formalism and the idiosyncratic theory of biodiversity. *Ecology Letters* 10: 1017–1028
- Strogatz, S. (2004) *Sync: The Emerging Science of Spontaneous Order*. Penguin Publ.352p.
- Svoray, T., Benenson, I. (2009). Scale and adequacy of environmental microsimulation. *Ecological Complexity*, 6(2), 77-79.
- Vigliola Laurent, Guillemot N., Wantiez L., Kulbicki Michel. (2018). Functional biodiversity in the lagoon. In : Payri Claude (ed.), Mattio L. (trad.). New Caledonia : world of corals. Marseille ; Nouméa : IRD ; Solaris, p. 115-119. ISBN 978-2-7099-2677-5.
- Von Foerster, H. and Zopf, G.W. (eds) (1962). *Principles of Self-Organization*. Trans. Univ. Illinois. Symposium on Self-Organization, 1961, Pergamon Press.
- Wirth, N. (2006) Good Ideas through the Looking Glass. *Computer*, vol. 39, no. 1, pp. 28-39, 2006.

Annexe : Première étude de cas – proposition de contribution au projet ANR AIME

Le projet ANR AIME vise à exploiter le potentiel des approches de type intelligence artificielle pour quantifier la santé des écosystèmes méditerranéens et néo-calédoniens principalement et produire des estimations des changements de biodiversité au sein de ces systèmes. Pour ce faire, cinq modules (Work Package) correspondant à autant de directions thématiques sont réalisés :

- WP1. La caractérisation de l'évolution des **habitats** et des **pressions anthropiques** par l'analyse d'images satellites au moyen de réseaux neuronaux
- WP2. L'élaboration d'**indices de biodiversité** en utilisant l'analyse par apprentissage de données de metabarcoding
- WP3. La constitution d'une base de connaissance pour l'identification des espèces de poissons coralliens à partir d'images sous-marines traitées par réseaux neuronaux convolutifs
- WP4. La caractérisation des trajectoires et **déplacements de la mégafaune** (requins) à partir d'approches de type apprentissage automatique et réseaux sociaux localisés
- WP5. L'identification par traitement automatique du langage des **interdictions et sanctions légales** à partir de l'analyse des textes juridiques

Le projet AIME vise enfin dans le cadre d'un sixième module (WP6) au développement d'une approche intégrative des résultats obtenus par les autres modules. La méthode privilégiée pour ce faire est fondée sur l'utilisation de réseaux bayésiens dynamiques. On propose dans cette étude de cas de contribuer à cette approche intégrative en complétant l'analyse probabiliste par l'implémentation des résultats issus des cinq modules thématiques, ainsi que des données compilées pour le modèle bayésien, avec le modèle de type "à base d'agents" qui est proposé dans ce document. L'écologie synthétique objectivée se focalisera sur les dynamiques au sein d'un espace correspondant à un sous ensemble de la ZEE calédonienne.

Le domaine retenu sera discrétisé en cellules qui seront caractérisées à partir d'un ensemble diachronique de cartes bâties à partir des résultats des WP 1 et 2. Les valeurs correspondantes seront injectées dans le modèle et renseigneront chaque cellule en termes de diversité et d'abondances. Sur ce domaine seront simulés des agents cognitifs mobiles qui formaliseront *(i)* la mégafaune répertoriée dont les mouvements seront simulés à partir du modèle de comportement de façon à reproduire les trajectoires et distributions identifiés dans le WP 4, *(ii)* des flottilles de bateaux de pêche légale et illégale et des paquebots de croisière touristique qui simuleront la pression anthropique ainsi que, *(iii)* des agents "contrôleurs" représentant *e.g.*, les vaisseaux de la marine nationale et qui formaliseront la mise en application ou non des contraintes et sanctions identifiées au sein du WP 5. Ces derniers pourront alors agir et modifier les caractéristiques des cellules constituant les différentes parties du domaine représenté (préservation/atteinte à la biodiversité).

Je propose de développer une collaboration pour construire un système permettant de rendre les deux modèles (bayésien et à base d'agents) **interopérables**. Le travail effectué au sein du projet AIME pour collationner les données nécessaires au fonctionnement du réseau bayésien et la définition des outputs/cibles pour restituer ses résultats pourront être utilisés comme données d'entrée/consignes au simulateur. Les sorties du simulateur, virtuelles mais beaucoup plus conséquentes que les données issues du terrain, pourront être à leur tour réinjectées comme des scénarios tests pour entraîner le réseau bayésien. L'aller-retour entre modèle probabiliste et modèle mécaniste permettra d'enrichir mutuellement les deux approches pour un résultat plus circonstancié sur l'intégration des résultats issus des modules thématiques.