



HAL
open science

Les expériences virtuelles de simulation comme outils d'aide à la prise de décisions : des données au processus de décision

Paul-Antoine Bisgambiglia

► **To cite this version:**

Paul-Antoine Bisgambiglia. Les expériences virtuelles de simulation comme outils d'aide à la prise de décisions : des données au processus de décision. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université de Corse Pascal Paoli, 2021. tel-03294945

HAL Id: tel-03294945

<https://hal.science/tel-03294945>

Submitted on 21 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



LABORATOIRE
SCIENCES POUR
L'ENVIRONNEMENT
UMR 6134 SPE



**UNIVERSITE DE CORSE – PASQUALE PAOLI
U.M.R CNRS 6134 – SCIENCES POUR
L'ENVIRONNEMENT**

Habilitation à Diriger des Recherches

présentée à

L'UNIVERSITE DE CORSE

Discipline : Informatique

Spécialité : Modélisation et Simulation

par

M. Paul-Antoine Bisgambiglia

Maître de Conférences en Informatique

**Les expériences virtuelles de simulation comme outils
d'aide à la prise de décisions
*des données au processus de décision***

soutenue publiquement le 15 Juillet 2021 devant le jury composé de :

- Rapporteurs :** M. Michaël Krajecki, *Professeur associé, Université de Reims Champagne-Ardenne*
M. Eric Ramat, *Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale*
M. Patrick Siarry, *Professeur, Université Paris-Est Créteil*
- Président :** M. David Hill, *Professeur, Université Clermont Auvergne*
- Examineurs :** M. Philippe Mathieu, *Professeur, Université de Lille*
M. Paul Antoine Santoni *Professeur, Université de Corse Pasquale Paoli*
M. Dominique Federici *Professeur, Université de Corse Pasquale Paoli*
- Garant :** M. Paul Antoine Bisgambiglia, *Professeur, Université de Corse Pasquale Paoli*



LABORATOIRE
SCIENCES POUR
L'ENVIRONNEMENT
UMR 6134 SPE



**UNIVERSITE DE CORSE – PASQUALE PAOLI
U.M.R CNRS 6134 – SCIENCES POUR
L'ENVIRONNEMENT**

Habilitation à Diriger des Recherches

présentée à

L'UNIVERSITE DE CORSE

Discipline : Informatique

Spécialité : Modélisation et Simulation

par

M. Paul-Antoine Bisgambiglia

Maître de Conférences en Informatique

**Les expériences virtuelles de simulation comme outils
d'aide à la prise de décisions
*des données au processus de décision***

soutenue publiquement le 15 Juillet 2021 devant le jury composé de :

- Rapporteurs :** M. Michaël Krajecki, *Professeur associé, Université de Reims Champagne-Ardenne*
M. Eric Ramat, *Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale*
M. Patrick Siarry, *Professeur, Université Paris-Est Créteil*
- Président :** M. David Hill, *Professeur, Université Clermont Auvergne*
- Examineurs :** M. Philippe Mathieu, *Professeur, Université de Lille*
M. Paul Antoine Santoni *Professeur, Université de Corse Pasquale Paoli*
M. Dominique Federici *Professeur, Université de Corse Pasquale Paoli*
- Garant :** M. Paul Antoine Bisgambiglia, *Professeur, Université de Corse Pasquale Paoli*

Pour Gabriel, Benjamin et Virginie.

A mes parents Marie-Paule et Antoine.

Remerciements

Ce n'est pas tant l'intervention de nos amis qui nous aide, mais le fait de savoir que nous pourrons toujours compter sur eux.

Epicure

LES remerciements de mon manuscrit de thèse débutaient par une citation de *Bernard Werber* "J'ai rédigé ce document, mais le plus important dans mon document est ce qui n'est pas écrit".

C'était déjà vrai pour mes travaux de thèse, qui sont à la fois un cheminement intellectuel très personnel et un projet collaboratif réalisé avec son équipe d'encadrement et influencé par nos différentes rencontres.

C'est sûrement encore plus vrai au moment où j'écris ces quelques lignes car plus de dix ans après ma soutenance de thèse, la rédaction de ce manuscrit d'habilitation à diriger des recherches n'est autre que la synthèse de travaux, de rencontres, de discussions, de projets, de collaborations qui ponctuent notre quotidien.

Je vais donc essayer de n'oublier personne, et déjà remercier sincèrement toutes les personnes qui m'ont aidé au cours de ces années.

Ces travaux se sont principalement déroulés au sein de l'équipe Informatique de l'Université de Corse. Cette équipe (TIC puis SiSU) est intégrée au laboratoire Sciences Pour l'Environnement (SPE), Unité Mixte de Recherche CNRS 6134 dirigée par Monsieur *Paul Antoine Santoni*, professeur à l'Université de Corse.

Je remercie chaleureusement tout le personnel administratif de l'UMR pour sa présence, sa bonne humeur et son aide dans tous nos projets, merci à Nicole, Ingrid, Laura, Isabelle, Stéphanie, Laetitia, et François.

Merci également à Thierry, David, Yves, Tony et Fred pour leurs apports plus techniques.

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma profonde sympathie à Monsieur *Paul Antoine Bisgambiglia*, Professeur de l'Université de Corse, qui après avoir accepté de diriger mes travaux de thèse, continue encore aujourd'hui à m'accompagner dans presque tous mes projets. Je ne suis pas en mesure de donner notre lien de parenté et qu'importe car les amis sont la famille que l'on se choisit.

Je souhaite également particulièrement remercier Monsieur *Jean-François Santucci*, Professeur de l'Université de Corse, qui m'a transmis sa passion pour la recherche alors que je n'étais qu'un étudiant.

Je remercie tout autant Monsieur *David Hill*, Professeur de l'Université de Clermont Auvergne, qui est pour moi un exemple et qui m'a beaucoup apporté et fait grandir comme chercheur. Je garde toujours en mémoire un de ses conseils pour l'encadrement des doctorants : "...ton accompagnement ne doit s'arrêter qu'après son recrutement...".

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à Monsieur *Eric Ramat*, Professeur à l'Université du Littoral Côte d'Opale, à Monsieur *Patrick Siarry*, Professeur à l'Université Paris-Est Créteil et Monsieur *Michaël Krajecki*, Professeur associé à l'Université de Reims Champagne-Ardenne, pour le temps qu'ils m'ont consacré et surtout l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'examiner ce mémoire avec autant d'attention.

Je voudrais également dire toute ma reconnaissance à Monsieur *Philippe Mathieu*, Professeur à l'Université de Lille, Messieurs *Dominique Federici* et *Paul Antoine Santoni*, Professeurs à l'Université de Corse Pasquale Paoli, qui me font l'honneur de participer à ce jury.

De la même manière que pour le laboratoire, notre travail pédagogique serait encore plus difficile sans l'aide de Dominique, Nelly, Marie-Josée, Marcel, Anaïs, Andrée, veuillez trouver ici un remerciement bien mince au rapport de vos apports quotidiens.

Un grand merci à toutes l'équipe pédagogique du département informatique, et tout particulièrement à Madame *Evelyne Vittori*, maître de conférences à l'Université de Corse et Madame *Marie-Laure Nivet*, maître de conférences à l'Université de Corse, votre dévouement, votre gentillesse, votre bienveillance à l'égard de vos collègues et de nos étudiants est une vraie source d'inspiration. Vous contribuez à nous rendre meilleurs et pour tout cela merci beaucoup.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Marie-Françoise, Camille, Céline, Nicolas et Paul-Henri, pour nos discussions et collaborations ; Romain et Eric pour notre camaraderie ; le staff du projet MoonFish : Eric, Christelle, Jean-Pierre, Lucie et Céline ainsi que tous nos partenaires ; le staff de la fondation et notamment sa directrice Graziella, mais également Antéa et Alex ; et enfin les participants des projets GOLIAT et ESTATE.

J'ai presque terminé, les meilleurs pour la fin, pour leur soutien perpétuel et sans faille, je tiens à remercier de tout cœur mes beaux-parents *Dominique* et *Jean-Paul*, mon épouse *Virginie* et mes enfants *Benjamin* et *Gabriel*.

Je tiens enfin à remercier et encourager tous les lecteurs qui par nécessité ou curiosité parcourront encore quelques pages de ce document.

Résumé

Dans ce document, nous revenons sur nos 15 dernières années d'activités; d'abord comme doctorant (2005-2008), puis comme enseignant-chercheur contractuel (2008-2011) et enfin en tant que maître de conférences (depuis 2011) à l'Université de Corse. Nous y détaillons nos contributions, notre projet de recherche, nos activités d'administration et d'enseignement.

L'objectif principal de nos travaux de thèse ([Bisgambiglia \(2008\)](#)) était de prendre en compte des données imprécises dans un processus de modélisation et de simulation. Ils ont donné lieu à une proposition d'intégration de la théorie des sous-ensembles flous (Fuzzy-Set [Zadeh \(1975\)](#)) dans un formalisme de modélisation et de simulation à événements discrets (DEVS [Zeigler \(1976\)](#)). Ils se sont poursuivis et se poursuivent toujours avec pour objectif d'intégrer dans les processus de modélisation et de simulation d'autres méthodes de prise en compte de l'incertain ([Dubois and Prade \(1988b\)](#)).

Par la suite, nous avons ouvert nos thématiques à la représentation de systèmes à partir du paradigme multi-agents ([Ferber \(1995b\)](#)) et avons proposé une formalisation d'un système multi-agents à partir des formalismes PDEVS (version parallèle de DEVS permettant de gérer les événements simultanés [Chow and Zeigler \(1994\)](#)) et DSDE (version dynamique de PDEVS introduisant la prise en compte d'une dynamique structurelle [Barros \(1995\)](#)). L'objectif était d'introduire plus de rigueur scientifique dans les simulations multi-agents et de permettre leur reproductibilité numérique (c.f. Dynamic Parallel Discrete Event Multi-Agent Specification : DPDEMAS [Franceschini et al. \(2017\)](#)).

Actuellement, nous travaillons sur des méthodes d'optimisation et d'apprentissage automatique afin de fournir aux agents des moyens pour évaluer l'impact de leurs actions sur l'environnement ([Poiron-Guidoni et al. \(2020b\)](#)). Nous souhaitons proposer une démarche complète pour décrire les processus de décision, depuis la collecte des données jusqu'à la formalisation de modèles de simulation adaptés au domaine d'étude.

Mots-clés : *Modélisation, Simulation, Logique Floue, Systèmes Multi-Agents, Optimisation, Processus de Décision.*

Abstract

In this document, we detail 15 years of activities; first as a PhD student (2005-2008), then as an assistant professor (2008-2011) and finally as a lecturer (since 2011) at the University of Corsica. We describe our contributions, our research projects, our administrative and teaching activities.

The main aim of our thesis work ([Bisgambiglia \(2008\)](#)) was to take into account imprecise data in a modeling and simulation process. They led to a proposal for the integration of the Fuzzy-Set theory, introduced by [Zadeh \(1975\)](#), in a Discrete Event system Specification formalism (DEVS [Zeigler \(1976\)](#)). They continued with the goal of integrating into the modeling and simulation processes other methods of considering the uncertainties ([Dubois and Prade \(1988b\)](#)).

Thereafter, we work to the representation of systems from the multi-agent paradigm ([Ferber \(1995b\)](#)) and proposed a formalization of a multi-agent systems from the formalisms PDEVS (parallel version of DEVS allowing to manage simultaneous events [Chow and Zeigler \(1994\)](#)) and DSDE (dynamic version of PDEVS to change structure dynamically [Barros \(1995\)](#)). The aim was to introduce more scientific rigor in multi-agent simulations and to allow their numerical reproducibility (c.f. Dynamic Parallel Discrete Event Multi-Agent Specification : DPDEMAS [Franceschini et al. \(2017\)](#)).

Currently, we are working on optimization and machine learning methods to provide agents with the means to check the impact of their actions on the environment ([Poiron-Guidoni et al. \(2020b\)](#)). We wish to propose a complete approach to describe decision processes, from data to the formalization of simulation models adapted to the study domain.

Keywords : *Modeling, Simulation, Fuzzy Logic, Multi-Agent Systems, Optimization, Decision Process.*

Table des matières

Remerciements	v
Résumé	ix
Abstract	xi
Avant-propos	1
I Activités de recherche	8
1 Contexte et positionnement en Modélisation et en Simulation	9
1.1 Contexte	12
1.2 Thématiques et positionnement	14
1.3 Résumé des contributions	22
2 La Théorie de la Modélisation et de la Simulation appliquée à la lutte contre les incendies	29
2.1 Contexte : modélisation des imprécisions	30
2.2 Notions de base : DEVS et logique floue	31
2.3 Travaux finalisés	41
2.4 Travaux en cours	60
2.5 Conclusion du chapitre	61
3 Aide à la décision pour la gestion des ressources halieutiques	63
3.1 Contexte : modèles de gestion de ressources et projet MoonFish	64
3.2 Travaux finalisés	67
3.3 Notions de base : les modèles de stocks	81
3.4 Travaux en cours	89

3.5	Conclusion du chapitre	124
4	Projets de recherche	125
4.1	Notions de base : émergence des théories de la décision	127
4.2	Projets théoriques	133
4.3	Projets collaboratifs	139
4.4	Transfert de connaissances	141
4.5	Conclusion du chapitre	144
5	Conclusion de la partie	146
II	Curriculum Vitae détaillé	151
6	Curriculum Vitae	152
6.1	CV synthétique	153
6.2	Activités pédagogiques et administratives	155
6.3	Administration de la recherche	164
6.4	Bilan	175
III	Liste des publications	176
7	Publications	177
7.1	Liste des productions	177
	Table des figures	188
	Liste des tableaux	191
	Bibliographie	192

Avant-propos

LA rédaction de ce manuscrit d’habilitation à diriger des recherches a été pour moi l’occasion de prendre un peu de recul¹ par rapport à mes activités quotidiennes d’enseignement, de recherche et de responsable pédagogique du Master informatique.

Tout au long de nos exposés, nous tâcherons de montrer comment nos travaux, et nos questionnements ont fait mûrir notre vision de la recherche scientifique. Ils nous ont également guidés vers des réflexions et le développement d’une certaine idée des questions scientifiques importantes de notre domaine (la théorie de la modélisation et de la simulation), et de l’activité de recherche en général.

Plus personnellement, il s’agit de faire le bilan d’une quinzaine d’années de vie professionnelle pour analyser d’un regard critique et rétrospectif les travaux poursuivis depuis mon doctorat (2005-2008).

Nos premiers travaux conduits à l’Université de Corse ([Bisgambiglia \(2008\)](#)) avaient pour objectif d’étendre la théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S proposée par [Zeigler et al. \(2018\)](#)) aux théories de l’incertain ([Zadeh \(1965\)](#); [Dubois and Prade \(1986\)](#)). Nous y avons développé une approche de modélisation et de simulation de systèmes naturels à paramètres (données d’entrée et états) imprécis. Puis, nous avons au fil des projets réalisés, des rencontres et des applications, étendu nos champs de recherche :

- aux systèmes d’inférence floue (SIF), pour proposer une approche de modélisation approximative (c.f. [Bisgambiglia et al. \(2018a\)](#)) et plus largement à la logique floue;
- aux systèmes multi-agents² (SMA), pour rapprocher le paradigme agent ([Ferber \(1995a\)](#)) de la TM&S afin favoriser la reproductibilité des simulations en proposant une analogie d’un SMA à partir d’une approche formelle de modélisation (c.f. formalisation DPDE-MAS présentée dans les travaux de thèse de [Franceschini et al. \(2017\)](#)).
- à l’optimisation par simulation (OvS), pour aider à la calibration (c.f. [Poiron-Guidoni et al. \(2020b\)](#)) des modèles et permettre aux agents d’évaluer l’impact de leurs actions

1. Rédaction pendant le confinement de Mars 2020.

2. NB : dans tout notre document nous avons choisi d’utiliser le pluriel à agent.

(décisions).

Ces recherches théoriques ont été développées en collaboration avec des collègues d'autres disciplines et appliquées dans le cadre de plusieurs projets de recherche. En particulier autour d'un projet de gestion et d'optimisation des ressources halieutiques (*MoonFish*).

Projet de recherche Les recherches que nous souhaiterions conduire dorénavant s'ancrent totalement dans le domaine de l'intelligence artificielle comme la représentation des connaissances, l'optimisation par simulation (OvS) et plus particulièrement les processus de décision, le tout appliqué aux systèmes environnementaux où l'incertain et l'aléatoire jouent un rôle important.

L'usage de méthodes d'intelligence artificielle comme l'optimisation, l'apprentissage, etc. et la définition d'un processus de décision inspiré du mode de raisonnement de l'être humain doivent guider ce projet. Les concepts développés pourront être validés dans différents projets applicatifs liés à la gestion des incendies ou à la *bonne* gestion des stocks de poissons. Deux exemples où les processus de décision ont une importance capitale et des temporalités très différentes.

CONTEXTE

Ces activités ont été réalisées dans l'*Unité Mixte de Recherche* (UMR CNRS) *Sciences Pour l'Environnement* (SPE) 6134 au sein de plusieurs équipes de chercheurs telles que :

- le projet *Simulation et Systèmes Ubiquitaires* (SiSU³) qui a pour objectif de concevoir et développer un environnement de multi-modélisation et de simulation. Nous avons contribué aux développements théoriques, que ce soit au niveau de la modélisation et de la simulation (TM&S), de l'utilisation de la logique floue ou des systèmes multi-agents (SMA) ;
- le projet FEUX qui étudie les mécanismes physiques et chimiques en action pendant les incendies ainsi que des aspects liés à la prévention et à la lutte. Au sein de ce dernier, nous avons étudié des modèles de propagation et développé des outils pour la prévention (aide à la prise de décisions) ;
- le projet *Gestion et valorisation des Eaux en Méditerranée* (GEM) qui propose des solutions à la gestion durable de l'eau et des ressources associées. Nous collaborons avec les biologistes et les écologues afin de développer des outils pour une pêche durable et

3. Anciennement *Technologies de l'Informatique et la Communication* (TIC).

responsable. Nous travaillons notamment sur la mise en place de processus d'optimisation et d'apprentissage automatique liés à la pêche afin d'aider à la *bonne* gestion des stocks de poissons.

L'ensemble de ces travaux ainsi que nos activités d'enseignant-chercheur sont détaillés dans la suite de ce document.

ORGANISATION DU DOCUMENT

Ce document présente nos problématiques de recherche passées, celles en cours ainsi que les futures questions scientifiques que nous aimerions aborder. Il est composé de quatre parties qui incluent cette introduction. Dans la partie activités de recherche nous reviendrons sur quinze ans de travaux qui explorent les domaines de la théorie de la modélisation et la simulation (TM&S), la logique floue, les systèmes multi-agents (SMA), l'optimisation, l'apprentissage automatique (ou machine learning) et enfin l'aide à la décision. La troisième partie est illustrée par la figure 1, elle détaille notre CV et nos activités pédagogiques et administratives. Enfin, la dernière partie liste nos productions.

La première partie comprend cinq chapitres qui décrivent nos thématiques de recherche. Nos travaux y sont présentés en suivant le déroulé : motivations, contributions, applications et enfin perspectives.

Dans le premier chapitre (1), nous allons introduire le cadre formel sous-jacent à tous nos travaux à savoir le processus de modélisation et de simulation proposé dans la TM&S.

Dans le deuxième chapitre (2), nous allons présenter nos travaux sur la théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S) appliqués à la problématique des feux de végétation.

Dans le troisième chapitre (3), nous allons décrire les recherches menées sur la gestion des ressources halieutiques dans le cadre d'un programme PO-FEDER (MoonFish).

Dans le quatrième chapitre (4), nous allons détailler nos projets de recherche à venir.

Enfin, dans un cinquième et dernier chapitre (5), nous proposons une conclusion à la partie *activités de recherche*.

Dans la deuxième partie, nous résumons notre parcours universitaire et présentons les aspects pédagogiques et administratifs énumérés sur la figure 1 (chapitre 6).

Enfin, dans la dernière partie, nous listons nos publications (chapitre 7).

NOTE

Pour revenir sur notre choix de plan, nous pouvons énoncer une autre composition ou plutôt une décomposition. Tout au long des 5 premiers chapitres, nous proposons des frac-

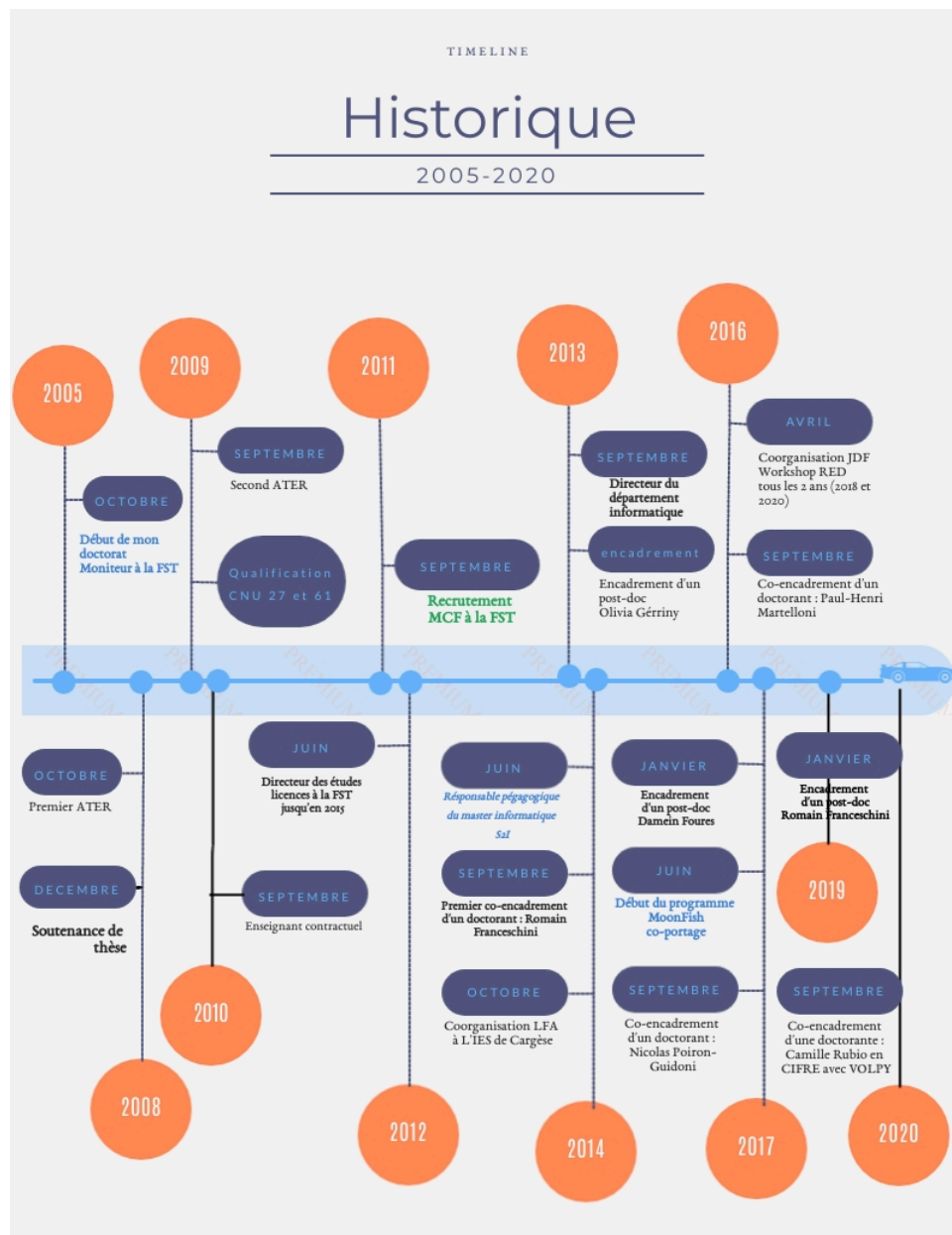


FIGURE 1 – Chronologie.

tions d'état de l'art ou des descriptions des domaines suivants :

- le processus de modélisation et de simulation est décrit dans le chapitre 1 et complété dans le chapitre 4;
- les formalismes DEVS et PDEVS sont présentés dans le chapitre 2;
- quelques notions de base de la logique floue sont également données dans le chapitre 2;

- une analyse des modèles de stocks est proposée dans le chapitre 3 ;
- des éléments d'état de l'art sur les SMA sont donnés dans les chapitres 1 et 3 ;
- l'optimisation par simulation et les métaheuristiques sont détaillées dans le chapitre 3 ;
- un descriptif et un historique des théories de la décision sont proposés dans le chapitre 4.

Un point est à préciser afin de lever toute ambiguïté. Avec le professeur *Paul Antoine Bisgambiglia* nous sommes homonymes et nous partageons les mêmes thématiques de recherche. C'était mon directeur de thèse et c'est aujourd'hui mon garant d'HDR. Dans le reste du document :

- je serai mentionné sous la forme *Paul-Antoine Bisgambiglia* ou *P.-A. Bisgambiglia*,
- mon garant sera mentionné sous la forme *Paul Bisgambiglia* ou *P. Bisgambiglia*.

Enfin, bien que les travaux soient cités et référencés, nous souhaitons préciser les contributions suivantes et par la même occasion renouveler nos remerciements :

- une version proche de la section de présentation du formalisme DEVS (c.f. 2.2.1) a été rédigée à deux mains avec *Gauthier Quesnel* et publiée en introduction d'un numéro spécial de TSI sur les avancées de la TM&S. Ce dernier faisant suite à la co-organisation des conférences JDF 2016 et 2018. Il est également utilisé en introduction des actes des conférences JDF 2018 et JFMS 2020 ;
- la section sur l'activité floue dans les automates cellulaires (c.f. 2.3.2.2) a été rédigée à deux avec *Eric Innocenti* et publiée dans [Bisgambiglia and Innocenti \(2016\)](#) ;
- le logiciel DimZal (c.f. 2.3.3) a été pensé et développé avec *Paul Bisgambiglia*, *Jean-Louis Rossi*, *Joseph Chatelon*, *Thierry Marcelli*, *Romain Franceschini* et *Jean-Pierre Jouault* ;
- l'état de l'art sur les modèles de stocks, section 3.3, est inspiré d'un rapport bibliographique rédigé dans le cadre de l'alternance au laboratoire de *Camille Rubio* ;
- les paragraphes présentant les problématiques en lien avec la reproductibilité sont issus de la thèse de Romain [Franceschini \(2017\)](#) ou d'un texte de *David Hill* intégré dans l'introduction des actes de JFMS 2020 et co-écrit avec *David Hill*, *Raphaël Duboz*, *Fabien Michel* et *Gauthier Quesnel* ;
- les nombreuses réflexions sur les SMA sont notamment inspirées des lectures de la thèse et de l'HDR de *Fabien Michel* (c.f. [Michel \(2004, 2015\)](#)) ;
- la section 3.4.1 sur le calage de modèles a été rédigée avec *Nicolas Poiron-Guidoni* et *Paul Bisgambiglia* dans le cadre d'un projet d'article ;

- les informations sur le programme MoonFish sont issues des documents de dépôt du projet rédigés avec *Eric Durieux* et *Paul Bisgambiglia* ;
- les éléments de la section 3.2.1 sur la courantologie sont issus d'un rapport d'étape rédigé avec *Olivia Gerigny* ;
- la section 3.2.2 sur DPDEMAS est un condensé de la thèse de Romain [Franceschini \(2017\)](#) ;
- le résumé sur l'aide à la décision est inspiré du rapport de [Tsoukiàs \(2006\)](#) qui revient sur l'historique de la discipline ;
- l'application présentée section 3.4.2.2 a été conçue avec *Paul Henri Martelloni* et *Nicolas Poiron-Guidoni*, et publiée dans [Martelloni et al. \(2020\)](#) ;
- le résumé du sujet de thèse CIFRE détaillé dans la section 4.4.1 a été rédigé avec *Baptiste Colombani* et *Quentin Blondel* de l'entreprise Volpy ;
- le résumé du sujet de thèse CIFRE détaillé dans la section 4.4.2 a été rédigé avec *Benjamin Pereney* et *Cédric Tarsitano* de l'entreprise Aflokkat ;
- l'un des premiers réflexes avant le début de la rédaction de ce manuscrit a été de consulter les productions des collègues ayant travaillé dans des domaines assez proches ([Masson \(2005\)](#), [Soulié \(2012\)](#), [Michel \(2015\)](#), [Demazeau \(2001\)](#), [Picault \(2013\)](#), [Batton-Hubert \(2006\)](#), [Zacharewicz \(2014\)](#), [Bachelet \(2016\)](#), [Olivier \(2017\)](#)), outre la grande qualité de leurs documents, ils m'ont grandement inspiré.

Première partie

Activités de recherche

Chapitre 1 :

Contexte et positionnement en Modélisation et en Simulation

Sommaire

1.1	Contexte	12
1.2	Thématiques et positionnement	14
1.2.1	Approche globale de la TM&S	14
1.2.2	Systèmes Multi-Agents	17
1.2.3	Processus de décision	19
1.2.4	Reproductibilité	20
1.3	Résumé des contributions	22
1.3.1	Approche de modélisation approximative pour les systèmes à événements discrets	23
1.3.2	Modélisation et simulation à partir de données approximatives	24
1.3.3	Modélisation et simulation descriptives	24
1.3.4	Vers des simulations cognitives grâce à l'optimisation et l'apprentissage	26

Le moment de la rédaction de son manuscrit d'habilitation à diriger des recherches est particulier. Il force à faire un premier bilan et pose, voire impose, une introspection qui soulève la question de la cohérence des travaux engagés. Y-a-t il forcément une cohérence, un lien, un fil directeur ?

Après tout qu'importe, l'une des facettes qui rend si intéressant notre travail est sa richesse, le nombre de domaines à explorer, la somme de connaissances à emmagasiner et finalement le plaisir ou le vertige procuré par la sensation de savoir, que plus l'on en sait, plus l'on sait que l'on ne sait rien, enfin plutôt pas grand chose !

Ce doute est finalement salvateur car peu importent les thématiques abordées, il peut à lui seul être un fil directeur, seul garant du respect de la méthode scientifique et sa saine culture du doute et de la preuve, telle que définie par bon nombre d'épistémologistes [Russell \(1993\)](#), [Popper \(1973, 1985\)](#), [Wittgenstein \(Chauviré \(2005\)\)](#), etc.

Douter de sa méthode, de ses résultats et attendre la validation par l'observation ou par ses pairs permet de confirmer, parfois, infirmer nos hypothèses, notre approche, nos théories.

Cette étape est l'une des autres facettes de notre travail : la collaboration, le travail d'équipe, nous pousse encore à bousculer nos habitudes et surtout nos acquis.

Ce manuscrit sera donc l'occasion de revenir sur plus de 15 ans d'activités de recherche, d'acquis, de connaissances emmagasinées et surtout de rapports humains au travers d'encadrement de stagiaires, d'alternants, de doctorants, mais aussi de riches discussions avec les collègues, de participations ou d'organisations de conférences, etc.

Si le doute est bien un fil conducteur, un autre fil rouge pourrait être l'utilisation de la modélisation et de la simulation comme outil de création de connaissances.

La simulation numérique s'est aujourd'hui démocratisée, et est devenue un outil décisionnel indispensable (aéronautique, météorologie, etc.), mais certains utilisateurs ont trop souvent tendance à considérer les résultats de simulation comme des résultats réels, alors que c'est un modèle et non le système lui-même qui est étudié. De plus, afin d'être utilisable, un modèle ne doit être ni trop complexe (proche de système), ni trop simpliste (construit d'hypothèses trop réductrices). Cette approche est très bien décrite par [Zeigler et al. \(2000\)](#) et peut être représentée par la figure 1.1.

Cette phase de conception, voire de simplification (mise en avant par le principe de développement logiciel KISS¹), nous engage et devrait nous obliger à douter de nos modèles, et donc à vérifier et valider nos résultats. Ces étapes de vérification et de validation (V&V) des modèles et des résultats sont pourtant souvent négligées (c.f. [Hill \(1995\)](#) et chapitre 7 du livre [Coquillard and Hill \(1997\)](#)).

1. Keep it simple, stupid

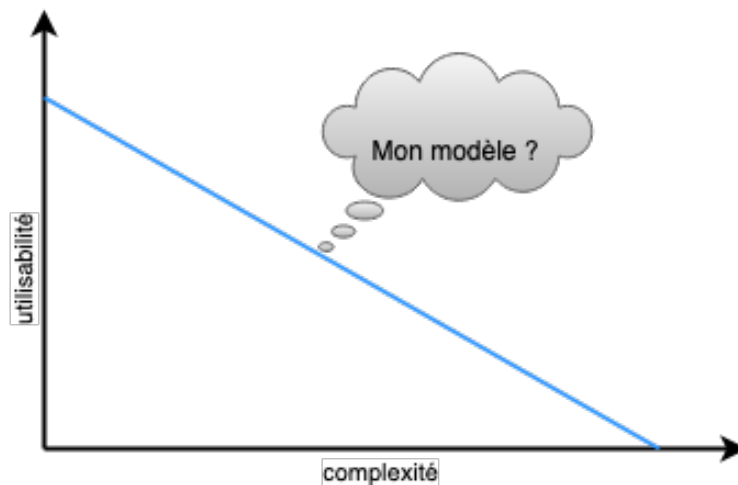


FIGURE 1.1 – Positionnement des hypothèses de modélisation.

Par exemple, nous pouvons lire, dans un article du journal "Le Monde", daté du 2 Octobre 2017, qui a pour titre "*La rigueur scientifique à l'épreuve de la reproductibilité*" [Larousserie \(2017\)](#) : "dès 2005, John Ioannidis, de l'université Stanford, suggérait de façon provocatrice dans un article de PloS Medicine que "la plupart des résultats scientifiques sont faux", car impossibles à reproduire". Dans [Fitzpatrick \(2019\)](#) l'étude de [Freedman et al. \(2015\)](#) est citée et nous pouvons y lire que "même les estimations les plus prudentes de la recherche en biomédecine placent le taux de reproductibilité à moins de 50%".

Tout au long de ce manuscrit nous aborderons la notion de doute dans les différentes phases du processus de modélisation et de simulation : cette notion est ambiguë, car elle amène à s'interroger aussi bien sur la qualité du code de simulation ou des données, que sur l'expertise de l'utilisateur et même sur celle du modélisateur. La qualité de la connaissance, dans sa globalité, et en particulier sur le système étudié, a un fort impact sur les résultats obtenus ou attendus. Dans ce contexte, la conception du modèle, sa contextualisation, son utilisation, sont dépendantes de connaissances imparfaites (incertaines, imprécises, vagues, ambiguës, contradictoires, etc.). Représenter et manipuler ces types de connaissances, ce doute, le quantifier, n'est pas évident. L'impact de la qualité de la connaissance sur la prise de décision est très important.

Des méthodes issues de la logique floue [Zadeh \(1965\)](#) et de la théorie des sous-ensembles flous [Zadeh \(1972\)](#) permettent de manipuler ces connaissances, de mesurer et d'évaluer le doute voire la crédibilité des modèles proposés.

Ces méthodes ont fait l'objet de mes premiers travaux de recherche et ont donné naissance à de nombreux projets plus ou moins liés qui seront détaillés dans les chapitres suivants.

1.1

CONTEXTE

La recherche à l'Université de Corse est structurée en projets pluridisciplinaires. La grande majorité des enseignants-chercheurs en informatique sont intégrés dans le projet "Simulation et Systèmes Ubiquitaires".

Dans le cadre de ce projet (SiSU), nous développons des concepts génériques pour l'étude des systèmes complexes. L'objectif est de les mettre en œuvre dans le cadre d'applications afin d'apporter un éclairage sur des problèmes concrets émanant de la société ou de l'industrie, mais également de la recherche au travers de modèles purement théoriques. La genèse du projet est très bien expliquée dans [Santucci and Capocchi \(2018\)](#). Deux axes complémentaires sont développés :

- le premier concerne la conception et l'exploitation d'un outil collaboratif permettant la construction, la simulation et le partage de bibliothèques de modèles définis sur la base du formalisme DEVS (Discrete Event system Specification) à l'aide du logiciel DEVSIMPy (Python DEVS Simulator) [Capocchi et al. \(2011\)](#). Pour résumer, le thème central est la modélisation et la simulation autour du formalisme DEVS et ses extensions ;
- le second vise à la mise en œuvre de nos concepts dans le cadre de l'étude de problèmes liés au comportement de systèmes naturels ou artificiels, associés à la préservation de l'environnement ou conformes aux enjeux territoriaux de développement économique en région Corse. Les problèmes étudiés concernent la simulation de systèmes à interfaces évolutives (polluants, feux, post-larves), la modélisation centrée individu/groupe (poissons, individus, animaux, robots, pêcheurs, véhicules, etc.), la conception de systèmes d'acquisition et de télécommunication (capteurs) ainsi que l'analyse et le traitement des données (statistiques, inférence, aide à la décision, optimisation par simulation, apprentissage, etc.) [Koeck et al. \(2015\)](#) ; [Foures et al. \(2018\)](#). Pour résumer, les thématiques sont larges et elles regroupent la captation de données environnementales, l'IoT, l'apprentissage automatique, la simulation et l'aide à la prise de décision.

Compte tenu des problèmes traités, ces recherches couvrent un grand nombre de thématiques. Certaines s'insèrent dans le domaine de la théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S) afin de replacer le système étudié dans un processus plus large de modélisation formelle et de simulation reproductible. D'autres s'insèrent dans le domaine de l'Intelligence Artificielle (IA) qui vise à faire coopérer des agents réactifs ou autonomes au sein d'un même environnement; dans celui de la Recherche Opérationnelle (RO) afin de proposer des méthodes d'optimisation; ou encore, le développement d'algorithmes de Machine Learning pour la gestion des ressources environnementales. De plus face à l'évolution des technologies liées au cloud et aux objets connectés permettant de mettre en relation les outils de simulation et les données acquises, des recherches ont été initiées autour des systèmes ubiquitaires, des objets connectés et des réseaux de capteurs sans fils.

Nos travaux s'inscrivent au sein de ces deux axes et nous ont permis de collaborer avec les équipes des autres projets lors de développements d'applications spécifiques liées à l'environnement. Par exemple, une grande partie de nos travaux doctoraux et post-doctoraux a été effectuée en collaboration avec des physiciens de l'équipe **FEUX**. Ces travaux nous ont permis de développer des outils de prévention ou de lutte contre les incendies, voir [Bisgambiglia et al. \(2007b, 2006a\)](#). Ils seront présentés dans le chapitre suivant (2).

Les travaux actuels, liés à la gestion des ressources halieutiques, sont appliqués dans le cadre d'un projet européen nommé **MoonFish**². Ce programme dépend du projet Gestion et valorisation des eaux en Méditerranée (GEM), et il a pour objectifs de faire un état des lieux des ressources halieutiques en Corse et de proposer des outils d'aide à la décision pour évaluer des politiques de gestion.

Après avoir rapidement détaillé le contexte de nos travaux et les projets qui y sont rattachés, nous allons présenter les thématiques scientifiques.

2. Acronyme en anglais qui signifie outils de modélisation pour la gestion durable des ressources halieutiques en Corse - projet PO-FEDER 2017-2021.

1.2

THÉMATIQUES ET POSITIONNEMENT

Les questions de recherche que nous présentons dans ce document sont à replacer dans le cadre de la théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S) introduite par Zeigler (1976) puis complétée et étendue dans Zeigler et al. (2000); Traoré and Muzy (2006); Zeigler et al. (2018). L'approche prônée permet dans un premier temps de poser les bases de la simulation informatique comme science (au sens épistémologique). Elle détaille également les différents artefacts à considérer dans un processus de modélisation et de simulation.

1.2.1 APPROCHE GLOBALE DE LA TM&S

La TM&S propose un cadre formel pour l'étude de systèmes dynamiques et détaille l'ensemble du processus de modélisation et de simulation (c.f. figure 1.2).

Nous devons ainsi distinguer les entités suivantes :

- le système à étudier ou système source ;
- le cadre expérimental (domaine de validité du modèle) ;
- le modèle ;
- le contexte de modélisation (générateur de données d'entrée du modèle) ;
- le simulateur ;
- le contexte de simulation (l'ensemble des données essentielles à la simulation) ;

Dans l'approche que nous développons, un système doit être considéré dans un contexte spécifique, puis modélisé avec des objectifs spécifiques pour donner naissance à un modèle.

L'approche systémique définie dans le cadre de la théorie générale des systèmes par Von Bertalanffy et al. (1973) permettait déjà de décrire formellement une partie des aspects du système. C'est l'une des étapes pour la construction et la description du modèle.

Construire un modèle est un processus particulier : il s'agit non seulement de choisir un cadre théorique, un formalisme pour décrire le système source ou l'objet d'étude, mais également vérifier que l'ensemble est adapté à la question que nous nous posons. Dès la phase

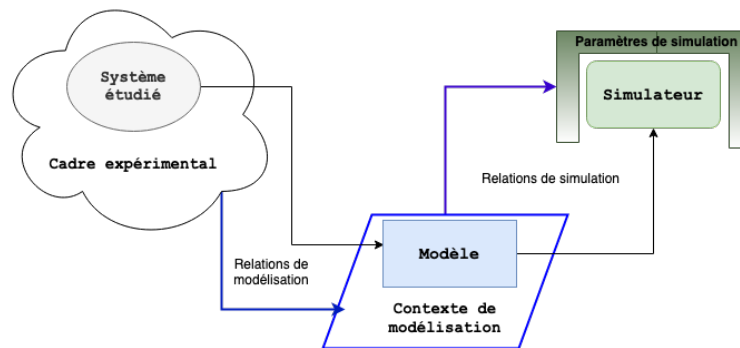


FIGURE 1.2 – Processus de modélisation et de simulation Traoré and Muzy (2006)

de conception il faut prévoir le moyen de vérifier et valider le modèle afin de démontrer qu'il répond bien à la question posée.

Le simulateur désigne l'entité capable d'exécuter les spécifications du modèle. Simuler le modèle c'est donc le mettre en œuvre informatiquement à partir d'un code de calcul. L'un des principes de la simulation consiste à faire varier les paramètres (contexte de simulation) pour voir comment le modèle évolue. Cette étape peut être liée au processus de calibration du modèle, à l'analyse de sensibilité des paramètres mais également à la vérification du modèle.

La démocratisation de la simulation est en grande partie due à l'augmentation de la puissance de calcul, la mise à disposition de grandes quantités de données ou encore l'explosion du nombre d'outils permettant de produire des simulations rapidement et facilement. La simulation peut alors être utilisée sans recul et sans se poser trop de questions sur le domaine de validité des modèles associés et la pertinence des résultats générés.

Dans ce contexte, comme dans Zeigler et al. (2000) et Traoré and Muzy (2006) une distinction claire doit être faite entre les trois niveaux d'abstraction : (1) le cadre expérimental, (2) sa spécification en tant que cadre (contexte) de modélisation (modèle formelle), et (3) sa mise en œuvre (modèle de simulation ou modèle informatique).

La relation de modélisation doit permettre de passer du système au modèle et du cadre expérimental au contexte de modélisation. La relation de simulation lie le modèle à son simulateur et le contexte de modélisation à son contexte de simulation. Il serait essentiel d'intégrer dans les contextes de modélisation et de simulation l'ensemble des données d'exécution de la simulation afin de faciliter l'interopérabilité des modèles et la reproductibilité des expériences de simulation, mais nous y reviendrons.

Un autre atout de la TM&S est important à préciser, dans ses travaux, Vangheluwe (2000b)

montre que cette approche formelle de modélisation peut être considérée comme un formalisme pivot pour décrire plusieurs types de modèles : c'est la multi-modélisation.

Nous pouvons définir la multi-modélisation (c.f. [Vangheluwe et al. \(2002\)](#)) comme le moyen de combiner plusieurs perspectives d'un même système au sein d'une représentation cohérente. Ceci implique la gestion de phénomènes à différents niveaux (micro et macro), à différentes échelles (temporelles comme spatiales), et selon différentes perspectives en associant plusieurs formalismes ou paradigmes de modélisation pour le même problème.

C'est un élément fondateur car il est alors possible de modéliser un système hétérogène en confrontant les points de vue des utilisateurs (modélisateurs), comme par exemple des pêcheurs et des gestionnaires, mais également modéliser à partir d'équations l'évolution de l'environnement. Dans ce cas d'application, la modélisation et la simulation et plus largement la TM&S, multi-modélisation incluse, peuvent être utilisées comme outil d'aide à la prise de décision.

La simulation numérique s'est énormément développée dans tous les domaines où il est possible de représenter des phénomènes par des équations que l'on peut calculer ou simuler à partir de modèles dits de *connaissances*.

Cependant, ces dernières années grâce à l'utilisation des données massives (big data) et de l'apprentissage automatique (machine learning), nous pouvons travailler sur d'autres types de modèles dits de *représentation*. Ces approches centrées sur les données peuvent sortir du cadre de la TM&S car les modèles ne sont pas construits à partir d'équations ou de formalismes mais plutôt après apprentissage automatique.

Si le formalisme DEVS ne s'est pas imposé comme un outil de modélisation et de simulation fondamentale dans la communauté de la simulation, c'est que sa prise en main est difficile. L'effort d'apprentissage est important. Il n'a pas été pensé pour les utilisateurs et comme nous venons de le voir, il n'est pas adapté à toutes les approches notamment les modèles construits par apprentissage automatique.

Chercher à associer la TM&S, les Systèmes Multi-Agents (SMA) et les approches basées sur les méta-heuristiques, pour la résolution de problèmes d'aide à la décision, nous semble très intéressant. Nous pourrions ainsi combiner des modèles de *connaissances* et de *représentation* tout en gardant comme socle fondamental une description formelle des modèles.

Les SMA pour leurs capacités de description, de rapidité de modélisation et la simplicité d'expérimentation, nous semblent être le paradigme idoine à lier à la TM&S.

1.2.2 SYSTÈMES MULTI-AGENTS

Après des années dominées par les approches basées sur des équations, qui ne décrivent le comportement du système étudié que d'un point de vue endogène, la modélisation et la simulation de systèmes complexes ont connu une profonde évolution. L'apparition des systèmes multi-agents (SMA) et des approches basées sur les agents, comme les Agent-Based Modeling and Simulation (ABMS), permettent de décrire les interactions et les comportements exogènes.

Les systèmes multi-agents [Ferber \(1995a,b\)](#) (SMA) permettent de se concentrer sur la description de phénomènes complexes soit au travers des descriptions des interactions entre un agent et son environnement soit au travers du comportement d'un agent ou encore d'un groupe d'agents.

Les agents sont basés sur les notions de coopération et d'autonomie. Ils ne disposent pas individuellement de toutes les connaissances requises leur permettant de résoudre les problèmes, ou n'ont pas les capacités nécessaires pour atteindre leurs objectifs face à une situation donnée.

Un agent agit en fonction de ses objectifs et des changements dans sa zone de perception. Si un événement se produit et que cela peut avoir une influence sur lui ou sur ses actions, il modifiera son comportement en fonction (action/réaction).

[Parunak et al. \(1998\)](#) définit la simulation de systèmes multi-agents comme la représentation directe des comportements, des actions et des interactions d'un ensemble d'entités autonomes (les agents) évoluant dans un environnement commun. [Michel \(2007b\)](#) nous indique que dans ce contexte, la dynamique globale d'un système, au niveau macroscopique, est considérée comme le fruit de la dynamique issue des interactions qui se déroulent au niveau microscopique.

Un peu comme les modèles cellulaires où l'addition des actions d'un ensemble de cellules permet de visualiser un comportement émergent. Le tout étant plus que la somme des parties.

Parmi les nombreuses problématiques liées à cette approche, l'articulation entre ces deux niveaux de modélisation (micro vs macro) est donc fondamentale.

Toujours selon [Michel \(2007b\)](#), déduire la dynamique macroscopique d'un système en fonction de la dynamique du niveau microscopique soulève de nombreux problèmes, techniques et conceptuels, qui sont le plus souvent ignorés. Les modèles multi-agents s'arrêtent le plus souvent aux spécifications du niveau micro (le comportement des agents et l'environnement) et très peu d'éléments concernent la manière dont le niveau macro entre en jeu [David et al. \(2002\)](#).

Il n'y a pas de formalisation clairement adoptée par la communauté mais beaucoup de modèles ont déjà été proposés dont certains comme *IRM4S* s'attaquent à l'articulation "micro-macro" :

1. le modèle *AGR* pour Agent, Groupe, Rôle est basé sur l'association de ses trois concepts clés. Un agent est une entité communicante qui joue un ou plusieurs rôles dans des groupes. Un groupe est un ensemble d'agents. Chaque agent peut appartenir à différents groupes et les groupes peuvent se chevaucher. Un rôle est une représentation abstraite de la fonction, du service ou tout simplement l'identifiant de l'agent dans un groupe. Il est détaillé dans [Ferber et al. \(2003\)](#), et complété dans [Ferber et al. \(2004\)](#) avec l'ajout de la notion d'environnement donnant *AGRE*.
2. le modèle *IRM4S* est proposé par [Michel \(2007a\)](#). Il est basé sur des approches centrées "action" proposées par [Ferber \(1995a\)](#), puis affinées dans [Ferber and Müller \(1996\)](#) sous la dénomination de modèle "influence/réaction". L'objectif est de faire une distinction explicite entre les niveaux de dynamiques de l'agent et du SMA, puis définir leurs articulations. Il est basé sur l'idée que le résultat de l'action d'un agent ne peut être déduit directement de sa prise de décision, ce qui permet de faciliter la représentation de la simultanéité des actions. Le modèle *IRM4S* repose ainsi sur la formalisation d'un mécanisme à deux phases : influence puis réaction. Il permet de modéliser explicitement le résultat, sur l'environnement, de la combinaison d'un ensemble de prises de décisions autonomes et potentiellement simultanées [Michel \(2007b\)](#).

Ces modèles sont pour certains intégrés dans une approche plus large d'aide à la conception du système multi-agents. Nous pouvons citer :

- la méthode *AALAADIN* proposée par [Ferber and Gutknecht \(1998\)](#) repose sur le modèle *AGR*. Elle est présentée comme un Meta-Modèle.
- la méthode *RIO* pour Rôles, Interactions et Organisations qui propose un ensemble de concepts pour concevoir des systèmes multi-agents distribués à gros grains [Secq \(2003\)](#).
- la méthodologie *Gaia* présentée par [Wooldridge et al. \(2000\)](#) est basée sur l'idée qu'un SMA doit être considéré comme une organisation "computationnelle" reposant sur les interactions entre les différents rôles présents dans le système. Son but bien qu'identique à celui d'*AALAADIN* (c'est-à-dire : capturer la structure organisationnelle du système) diffère au niveau de la structure qui, dans *Gaia*, est constituée d'un ensemble de rôles en relation, et qui interagissent selon des motifs d'interaction. Ainsi, *Gaia* propose l'identification de deux modèles : le modèle de rôle et le ou les modèle(s) interaction(s).

- l'approche *Voyelles* décrite dans Demazeau (1995) et complétée dans Ricordel (2001) est un paradigme de décomposition des Systèmes Multi-Agents fondé initialement sur quatre éléments :
 - l'Agent (A);
 - l'Environnement (E);
 - l'Interaction (I);
 - l'Organisation (O);

Cette décomposition permet de moduler le Système Multi-Agents, donc de simplifier la construction du système et d'offrir une meilleure réutilisation du code. Plus récemment, afin de compléter l'approche, la notion d'*Utilisateur (U)* a été rajoutée. "L'utilisateur est maintenant rentré dans la boucle de la conception des systèmes multi-agents, n'est-il pas temps que le concepteur soit mieux associé à la programmation, à la dynamique et à la maintenance des systèmes qu'il conçoit?" Demazeau (2018).

Comme dans la dernière version de l'approche *Voyelles*, il nous semble important de replacer l'utilisateur au centre du processus de modélisation et de simulation.

Dans les SMA, l'agent a une place centrale comme nous venons de le voir, sous sa forme dite *cognitive*, il est le réceptacle de la description des processus de décision.

1.2.3 PROCESSUS DE DÉCISION

Il y a un intérêt croissant de la communauté scientifique pour les questions de structuration et de formulation des problèmes pouvant être résolus par la mise en œuvre des processus d'aide à la décision.

Formaliser le problème est une étape essentielle, le côté utilisateur est donc très important. L'utilisateur énonce le problème et définit l'objet d'étude mais en réalité il n'a pas souvent les idées assez claires pour fournir un modèle rationnel et précis.

La structuration et la formulation des problèmes de décision sont l'une des thématiques des théories de la décision que nous nommerons par commodité dans le reste de ce document processus de décision.

L'aide à la décision n'est pas une action mais bien un processus qui doit produire les éléments suivants :

- une représentation de la situation problématique;
- une formulation du problème;

- un modèle d'évaluation ;
- une ou des recommandation(s) finale(s).

Ces différents éléments ont été formalisés par la communauté de l'aide à la décision. Les détails sont présentés dans [Tsoukiàs \(2006\)](#), nous reviendrons sur ces concepts dans le chapitre 4, section 4.1.

Pour revenir sur l'utilisateur, il peut également lancer des simulations et donc l'outil doit être adapté à ses besoins. Pour que l'outil soit utilisé, il doit être utilisable.

Cet aspect fondamental est très négligé en recherche, il y a pourtant de nombreux travaux en génie logiciel et interface homme machine (IHM) qui définissent les notions d'ergonomie, d'usage et d'utilisabilité [Bastien and Scapin \(1995\)](#) ; [Scapin and Bastien \(1997\)](#).

Nous les présentons dans le cadre d'un cours de développement d'applications web pour définir les concepts d'ergonomie, de design, et d'expérience utilisateur (UX).

En recherche, elles sont le plus souvent associées à des problématiques potentiellement résolues par ingénierie dirigée par les modèles (IDM) [Garredu et al. \(2012\)](#) ou de langage spécifique (DSL) [Franceschini et al. \(2014a\)](#).

Au final, la simulation est bien un outil d'aide à la prise de décision, à intégrer dans le processus de décision, mais toute décision demande réflexion.

Les prévisions météorologiques sont un bon exemple, elles peuvent se tromper mais porter une veste alors qu'il ne pleut pas entraîne peu de conséquences voire pas. Dans certains cas critiques l'approximation ne peut être tolérée, le doute doit être maîtrisé pour renforcer la confiance dans l'outil et la crédibilité des résultats. La reproductibilité des expériences de simulation est une étape majeure pour obtenir de la crédibilité.

1.2.4 REPRODUCTIBILITÉ

L'idée première derrière la notion de reproductibilité est que l'on puisse reproduire une expérience qui a été partagée au sein de la communauté scientifique dans le but d'obtenir les mêmes résultats.

Dans le cadre d'expériences numériques, [Fitzpatrick \(2019\)](#) ; [Dao et al. \(2016\)](#) ; [Dao \(2017\)](#) ; [Hill \(2015, 2017\)](#) ; [Hill et al. \(2017\)](#) proposent un état de l'art et des définitions issues de la littérature.

Deux dimensions de la reproductibilité y sont dégagées : (1) la reproduction de l'expérience numérique et (2) la reproduction exacte du résultat calculé, c'est-à-dire la reproductibilité numérique ou répétabilité dont nous avons besoin ne serait-ce que pour mettre au point les programmes numériques sur un ordinateur.

La nuance entre reproductibilité et répétabilité est également mise en avant : la répétabilité *consiste à retrouver les mêmes résultats lorsque deux expériences sont menées avec les mêmes paramètres d'entrées, avec des matériels, des méthodes et des contextes identiques.*

La reproductibilité se veut elle plus générale que la répétabilité. Parmi les apports de la reproductibilité, [Dao et al. \(2016\)](#) nous rappellent qu'elle " *constitue une méthode et un standard pour juger de la pertinence d'une expérience numérique publiée et donc des conclusions qui en découlent*". Entre la notion de répétabilité et de reproductibilité, différents degrés sont suggérés dans la littérature. La reproductibilité implique des changements, mais l'obtention de la même conclusion scientifique. La répétabilité par contre exclut les changements. Elle n'est donc pas un élément de la démarche scientifique au sens de *Popper*, mais elle est essentielle en informatique de par le fait qu'elle permet la mise au point des programmes [Hill et al. \(2017\)](#).

[Dalle \(2012\)](#) propose par exemple quatre niveaux de reproductibilité, (1) selon la disponibilité du code source, (2) les aspects non-déterministes du calcul, (3) la similitude du plan d'expérience et (4) des sorties du modèle. Dans leurs travaux, [Stodden et al. \(2013\)](#) définissent également plusieurs niveaux de reproductibilité :

- l'examen par les pairs, qui est la méthode traditionnelle de publication (les travaux et résultats décrits sont jugés crédibles par la communauté scientifique) ;
- la recherche répliquable, où les outils permettant de reproduire les mêmes résultats sont fournis ;
- la recherche vérifiable, où les mêmes conclusions peuvent être atteintes indépendamment du code source fourni par l'auteur ;
- la recherche validable, où suffisamment de ressources (sources et données) sont archivées afin de permettre de défendre les résultats fournis ;
- la recherche ouverte, où tous les éléments utilisés pour arriver aux résultats présentés sont fournis en accès libre et documentés.

Les conclusions établies par [Stodden et al. \(2013\)](#), [Hill et al. \(2017\)](#), [Dao et al. \(2016\)](#), [Dalle \(2012\)](#) se rejoignent, et nous pouvons les résumer de la manière suivante : pour permettre un degré de reproductibilité se rapprochant de la " *recherche ouverte*", un changement dans la culture de publication est nécessaire. Ce changement doit être impulsé non seulement par les auteurs, mais également par les éditeurs. Il est recommandé aux premiers de fournir les éléments permettant de reproduire l'expérience de simulation (données, code source, etc.), et aux seconds d'encourager cet effort durant le processus de publication en offrant les supports numériques d'archivage et de diffusion de ce contenu.

Des efforts sont faits, par exemple dans le formulaire d'examen des articles de la conférence [SpringSim 2020](#) est apparu un item d'évaluation portant sur la reproductibilité des résultats de simulation.

Il y a également de nombreuses initiatives de la communauté comme un [MOOC](#) de l'INRIA " *Recherche reproductible : principes méthodologiques pour une science transparente*" qui met en avant l'utilisation des outils :

- Markdown pour la prise de notes structurées;
- des Outils d'indexation (DocFetcher et ExifTool);
- Gitlab pour le suivi de version et le travail collaboratif;
- Notebooks (Jupyter, Rstudio ou Org-mode).

Ce processus d'échange des méthodes, codes et protocoles d'expériences augmente la confiance dans les résultats. Il est donc en partie garant du respect de la méthode scientifique.

La TM&S en permettant de lever les ambiguïtés de description des modèles et en proposant une sémantique univoque de simulation peut aider à résoudre certains problèmes de reproductibilité notamment en simulation multi-agents.

L'intégration de ces concepts dans un SMA renforcera la crédibilité des conclusions des simulations et aidera à la démocratisation de l'outil comme moyen de gestion (aide à la décision). Nous avons abordé ces aspects dans les travaux de [Franceschini et al. \(2017, 2018b\)](#) présentés dans la section 3.2.2.

Ces bases théoriques sont au cœur de nos réflexions et projets de recherche que nous allons détailler par la suite.

1.3

RÉSUMÉ DES CONTRIBUTIONS

Dans cette section, nous avons appliqué une présentation principalement chronologique des projets.

1.3.1 APPROCHE DE MODÉLISATION APPROXIMATIVE POUR LES SYSTÈMES À ÉVÈNEMENTS DISCRETS

Le premier, le plus important car il m'a vu naître professionnellement, est mon travail de thèse ([Bisgambiglia \(2008\)](#)). L'objectif principal était de prendre en compte des données imprécises dans un processus de modélisation et de simulation. Il a donné lieu à une proposition d'intégration de la théorie des sous-ensembles flous (Fuzzy-Set) dans le formalisme de modélisation et de simulation à événement discret DEVS. Le formalisme DEVS a été développé par le professeur *B.P. Zeigler* (ouvrages de référence [Zeigler \(1976\)](#); [Zeigler et al. \(2000, 2018\)](#)) dans le cadre de la théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S). Il propose deux apports fondamentaux : un cadre de modélisation inspiré des méthodes formelles et une séparation explicite des étapes de modélisation et de simulation rendant le modèle indépendant du simulateur. Ces éléments permettent dans une certaine mesure de séparer l'approche descriptive du modèle de sa vérification par la simulation, et le partage du modèle en vue de sa validation par les pairs ce qui est une première étape dans le cadre de la mise en place d'une démarche reproductible [Hill \(2015\)](#).

La théorie qui permet de représenter et manipuler les imprécisions est la théorie des sous-ensembles flous (FST). Elle est, pour sa part, un des éléments de la logique floue introduit par [Zadeh \(1975, 1976\)](#). Elle permet, sur une base mathématique forte, de décrire plus simplement le processus de raisonnement humain emprunt de doutes, d'impressions, d'incertitudes, d'approximations.

Lotfi Zadeh a introduit une généralisation des ensembles réels, appelé sous-ensemble flou (Fuzzy-Set FS [Zadeh \(1972\)](#)). Les sous-ensembles flous définis dans \mathbb{R} sont des nombres flous. Un nombre flou est une extension d'un nombre réel dans lequel la valeur (abscisse) correspondant à l'élément et son poids compris entre zéro et un (ordonnée), est appelé degré d'appartenance. Les nombres flous les plus couramment utilisés sont basés sur des fonctions d'appartenance de forme triangulaires, trapézoïdales ou paraboliques (c.f. [Dubois and Prade \(1986\)](#)). Comme les nombres flous décrivent des situations du monde physique de manière plus réaliste que les nombres réels, ils sont souvent utilisés pour décrire ou quantifier des données imprécises.

1.3.2 MODÉLISATION ET SIMULATION À PARTIR DE DONNÉES APPROXIMATIVES

Mes travaux de thèse se sont ensuite poursuivis avec pour objectif d'associer, toujours au formalisme DEVS, d'autres éléments de modélisation de l'incertain afin de faire bénéficier la communauté de la TM&S des apports de la logique floue [Bisgambiglia et al. \(2018a\)](#).

Nous pouvons par exemple lister la description d'une structure de modèles DEVS pour représenter un système d'inférence flou (SIF) [Bisgambiglia et al. \(2009a\)](#); [Bisgambiglia and Innocenti \(2016\)](#).

Le principe d'un système d'inférence flou [Glorennec \(1999\)](#); [Guillaume \(2001\)](#), est de pouvoir calculer des valeurs de sortie en fournissant à un modèle un ensemble de règles formulées en langage naturel de type : *Si A alors B* (implication logique). Pour faire un lien entre les données d'entrée, les règles et les valeurs de sortie, le modèle est décomposé en trois sous-parties.

La première permet de traduire une donnée numérique d'entrée en une variable linguistique. C'est la fuzzification. Grâce aux fonctions d'appartenance nous pouvons transformer une donnée quantitative en variable linguistique qualitative. Par exemple 30° correspond à une température extérieure chaude. Après fuzzification, on aurait donc des températures qui pourraient être soit froides, soit moyennes soit chaudes au lieu de correspondre à une valeur numérique.

La seconde partie est le moteur d'inférence qui se chargera d'appliquer chacune des règles d'inférences. Celles-ci représentant les connaissances que nous avons sur le système grâce à l'expertise humaine. Par exemple s'il fait froid, je mets une veste.

Enfin, la troisième partie est la défuzzification. C'est l'étape permettant de fusionner les différents éléments générés par le moteur d'inférence afin de donner une sortie et de transformer la variable linguistique de sortie en données numériques.

Le bilan de ces travaux permet de dégager une première thématique de recherche autour de la prise en compte de données, décrites par des experts et donc, sujettes à interprétations, doutes, approximations. Ces données peuvent être utilisées comme des entrants ou comme des paramètres propres à certains modèles.

La question de la confiance dans les données est alors ouverte.

1.3.3 MODÉLISATION ET SIMULATION DESCRIPTIVES

Ce projet a débuté par une collaboration avec des courantologues de l'IFREMER, puis des écologues de l'UMS Stella Mare. Il ouvrait une nouvelle voie dans nos recherches orientée

vers des applications en gestion de ressources halieutiques.

Les premiers travaux avaient pour objectif de mieux comprendre les phénomènes courantologiques en Méditerranée afin d'affiner nos connaissances sur le recrutement³ des post-larves.

Les résultats préliminaires obtenus à partir d'un logiciel spécifique développé à l'IFREMER ichthyop⁴ [Gérigny et al. \(2015\)](#); [Koeck et al. \(2015\)](#), nous ont conduits à repenser notre utilisation du formalisme DEVS afin de faciliter sa prise en main par des non-informaticiens.

Dans un premier temps, nous avons initié nos travaux en nous basant sur l'ingénierie dirigée par les modèles (IDM) [Garredu et al. \(2007, 2012\)](#). Puis, nous avons orienté nos recherches à partir d'un paradigme de modélisation très "descriptif" comme les Systèmes Multi-Agents (SMA).

Depuis plus de 30 ans et les premiers travaux dans cette branche de l'intelligence artificielle, la simulation multi-agents a été appliquée avec succès à la plupart des domaines scientifiques.

Les SMA, par leur faculté à simuler des comportements individuels simples, comme les agents réactifs, ou compliqués, comme les agents cognitifs, et à les mettre en situation d'interaction avec leur environnement, sont des systèmes particulièrement adaptés aux simulations dites centrées individus, où chaque agent possède ses propres caractéristiques et son propre comportement, par opposition aux simulations centrées groupe, dans lesquelles on travaille plutôt sur des lois de masses.

Dans notre cas les deux approches sont intéressantes afin de modéliser soit des stocks de poissons (groupe) soit des pêcheurs (individu).

De nombreux travaux existants associent le formalisme DEVS et les SMA, nous avons décidé de les poursuivre en repartant des dernières évolutions du formalisme DEVS avec sa version parallèle PDEVS [Chow and Zeigler \(1994\)](#), Dynamic Structure of Discrete Events (DSDE) une extension permettant de prendre en compte les changements structurels [Barros \(2003\)](#) et l'approche IRM4S [Michel \(2007a\)](#) qui propose un cadre formel pour faciliter l'utilisation du principe Influence/Réaction [Ferber and Müller \(1996\)](#) dans les simulations multi-agents.

Ces travaux, effectués dans le cadre de la thèse de *R. Franceschini*, avaient également pour objectif de mettre au cœur de la problématique la nécessité d'utiliser une approche formelle de description des modèles et aussi se concentrer sur la reproductibilité des expériences de simulation [Franceschini \(2017\)](#).

3. le recrutement est le processus d'ajout de nouveaux individus à la population d'une espèce par la naissance, l'immigration ou l'implantation dans un milieu de vie

4. <https://www.ichthyop.org/>

Ils ont débouché sur la proposition d'un nouveau formalisme de modélisation et de simulation (DPDEMAS⁵) qui permet de décrire, à partir de modèles DSDE, un environnement et des agents scindés en deux éléments leur corps, qui est plongé dans l'environnement, et leur esprit qui gère le ou les corps [Franceschini et al. \(2017\)](#).

1.3.4 VERS DES SIMULATIONS COGNITIVES GRÂCE À L'OPTIMISATION ET L'APPRENTISSAGE

Nous avons ensuite souhaité poursuivre nos recherches dans le cadre d'une autre thèse afin de développer l'esprit des agents et ainsi permettre la définition d'agents cognitifs. L'objectif de ces travaux est de compléter l'approche existante en s'appuyant sur les structures cognitives de décision afin de complexifier l'esprit des agents. Ils sont appliqués dans le cadre du projet *MoonFish* et doivent permettre de décrire les comportements autonomes des pêcheurs.

Enfin, d'autres travaux ont été initiés dans la même période, toujours appliqués dans le cadre du projet *MoonFish*. L'objectif de cette nouvelle thèse est de s'appuyer sur les méthodes d'optimisation, et notamment les heuristiques, afin d'affiner les données imparfaites (imprécises et/ou incertaines) utilisées dans les modèles.

L'un des objectifs est d'améliorer la phase de calibration des modèles et dans notre cas l'appliquer aux modèles de stocks. Les modèles sont généralement caractérisés par de nombreux paramètres qui déterminent la dynamique globale du système étudié. L'espace des paramètres peut alors être gigantesque (au sens où la sensibilité et les interactions entre les paramètres peuvent rendre l'espace des solutions exactes ou acceptables infini). L'un des aspects importants dans la modélisation est lié à la mise au point des paramètres du modèle ([Calvez \(2007\)](#)). Ces paramètres peuvent être fixés par étude de sensibilité ou expertise puis affinés lors de la phase de calibration.

L'idée dans ces travaux est de voir la calibration comme un problème d'optimisation et l'objectif est d'identifier les jeux de paramètres qui optimisent nos résultats de simulation. Dans ce cas, la simulation numérique, couplée au processus d'optimisation, doit permettre d'identifier les meilleures solutions applicables. L'approche développée doit également être utilisée pour tester des stratégies (politiques) de pêche et définir quelles sont les meilleures pour les pêcheurs et l'environnement [Poiron-Guidoni et al. \(2019\)](#).

Le bilan de ces travaux permet de dégager une seconde thématique de recherche autour de la modélisation et la simulation des incertitudes dans les algorithmes d'optimisation, et d'apprentissage. La problématique peut être élargie à la proposition de modèles de raison-

5. DPDEMAS pour Dynamic Parallel Discrete Event Multi-Agent Specification.

nement et de décision basés sur des formalismes de modélisation et de simulation comme DEVS ou les SMA. Dans le cadre de la proposition d'outils d'aide à la décision, la question de la confiance dans les données, les modèles et les résultats de simulation est alors essentielle !

Nous allons maintenant suivre la chronologie énumérée dans la section contributions. Dans le chapitre (2), nous présenterons nos travaux sur la théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S) appliqués à la problématique des feux de végétation. Nous y décrivons une approche de modélisation approximative pour les systèmes à événements discrets.

Chapitre 2 :

La Théorie de la Modélisation et de la Simulation appliquée à la lutte contre les incendies

Sommaire

2.1	Contexte : modélisation des imprécisions	30
2.2	Notions de base : DEVS et logique floue	31
2.2.1	Le formalisme DEVS	31
2.2.2	Logique floue	36
2.3	Travaux finalisés	41
2.3.1	iDEVS : Modélisation et Simulation des Imprécisions	41
2.3.2	Fuzz-iDEVS : Modélisation, Simulation et Logique Floue	48
2.3.3	DimZal : Dimensionnement d'ouvrage	55
2.4	Travaux en cours	60
2.4.1	GOLIAT : Outils d'aide à la décision	60
2.5	Conclusion du chapitre	61

2.1

CONTEXTE : MODÉLISATION DES IMPRÉCISIONS

Nous avons initié nos recherches au sein du laboratoire de l'UMR SPE 6134 avec la proposition d'une approche de modélisation et de simulation des imprécisions dans les systèmes dynamiques et en particulier dans les phénomènes de propagation en lien avec la lutte ou la prévention des incendies. En effet, au début de nos travaux il n'y avait pas de projet informatique dans l'unité. Nos études devaient être appliquées aux thèmes du laboratoire, à savoir les incendies, les énergies renouvelables, les ressources naturelles ou la gestion de l'eau. Depuis la création d'un projet purement informatique au sein de l'UMR SPE, nous développons des approches plus théoriques et nous continuons à appliquer ces avancées en relation avec les autres projets.

Composée de physiciens, de chimistes et d'informaticiens, l'équipe du projet **FEUX** travaille depuis maintenant plusieurs années à la compréhension des phénomènes et développe des modèles et des outils de prévention et de lutte. Cette collaboration nous permet d'appliquer les concepts théoriques développés en informatique à partir de modèles physiques.

Nous avons utilisé trois types de modèles.

- Certains s'emploient à décrire de manière plus ou moins pointue tous les mécanismes mis en œuvre, à l'aide d'équations physiques ou mathématiques [McArthur \(1966\)](#); [Rothermel \(1972\)](#); [Weber \(1991\)](#); [Grishin \(1997\)](#); [Balbi et al. \(2010\)](#).
- D'autres, plus proches d'un raisonnement à l'échelle du terrain, considèrent qu'un grand nombre de paramètres peuvent ne pas être pris en compte [Sasikala and Petrou \(2001\)](#); [Vakalis et al. \(2004\)](#); [Iliadis et al. \(2001\)](#); [Ntaimo et al. \(2008\)](#); [Rossi et al. \(2011\)](#). Ils sont souvent décrits comme des modèles semi-physiques ou semi-empiriques.
- Enfin, des modèles adaptés aux propagations cellulaires [Mraz et al. \(2000\)](#); [Muzy et al. \(2002\)](#); [Innocenti et al. \(2009, 2014\)](#). Ces modèles décrivent localement la combus-

tion d'une zone de végétation homogène (cellule) possédant une masse et une température et une méthode détaillant comment les zones adjacentes peuvent être touchées.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les travaux passés et en cours dans le cadre de la prévention et la lutte incendie. Ils sont bivalents en proposant à la fois des contributions théoriques dans le cadre de la théorie de la modélisation et de la simulation et des applications concrètes, dont un cas d'application qui a fait l'objet d'une déclaration d'invention à la **SATI Sud-Est** (DimZal¹). L'objectif est de contribuer à l'élaboration d'outils d'aide à la prise de décision.

Ce chapitre est structuré en quatre sections. Dans la première, nous proposons une description du formalisme DEVS et de la logique floue. Dans la deuxième, nous détaillons nos recherches finalisées. Enfin, avant de conclure, dans une troisième section, nous présentons les travaux et projets en cours.

2.2

NOTIONS DE BASE : DEVS ET LOGIQUE FLOUE

2.2.1 LE FORMALISME DEVS

La théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S) a été développée dans les années 70 par le professeur B.P. Zeigler (1976) aux Etats-Unis à l'Université d'Arizona. Associant approche formelle et théorie générale des systèmes, elle a connu un large écho dans les années 90 auprès de la communauté scientifique et notamment francophone.

On compte aujourd'hui plusieurs équipes françaises qui font vivre la communauté et développent des méthodes, outils et applications basés sur la formalisation de la TM&S à savoir le formalisme DEVS et ses extensions ou déclinaisons.

1. logiciel déposé à l'agence pour la protection des programmes
IDDN.FR.001.170010.001.S.C.2014.000.31235

Les domaines d'applications sont très variés, cette diversité d'utilisation est une des forces de la TM&S, qui a su évoluer et étendre ses champs d'utilisation.

DEVS Le formalisme DEVS Zeigler (1976); Zeigler et al. (2000, 2018) propose une approche formelle basée sur la théorie générale des systèmes (Von Bertalanffy et al. (1973)), qui facilite la modélisation et la simulation de systèmes complexes à événements discrets.

Dans sa forme originale dite classique, il a été adapté et étendu afin de répondre aux problématiques applicatives de contextes spécifiques. C'est par exemple le cas pour modéliser des équations différentielles Kofman et al. (2000), des systèmes flous Kwon et al. (1996), des systèmes proches des automates cellulaires Wainer (2015), etc.

Le formalisme DEVS et ses déclinaisons DESS, DEV&DESS, DSDE, PDEVS, etc. permettent de décrire les systèmes à partir d'une sémantique de modélisation et de simulation univoque et apportent une solution pour répondre aux enjeux de modélisation multi-formalismes (c.f. Vangheluwe (2000a)), voire de co-simulation (c.f. Camus et al. (2018)).

En effet, modéliser un système complexe hétérogène peut nécessiter l'utilisation de plusieurs formalismes Vangheluwe and Lara (2002); Vangheluwe (2000a), équations différentielles ou algébriques, automates ou réseaux de pétri, évolution dans le temps continue ou discrète, etc.

Le formalisme DEVS repose sur la définition de deux types de composants de modélisation : les modèles atomiques AM (c.f. formule 1) et les modèles couplés CM (c.f. formule 2).

Modèle atomique DEVS Les modèles atomiques (AM) permettent de décrire le comportement du système à étudier à l'aide de fonctions comportementales. Les AM évoluent en fonction d'occurrences d'événements qui engendrent des transitions d'états internes ou externes. C'est une sorte de machine à états.

Le modèle atomique AM est défini par le tuple : $\langle X, Y, S, t_a, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda \rangle$ (1)

Avec :

- X : l'ensemble des ports d'entrée;
- Y : l'ensemble des ports de sortie;
- S : l'ensemble des états du système;
- t_a : la fonction d'avancement du temps (ou de durée de vie d'un état);

- δ_{int} : la fonction de transition interne. Elle permet de passer d'un état s_1 à l'instant t_1 , à un état s_2 à l'instant t_2 tant qu'aucun évènement externe ne survient durant le temps de vie de l'état $t_a(s_1)$;
- δ_{ext} : la fonction de transition externe. Elle spécifie le changement d'état (passage de l'état s_1 à l'état s_2) quand une entrée survient (x) avant que $t_a(s_1)$ ne soit écoulé; Q est l'ensemble des états tels que $(e, s) | s \text{ dans } S, 0 \leq e \leq t_a(s)$; e est le temps passé dans l'état.
- λ : la fonction de sortie;

Modèle couplé DEVS Les modèles couplés (CM) décrivent la structure et fixent une priorité entre composants du modèle grâce à une fonction adaptée nommée "select". Ils définissent comment sont interconnectés des sous-modèles (atomiques ou couplés) afin de former un nouveau modèle (couplé). Une hiérarchie de composition est donc possible.

Un modèle couplé possède la structure suivante : $\langle X, Y, D, Md/d \text{ dans } D, EIC, EOC, IC, Select \rangle$ (2) avec :

- les définitions de X et Y sont identiques à celles du modèle atomique;
- D est l'ensemble des noms des composants (modèles) du modèle couplé;
- Md est un modèle DEVS atomique ou couplé. Les variables représentant les entrées et les sorties du modèle seront indexées par l'identifiant du modèle. Les entrées et les sorties du modèle couplé sont connectées aux entrées et sorties des modèles composant le modèle couplé;
- EIC représente l'ensemble des ports d'entrée du modèle couplé connectés aux ports d'entrée des sous-modèles le composant;
- on a la même situation pour les ports de sortie EOC ;
- à l'intérieur du modèle couplé, les sorties d'un modèle peuvent être couplées aux entrées des autres modèles IC . Une sortie d'un modèle ne peut pas être couplée à l'une de ses entrées.

Plusieurs composants de modélisation peuvent être interconnectés entre eux dans un modèle couplé et des évènements simultanés peuvent se produire. Or, dans sa formulation originale, le formalisme DEVS impose de briser le lien de causalité entre composants dans le cas d'évènements simultanés. Si plusieurs composants interconnectés s'influencent mutuellement, les évènements de sortie des influenceurs ne seront pas reçus par les influencés aux mêmes instants. Cela résulte de la définition de la fonction "select" empêchant toute possibilité de simultanéité dans le modèle DEVS original.

De plus, un événement externe peut survenir sur les ports d'entrées d'un composant du modèle au même instant que celui déclenchant la transition interne, ces limites conceptuelles sont détaillées dans Zeigler et al. (2000). Dans la version classique, la prise en compte de ce conflit est à la charge du modélisateur.

PDEVS Le formalisme PDEVS pour "Parallel Discrete EVent system Specification" est une extension du formalisme DEVS. Il a été proposé pour prendre en compte la simultanéité des événements, et est complété d'une fonction (δ_{con}) dont l'objectif est de permettre au modélisateur de gérer les conflits survenant entre événements internes et externes (fonctions δ_{int} et δ_{ext}).

PDEVS inclut aussi un mécanisme (structure de données de type sac, Xb sous-ensemble de X) pour gérer les événements d'entrées simultanés qui permet de collecter tous les événements mêmes ceux émis en parallèle. Les sorties réalisées par les modèles en conflit pour lesquels une transition est prévue au même instant sont stockées dans un sous-ensemble d'entrées noté Xb. Chacun des événements de l'ensemble Xb est identifié par son temps d'occurrence. Aucune relation d'ordre n'est préconisée pour les événements appartenant à un même ensemble. On peut ainsi autoriser et dénombrer les événements simultanés sur chaque port d'entrée X.

De ce fait, les transitions externes sont réalisées par des ensembles représentant ainsi la réponse agrégée des événements simultanés.

Modèle atomique PDEVS Le modèle atomique PDEVS M est décrit par un tuple $\langle X, Y, S, t_a, \delta_{con}, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda \rangle$ (3) où :

- X est l'ensemble des ports ip et des valeurs d'entrée ;
- Y est l'ensemble des ports op et des valeurs de sorties ;
- S est l'ensemble des états partiels du système ;
- t_a : est la fonction d'avancement du temps ;
- δ_{int} : est la fonction de transition interne ;
- δ_{ext} : est la fonction de transition externe où, est l'ensemble des sacs d'entrées appartenant à X, Q est l'ensemble des états totaux, $Q = (s, e) \mid s \text{ dans } S, 0 \leq e \leq t_a(s)$, e est le temps écoulé depuis la dernière transition ;
- δ_{com} : la fonction de conflit ;
- λ : la fonction de sortie.

De la même manière que pour la version classique de DEVS, en l'absence d'événements sur les ports d'entrées, le modèle conserve un état passif jusqu'au prochain événement déclenchant la transition interne (δ_{int}). Une sortie est alors générée par la fonction de sortie (λ), suivie de l'exécution de la fonction de transition interne (δ_{int}).

Echéancier Si un événement externe survient sur l'un des ports d'entrée avant l'instant prévu pour la transition interne, l'état du système passe à $\delta_{ext}(s, e, xb)$.

A la différence d'une approche DEVS classique, la transition externe recalcule l'état s depuis les ensembles d'événements (Xb) provenant d'un ou de plusieurs modèle(s) PDEVS.

Si un événement survient sur X à $e = ta(s)$, le simulateur appelle la fonction $\delta_{con}(s, e, xb)$.

L'algorithme comportemental de la fonction de conflit δ_{con} doit être implémenté par le modélisateur.

Par défaut $\delta_{con} = \delta_{ext}(\delta_{int}(s, e), 0, xb)$, donnant ainsi la priorité à la transition interne lors d'un conflit dans un modèle PDEVS.

Simulation Au niveau de la simulation, l'une des propriétés importantes du formalisme DEVS est qu'il fournit automatiquement un simulateur pour chacun des modèles.

Il établit donc une distinction explicite entre la partie modélisation et les algorithmes de simulation de sorte que n'importe quel modèle DEVS peut être simulé sans qu'il ne soit nécessaire d'implémenter un simulateur spécifique. C'est la notion de simulateur abstrait défini dans [Zeigler et al. \(2000\)](#).

Chaque modèle atomique est associé à un simulateur chargé de gérer le comportement du modèle, et chaque modèle couplé est associé à un coordinateur chargé de la synchronisation temporelle des modèles sous-jacents.

L'ensemble des composants de modélisation est géré par un coordinateur spécifique nommé *root* qui centralise et organise l'échéancier de la simulation.

L'échéancier est une structure de données composée d'événements classés suivant un ordre chronologique, la tête de l'échéancier représentant le futur immédiat, et la queue le futur plus lointain.

La simulation consiste à faire évoluer les états des modèles dans le temps en fonction des événements.

Codes de simulation Finalement, un autre avantage du formalisme est sa forte compatibilité avec les propriétés des langages orientés objets.

En résulte un nombre important d'implémentations, dans différents langages, souvent adaptées à un contexte d'application. Nous pouvons lister :

- aDEVS [Nutaro \(1999\)](#)
- CD++ [Wainer \(2002\)](#)
- fwkDEVS [Bisgambiglia et al. \(2018b\)](#)
- MS4ME [Zeigler \(2013\)](#)
- VLE [Quesnel et al. \(2007\)](#)
- PyDEVS et PyPDEVS [Bolduc and Vangheluwe \(2002\)](#); [Van Tendeloo and Vangheluwe \(2015\)](#)
- DEVSimPY [Capocchi et al. \(2011\)](#)
- PowerDEVS [Bergero and Kofman \(2011\)](#)
- ProDEVS [Bisgambiglia et al. \(2018b\)](#)
- DEVS-Ruby [Franceschini et al. \(2014a\)](#)
- SimStudio [Traoré \(2008\)](#)
- Quartz [Franceschini et al. \(2018a\)](#)

Ces outils de modélisation et simulation sont comparés dans [Franceschini et al. \(2014b\)](#); [Van Tendeloo and Vangheluwe \(2016, 2017\)](#).

La littérature dans le domaine est abondante, les dernières avancées sont présentées dans la troisième édition du livre [Zeigler et al. \(2018\)](#).

Les évolutions du formalisme traitent les données comme des valeurs connues et précises, et très peu prennent en compte l'imprécision dans les paramètres d'entrées. Or dans la plupart des modèles environnementaux, il est difficile voire impossible d'obtenir des valeurs précises.

2.2.2 LOGIQUE FLOUE

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, dans le cas de domaines particuliers, le formalisme DEVS doit être étendu.

Par exemple, [Giambiasi and Ghosh \(2001\)](#) permettent de prendre en compte les délais de transmission dans les signaux des circuits électriques. C'est une forme d'imprécision.

[Kwon et al. \(1996\)](#) permet de simuler des systèmes où la transition entre états est incertaine.

[Castro et al. \(2010\)](#) proposent une extension du formalisme DEVS classique pour les modèles stochastiques, et il y a beaucoup d'autres exemples.

Le formalisme DEVS permet la représentation des systèmes à événements discrets, qui eux aussi bénéficient d'une théorie présentée dans [Cassandras and Lafortune \(1999\)](#) et étendue aux systèmes flous (Fuzzy Discrete Event Systems) dans [Lin and Ying \(2002\)](#) et [Kilic et al. \(2005\)](#).

Leur objectif est de permettre de représenter efficacement les incertitudes et d'une manière générale le "flou", ainsi que les observations et les jugements subjectifs de l'être humain. Ces derniers sont inhérents à de nombreux problèmes du monde réel et en particulier ceux liés aux systèmes complexes.

Plusieurs travaux introduisent les concepts d'états flous et d'événements flous, et généralisent la théorie des systèmes à événements discrets aux DES flous. Ils sont présentés dans [Lin and Ying \(2001, 2002\)](#); [Lin et al. \(2007\)](#) et sont basés sur la logique floue et les théories du "FLOU".

Dans le cadre de la logique classique, une proposition est soit vraie, soit fausse, soit indéterminée. Or, dans son raisonnement, l'être humain s'appuie sur des informations approximatives et des données imparfaites : imprécises, incertaines, incomplètes, vagues, contradictoires, floues, ambiguës, etc. Néanmoins, son raisonnement peut être cohérent et aboutir à des résultats corrects.

Les théories du "FLOU" sont tout un ensemble de théories généralisant des concepts mathématiques prouvés et éprouvés; un cadre formel (aussi) permettant la modélisation et l'interprétation de connaissances ou propositions floues et de données imparfaites.

Historiquement la science n'a pas porté le même intérêt à toutes ces imperfections; en ce qui concerne l'incertain, il a été abordé par la notion de probabilité dès le XVIIème siècle par *B. Pascal* et *P. Fermat* et formalisé par [Bernoulli \(1713\)](#).

La notion de probabilité n'est cependant pas adaptée à la représentation d'incertitudes liées à la fiabilité d'un informateur.

F. Ramsey en 1931 a introduit les notions de probabilité subjective [Ramsey \(1931\)](#), puis *A.P. Dempster* et *G. Shafer* ont introduit la théorie de l'évidence [Dempster \(1967\)](#); [Shafer \(1976\)](#), qui permet de manipuler les degrés de confiance qu'un observateur attribue à la validité de certains faits. Cependant, celle-ci ne permet pas de traiter des croyances subjectives, ni de résoudre le problème posé par les connaissances imprécises.

Les imprécisions n'ont été prises en considération qu'à partir de 1965 par [Zadeh \(1965\)](#) qui introduit la notion de sous ensemble flou (SEF), à partir de l'idée d'appartenance partielle à un ensemble aux limites imprécises.

Les développements de cette notion fournissent des moyens de représenter et de manipuler des connaissances décrites de manière imprécise et qui établissent une interface entre

des données décrites ou linguistiques (mots) et des données numériques (chiffres).

La logique floue s'appuie sur des notions mathématiques comme la théorie des ensembles, la notion d'appartenance, la notion d'intervalle (arithmétique des intervalles), etc.

Elle a été présentée par Zadeh (1975) comme un cadre pour le raisonnement approximatif, une théorie mathématique permettant l'étude des systèmes flous.

Selon Zadeh (1983) la modélisation floue fournit des moyens approximatifs mais efficaces pour décrire le comportement des systèmes qui sont trop complexes ou trop mal définis pour admettre l'utilisation d'une analyse mathématique précise.

Théorie des sous-ensembles flous La **théorie des sous-ensembles flous** (SEF) est une théorie mathématique du domaine de l'algèbre abstraite. Elle a été introduite dans Zadeh (1965) comme une nouvelle logique qui s'affranchit du principe d'élément exclu contrairement aux notions d'appartenance classiques.

La logique floue Zadeh (1988) est en grande partie fondée sur le concept de sous-ensemble flou (Fuzzy Set).

La définition d'un sous-ensemble flou répond au besoin de représenter des connaissances imprécises ou imparfaites, soit parce qu'elles sont exprimées en langage naturel par un observateur qui donne peu de précisions ou qui est peu fiable (confiance), soit parce qu'elles sont obtenues à l'aide d'instruments d'observation qui produisent des erreurs ou qui sont peu précis.

La théorie des SEF donne la possibilité à un élément d'information d'être dans un ensemble, à un niveau d'appartenance allant de 0, pas du tout, à 1, totalement.

La notion de sous-ensembles flous permet de traiter :

- des catégories aux limites mal définies ;
- des situations intermédiaires entre le tout et le rien ;
- le passage progressif d'une propriété à une autre ;
- des valeurs approximatives ;
- des classes en évitant l'utilisation arbitraire de limites rigides.

Comme l'indique Bouchon Meunier (1985) le concept de SEF constitue un assouplissement de la notion d'appartenance.

Dans un ensemble de référence E , un sous-ensemble flou A de ce référentiel est caractérisé par une fonction d'appartenance μ de A , qui associe à chaque élément x de E , le degré $\mu_A(x)$, compris entre 0 et 1, pour lequel x appartient à A .

Cette fonction est l'extension de la fonction caractéristique d'un (sous-)ensemble classique. Elle est définie dans Zadeh (1965), Kaufmann (1973).

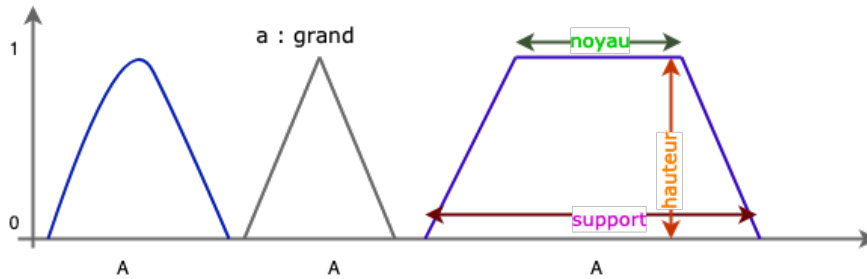


FIGURE 2.1 – Exemple de trois fonctions d'appartenance pour un SEF A

La notion de SEF a pour but de permettre des gradations dans l'appartenance d'un élément x à une classe A , c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe.

Un sous-ensemble flou A sur le domaine de variation E de x est défini par le triplet (A, a, μ_A) , où :

- A est un sous-ensemble de E ;
- a , un label linguistique, caractérisant qualitativement une partie des valeurs de x ;
- et μ_A , la fonction qui donne le degré d'appartenance d'une observation de x au sous-ensemble flou A . Cette fonction μ_A est appelée fonction d'appartenance de A . Elle associe à chaque élément x de E , le degré $\mu_A(x)$ compris entre $[0; 1]$.

Dans le cas des sous-ensembles flous, la fonction d'appartenance peut être définie sous forme triangulaire, parabolique ou trapézoïdale comme le montre la figure 2.1.

A partir de cette représentation, nous pouvons identifier :

- le noyau comme l'ensemble des éléments "vraiment" dans le SEF A , $\{\forall x \in E, \mu_A(x) = 1\}$;
- le support comme l'ensemble des éléments dans A à des degrés divers, $\{\forall x \in E, \mu_A(x) \neq 0\}$;
- la hauteur comme l'élément ou l'ensemble des éléments le plus dans A , $\forall x \in E, hauteur = \sup\{\mu_A(x)\}$;
- l'alpha couple d'un ensemble flou A est le sous ensemble classique des éléments ayant un degré d'appartenance supérieur ou égal à α , $\{\forall x \in E, \mu_A(x) \geq \alpha\}$.

Si le noyau et le support sont confondus, la fonction caractéristique μ n'admet que 0 ou 1 pour valeur, nous retrouvons une représentation de la variable sans incertitude.

Systèmes flous Les **systèmes flous** utilisent une représentation des connaissances sous forme de règles floues, une manière normale d'expliquer des procédés de décision.

Ils expriment des concepts en terme linguistique (variable), proche de notre mode de représentation, par exemple, "température élevée" au lieu de "température supérieure à 39°".

Il y a une correspondance entre les variables linguistiques et des valeurs numériques associées.

Variable linguistique Une **variable linguistique** définie par Zadeh (1975) est une variable prenant ses valeurs dans un ensemble de "mots" symboliques, définissant certaines catégories d'un ensemble de référence.

On appelle variable linguistique le triplet (V, X, T_v) , tel que :

- V : une variable symbolique définie sur X ;
- X : un ensemble de référence ;
- $T_v : T_v = \{A_1, A_2, \dots\}$ un ensemble fini ou dénombrable de sous-ensembles flous normalisés, utilisés pour caractériser V .

Si l'on reprend notre exemple, la variable linguistique est définie par une variable symbolique V : "la température", par un ensemble de référence $X = \mathbb{R}^+$, et un ensemble de SEF caractérisant les valeurs de la température $T_v = \{ \text{faible, modérée, élevée} \}$.

Définitions Une **proposition floue** est définie à partir d'une variable linguistique (V, X, T_v) par la qualification "V est A", exemple : "la température **est** modérée".

On appelle **modificateur linguistique** M un opérateur qui permet à partir de toute caractérisation floue A de V , de produire une nouvelle caractérisation où $A \in M(T_v)$, ce dernier étant l'ensemble des caractérisations obtenues en appliquant un modificateur linguistique M .

Le résultat de cette opération n'est pas forcément dans T_v .

Par exemple un modificateur linguistique peut caractériser la température comme étant "très élevée".

Une **règle floue** est une proposition floue de la forme "Si p alors q " utilisant une implication entre deux propositions floues quelconques p et q .

Ces règles permettent de décrire le comportement d'un système flou à partir de la combinaison d'une ou plusieurs propositions floues.

Par exemple, "si la température **est** élevée **et** la gorge **est** irritée **alors** les risques de laryngite sont importants".

Les systèmes flous sont adaptés à la modélisation de systèmes à comportements complexes, ils peuvent approcher n'importe quel comportement numérique avec le niveau désiré de précision et un coût d'expression linguistique réduit [Zadeh \(1973\)](#).

Nous nous reposons sur ces travaux dans le cadre de la représentation de connaissances, la modélisation de systèmes et la description de processus de décision.

Après la présentation des bases de la TM&S et de la logique floue, nous pouvons aborder les travaux que nous avons réalisés.

2.3

TRAVAUX FINALISÉS

Dans cette section, nous allons revenir sur nos travaux de doctorat, puis présenter les recherches qui en ont directement découlé.

Pendant notre thèse de doctorat, nous avons développé une méthode de prise en compte des imprécisions dans les modèles DEVS (classique). Appliquée dans un premier temps à l'étude des feux de forêt (iDEVS), cette méthode a ensuite été étendue pour décrire des (SIF) systèmes d'inférences flous (Fuzz-iDEVS). Les SIF se prêtent très bien aux applications de contrôle et de décision, nous les avons également utilisés pour quantifier l'activité d'un modèle cellulaire de propagation de feux. La troisième et dernière section décrit une application (DimZal) axée sur la prévention incendie.

2.3.1 iDEVS : MODÉLISATION ET SIMULATION DES IMPRÉCISIONS

Les éléments présentés dans cette section sont détaillés dans [Bisgambiglia \(2008\)](#). Nous en donnons ici un résumé.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la théorie de la modélisation et de la simulation de [Zeigler et al. \(2018\)](#) et est basé sur le formalisme DEVS. Comme l'a montré [Vangheluwe \(2000a\)](#), ce dernier peut être considéré comme un multi-formalisme regroupant de manière cohérente plusieurs méthodes de modélisation, c'est à partir de cette approche que nous avons proposé

une nouvelle méthode de modélisation approximative basée sur la théorie des sous-ensembles flous (SEF c.f. Zadeh (1965, 1972)).

Nous définissons ici une *imprécision* comme une difficulté à quantifier la valeur d'un objet ou d'une variable.

Elle peut être induite par le manque de précision d'un instrument de mesure, le manque de connaissances sur l'objet, ou encore un doute sur les faits et/ou observations décrits par un être humain (expert, utilisateur, modélisateur). Elle est alors représentée par un intervalle de confiance.

Par exemple la valeur PI peut être décrite par l'intervalle [3.141, 3.142].

Lors de l'étude de systèmes naturels complexes, il est fréquent qu'un certain nombre de paramètres soient imparfaitement définis. A partir de la théorie des sous-ensembles flous (SEF), qui permet de représenter et de manipuler des variables imprécises, nous avons défini une nouvelle méthode pour la modélisation et la simulation de systèmes à paramètres imprécis.

Nos **motivations** étaient d'étendre le formalisme DEVS pour la prise en compte, et la manipulation de données (entrées et états des modèles) imprécises. Ce mode de représentation est proche du mode de pensée et de réflexion de l'être humain. Ce travail permet également d'avancer sur la représentation des connaissances et donc sur le cadre expérimental associé au modèle.

2.3.1.1 CONTRIBUTIONS

Cette nouvelle méthode a plusieurs objectifs, le premier est bien évidemment de permettre la modélisation et la simulation de systèmes flous, et d'étendre ainsi le champ d'action du formalisme DEVS classique; le deuxième est de fournir plusieurs modèles de base afin de faciliter le rôle du concepteur; le troisième est de rendre plus souple la spécification des modèles grâce à l'utilisation de variables linguistiques; enfin, éviter que le modélisateur donne des valeurs "aléatoires" à leurs paramètres, car ces imprécisions même légères peuvent conduire à des résultats faux voire aberrants surtout lorsque un modèle est sensible à certaines variables.

La principale réalisation est le développement d'une classe, au sens objet, pour décrire les sous-ensembles flous c.f. algorithme 1. Une fois intégrée dans un modèle DEVS, elle permet de définir un nouveau type de données (*FuzzySet*) dans le langage de programmation et ainsi représenter et manipuler les imprécisions.

Au niveau des **modèles** DEVS, la prise en compte d'imprécisions induit une évolution comportementale et non structurelle, elle est traitée par les différentes fonctions caractéris-

Algorithm 1 Classe FuzzySet.

```

1: list operator = +, -, ×, /, ln, expo, √, sin, cos, tan, ...
2: class FuzzySet
3: {
4:     int λ ∈ [0, 1],
5:     float a, b, ψ, ω, α = a - ψ, β = ω - b
6:     String label
7:     function left(int λ) = α × λ + (a - α)
8:     function right(int λ) = -β × λ + (β + b)
9:     function left(float x) =  $\frac{x-\psi}{a-\psi}$ 
10:    function right(float x) =  $\frac{x-\omega}{b-\omega}$ 
11:    % Constructor and functions prototype : out name(in)
12:    % Constructor
13:    FuzzySet(a, b = a, ψ = a, ω = b, label = ' I')
14:    % Operator with FuzzySet
15:    FuzzySet operator + (FuzzySet)
16:    boolean operator == (FuzzySet)
17:    ...
18:    % Extension principle function
19:    FuzzySet supMin(FuzzySet, operator)
20:    % Defuzzification function
21:    float defuzzification(FuzzySet)
22:    ...
23: }
24: % Friends function
25: FuzzySet sin(FuzzySet)
26: FuzzySet tan(FuzzySet)
27: ...

```

tiques des modèles DEVS $(\delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, t_a)$. Nous laissons au concepteur la possibilité de décrire le comportement des modèles à partir d'une librairie de fonctions préprogrammées (+, -, ×, /, sin, cos, etc.) ou en réutilisant des modèles *iDEVs* prédéfinis et stockés dans une bibliothèque.

Ces modèles doivent respecter les contraintes du formalisme DEVS, afin de rester cohérents avec ses concepts et permettre d'exploiter pleinement la possibilité de connecter entre eux des modèles hétérogènes, c'est-à-dire des modèles provenant de méthodes de modélisation différentes (c.f. [Vangheluwe \(2000b\)](#)).

Les paramètres les plus sujets aux imprécisions sont les variables d'états, le temps de vie des états, et les valeurs d'entrées et de sorties des modèles. Les variables d'état n'interviennent qu'au niveau des modèles, le temps de vie des états et les valeurs d'entrées et de sorties sont :

soit à l'origine des événements ; soit directement manipulées par les événements. Les événements dirigent toute la simulation, ils distribuent les informations aux modèles et font donc l'objet d'une attention particulière. Ils sont définis par le triplet :

- port : modèle source vers modèle cible ;
- date : pour le positionner dans l'échéancier de simulation ;
- valeur : la donnée à transmettre au modèle cible.

Dans un **événement**, l'imprécision peut intervenir au niveau du temps et/ou de la valeur. Dans l'approche proposée, l'imprécision sur une **valeur** peut être traitée sans avoir à modifier la partie simulation du formalisme DEVS. Un événement à valeur imprécise peut être inséré dans l'échéancier de DEVS comme un événement standard ; seul le type des données change, il n'y a pas de changement à apporter au formalisme DEVS classique.

Au niveau du **temps**, une imprécision sur une date induit des problèmes au niveau de la modélisation et de la simulation. Un événement est envoyé et placé dans l'échéancier de simulation à une date donnée ; si l'on ne connaît pas cette date précisément, l'événement ne peut avoir lieu et donc ne peut être pris en compte dans l'échéancier DEVS classique.

Les imprécisions sur le temps peuvent intervenir au niveau de la fonction d'avancement du temps (t_a), et sur la date de déclenchement des événements.

Pour résoudre le problème de simulation à dates imprécises, nous avons ajouté une fonction de défuzzification.

La défuzzification a pour but de passer d'une valeur imprécise à une valeur précise ; plusieurs techniques peuvent être employées.

Des simulations ont été effectuées pour tester plusieurs méthodes dans [Bisgambiglia et al. \(2008a,b\)](#).

Nous avons choisi la méthode de [Anglani et al. \(2000\)](#) (expected existence measure : EEM) qui permet d'ajouter un coefficient d'aide à la décision (une valeur en ordonnée) à la phase de défuzzification. Cette fonction, EEM sur la figure 2.2, représente le rapport entre une portion de l'aire de la fonction C1 et son aire totale :
$$\frac{\int_{borneinf}^t Fct}{\int_{borneinf}^{bornesupp} Fct}$$

S'il est défini très petit, cela veut dire que nous cherchons à déclencher l'événement tôt, si nous voulons être sûrs que l'événement ait bien eu lieu, nous pouvons fixer un coefficient élevé (proche de 1).

Cette approche a principalement été utilisée pour définir un modèle de propagation de feux purement empirique.

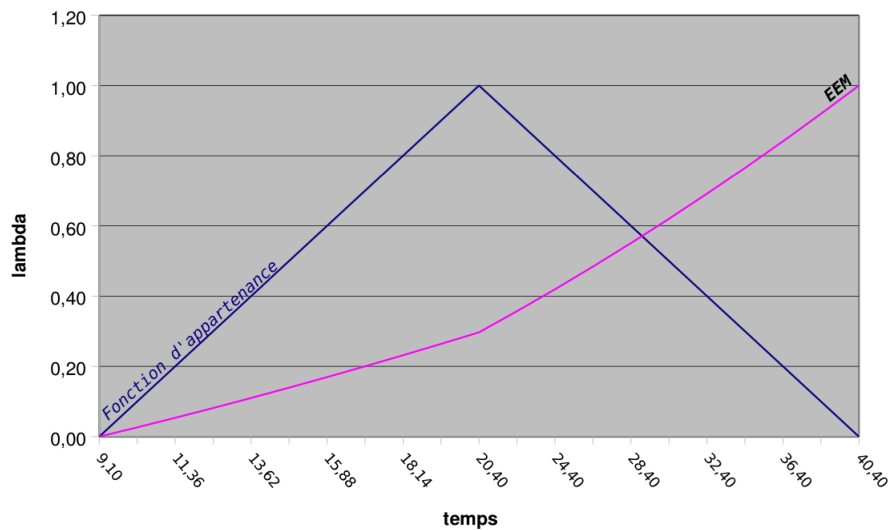


FIGURE 2.2 – Exemple d'un sous-ensemble flou C1 et sa fonction de défuzzification EEM associée.

2.3.1.2 APPLICATIONS

Deux exemples d'applications ont été présentés dans [Bisgambiglia et al. \(2009a\)](#) et [Bisgambiglia et al. \(2009b\)](#).

Ces modèles utilisés à visée pédagogique sont basés sur un mécanisme de propagation vectoriel présenté dans [Bisgambiglia et al. \(2006b\)](#).

Des facteurs comme la topographie du terrain, la vitesse du vent ou la végétation sont modélisés comme des coefficients accélérant ou réduisant le phénomène de propagation. Ils sont décrits à partir de la classe FuzzySet, les détails sont donnés dans [Bisgambiglia \(2008\)](#).

Le modèle décrit l'évolution du front du feu en termes de saut de feu par zone comme le décrit la figure 2.3.

Le terrain est découpé en fonction de l'influence de ses caractéristiques sur le feu. Il est divisé en zones où chaque zone a des propriétés propres comme une végétation homogène de maquis ou une forêt.

Nous ne calculons pas la propagation du feu en fonction du temps, mais en fonction des sauts entre zones adjacentes. Sur une zone donnée, nous considérons que tous les paramètres du modèle sont invariants. L'objectif est de visualiser et donc prévoir les différents scénarii de propagation.

L'évolution du modèle suit les étapes suivantes :

- initialisation des paramètres comme le point d'ignition, le vent et le découpage de l'environnement en zone ;

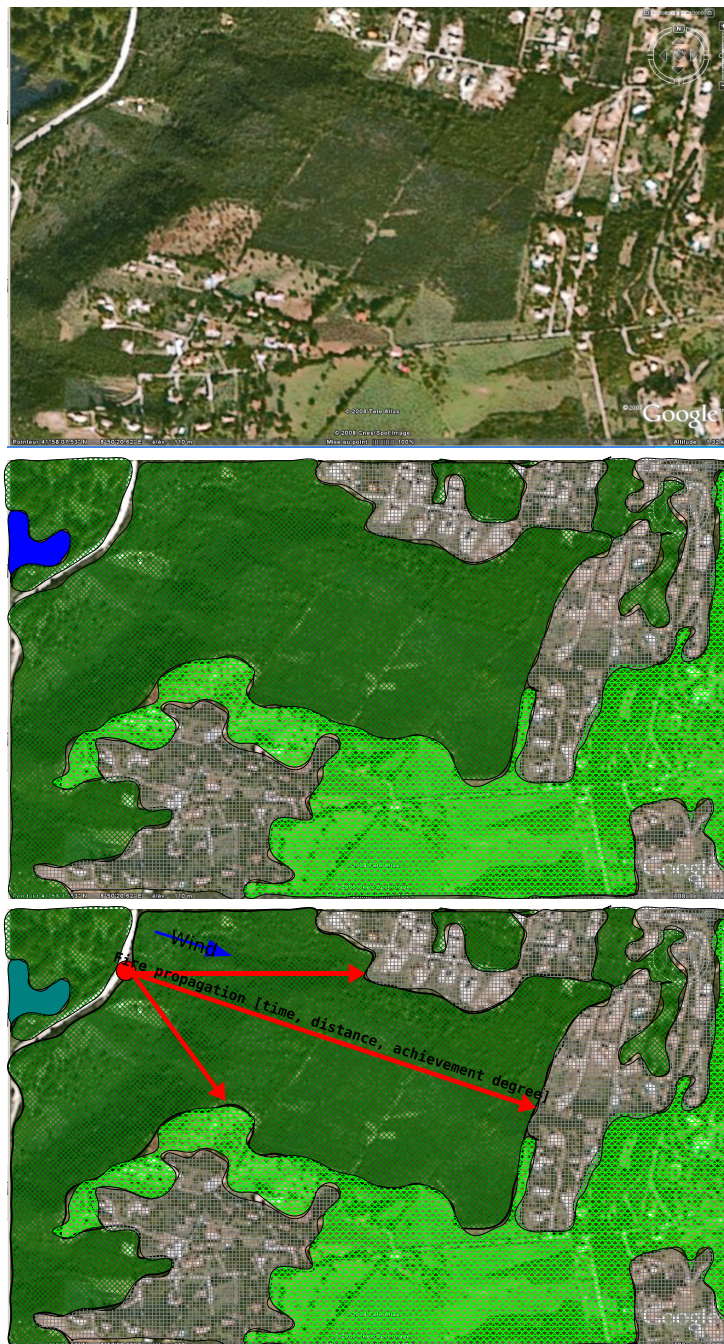


FIGURE 2.3 – Exemple de propagation vectorielle.

- détermination des caractéristiques propres à chaque zone (c.f. deuxième figure 2.3) ;
- calcul les points d'intersection entre les points géométriques composant le front de flamme et les frontières des zones voisines par projection du vecteur vent (c.f. dernière figure 2.3) ;

- calcul des distances entre le front et l'ensemble des points d'intersection afin de définir la zone la plus proche en terme de distance ;
- évaluation du temps probable avant le prochain saut afin de déterminer la zone qui a le plus de chance d'être touchée.

Le modèle est défini sur la base des paramètres suivants :

- coordonnées de départ du feu fixées par l'utilisation ;
- coordonnées délimitant chaque zone ;
- coefficient de propagation donné par un système d'inférence floue correspondant à la caractéristique de chaque zone (inflammabilité, hauteur et densité de la végétation, vitesse du vent local, topologie du terrain, etc.) ;
- vitesse et direction du vent ;

La vitesse de propagation du feu est égale à plus ou moins 3 à 8 % de la vitesse du vent. Critère défini par les pompiers et fuzzifié pour nos tests sous forme d'intervalle.

Cet exemple n'est pas basé sur un cas réel, il vise à démontrer l'intérêt de notre approche théorique.

En conclusion, nous pouvons indiquer que ces travaux ont principalement ouvert deux voies explorées après notre doctorat en tant que maître de conférences. La première sera présentée dans la section suivante, elle a pour objectif d'étendre le formalisme DEVS vers d'autres outils et méthodes de la logique floue comme les systèmes d'inférences flous (SIF).

La seconde est plus théorique, elle doit nous permettre d'utiliser la logique floue dans le cadre de la représentation des connaissances mais également de réfléchir aux moyens qu'elle offre pour quantifier la confiance dans nos données, modèles et résultats.

En renforçant la crédibilité de nos résultats cette approche pourrait aider aux processus de décisions.

Elle a été explorée dans :

- notre processus de défuzzification grâce à la fonction EEM [Anglani et al. \(2000\)](#) ; [Bisgambiglia et al. \(2008a\)](#) ;
- [Bisgambiglia et al. \(2011\)](#) pour faire évoluer en cours de simulation l'intervalle de confiance des données initiales ;
- [Bisgambiglia et al. \(2015\)](#) pour montrer l'impact de certains choix de modélisation sur les résultats de simulation. Dans ce travail exploratoire à partir d'un modèle théorique, nous mettons en évidence que le choix de modélisation proposé dans PDEVS [Chow](#)

and Zeigler (2003) pour gérer la simultanéité d'évènements (internes et externes) grâce à une fonction de conflit δ_{con} peut entraîner des différences dans les résultats. La fonction δ_{con} permet de choisir quelle fonction de transition (interne δ_{int} ou externe δ_{ext}) prioriser et exécuter en premier.

Ces travaux ont initié des réflexions sur la représentation des connaissances, leurs évolutions et enfin leurs validités.

Dans la section suivante, nous allons revenir sur nos travaux post-doctoraux.

2.3.2 FUZZ-IDEVs : MODÉLISATION, SIMULATION ET LOGIQUE FLOUE

Les éléments détaillés dans cette section sont issus de Bisgambiglia et al. (2018a).

Toujours sur le même format : motivation, contribution, application et perspective, nous allons détailler dans cette section des travaux finalisés qui ont fait suite à l'obtention de notre doctorat.

L'approche générale d'usage de la logique floue en modélisation et simulation est toujours l'un de nos axes de recherche. Ces travaux, nous ont notamment permis d'avancer vers une thématique plus centrée sur les processus de décision.

Nos **motivations** sont assez simples, faire bénéficier la communauté de la théorie de la modélisation et de la simulation des possibilités offertes par la logique floue.

Par exemple, utiliser l'expressivité des règles linguistiques pour définir un langage de spécification de modèle DEVS à haut niveau Garredu et al. (2007) ou des langages spécifiques à un domaine Franceschini et al. (2014a). Ensuite, permettre de définir des modèles d'inférence flous à partir du formalisme DEVS. Les systèmes d'inférence flous (SIF) Glorennec (1999); Guillaume (2001); Juang et al. (2007) permettent de mettre en place des modules de raisonnement et de déduction Bisgambiglia et al. (2010a, 2017a). C'est un premier pas vers des modèles d'aide à la prise de décision.

2.3.2.1 CONTRIBUTIONS

Les systèmes d'inférence floue sont composés de trois éléments : (1) des sous-ensembles flous d'entrées, (2) un moteur d'inférence à base de règles, et (3) des sous-ensembles flous de sorties, voir la figure 2.5. Afin de décrire sa structure, nous proposons une analogie à partir de modèles DEVS, et/ou iDEVs. Les données à définir et à manipuler sont alors représentées à partir des classes (au sens objet) **FuzzySet** et **FuzzySets**.

La classe **FuzzySet** a été définie dans le cadre des travaux sur la prise en compte des imprécisions dans les modèles DEVS [Bisgambiglia et al. \(2007a, 2009b\)](#). Elle permet de modéliser, c'est-à-dire, représenter et manipuler un sous-ensemble flou décrit à partir d'un couple : label linguistique / fonction d'appartenance.

La classe **FuzzySets** est un conteneur, qui associe un ensemble d'objets de type **FuzzySet**. Elle permet de représenter et de manipuler les entrées et les sorties du SIF. Cette classe regroupe une structure de données de type tableau et des méthodes de défuzzification de la littérature [Mamdani and Assilian \(1975\)](#); [Mamdani \(1977\)](#), [Takagi and Sugeno \(1985\)](#). Elle est détaillée dans [Bisgambiglia et al. \(2008a, 2009a\)](#).

Cette approche est résumée dans la figure 2.4.

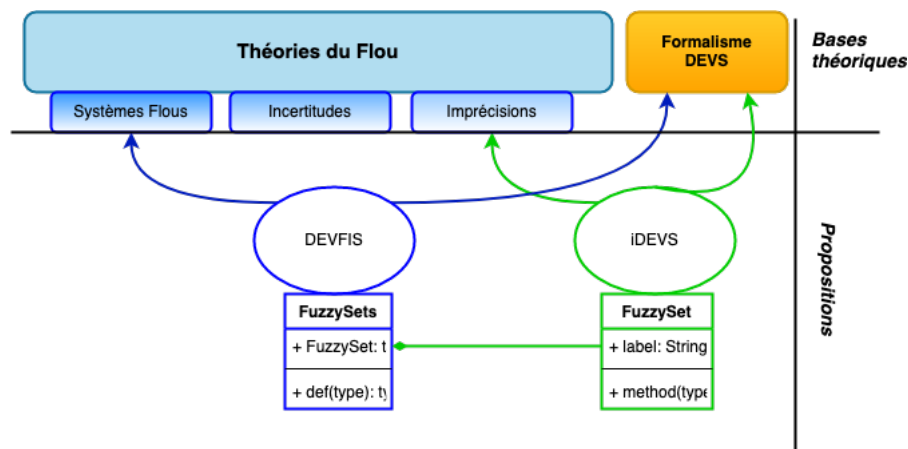


FIGURE 2.4 – Nos approches

Notre analogie DEVS-SIF est basée sur :

- un ou plusieurs modèles atomiques iDEVS permettant de décrire les entrées du système, c'est-à-dire la phase de fuzzification ;
- un ou plusieurs modèles atomiques iDEVS permettant de décrire les sorties du système, c'est-à-dire la phase de défuzzification ;
- un modèle couplé pour décrire le moteur d'inférence, il est composé d'un premier modèle atomique pour représenter toutes les règles, et d'un autre pour appliquer les opérateurs flous ;
- enfin un modèle optionnel peut-être ajouté pour faciliter la phase d'inférence et générer automatiquement par apprentissage ou optimisation l'ensemble des règles.

2.3.2.2 APPLICATIONS

Cette approche a été appliquée dans trois cas.

PILOTAGE ET CONTRÔLE

Un premier exemple pédagogique de pilotage et de contrôle d'une chaudière a été présenté dans [Bisgambiglia et al. \(2010b\)](#). Cet exemple ne sera pas détaillé, c'est un cas d'école d'utilisation des systèmes d'inférence floue. Il consiste à adapter les débits d'eau chaude et d'eau froide pour produire une eau tiède.

PROPAGATION DE FEUX PAR AUTOMATE CELLULAIRE

Une application plus complète est proposée dans [Bisgambiglia and Innocenti \(2016\)](#). Elle permet de décrire l'activité dans un modèle cellulaire.

Les *Modèles Cellulaires* (CAM²) sont des formes évoluées des *Automates Cellulaires* (CA) qui ont été proposés par [Neumann \(1966\)](#) et *Stanislas Ulam* dans les années 1940. Ils sont particulièrement bien adaptés à la simulation informatique des phénomènes spatiaux complexes. Comme ils héritent des propriétés des automates cellulaires, ils bénéficient également des avantages liés au phénomène de l'émergence; c'est-à-dire qu'à partir de règles mathématiques locales déterministes suffisamment simples, ils sont capables de présenter des comportements d'ensemble, non descriptibles a priori, lors de l'expression du modèle.

Ces dernières années, l'étude de la mise en œuvre informatique de ces modèles s'est considérablement développée [Santé et al. \(2010\)](#). Bien que la formulation classique initiale soit adaptée à la modélisation de nombreux systèmes spatiaux complexes, ce type de modèles bénéficie en général d'améliorations structurelles et comportementales, notamment pour les rendre plus efficaces et plus réalistes. L'introduction de perturbations (stochastiques puis floues) dans la règle d'activité (phase de propagation) est susceptible d'améliorer les temps de calculs et le réalisme des rendus finaux des simulations.

Pour cette application, nous nous basons sur une partie de la logique floue qui permet de raisonner sur des données approximatives : les Systèmes d'Inférence Floue (SIF). Les SIF ont été utilisés dans de nombreux domaines [Glorennec \(1999\)](#). Dans ce travail, nous souhaitons exploiter leurs caractéristiques pour transformer une perturbation aléatoire en transition approximative.

Par exemple, dans l'approche stochastique, une règle peut-être : pour le passage d'un état S_A à un état S_B , effectuer un tirage aléatoire P , puis évaluer P . Si $P > k$ (k est un réel, exemple 0.7) alors nous effectuons la transition. Cette règle est absolue, et pour considérer le résultat comme représentatif, il faut multiplier les répliques (tirages), donc les simulations. A partir d'un SIF, nous allons pouvoir définir un ensemble de règles qui vont à la fois pouvoir prendre

2. En anglais Cellular Automata Model.

en compte le passage progressif de A vers B, mais surtout couvrir un spectre plus large de possibilités. Notre système flou utilise pour cela une représentation des connaissances sous forme de règles floues, c'est une manière habituelle d'expliquer des procédés de décision. Les règles expriment des concepts en termes linguistiques (variables linguistiques), inspirés de la représentation humaine.

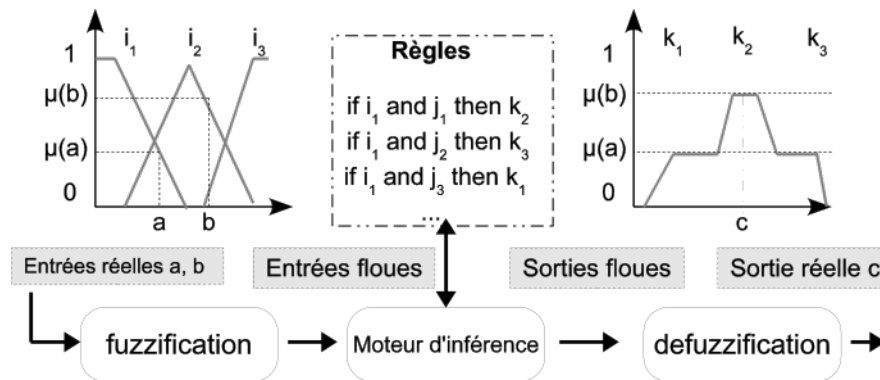


FIGURE 2.5 – Principe de fonctionnement d'un Système d'Inférence Flou (SIF).

Pour définir notre système flou et notamment les règles d'activité floues, nous allons implémenter un SIF. Sa réalisation passe par plusieurs étapes, voir [Glorennec \(1999\)](#) :

1. l'identification et la définition des ensembles d'entrées et de sorties. Ceux-ci sont représentés sous la forme de SEF et nécessitent la réalisation d'un moteur d'inférence.
2. Le moteur d'inférence est composé d'une collection de règles floues de forme : "Si p alors q" ou p et q sont des éléments d'un ensemble flou.

Suivant ce schéma, nous définissons les termes linguistiques associés à l'activité d'une cellule : "Passive", "Partiellement Active", "Active". La règle : "Si M cellule(s) voisine(s) est/sont active(s), alors la cellule courante devient Active" est un exemple de règle d'activité floue avec M un paramètre à fixer. Le SIF doit permettre de déduire l'activité des cellules. Pour cela, nous utilisons une donnée numérique contenue dans la cellule, comme dans notre application la température d'une cellule en entrée (étape 1 : la fuzzification sur la figure 4, avec a ou b des exemples de température). Après fuzzification, nous obtenons en sortie le couple label linguistique (i_1 et j_1 sur la figure 2.5), degré d'appartenance (μ sur la figure); à partir de ce label linguistique, nous allons inférer (étape 2 : Moteur d'inférence) et obtenir un nouveau label ("Passive", "Partiellement Active", "Active") qui sera associé à un degré d'appartenance permettant d'exprimer l'activité de la cellule (étape 3 la défuzzification, "c" sur la figure 2.5 définit le niveau d'activité de la cellule). Cette dernière étape correspond au processus de défuzzification.

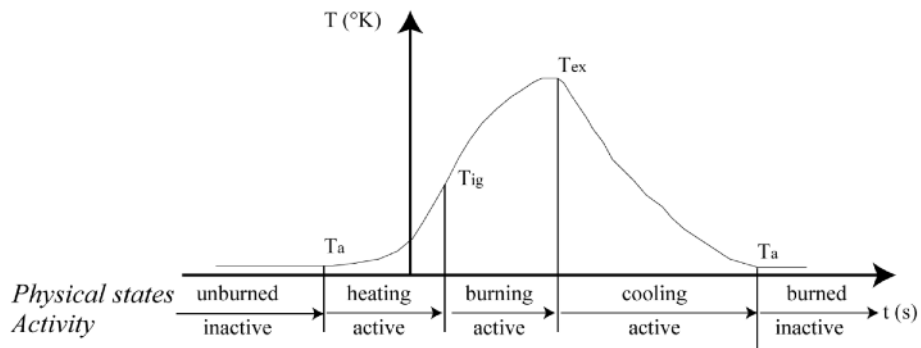


FIGURE 2.6 – Profil comportemental d'une cellule (règle de transition).

Cette approche a été appliquée à un modèle cellulaire de propagation basé sur la combustion d'une zone de végétation homogène possédant une masse m et une température T . Sur la figure 2.6, nous détaillons les profils de température du modèle et les phases d'activité.

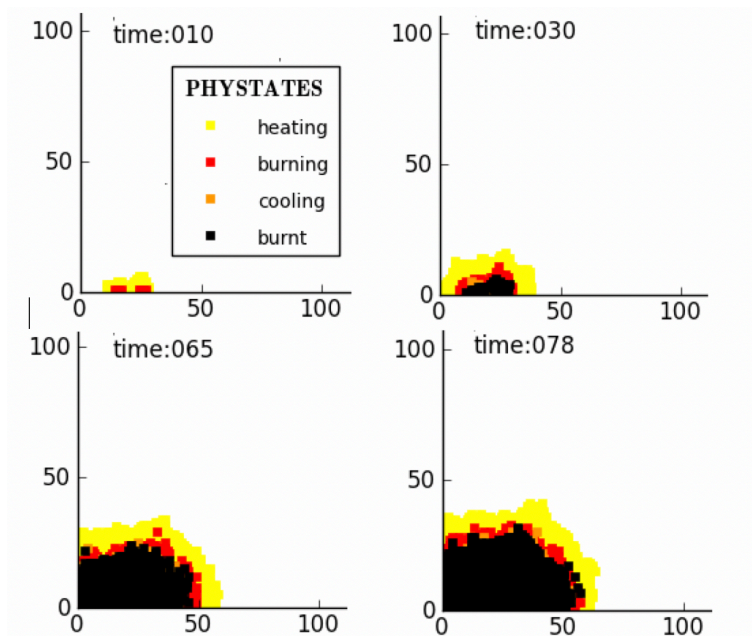


FIGURE 2.7 – Evolution dans le temps des états physiques du modèle. Légende : ambiante : blanc, préchauffé : jaune, ignition : rouge, extinction : orange, brûlée : noir.

Dans les paramètres initiaux du modèle, nous avons déclenché l'ignition de 8 cellules. Comme nous pouvons le constater sur la figure 2.7, après 10 pas de simulation nous voyons apparaître un petit front de flamme avec des cellules qui brûlent (en rouge) et des cellules qui préchauffent (en jaune). Le front de flamme continue de se propager tout au long de la simulation. Dans la figure 2.8, nous présentons 4 expériences de simulation. Elles donnent

des représentations différentes du front dues aux perturbations induites par la règle d'activité stochastique.

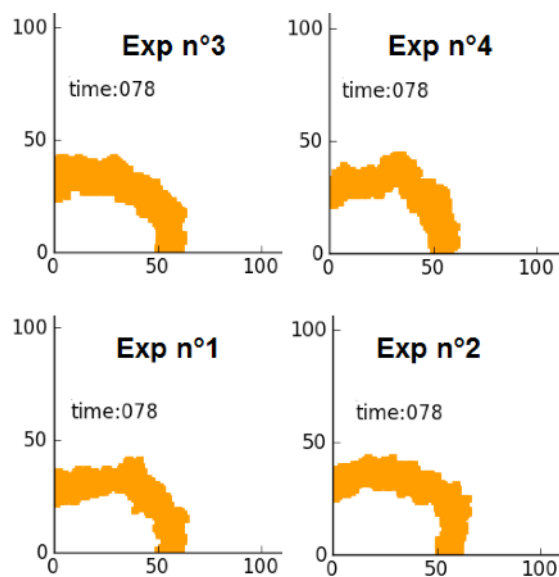


FIGURE 2.8 – Quatre répliques représentant l'évolution de l'activité des cellules à $t=78$. Légende : inactive : blanc, active : orange.

Les résultats que nous obtenons avec le modèle flou sont présentés sur les figures 2.9 et 2.10. Nous constatons que le front de flamme se propage plus rapidement si l'activité du modèle est gérée avec des règles floues plutôt qu'avec des règles stochastiques (figure 2.9 versus figure 2.7). Ce constat dépend du paramétrage du SIF (SEF d'entrée et règles floues). Nous constatons à temps de simulation identique, que l'approche floue engendre un nombre de cellules brûlées plus important. A $t=78$, avec le modèle flou, il y a environ 80 cellules brûlées sur le plan horizontal, alors que nous n'en dénombrons qu'environ 50 avec le modèle stochastique. Nous remarquons également que la propagation floue présente moins d'irrégularités. Elle paraît donc moins perturbée comparativement à l'approche stochastique.

Les résultats que nous obtenons soulignent l'intérêt d'utiliser l'activité floue au sein d'un CAM. L'intérêt principal se situe au niveau de la définition du comportement de propagation du modèle à partir de règles linguistiques simples exprimées en langage naturel. Les résultats obtenus prouvent que cette approche est comparable à une approche stochastique plus traditionnelle. Nous supposons ici que les tests de paramétrage du SIF sont similaires à la mise en place de répliques de simulations stochastiques. Il est vrai qu'au regard du faible nombre de paramètres à considérer (SEF et règles floues), nous utilisons ici une méthode de calibration empirique pour paramétrer notre SIF. Nous pouvons voir sur la figure 2.10 qu'une modification mineure des paramètres des règles du SIF permet d'influer énormément sur les résultats

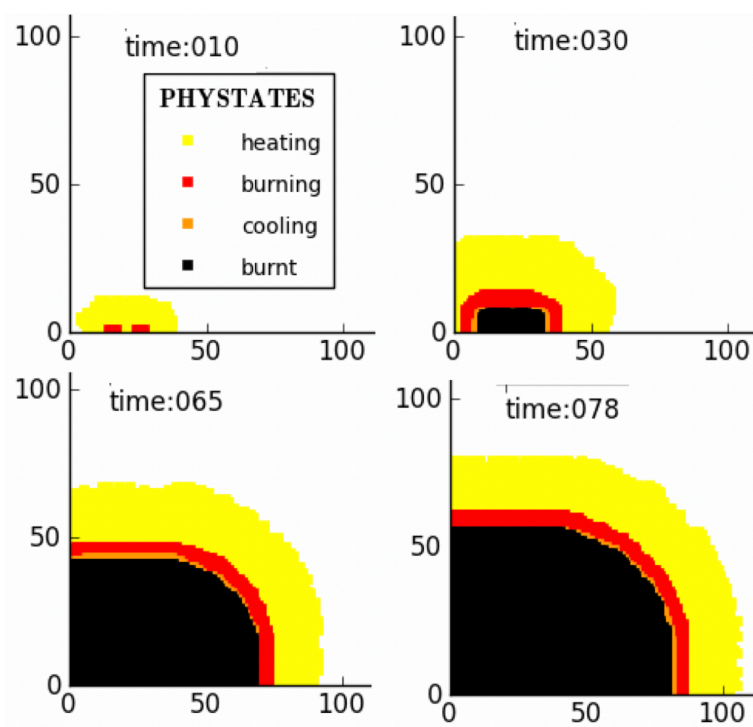


FIGURE 2.9 – Evolution dans le temps des états physiques du modèle fluide.

de propagation.

Dans les projections (b) et (c) de la figure 2.10, nous avons augmenté le nombre de cellules voisines nécessaire pour déclencher l'ignition de la cellule courante. Dans (d) un autre opérateur (min) est utilisé, et dans (e) et (f), nous avons modifié les intervalles d'entrées.

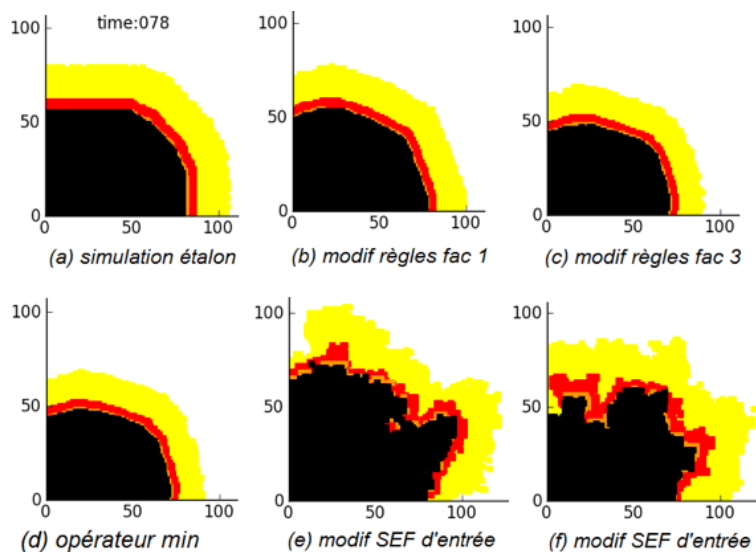


FIGURE 2.10 – Exemple de simulations avec modification des paramètres du SIF.

Les apports de notre "méthode floue" sont intéressants. Cependant, nous n'exploitons pas pleinement les possibilités du SIF. Nous ne pouvons pas quantifier précisément les résultats obtenus avec l'activité floue comparativement à ceux obtenus avec l'activité stochastique. Pour ce faire, il faudrait que nos résultats soient comparés avec des données expérimentales.

RECONNAISSANCE DE GESTES

Enfin, nous avons aussi utilisé l'expressivité des Systèmes d'Inférences Floues pour une application de reconnaissance de gestes. Elle est détaillée dans [Jean-Sébastien and Paul-Antoine \(2015\)](#). L'objectif était de capter grâce à un gant la position des doigts et de la main afin d'y associer un geste décrivant une note de musique. L'application devait favoriser l'apprentissage des chants polyphoniques corses en permettant de remplacer l'un des chanteurs. L'usage d'un SIF était bien indiqué car il permettait de faire correspondre des valeurs numériques d'entrée, les degrés d'inclinaison de chaque doigt et l'orientation de la main à une valeur décrivant le geste.

Ces travaux démontrent l'intérêt de la logique floue pour la représentation, la manipulation et l'évaluation de connaissances imparfaites. Ces aspects sont toujours d'actualité, et ils sont utilisés dans le cadre de la représentation des connaissances, la modélisation du doute et ouvrent nos recherches vers les méthodes d'aide à la prise de décisions.

Un premier exemple d'outil de décision est présenté dans la section suivante.

2.3.3 DIMZAL : DIMENSIONNEMENT D'OUVRAGE

Cette section présente l'outil *DimZal* pour Dimensionnement de Zone d'Appui à la Lutte. Les éléments qui y sont présentés sont résumés dans [Bisgambiglia et al. \(2017b\)](#) pour le modèle physique, et dans [Bisgambiglia et al. \(2013\)](#) pour l'architecture informatique. Une vidéo de démonstration est disponible [Chatelon \(2017\)](#).

L'objectif de ce travail était de combiner les compétences de l'équipe feux sur les modèles de propagation [Rossi et al. \(2011\)](#) et de l'équipe informatique sur les outils de modélisation et de simulation afin de développer un outil logiciel d'aide à la décision au profit des sapeurs-forestiers et des pompiers.

Positionnées et implantées dans une zone stratégique, les coupures de combustible assurent le cloisonnement des forêts, permettent de limiter sa propagation et diminuer son intensité. Le but de ces coupures de combustible est de réduire le risque d'incendie, de fournir une zone d'appui à la lutte (ZAL) pour sécuriser les interventions, et de réduire la puissance

du front.

Le modèle utilisé est présenté dans Rossi et al. (2011), c'est un modèle analytique basé sur le modèle de combustion de Balbi et al. (2010) et le modèle de flamme de Zárate et al. (2008) ainsi qu'un ensemble de paramètres, tels que la végétation, la météorologie, la topographie afin de calculer une distance de sécurité appelée ASD pour Acceptable Safety Distance. Cette distance est utilisée pour proposer une surface de défrichage de la végétation afin de réaliser des ZAL, et elle informe les pompiers sur le degré de chaleur à proximité du front de flamme.

Nos **motivations** étaient plurielles : (1) conduire des recherches pluridisciplinaires, (2) développer un outil concret, et (3) montrer que nos travaux théoriques et notamment le formalisme DEVS pouvaient être utilisés dans une application transférable vers la société civile. La contribution principale est donc de prouver que le formalisme DEVS n'est pas d'une méthodologie théorique.

Cet outil était une vraie demande des institutionnels.

2.3.3.1 CONTRIBUTIONS

Au niveau informatique, le travail a consisté à transformer un modèle physique en modèles DEVS, puis basculer d'API de modélisation et de simulation et les modèles sous forme de web-service comme le montre la figure 2.11.

Les résultats des modèles DEVS ont pu être vérifiés en rapport avec les résultats du modèle physique.

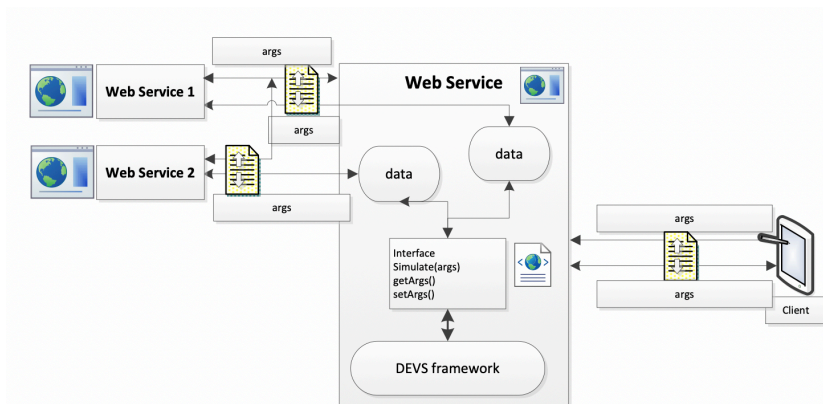


FIGURE 2.11 – Architecture de l'application DimZal.

Comme nous l'indiquons dans Bigambiglia et al. (2013) le formalisme DEVS est utilisé ici comme un outil de calcul permettant le dimensionnement de coupure de combustible (aide à la prise de décision).

2.3.3.2 APPLICATIONS

En 2013 dans le cadre du stage de Master 2 de *Romain Franceschini* l'application a été développée pour être utilisée sur tablette (iPad). Les modèles DEVS étaient codés sous l'API Ruby-DEVS présentée dans [Franceschini et al. \(2014a\)](#). Nous avons également fait une déclaration d'invention auprès de la SATT-SE.



FIGURE 2.12 – Vue de DimZal version 1, sélection de point (1/2).

Les figures 2.12 et 2.13 montrent l'interface. Le fonctionnement est assez simple, l'utilisateur dessine un chemin à partir de points, c'est le futur tracé de la ZAL. L'application récupère les coordonnées GPS, interroge un service web pour récupérer la topographie du terrain, et les autres entrants nécessaires aux modèles comme la végétation, et le vent maximum connu sur

la zone. Ensuite, toutes les données sont transmises aux modèles DEVS afin de calculer une distance de sécurité acceptable (ASD) en rapport aux rayonnements thermiques du front de flamme. Cette distance informe les pompiers sur le degré de chaleur à proximité du front de l'incendie.



FIGURE 2.13 – Vue de DimZal version 1, affichage de la ZAL (2/2).

Entre 2017 et 2018 dans le cadre du contrat d'alternance de Jean-Pierre Jouault, l'application a été redéveloppée sous forme de site web. Les modèles DEVS ont été portés sous VLE détaillée dans [Quesnel et al. \(2009\)](#).

Le fonctionnement reste identique mais comme le montre les figures 2.14 et 2.15 de nouvelles fonctionnalités viennent enrichir l'application comme des heatmaps de risques incen-

dies construites à partir d'une base de données d'historique des départs de feux ou de nouvelles possibilités de configuration des simulations.

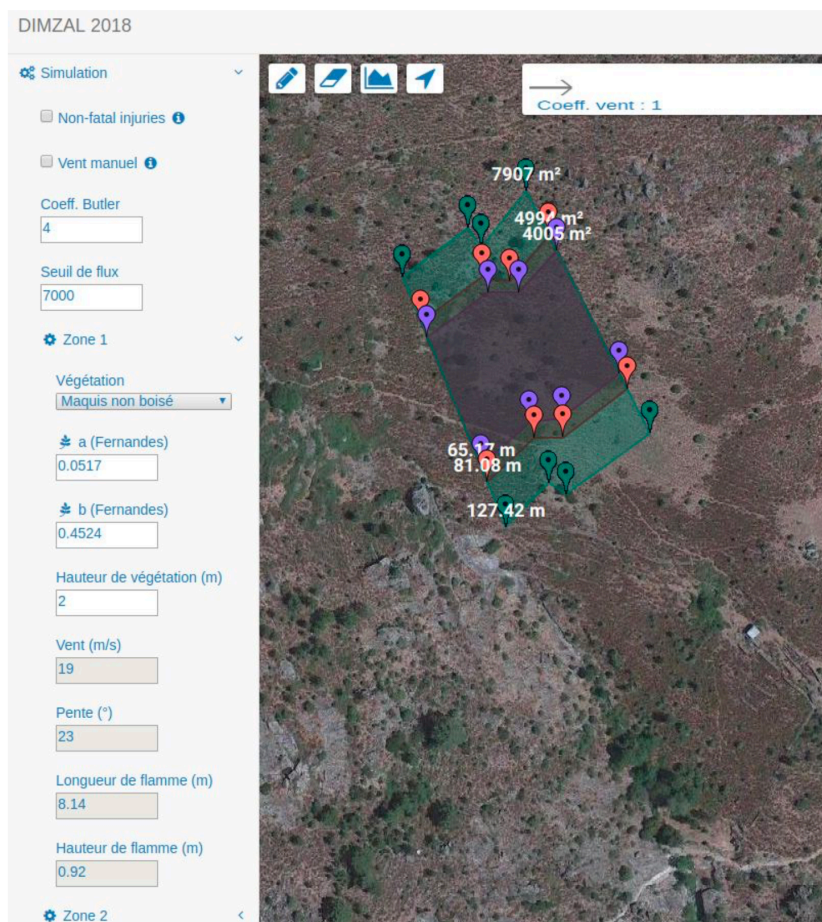


FIGURE 2.14 – Vue de DimZal version 2, configuration d'une simulation (1/2).

Les images 2.12, 2.13, 2.14 et 2.15 montrent l'évolution de l'interface et des fonctionnalités de l'application entre les 2 versions.

Ces travaux ont renforcé notre collaboration avec l'équipe feux. Ils s'inscrivent aujourd'hui dans une démarche plus large de développement d'outils logiciels pour la prévention et la lutte incendie. Ce nouveau projet est présenté dans la section suivante.

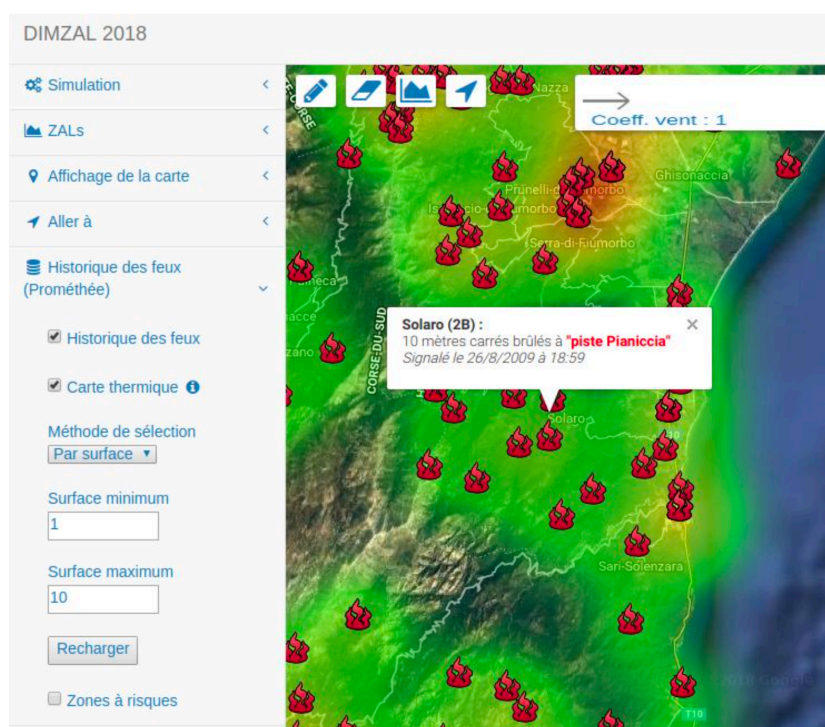


FIGURE 2.15 – Vue de DimZal version 2, affichage de l'historique des feux (2/2).

2.4

TRAVAUX EN COURS

2.4.1 GOLIAT : OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION

Le projet GOLIAT pour "Groupement d'Outils pour la Lutte Incendie et l'Aménagement du Territoire" a débuté en janvier 2020.

Les objectifs principaux du projet sont :

- d'une part d'approfondir nos connaissances concernant les incendies de végétation et de développer des prototypes d'outils d'aide à la décision destinés aux opérationnels pour la lutte incendie et l'aménagement du territoire ;
- d'autre part, d'étudier d'un point de vue historique et anthropologique l'usage du feu

dans les pratiques agraires traditionnelles (écobuages et feux pastoraux) en Corse ;

- et enfin, de réaliser un grand nombre d'actions de sensibilisation à la problématique des incendies de végétation en Corse auprès de différentes cibles (scolaires, grand public et élus).

Le volet informatique est centré sur l'une de nos nouvelles thématiques qui sera largement abordée dans la seconde partie de ce manuscrit. L'objectif est le développement d'algorithmes pour l'estimation des situations à risques. La connaissance des situations et l'analyse des feux passés peut fournir des informations utiles pour la prévention comme les périodes, les situations (grand vent, sécheresse, végétation, etc.) qui pourraient augmenter les risques d'incendie ou estimer l'impact qu'aurait pu avoir la présence de coupures de végétation. En situation de lutte, l'analyse des feux équivalents peut fournir des indications sur les moyens à mobiliser. Des analyses "statistiques" ou "possibilistes" - s'appuyant sur les théories de l'incertain - basées sur l'utilisation d'algorithmes issus de l'Intelligence Artificielle permettront de traiter ces données pour essayer d'en extraire des informations pouvant améliorer les opérations de prévention ou de lutte.

Nous pensons utiliser ici nos travaux sur les méthodes d'optimisation et les réseaux de neurones. Travaux en cours et présentés dans la partie suivante après une conclusion résumant cette première partie.

2.5

CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans cette partie, nous sommes revenus sur nos premiers travaux de recherche. Nous avons présenté plusieurs applications en lien avec la thématique des feux de forêt. Nos travaux sur l'utilisation et l'association entre la logique floue et le formalisme DEVS, nous ont conduits à proposer de nouvelles méthodes de modélisation et de simulation permettant la prise en compte dans les modèles de données imprécises dans iDEVS puis imparfaites dans Fuzz-iDEVS.

iDEVS est une méthode basée sur la théorie des sous-ensembles flous. Le lien avec le formalisme DEVS est effectué grâce à une classe (FuzzySet). Elle permet de représenter et ma-

nipuler des imprécisions sous forme d'intervalles et de fonctions. Cette classe implémente les concepts des sous-ensembles flous et de l'arithmétique des intervalles. L'association permet de modéliser et simuler l'imprécision dans les données des modèles DEVS.

Fuzz-iDEVS est une généralisation d'iDEVS qui étend la méthodologie pour décrire des systèmes d'inférence floue (SIF). La même approche est proposée afin de faire une analogie entre les éléments composant un SIF, c'est-à-dire (1) les modules d'entrée (fuzzification), les modules de sortie (defuzzification) et le moteur d'inférence (base de règles), et des modèles DEVS. Le lien est possible grâce à une nouvelle classe (FuzzySets) qui est un conteneur d'objet de type FuzzySet et qui implémente les concepts des SIF comme les méthodes de [Takagi and Sugeno \(1985\)](#) et [Mamdani \(1974\)](#).

L'ensemble de ces travaux à la fois théoriques et appliqués, nous ont orientés vers les méthodes et outils d'aide à la prise de décision. Dans cette optique, la logique floue offre de nombreuses possibilités. De nombreux aspects théoriques figurent encore aujourd'hui dans nos thématiques. Nous pouvons citer le projet de quantifier la crédibilité d'une simulation au vu de l'expertise (niveau de connaissance) du modélisateur.

Pour le côté applicatif, les deux dernières sections sur l'application DimZal et le projet *GOLIAT* sont de bons exemples de recherche appliquée avec un fort ancrage territorial et un transfert possible vers la société civile.

Dans le chapitre suivant, nous allons revenir sur le deuxième axe de nos travaux. Le cadre théorique reste identique, à savoir la théorie de la modélisation et de la simulation mais cette fois ouvert aux systèmes multi-agents (SMA) et à l'optimisation par simulation (OvS). Toujours dans les domaines de l'aide à la prise de décision, le cadre applicatif est maintenant la gestion des ressources halieutiques (après le feu, l'eau).

Chapitre 3 :

Aide à la décision pour la gestion des ressources halieutiques

Sommaire

3.1	Contexte : modèles de gestion de ressources et projet MoonFish . . .	64
3.2	Travaux finalisés	67
3.2.1	Courantologie et simulation centrée individus	67
3.2.2	Modélisation et Simulation Multi-Agents	70
3.2.3	Conclusion	80
3.3	Notions de base : les modèles de stocks	81
3.3.1	Modèles biologiques de croissance	82
3.3.2	Modèles proie-prédateur	83
3.3.3	Modèles structuraux	85
3.3.4	Modèles informatiques	86
3.3.5	Un modèle pour la Corse	87
3.4	Travaux en cours	89
3.4.1	Optimisation et Simulation	90
3.4.2	Vers des agents cognitifs	111
3.5	Conclusion du chapitre	124

3.1

CONTEXTE : MODÈLES DE GESTION DE RESSOURCES ET PROJET MOONFISH

DANS ce deuxième chapitre, nous allons détailler une autre application orientée sur la gestion des ressources halieutiques. Cette thématique a débuté en 2010-2011 avec l'émergence de la plateforme Stella Mare, aujourd'hui UMS CNRS, dont le but est de proposer et développer des méthodes et techniques innovantes d'ingénierie écologique marine et littorale.

Nos premiers travaux en collaboration avec les biologistes de la plateforme et les courantologues de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) ont initié de nombreux projets :

- le programme "Modélisation et hydrodynamique" de l'UMS *Stella-Mare* sur l'acquisition de données courantologiques et la validation d'un modèle à maille réduite [Gérigny et al. \(2015\)](#);
- la poursuite de ce programme s'est orientée vers des simulations de scénarii de dispersion larvaire [Koeck et al. \(2015\)](#);
- le programme **DACOR** pour Données hAlieutiques CORses porté par l'Office de l'Environnement de la Corse (OEC);
- le programme **MoonFish**, pour outils de modélisation pour la gestion durable des ressources halieutiques en Corse porté par l'Université de Corse Pasquale Paoli et le CNRS (UMR SPE), regroupe plusieurs acteurs du territoire, à savoir la station STARESO, le comité régional des pêches (CRPMEM) et l'office de l'environnement de la Corse (OEC). Nous le coordonnons avec *Eric Durieux*, Biologiste de l'équipe GEM;
- le programme DENTALE, porté par l'UMS Stella Mare, a démarré début 2021 pour une durée de 2 ans et concerne l'évaluation de stock du denti Dentex dentex en Corse.

Nous allons revenir sur le programme scientifique *MoonFish* car ses actions dictent une partie des travaux de recherches présentés dans ce chapitre. Ce programme est un projet fi-

nancé par l'Union Européenne (UE) au travers des fonds FEDER de la région Corse (CdC). Il a pour objectif de faire un état des lieux des ressources halieutiques en Corse, et de proposer une évaluation des politiques de gestion actuellement en place.

La question centrale de ce projet est de savoir comment assurer une exploitation raisonnée de la ressource dans un modèle de développement économique pérenne en proposant des stratégies de pêche respectueuses du milieu afin de maintenir ou restaurer les stocks à des niveaux permettant de produire un rendement maximal durable.

Depuis plusieurs années la politique scientifique de l'Université de Corse Pasquale Paoli et plus particulièrement celle de l'UMR SPE est basée sur des thématiques de recherche à forts ancrages régionaux et représentatives des potentialités des régions méditerranéennes. La question de la bonne gestion des ressources naturelles tient une place importante dans la réflexion concernant un modèle de développement durable respectueux de l'environnement. Des thématiques de recherche pluridisciplinaires dans le domaine de la gestion des ressources halieutiques se sont construites en collaboration avec des professionnels et des institutionnels, afin de voir l'environnement non seulement comme un milieu à protéger ou à défendre mais également comme support de développement socio-économique. Un mode de gestion et d'exploitation des ressources halieutiques en harmonie avec l'environnement et avec le potentiel des stocks, constitue alors l'enjeu de cette opération.

La gestion des ressources halieutiques est au cœur des problématiques écologiques actuelles. La protection de certaines espèces menacées impose plus que jamais la mise en place de réglementations efficaces. Cependant ces politiques sont de nos jours très difficiles à mettre en place, notamment du fait qu'elles sont souvent génératrices de pertes de revenus pour les professionnels. Des solutions efficaces doivent donc être élaborées afin d'offrir une gestion durable des ressources, des coûts maîtrisés et des profits suffisants. Des outils d'aide à la décision basés sur la modélisation et la simulation (M&S) permettent la prise en charge de nombreux critères pouvant être complémentaires mais également opposés ainsi que la mise en place de méthodes d'optimisation des ressources.

Un rapport récent de l'IFREMER montre que la surpêche touche un quart des stocks de poissons pêchés en France, source : [IFREMER \(2019\)](#) "48% des volumes pêchés en France sont issus de stocks de poissons exploités durablement, et 27% de stocks surpêchés.". Lorsque l'on sait que les océans sont la principale source de protéines de la planète, la gestion durable des stocks est donc un enjeu crucial. C'est l'un des objectifs du projet européen [MoonFish](#), au niveau de la Méditerranée et surtout des côtes corses. Les métiers de la pêche côtière en Corse sont encore artisanaux. Quatre prud'homies (nord-est, nord-ouest, sud-est, sud-ouest) se partagent plus de 1 000 kilomètres de côtes, avec 42 ports ou points de débarquement, pour

environ 200 navires (49 Bastia, 23 Balagne, 44 Bonifacio, 76 Ajaccio) et 300 marins pêcheurs. Bien que les données sur les pêches soient pour le moment insuffisantes, elles nous alertent déjà sur la nécessité de mettre en place des politiques vertueuses de bonne gestion.

L'ensemble des travaux présentés dans ce chapitre ont un lien avec ce projet. Soit ils sont antérieurs et ont participé à sa construction, soit ils sont en cours et ont pour objectifs de répondre aux différentes problématiques de gestion des ressources, d'évaluation des politiques et enfin de propositions de processus de décision.

Pour les aspects informatiques, le cadre est toujours la théorie de la modélisation et la simulation (TM&S). Elle est cette fois étendue vers le paradigme agent utilisé à la fois sous la dénomination de système multi-agents (SMA), de modèles centrés sur les individus (IBM) et de simulations à base d'agents¹. Nous reviendrons par la suite sur ces différentes terminologies.

Après la proposition d'une analogie entre SMA et le formalisme PDEVS au travers de la formalisation DPDEMAS [Franceschini et al. \(2017\)](#), nous explorons dans nos travaux les plus récents les approches agents dites cognitives (ou architectures cognitives) afin de donner plus d'autonomie à nos agents et leur permettre de prendre des décisions en situation complexes. Pour cela, nous nous sommes orientés vers les méthodes d'optimisation par simulation (OvS), et les méthodes d'apprentissage machines basées sur les réseaux de neurones artificiels (RN).

Un élément nous semble important à souligner, pour certaines applications, notre positionnement peut sembler proche d'ingénierie scientifique au service d'autres sciences. C'était déjà le cas dans le premier chapitre sur la problématique des incendies avec la Physique. Il est à la fois possible de faire avancer les théories de notre science et d'aider les autres domaines en étant support de création et/ou de validation de nouvelles connaissances.

Ce chapitre va débiter par la présentation de travaux finalisés qui avaient surtout pour objectifs l'acquisition de données et l'émergence de nos nouvelles problématiques de recherche. Elles sont formalisées et développées dans le cadre du projet MoonFish.

Dans une deuxième section, nous allons présenter une étude sur des modèles de courantologie. Elle était menée dans le cadre du programme "Modélisation et hydrodynamique" de *Stella-Mare*. Ce programme avait pour objectif l'acquisition et l'utilisation de données courantologiques autour de la Corse. Les modèles de courantologie servent de support pour l'étude des phénomènes de recrutement et plus généralement pour tout ce qui touche aux ressources halieutiques. Puis, nous reviendrons sur nos travaux théoriques sur les systèmes multi-agents et la proposition d'une analogie à partir de modèles PDEVS et DSDE.

Dans la troisième section, nous proposons une analyse des différents modèles de stocks et

1. Agent Based Modelling and Simulation (ABMS) en anglais.

d'accroissement de la population utilisables pour répondre à notre problématique de gestion des ressources halieutiques.

Enfin, avant de conclure, dans la quatrième section, nous décrirons nos travaux en cours sur l'optimisation par simulation à partir des métaheuristiques et enfin nos travaux sur les architectures cognitives pour les agents.

3.2

TRAVAUX FINALISÉS

Dans cette section, nous allons revenir sur les prémisses de nos travaux en lien avec la gestion des ressources halieutiques. Ils ont été initiés au début des années 2010. Les collaborations engagées notamment avec l'IFREMER et l'équipe GEM ont conduit et largement orienté nos thématiques de recherche. Par exemple, après une phase d'appropriation du domaine et d'utilisation de l'informatique comme outil au service de l'écologie marine, nous avons obtenu des financements pour le projet collaboratif *MoonFish*.

3.2.1 COURANTOLOGIE ET SIMULATION CENTRÉE INDIVIDUS

Ces travaux se sont déroulés entre 2012 et 2015 dans le cadre du Programme "Modélisation et hydrodynamique" de l'UMS CNRS *Stella-Mare*. Les résultats sont détaillés dans [Gérigny et al. \(2015\)](#) pour la partie courantologie et [Koeck et al. \(2015\)](#) pour la partie dispersion larvaire.

Nos **objectifs** étaient ici :

- de développer des outils de modélisation de processus hydrologiques,
- d'acquérir des données hydrologiques et courantologiques en vue de valider les modèles et d'enrichir les connaissances hydrodynamiques de différentes zones autour de la Corse,
- de développer la maîtrise d'outils de modélisation de dispersion larvaire pour la compréhension des processus de recrutement.

3.2.1.1 CONTRIBUTIONS

Pour mener à bien ces différentes thématiques, la constitution d'une base de données du modèle MARS 3D pour les emprises MENOR (résolution 1km200, année 2012), CORSE (résolution 400 m, année 2012) et BASTIA (résolution 100m, pour quelques mois de l'année 2013) était une première étape incontournable de ce travail.

L'objectif de ce travail en collaboration avec l'IFREMER était d'acquérir plus de connaissances sur les phénomènes courantologiques en Corse et de raffiner le modèle MARS. Nous souhaitons affiner la maille du modèle pour passer de 400 mètres à 100 mètres afin de mieux représenter les phénomènes impactant la propagation des larves.

Pour ce faire, une campagne océanographique a été organisée en août 2012, dont un des objectifs était d'acquérir des données hydrologiques et courantologiques le long des transects. Des profils ADCP ont ainsi été réalisés dans la colonne d'eau afin d'avoir une vision générale de la dynamique des courants à méso-échelle dans une zone considérée comme importante d'un point de vue économique et écologique.

Deux zones ont été étudiées, à l'extrême Sud, les bouches de Bonifacio car il y a une réserve naturelle (RNBB) et les phénomènes sont particulièrement intéressants [Gérigny \(2011\)](#). L'autre à l'Est sur le canal de Corse car les phénomènes sont plus simples et influencent les côtes de Bastia et sa région.

3.2.1.2 APPLICATIONS

Des mesures ont permis d'affiner la compréhension de la circulation dans les Bouches de Bonifacio et de valider localement les résultats fournis par le modèle Corse 400m qui se montrent cohérents avec la mesure dans les limites du détroit correspondant à la zone du Parc Naturel (RNBB²). Les simulations issues de ce modèle pourront être utilisées avec un bon niveau de confiance et servir de support aux études de dispersions menées à partir des prélèvements réalisés le long des profils (espèces biologiques et/ou micro-contaminants). Les résultats de ces études sont présentés figure 3.1 et dans [Gérigny et al. \(2015\)](#).

Sur la base de ces données de courantologie, nous avons étudié la dispersion larvaire afin d'identifier les zones de recrutement des ressources halieutiques. De part notre collaboration avec l'IFREMER, nous avons sélectionné l'outil Ichthyop "conçu pour étudier les effets de facteurs physiques et biologiques sur la dynamique de ichthyoplancton". La constitution d'une base de données de sortie Ichthyop traitant de la dispersion larvaire dans les Bouches de Bonifacio est finalisée à travers différents scénarios et publiée dans [Koeck et al. \(2015\)](#). Ces

2. Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio.

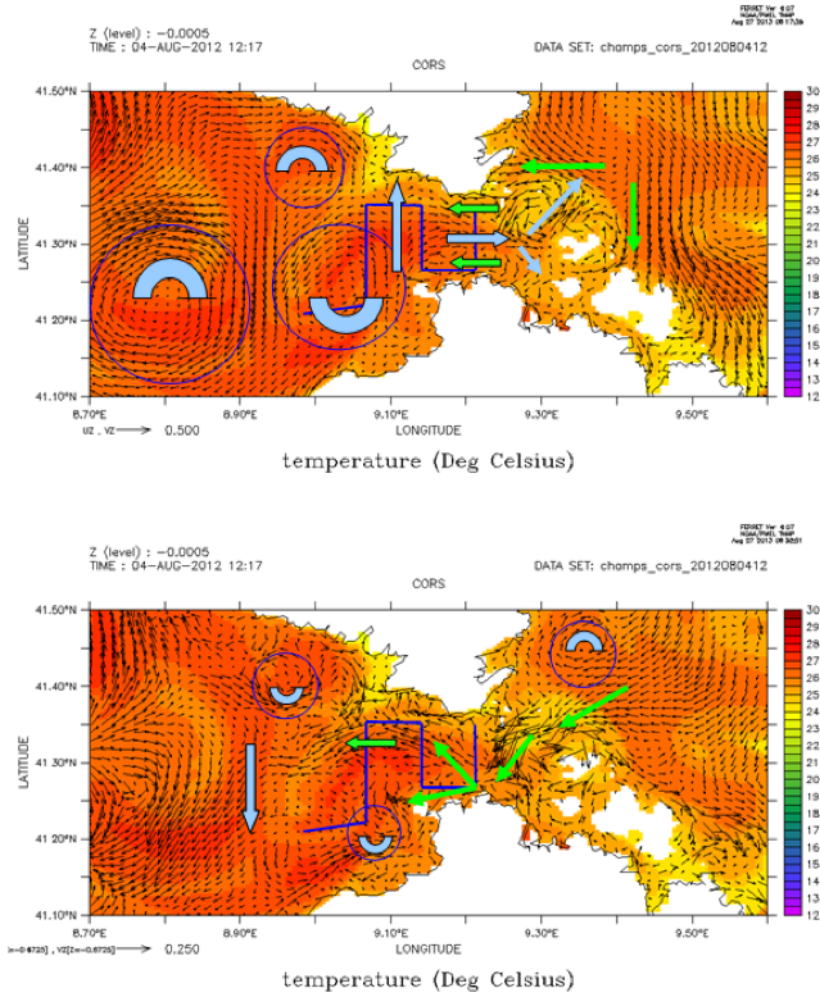


FIGURE 3.1 – Exemple d’analyse de la circulation des courants dans les bouches de Bonifacio pour le 4 aout 2012, effectuée entre le couplage des données modélisées MARS3D-Corse 400m et les données in-situ

données biologiques sont mises en relation et modélisées en fonction des données environnementales comme les courants. Cela permet de définir les processus de dispersion larvaire, colonisation et recrutement à intégrer dans les modèles de dynamique de population.

Ce travail n’est qu’une étape préliminaire. Une étude comparative d’outils de dispersion est en cours dans le cadre du projet *MoonFish*.

En conclusion, nous pouvons noter que ces travaux, sur la courantologie et la dispersion

larvaire, ont permis de renforcer nos liens avec l'IFREMER mais surtout, ils sont initiateurs du dépôt du programme scientifique MoonFish.

Dans ce programme ces deux thématiques sont regroupées dans un workpackage et des travaux sont toujours en cours cette fois à partir du logiciel Connectivity Modeling System : **CMS**, détaillé dans [Paris et al. \(2013\)](#).

La base de données sur les courants a été finalisée. L'étape suivante, déjà en réflexion sur le programme "Modélisation et hydrodynamique", était de pouvoir ajouter à la couche courant la biomasse, et enfin modéliser et simuler l'activité de pêche. Pour cela, nous avons décidé de nous appuyer sur le paradigme agent présenté figure 3.2.

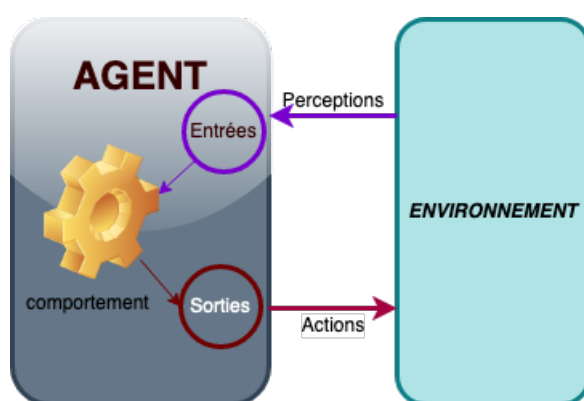


FIGURE 3.2 – Représentation d'un Agent.

Ce paradigme permet de décrire des systèmes en utilisant des concepts abstraits mais parlant comme les agents, leurs environnements physiques ou sociaux, leurs interactions, l'autonomie, la communication, etc. Ces concepts peuvent s'incarner dans un grand nombre de cas d'applications, ce qui permet au paradigme d'être utilisé dans de nombreux domaines.

3.2.2 MODÉLISATION ET SIMULATION MULTI-AGENTS

A partir d'un désir d'ouvrir nos thématiques de recherche vers un paradigme mature et qui a fait ses preuves (les SMA), des travaux ont débuté en 2012 [Mattei et al. \(2012\)](#) avec le suivi d'un étudiant de Master en alternance dans notre équipe, ils se sont poursuivis entre 2014 et 2017 dans le cadre d'une thèse [Franceschini \(2017\)](#). Cette section résume notre approche, largement décrite dans [Franceschini \(2017\)](#).

Dans un contexte de gestion des ressources halieutiques et d'aide à la prise de décision la problématique de vérification et de validation de nos hypothèses de modélisation et nos scénarii de simulation était fondamentale. Comment proposer des conclusions crédibles sans cela? Face à une même question, des outils, des méthodes différentes doivent aboutir aux

mêmes conclusions. La reproductibilité est essentielle pour établir la confiance dans les résultats d'expériences, et pour l'avancement de la Science en général.

Ces difficultés, liées à la reproductibilité des modèles et des résultats, ont aussi été soulevées à plusieurs reprises au sein de la communauté SMA [Duboz et al. \(2012\)](#); [Rouchier \(2003\)](#); [Wilensky and Rand \(2007\)](#); [Michel \(2004\)](#).

Elles peuvent être organisées selon deux catégories : les facteurs humains et les facteurs techniques.

Parmi les facteurs humains, [Dalle \(2012\)](#) met en cause l'ignorance sincère à propos de certains paramètres (*e.g.* le générateur de nombres aléatoires utilisé), les erreurs de manipulation, l'impossibilité de partager le code source pour des raisons de licence, ou encore l'omission de détails importants vis-à-vis du modèle dans les publications. [Michel \(2004\)](#) le souligne également, une spécification insuffisante du modèle dans une publication ne permet ni la réplique d'un modèle ni la reproductibilité d'une expérience numérique. Ce constat a également été souligné dans des travaux consistant à reproduire une expérience numérique, comme ceux de [Edmonds and Hales \(2003\)](#).

À ce sujet, [Duboz et al. \(2012\)](#) nous alertent sur la nécessité d'utiliser une spécification rigoureuse afin de permettre une implémentation non ambiguë du modèle. Cette question est d'autant plus difficile que les systèmes multi-agents sont issus et utilisés dans des domaines de recherche différents aux enjeux variés, ce qui a entraîné des définitions et visions différentes à propos de leur nature, même si aujourd'hui la communauté semble aboutir à un consensus.

Ces problématiques sont également liées aux facteurs techniques. En effet, la définition d'un modèle SMA et sa simulation sont souvent liées aux spécificités de la plateforme utilisée. Les plateformes de modélisation et de simulation dédiées aux SMA telles que NetLogo [Wilensky \(1999\)](#) ou GAMA [Grignard et al. \(2013\)](#) proposent des langages informatiques spécifiques qui offrent des primitives permettant de faciliter la modélisation des systèmes multi-agents. Un tel langage constitue une abstraction sur les concepts implémentés par la plateforme. Il dépend donc des choix conceptuels qui ont été opérés à propos de la nature d'un SMA et des entités qui le composent.

L'étude menée par [Bajracharya and Duboz \(2013\)](#) qui consiste à implémenter un modèle épidémiologique simple sur trois plateformes SMA différentes en témoigne. Après la simulation des différents modèles, chaque plateforme produit des résultats différents. La diversité des plateformes de simulation multi-agents ne permet pas d'obtenir des résultats identiques d'une plateforme à l'autre. Parmi les facteurs qui peuvent influencer les résultats, [Lawson et al. \(2000\)](#) identifient l'ordonnancement des agents. En effet, le fait qu'une multitude d'agents effectuent leurs actions potentiellement de manière simultanée dans un environnement com-

mun peut entraîner des trajectoires d'états différentes et donc influencer les résultats en fonction de leur ordre d'activation. Michel (2004) identifie également la manière dont le simulateur traite les actions simultanées des agents comme une source qui peut mener à des résultats différents.

Pour répondre à ces problématiques, nous proposons :

- la formalisation des modèles au travers de l'usage de méthodes formelles comme PDEVs, cette approche doit améliorer la reproductibilité des expériences numériques dédiées aux systèmes multi-agents.;
- le développement d'un outil de modélisation et de simulation afin de maîtriser la partie logicielle et donc faciliter la répétabilité des expériences.

A notre sens, "l'amélioration de la qualité *des décisions* et des publications passe par la reproductibilité des résultats de simulation, et donc des conclusions scientifiques qui en découlent, ..." extrait du paragraphe d'introduction des actes du *workshop JDF 2020 Bisgambiglia et al.* (2020).

Dans le contexte particulier de l'ingénierie logicielle, nous devons d'abord fournir les outils qui permettent de répéter les expériences numériques. Cette répétabilité est un cas particulier de reproductibilité. Elle est essentielle à la production de logiciels fiables.

Impossible de mettre au point un programme, de le déboguer, si le code n'est pas répétable au sens strict "qui peut être accompli de nouveau à l'identique" Hill et al. (2017).

La reproductibilité nécessite également de pouvoir partager les modèles, les algorithmes associés et les simulateurs. Les spécifications formelles et opérationnelles doivent être partagées pour pouvoir être reproduites. Les aspects formels sont essentiels pour la reproductibilité des expériences numériques et constituent dans ce sens un lien fort avec la TM&S.

3.2.2.1 CONTRIBUTIONS

Les contributions de ces travaux sont nombreuses :

- dans un premier temps, ils nous permettent d'élargir nos thématiques de recherche vers le paradigme Agent et les problématiques de la reproductibilité des expériences de simulation numérique Hill (2017); Franceschini et al. (2018b);
- ensuite, ils nous ont conduits à proposer et développer deux API de modélisation et de simulation DEVs-Ruby Franceschini et al. (2014b,a) et Quartz Franceschini et al. (2018a);

- nous avons montré dans [Franceschini et al. \(2018b\)](#) que les API développées produisaient des résultats répétables et pouvaient également reproduire des résultats de modèles de la littérature ;
- puis, nous avons proposé une formalisation nommée DPDEMAs afin de décrire un SMA à partir de DSDE (DEVS dynamique [Barros \(2003\)](#)) [Franceschini et al. \(2017\)](#) ;
- enfin, nous avons développé une extension de l’approche multi-composants pour le formalisme PDEVS nommée Multi-PDEVS [Foures et al. \(2018\)](#).

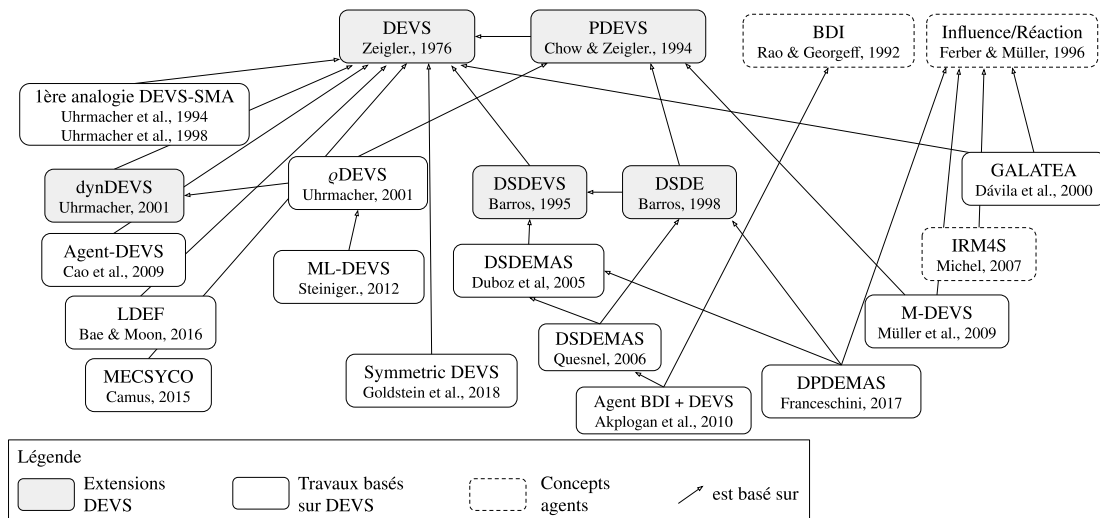


FIGURE 3.3 – Positionnement de DPDEMAs dans l’existant [Franceschini and Duboz \(2020\)](#).

L’apport principal étant la formalisation DPDEMAs implémentée dans l’API Quartz [Franceschini et al. \(2018a\)](#).

Le positionnement de DPDEMAs dans l’existant est illustré dans la figure 3.3.

Le développement de ces API avait pour but de permettre la modélisation et la simulation de systèmes multi-agents basés sur la formalisation DPDEMAs. Pour cela, nous avons retenu du point de vue du formalisme l’implémentation de PDEVS pour sa gestion simultanée des évènements ainsi que de l’extension DSDE, afin de permettre une dynamique structurée au cours de la simulation. La simulation de systèmes multi-agents peut mettre à rude épreuve les systèmes informatiques. Les besoins en ressources computationnelles ou en ressources mémoire sont notamment liés au nombre et à la complexité des agents qui composent le système mais également à l’étendue et à la résolution des environnements modélisés. Nous avons donc veillé à réaliser un certain nombre d’optimisations afin d’obtenir des performances convenables (c.f. [Franceschini et al. \(2017\)](#)).

La plateforme Quartz est un héritage direct de la première plateforme développée et nommée DEVS-Ruby [Franceschini et al. \(2014a\)](#). Comme son nom le laisse supposer, l’implé-

mentation de DEVS-Ruby a été réalisée avec Ruby, un langage interprété au typage dynamique.

Quartz constitue une variante de DEVS-Ruby, qui est basée sur Crystal ³, un langage compilé au typage statique (avec inférence de types), dont la syntaxe est très similaire à Ruby. Crystal est un langage compilé de haut-niveau, orienté objet et fonctionnel, doté d'un système de typage basé sur les *union types* Igarashi and Nagira (2006), dont les valeurs ne peuvent pas être nulles. Cette dernière particularité associée au fait qu'un ramasse-miettes gère l'allocation et la désallocation de la mémoire permet de prévenir les erreurs liées à sa gestion. Malgré la présence d'un ramasse-miettes, Crystal permet de garder la maîtrise des allocations effectuées sur le tas ou sur la pile, puisqu'il supporte les *value types*. Aussi, à travers le support de la généricité et d'un système de macros, le langage permet d'effectuer de la métaprogrammation. Pour ces raisons, Crystal représente un compromis idéal entre l'expressivité de Ruby, qui permet un prototypage rapide des modèles, et les performances et les garanties d'un langage compilé. L'utilisation d'un langage compilé permet de réaliser une analyse statique sur les modèles afin de vérifier certaines propriétés.

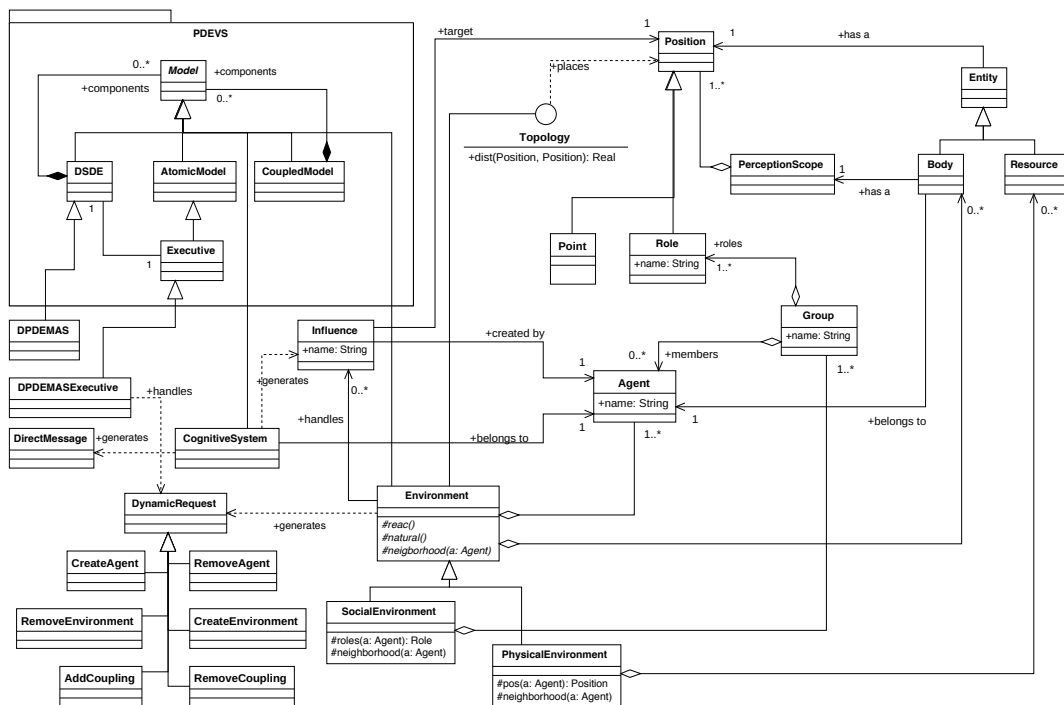


FIGURE 3.4 – Métamodèle UML du système multi-agents adopté par la spécification DPDE-MAS, source Franceschini et al. (2017).

L'ensemble de la formalisation est détaillé dans Franceschini et al. (2017), en complé-

3. <https://crystal-lang.org>

ment le langage UML est utilisé afin de donner une représentation graphique du métamodèle adopté. La figure 3.4 décrit le diagramme UML simplifié du métamodèle et permet de visualiser les relations entre agents, corps, esprits, environnements, positions, ou encore influences.

Afin de spécifier l'agent, nous nous appuyons sur l'analogie proposée par [Uhrmacher and Arnold \(1994\)](#), reprise par [Duboz et al. \(2002\)](#) entre un modèle PDEVS et un agent, laquelle permet de mettre en évidence la capacité d'un modèle PDEVS (couplé ou non) à satisfaire les propriétés définissant un agent selon [Wooldridge and Jennings \(1995\)](#) :

- *autonomie* : le modèle est seul responsable de son état ;
- *proactivité* : à travers la transition interne ;
- *réactivité* : perception à travers la transition externe et action à travers la fonction de sortie après un état transitoire ;
- *sociabilité* : à travers la communication via les ports.

Plus précisément, nous reprenons cette analogie pour définir le *système cognitif* de l'agent, étant donné que nous utilisons la séparation explicite du "corps" et de "l'esprit" de l'agent. Comme le précise [Saunier \(2015\)](#), le fait de décomposer architecturalement l'agent en deux parties pour distinguer l'esprit et le corps n'est pas une approche courante dans la communauté SMA. Cette approche peut être associée à la théorie de l'approche incarnée de la "cognition" [Wilson \(2002\)](#). Celle-ci considère que l'esprit, le corps et l'environnement jouent un rôle dans le processus cognitif global, par opposition à l'approche "cognitiviste" classique [Haugeland \(1989\)](#) où le corps est entièrement déconnecté du siège de l'intelligence. [Saunier \(2015\)](#), toujours, considère le corps comme une abstraction de premier ordre : bien que l'esprit puisse prendre n'importe quelle décision, les limites à la réalisation de ces décisions sont imposées à la fois par les capacités du corps et par les règles de l'environnement.

Cette décomposition de l'agent présente plusieurs intérêts conceptuels. Elle permet à un agent d'exister au sein de plusieurs environnements. Le corps est alors la manifestation physique de l'agent au sein d'un environnement. C'est à travers lui que l'agent peut exposer certaines caractéristiques observables par les autres agents, qu'il peut percevoir des informations et agir. Les travaux de [Soulié \(2001\)](#) ; [Soulié \(2012\)](#) sur l'approche multi-environnement sont à notre connaissance les premiers à séparer de manière explicite le corps de l'esprit de l'agent. On retrouve ensuite cette idée dans les modèles conceptuels AGRE [Ferber \(1995b\)](#) ou encore MASQ [Dinu et al. \(2012\)](#). Plus qu'un simple intermédiaire entre l'environnement et le processus décisionnel de l'agent, le corps permet également de satisfaire la *contrainte d'intégrité interne de l'agent* [Michel \(2007b, 2015\)](#), qui consiste à s'assurer que les agents réalisent leur processus de délibération en disposant du contrôle de leur état.

Ainsi, cette distinction permet de considérer la partie physique de l'agent comme une entité à part entière de l'environnement. Un agent ne perçoit pas le système cognitif de ses pairs, il perçoit uniquement leurs corps.

La description d'un agent à partir du couple corps/esprit est très importante. L'esprit est donc le siège des décisions et le corps la représentation de l'agent dans un environnement.

Nous faisons également apparaître une partie du métamodèle du formalisme PDEVS sous la forme d'un paquetage dédié afin d'en représenter les concepts. Par exemple, le système multi-agents DPDEMAS est un modèle DSDE ; le système cognitif est un modèle, tout comme l'environnement.

Les types de messages qui transitent entre les ports des différents modèles sont représentés sous forme de dépendance. Par exemple, l'environnement envoie des requêtes dynamiques, et le modèle exécutif DPDEMAS les traite.

Ces relations de dépendance représentent indirectement les différents types de couplage entre les modèles PDEVS. Ainsi, le système cognitif envoie et reçoit des messages directs ; envoie des influences qui sont traitées par l'environnement.

Les autres concepts représentés correspondent aux différentes entités qui composent l'état des modèles d'environnements ou l'état des systèmes cognitifs, tels que nous les avons définis dans DPDEMAS. Leurs relations permettent de visualiser la façon dont nous avons défini l'état des modèles.

En ce qui concerne l'environnement, il réalise une topologie à travers la fonction de distance, qui place les positions les unes par rapport aux autres. Les concepts qui forment son état sont représentés par des relations de composition ou d'association : les influences pour lesquelles l'environnement a réagi, les agents qui y sont plongés et les corps des agents. Comme l'environnement, l'agent est un concept central. Chaque système cognitif est associé à un agent, et chaque corps appartient à un agent. C'est à travers le corps que l'agent est plongé dans l'environnement. Deux spécialisations de l'environnement permettent de faire apparaître le concept d'environnement social et d'environnement physique. Le premier dispose d'une relation de composition avec les groupes qui le composent, où chaque groupe est composé d'un ensemble de rôles que les agents peuvent jouer. Les agents membres d'un groupe peuvent jouer différents rôles au sein d'un groupe. Cette relation est établie à travers le corps de l'agent et le fait qu'il soit situé. L'environnement physique, lui, est également composé de ressources.

3.2.2.2 APPLICATIONS

Deux exemples d'applications à base d'agents réactifs sont présentés dans [Franceschini et al. \(2017\)](#). Le premier modèle décrit un système proie/prédateur simple et permet de mettre

en application la dynamique structurelle du système à travers une dynamique de population. Le second exemple définit un modèle classique, SugarScape, et permet de souligner d'autres aspects de DPDEMAS, comme le processus de dynamique environnemental. Un exemple de simulation est présenté figure 3.5.

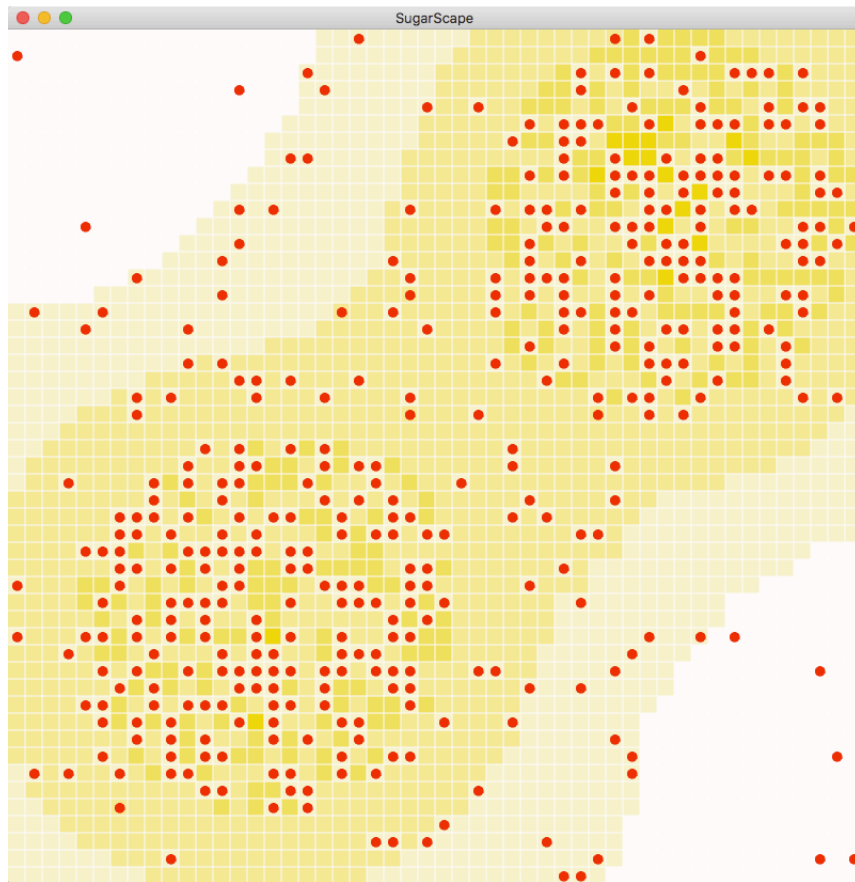


FIGURE 3.5 – Visualisation de l'environnement du modèle SugarScape à différents stades d'évolution, sur la plateforme Quartz.

Ces deux exemples permettent de montrer le caractère générique de la spécification, puisqu'ils sont basés sur des environnements distincts, où l'évolution des agents diffère. En confrontant les résultats du modèle SugarScape au modèle équivalent implémenté en NetLogo, nous avons confirmé le fait que l'ordonnancement peut introduire des artefacts dans le modèle, voir le tableau 3.1.

Après 300 unités de temps, le modèle de NetLogo indique un coefficient de 0,473, tandis que notre implémentation indique un coefficient de 0,464. Afin de comparer les deux moyennes après 300 unités de temps, nous avons utilisé un test t de Student, avec l'hypothèse que les distributions ont des moyennes équivalentes. Nous avons tenu compte de l'homogénéité des variances (homoscédasticité) sur les deux échantillons indépendants (non appa-

riés). Les résultats du test, indiqués dans le tableau 3.1 donnent une probabilité (p-value) de 0,1051, supérieure à la valeur critique des 5%. Nous pouvons donc conclure que les moyennes des deux groupes sont significativement similaires.

Moy. NetLogo	Moy. Quartz	t-value	Degrés de liberté	p-value
0,4733232	0,4644865	1,7068	18	0,1051

TABLE 3.1 – Résultats du test t de Student permettant de vérifier l'équivalence des résultats du modèle de NetLogo avec les résultats de notre implémentation.

Enfin, les deux exemples nous ont permis de montrer que l'évolution synchrone ou asynchrone des agents est possible en adoptant une gestion des évènements simultanés explicite.

Ces deux exemples n'ont en revanche pas permis d'illustrer toutes les possibilités liées à l'utilisation de la spécification DPDEMAS. Par exemple, la définition d'un modèle basé sur un environnement social nous aurait permis de mettre en application les concepts de groupes, de rôles, ou encore de communication directe. De même, l'approche multi-environnements qui permet de plonger les corps d'un agent dans un environnement physique et un environnement social n'a pas encore été utilisée.

De nombreuses **perspectives** pourraient améliorer et/ou compléter ce travail.

Quantifier l'apport de la méthode Puisque nous proposons une approche couvrant une partie du processus de modélisation et de simulation, il est indispensable dans le court terme de déterminer dans quelle mesure celle-ci permet de favoriser la reproductibilité des expériences numériques.

Il faudrait intégrer le plan d'expérience dans l'approche, puis identifier les différents acteurs (utilisateurs, experts, modélisateurs et informaticiens) impliqués dans la conception d'un modèle pour les guider dans chacune des étapes où ils interviennent et ainsi co-vérifier les apports de chacun ce qui serait un plus vers la "recherche ouverte" définie par [Stodden et al. \(2013\)](#).

Approche IDM Un environnement intégré de modélisation est idéal pour mettre en œuvre les concepts liés à l'Ingénierie Dirigée par les Modèles. Nous souhaitons proposer un méta-modèle de la spécification DPDEMAS indépendamment de toute plateforme, tout en offrant la possibilité d'y associer des contraintes sémantiques sur les SMA (*e.g.* à travers l'utilisation d'OCL). Le principal avantage de l'IDM est qu'il permet d'automatiser plusieurs étapes du processus de M&S. Entre les relations structurelles définies entre les concepts du métamodèle et la définition de contraintes sémantiques, il est possible d'appliquer des vérifications

statiques sur les modèles de manière automatisée. Des règles de transformation permettent également de passer automatiquement d'un modèle indépendant d'une plateforme à un modèle dépendant autorisant l'exécution du modèle, et réduisant ainsi les biais potentiels associés à la traduction d'un modèle. Cette étape nécessite simplement la définition du métamodèle associé à chaque plateforme cible. Nous pensons que l'utilisation des outils associés à l'IDM permettrait de compléter notre approche et faciliterait la reproductibilité des modèles. L'approche couvrirait alors la quasi-totalité du processus de M&S, en ajoutant la vérification automatique des modèles et la traduction automatique du modèle conceptuel vers le modèle d'exécution.

Définition d'un DSL Afin de proposer une approche permettant de définir de manière non-ambigüe des modèles SMA, nous nous sommes orientés vers une approche formelle, visant à définir précisément la structure et le comportement de chaque entité d'un SMA. Dans notre cas nous attribuons aux méthodes formelles la capacité de clarifier la définition d'un modèle. Cependant, au vu de la complexité du paradigme agent et de la longueur des définitions formelles, il est légitime de se demander si une approche formelle dans ce cadre permet véritablement d'éclaircir la définition d'un modèle. Le niveau d'expertise nécessaire pour appréhender l'approche proposée est trop élevé pour permettre son adoption et donc favoriser la reproductibilité. Pour pallier à cette problématique, nous sommes convaincus qu'il est nécessaire de concevoir un langage de modélisation spécifique permettant de faciliter la définition des aspects structurels et comportementaux des SMA. Il est possible de concevoir un langage associé aux concepts utilisés dans le cadre de cette thèse, de l'intégrer à notre environnement de modélisation à moyen terme et de réutiliser ce langage pour l'intégrer à une approche IDM à plus long terme.

Définition d'une structure d'agent "intelligent" La formalisation proposée est assez générique et souple pour être adaptée. Dans la décomposition proposée corps/esprit, ce dernier a la responsabilité de collecter les perceptions, d'en tenir compte dans son processus de raisonnement avant de concrétiser ses décisions à travers l'action. Il représente le processus de délibération à trois phases identifié par [Pnueli \(1986\)](#). Un modèle PDEVS permet déjà de réaliser ce processus de délibération, nous représentons donc le système cognitif de l'agent par un modèle PDEVS.

Le comportement à donner au système cognitif d'un agent est de la responsabilité du modélisateur. Nous ne donnons aucune directive à propos de l'utilisation d'un modèle atomique, couplé, ou encore dynamique pour représenter le système cognitif. Nous pensons que cette

décision revient au modélisateur en fonction du type d'agent qu'il souhaite modéliser et de sa complexité.

L'architecture du système cognitif est aujourd'hui l'objet d'une autre thèse qui sera détaillée par la suite.

3.2.3 CONCLUSION

Avant de passer aux travaux en cours un premier bilan s'impose. Si l'on suit le processus général de modélisation et de simulation présenté figure 3.6, nous retrouvons les étapes :

1. d'identification de l'objet d'étude ;
2. d'acquisition de données voire d'informations et de connaissances sur l'objet dans son environnement ;
3. la réalisation d'hypothèses afin de le modéliser, et de produire un modèle conceptuel ;
4. la simulation du modèle informatique afin de vérifier nos hypothèses et/ou observations, enfin ;
5. l'exploitation des résultats afin de valider les hypothèses de modélisation, d'apporter un éclairage sur la problématique de départ et aussi la création de nouvelles connaissances sur l'objet d'étude.

Finalement, dans ce processus, les travaux présentés permettent de répondre aux deux premiers items et débiter partiellement le troisième.

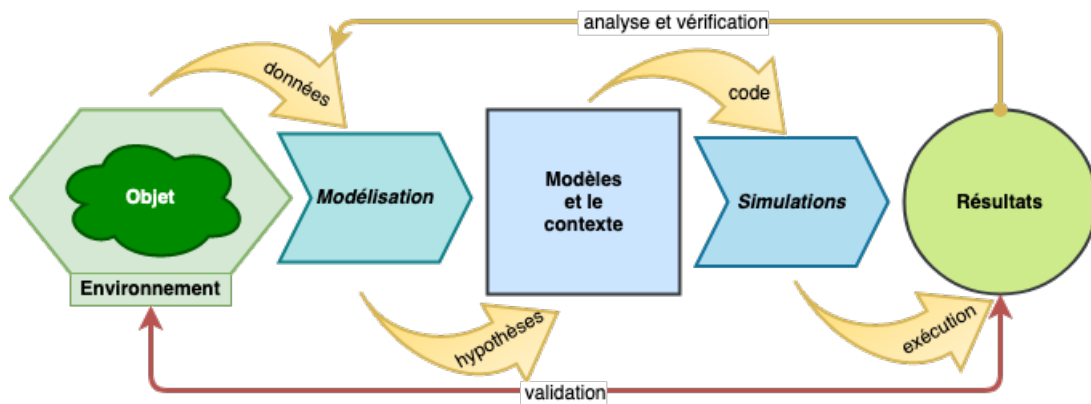


FIGURE 3.6 – Processus de modélisation et de simulation.

Nous avons des données à la fois environnementales (les courants) et biologiques sur notre système global à savoir la gestion des ressources halieutiques en Corse. Puis, un outil

de modélisation et de simulation pour décrire toutes nos entités (l'environnement, les ressources, les pêcheurs) et leurs interactions (production, prélèvement).

Dans la section suivante, nous proposons un panorama des modèles d'évolution de stocks que nous pouvons utiliser pour modéliser notre système de gestion de ressources halieutiques. C'était l'un des objectifs de *MoonFish*. Dans cette application, les apports théoriques de DP-DEMAS seront en partie complétés, puis appliqués. Enfin, dans les travaux en cours nous reviendrons sur les méthodes d'optimisation et d'aide à la prise de décisions toujours dans le même domaine.

3.3

NOTIONS DE BASE : LES MODÈLES DE STOCKS

Dans le cadre de projet *MoonFish*, nous souhaitons estimer puis étudier l'évolution des stocks de poissons. Nous allons maintenant lister les modèles les plus connus de la littérature pouvant être utilisés dans cette optique. Ces modèles doivent pouvoir être appliqués dans le cadre d'une pêche responsable pour une gestion durable des ressources halieutiques.

La dynamique des populations étudie la variation dans le temps du nombre d'individus au sein d'une population d'êtres vivants [Laurec and Le Guen \(1981\)](#).

Celle-ci peut soit considérer les individus comme faisant partie d'un stock estimé dans sa totalité (modèles globaux), soit structurer la population en groupes d'âge, de tailles ou de poids différents (modèles structuraux).

Les modèles globaux sont une première approche explicative des stocks et de l'exploitation, l'hypothèse principale est qu'il existe des mécanismes d'autorégulation du stock, et qu'en l'absence d'exploitation le stock tend vers une situation d'équilibre stable. Ils permettent de quantifier les variables d'abondance et de capture par rapport à l'effort de pêche⁴, et ont l'avantage de pouvoir estimer la production maximale du stock en situation d'équilibre. Le nombre peu important de paramètres permet de caler les modèles en fonction des captures

4. Variable quantifiant à quel point la pêche a été intensive sur une période de temps.

totales et des efforts de pêche associés. Bien que moins précis que les modèles structuraux qui décrivent le stock en cohortes, ces modèles sont très utilisés pour la gestion des pêcheries de part leur relative facilité d'utilisation.

Contrairement aux modèles globaux qui considèrent tous les individus comme étant identiques, les modèles structuraux prennent en compte explicitement des processus biologiques, tels que la reproduction, le recrutement, la croissance, les mortalités naturelles et la pêche en fonction de différentes phases ou stades de développement des individus. Ils sont privilégiés dans certains cas par les scientifiques puisqu'ils sont considérés comme de puissants outils de diagnostic et d'aide à la gestion de la pêche. En effet, ces modèles démontrent l'impact des changements de mode d'exploitation, tel que la taille des mailles, sur la structure démographique ainsi que sur l'abondance des géniteurs et par conséquent sur le recrutement et la capacité de renouvellement du stock.

Nous allons donc maintenant détailler certains de ces modèles.

3.3.1 MODÈLES BIOLOGIQUES DE CROISSANCE

Il existe plusieurs variantes de ce type de modèle. Notre choix sera dicté par les contraintes de notre application et surtout les données à notre disposition.

Nous pouvons citer le modèle de [Fox Jr \(1970\)](#) qui est un modèle logarithmique basé sur le modèle de croissance de *Gompertz* présenté dans [Tjørve and Tjørve \(2017\)](#).

Dans leurs travaux [Roopnarine \(2013\)](#) testent les hypothèses du modèle de [Hardin \(1968\)](#) sur le partage de ressources communes en l'intégrant à deux modèles mathématiques : un modèle écologique de croissance démographique et un modèle proies-prédateurs.

Le modèle de [Pella and Tomlinson \(1969\)](#) est lui une généralisation du modèle de *Graham-Schaefer*. Il permet de tenir compte de l'asymétrie de la courbe de production des stocks en fonction de la taille de la population et propose un ajustement qui détermine la courbe de production du stock pour une population exploitée en utilisant uniquement l'historique des captures et l'effort de pêche.

Le modèle de *Graham-Schaefer* [Graham \(1935\)](#); [Schaefer \(1954, 1959\)](#) est une évolution du modèle de [Verhulst \(1845\)](#), modèle logistique d'accroissement de population, pour lequel on introduit une pêche. C'est un modèle bio-économique qui permet d'estimer l'évolution d'une population ou d'une biomasse soumise à une activité de pêche.

Il est basé sur le modèle initial de [Graham \(1935\)](#) auquel [Schaefer \(1954, 1959\)](#) a ajouté une composante modélisant l'activité de pêche.

Il s'exprime de la manière suivante :

$$\frac{dB(t)}{dt} = r \times \left(1 - \frac{B(t)}{k}\right) \times B(t) - q \times E(t) \times B(t) \quad (3.1)$$

Avec :

- k : la biomasse à l'équilibre, ou capacité de charge (en masse);
- r : le taux de croissance;
- $E(t)$: l'effort de pêche déployé sur une unité de temps, et
- q : le coefficient de capturabilité;
- on peut définir $C(t) = q \times E(t) \times B(t)$: les captures.

La résolution de cette équation nécessite la connaissance d'un paramètre n'apparaissant pas explicitement à savoir la valeur de la biomasse à l'instant initial, notée B_0 .

Ce modèle a l'avantage d'être simple à utiliser et répertorie l'ensemble des paramètres écosystémiques qui décrivent l'évolution de la population et qui permettent l'élaboration d'une stratégie de pêche à appliquer.

D'autres versions du modèle de *Graham-Schaefer* ont été étudiées plus récemment, en prenant certaines conditions en compte, notamment l'aléatoire comme dans [Shah and Sharma \(2003\)](#).

D'autres *familles* de modèles existent.

3.3.2 MODÈLES PROIE-PRÉDATEUR

Le modèle de [Lotka \(1956\)](#) se base sur un système proie-prédateur où chaque espèce interagit avec l'autre.

On considère que les proies possèdent une quantité illimitée de nourriture et qu'en absence de prédateurs le nombre de proies augmente exponentiellement. Les prédateurs eux sont limités par la quantité de proies dont dispose le milieu, s'il n'y a plus de proies, la quantité de prédateurs diminue très fortement comme le montre la figure 3.7. Dans cet exemple, la courbe n'est pas lisse car elle décrit une modélisation à base d'agents. Ainsi, il existe un certain équilibre et une certaine proportionnalité entre les proies et les prédateurs, permettant de conduire au système d'équations différentielles correspondant au modèle de Lotka-Volterra suivant :

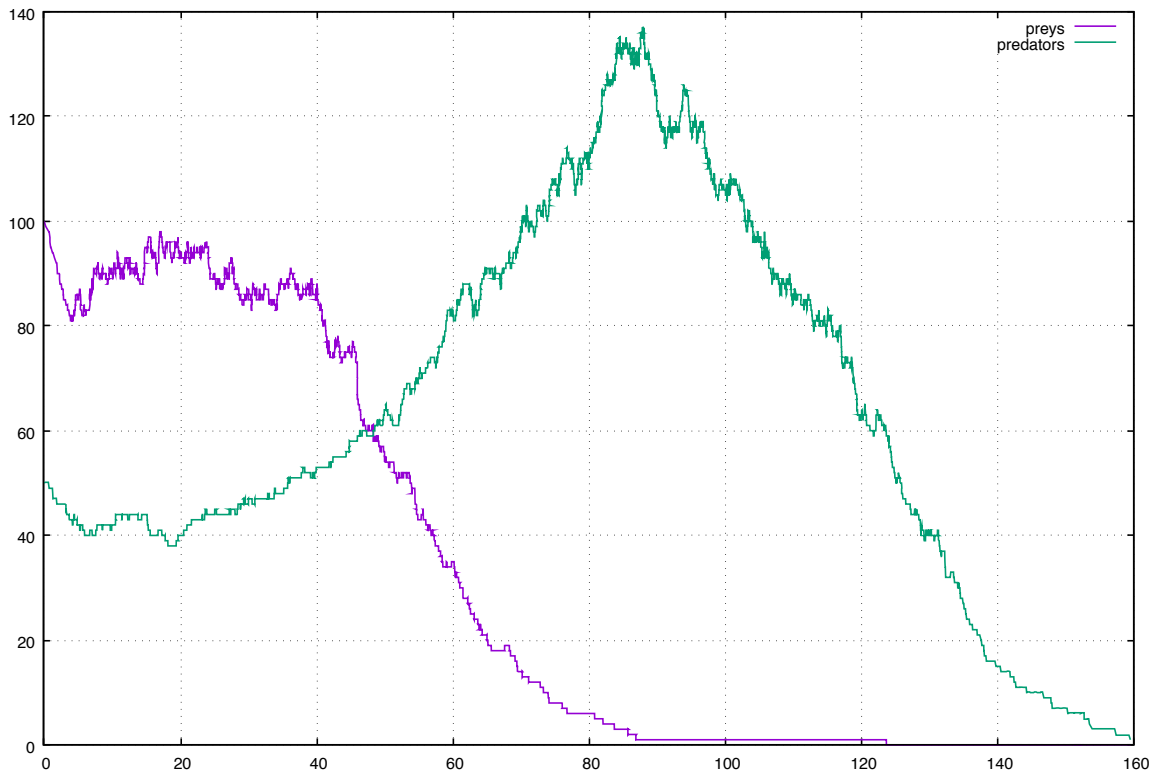


FIGURE 3.7 – Evolution de la population des agents "proies" et des agents "prédateurs" au cours du temps, exemple présenté dans [Franceschini et al. \(2017\)](#).

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = x(t) \times (\alpha - \beta t(t)) \\ \frac{dy(t)}{dt} = y(t) \times (\delta x(t) - \gamma) \end{cases} \quad (3.2)$$

Où :

- $x(t)$ et $y(t)$ correspondent respectivement à l'effectif des proies et à l'effectif des prédateurs en fonction du temps ;
- α et β correspondent au taux de reproduction et de mortalité des proies ;
- δ et γ correspondent au taux de reproduction et de mortalité des prédateurs.

Il peut exister un équilibre des populations lorsque chacune des deux équations est égale à 0. Cela signifie soit que les deux espèces disparaissent soit que les paramètres de reproduction/mortalité pour chacune des espèces restent stables indéfiniment.

Dans le cas d'un modèle de pêche, nous pourrions considérer que les proies sont les poissons et la pêche le prédateur.

Depuis la création de ce modèle, de nombreuses variantes ont été développées : adaptation pour un système multi-espèces dans [Padua and Ontoy \(2010\)](#); prise en compte des migrations dans [Tahara et al. \(2018\)](#); ou encore [Ayala et al. \(1973\)](#) pour expliquer les changements inattendus et les fluctuations temporelles de la dynamique des populations animales, pour plus de détails le lecteur intéressé pourra se référer à [Schoener \(1976\)](#).

Cette nécessité d'adapter ce modèle, voire les modèles en général, vient du fait qu'à partir de sa forme initiale souvent spécifique d'un cas d'application, il n'est utilisable que pour des exemples théoriques. Bien qu'efficace et permettant d'avoir une bonne vue d'ensemble, dans la pratique le système est plus complexe. Pour être en adéquation avec la réalité, il est nécessaire de rajouter des paramètres modélisant les changements évoqués précédemment et donc complexifier le modèle.

Les modèles présentés permettent d'étudier l'évolution de la biomasse au cours du temps mais ils présentent d'importantes limitations. En considérant tous les individus comme identiques, quel que soit leurs caractéristiques, et en ne prenant pas en compte certains paramètres tels que : l'âge, le stade de développement, ou des facteurs de développement biologique, ces modèles sont incapables de représenter une variation du diagramme d'exploitation, comme par exemple un changement de maillage de filets.

Une autre *famille* de modèles, dit plus "fins" permet de prendre en compte plus d'informations, ce sont les modèles structuraux.

3.3.3 MODÈLES STRUCTURAUX

L'intérêt des modèles structuraux consiste à regrouper les individus par tranche d'âge, de taille ou sur la base d'un critère afin d'intégrer les paramètres biologiques propres à la catégorie sélectionnée. Ces modèles nécessitent une grande connaissance des espèces modélisées, plutôt que de considérer le stock dans sa globalité, ils prennent en compte des mécanismes plus complexes tels que la croissance des individus ou leur reproduction. Cette croissance suit généralement des modèles biologiques établis, comme peut le proposer [Von Bertalanffy \(1938\)](#). Il est également possible de considérer la croissance du stock de manière discrète, comme dans [Beverton and Holt \(2012\)](#) et [Ricker \(1958\)](#). Cette dernière approche est assez similaire aux modèles dits matriciels qui proposent une séparation discrète en différentes classes de taille [Usher \(1966\)](#), de poids [Lefkovitch \(1965\)](#), ou encore d'âge comme pour le modèle de [Leslie \(1945, 1948\)](#).

Ce dernier est un modèle structuré par âge, c'est-à-dire qu'il divise une population par étape de croissance (âge) : larve, post-larve, juvénile, adulte. L'évolution de la population d'un instant t à $t + 1$ est donnée par une matrice d'évolution qui modélise les migrations entre

classes. La construction de la matrice de *Leslie* est basée sur les données suivantes :

- $N(t)$, le vecteur de population à l'instant t avec n_x le nombre d'individus de la classe x à l'instant t ;
- M la matrice d'évolution avec :
 - s_x , le taux de survie de la classe x à $x+1$, sur la première sous diagonale de M ;
 - f_x , la fécondité, etc., sur la première ligne de M qui lie la classe x avec la première classe d'âge;
 - w , l'âge maximum atteignable;

L'évolution de la population d'un instant t à $t+1$ est alors donnée par la relation $N(t+1) = M * N(t)$

Il existe beaucoup d'autres modèles de ce type puisque la principale donnée nécessaire est la caractéristique à partir de laquelle on souhaite représenter la population étudiée. Le modèle matriciel est le principal moyen de modéliser une population structurée, car il permet d'étudier efficacement la dynamique d'une population. Le modèle de *Leslie* est en fait un cas particulier d'un modèle plus général ayant comme forme générale $n_{t+1} = An_t$.

Le but des différents modèles structuraux est avant tout de représenter au mieux une population en les divisant en classes, plus il y aura de classes, plus on obtiendra des résultats précis mais meilleures doivent être nos données et connaissances sur l'objet d'étude.

La gestion des stocks est un enjeu majeur et la littérature dans le domaine est très abondante. Nous avons simplement listé les modèles les plus connus. La section suivante complète ce petit état de l'art, nous y listons plusieurs approches ou projets qui mettent en application différents types de modèles (mono ou multi-espèces, par compartiment, etc.) et d'objectifs (économique, restauration de stocks, gestion, etc.).

3.3.4 MODÈLES INFORMATIQUES

Dans [Versmisse \(2008\)](#); [Versmisse et al. \(2007\)](#), [Thébaud et al. \(2007\)](#) et [Soulié \(2012\)](#) les auteurs présentent la famille de modèles DynFish. Ils sont basés sur un modèle structurel séparé en classes d'âge avec un taux de mortalité et de fécondité pour chaque âge. La version 2 est mono-flotte et multi-espèces avec une répartition en zones. La version 3 ajoute la partie économique. L'article [Versmisse et al. \(2007\)](#) met l'accent sur l'implémentation du modèle dans VLE [Quesnel et al. \(2007\)](#). Dans [Duboz et al. \(2010\)](#), ils présentent un algorithme évolutionniste pour estimer les paramètres des modèles.

Le projet *CHALOUPE* propose une évaluation coûts-bénéfices pour la flotte langoustinière, et teste plusieurs scénarios. Les auteurs utilisent un modèle mono-espèce centré sur la langouste [Macher et al. \(2008\)](#).

Dans [De Lara and Martinet \(2009\)](#), les auteurs présentent une approche pour évaluer et prendre en compte des variations des paramètres qui sont impossibles à déterminer précisément à l'avance. Ils utilisent pour cela de multiples simulations en réalisant des études statistiques sur les résultats pour en sortir des probabilités de viabilité en fonction du nombre et du taux de satisfaction des contraintes économiques et écologiques.

Dans [Doyen et al. \(2012\)](#), les auteurs présentent un modèle bio-économique multi-espèces, multi-flottes structuré par âge ainsi que des analyses de viabilité.

Des études ont déjà été réalisées pour aider à la gestion des pêcheries Méditerranéennes.

Les approches de [Lleonart and Maynou \(2003\)](#) nommées MEFISTO et [Merino et al. \(2015\)](#) ont été utilisées pour optimiser les pêcheries. Leur objectif était de trouver une stratégie qui assurait un certain profit aux pêcheurs tout en conservant les espèces, voire en permettant une repopulation des espèces en voie d'extinction. Des simulations déterministes ou stochastiques sont utilisées pour évaluer l'impact d'une stratégie. Différents scénarii sont testés comme la réduction du temps de pêche journalier des chalutiers de fond. Pour plus de détails sur la gestion des pêches méditerranéennes le lecteur intéressé pourra se reporter à leur état de l'art [Lleonart and Maynou \(2003\)](#).

Niveau logiciel, Ecosim with Ecosim [Walters et al. \(1997\)](#); [Pauly et al. \(2000\)](#); [Steenbeek et al. \(2016\)](#) permet de simuler une activité de pêche facilement et est une référence dans le domaine. Sa fonction principale est la modélisation basée sur l'équilibre des masses mais il a été utilisé dans de nombreux projets avec différents objectifs comme le repeuplement d'espèces en difficulté [Fouzai et al. \(2012\)](#), l'amélioration des gains et des stocks [Christensen and Walters \(2004b\)](#), les performances économiques des pêcheries sur le court et long terme [Le Floc'h et al. \(2008\)](#). Il souffre néanmoins de quelques limitations, comme le souligne [Christensen and Walters \(2004a\)](#). Il est par exemple très peu sensible à la variation de paramètres imprévisibles. Pour autant il est actuellement utilisé dans le cadre de la finalisation des actions de modélisation du programme *MoonFish*.

Parmi toutes ces propositions de nombreuses pistes nous intéressent, mais aucun modèle n'est adapté aux spécificités de la pêche corse.

3.3.5 UN MODÈLE POUR LA CORSE

Fournir un modèle bio-économique spatialisé de confiance pour la gestion des pêcheries en Corse s'avère être un enjeu majeur. La mise à disposition d'un tel modèle pourra four-

nir aux gestionnaires du milieu halieutique un outil efficace pour une évaluation dynamique des conséquences des mesures envisagées, telles que la modification des périodes de pêches, la réévaluation des quotas, la modification des maillages, ou encore la délimitation de zones protégées.

Un modèle bio-économique doit permettre de mesurer les conséquences environnementales, mais aussi économiques des mesures proposées. Si l'aspect artisanal des pêcheries et la complexité des courants présents autour de l'île imposent l'élaboration d'un modèle dédié, des besoins similaires sont observés sur l'ensemble des zones où intérêts économiques et protection de l'environnement cohabitent.

L'exploitation en Corse est basée sur une pêcherie aux petits métiers et multi-espèces, c'est-à-dire qu'à la différence de certaines pêcheries industrielles mono-spécifiques, il y a un grand nombre d'espèces d'intérêt exploitées par la plupart des pêcheurs. Cette spécificité rend l'acquisition des données associées aux prises réelles très difficile. En effet, là où une pêcherie mono-spécifique peut se permettre des études précises sur la dynamique de population d'une espèce en particulier, il nous est impossible de réaliser cela sur les 6 espèces d'intérêt principales de notre projet et encore moins sur l'ensemble des 50 réellement exploitées.

Pour conclure cette section d'état de l'art, nous pouvons rappeler que les modèles globaux ne prennent en considération que l'ensemble de la biomasse (stock) à un temps donné. Ils nécessitent peu de connaissances par rapport à des modèles plus précis comme les modèles structuraux; seuls les indices d'abondance des stocks et les captures correspondantes sont nécessaires.

En conséquence, si les données sont limitées, ils peuvent être utilisés, alors que les modèles structuraux nécessiteront plus de connaissances et des données plus spécifiques qui ne sont pas forcément toutes mesurables ou déductibles empiriquement comme l'a montré [Chaloupka and Balazs \(2007\)](#). Même si les modèles globaux sont moins réalistes que les modèles structuraux, ils sont utiles et fournissent de bonnes indications comme les grandes tendances encore utilisées pour fixer les quotas de pêche.

Les modèles structuraux peuvent présenter des résultats plus réalistes en prenant en compte des paramètres spécifiques aux espèces étudiées, mais dans le cas de pêcherie multi-espèces, l'intérêt d'utiliser ce type de modèle représenterait un coût d'acquisition de données très important comparé aux résultats que l'on pourrait obtenir.

Dans le cas de notre projet, il est difficile voire impossible de représenter une ressource multi-espèces selon une unique caractéristique car les données nous manquent. Ainsi, nous ne pouvons pas à l'heure actuelle nous permettre l'utilisation d'un modèle structural. Notre choix s'est donc porté vers l'utilisation du modèle de *Graham-Schaefer* [Graham \(1935\)](#); [Schaefer](#)

(1954, 1959), qui semble le plus adapté aux données que nous possédons. En effet, la campagne d'acquisition de données de programme *MoonFish* n'est pas terminée, et ne sera vraisemblablement pas suffisante. Nous basons donc nos premiers essais sur des données trouvées dans la littérature issue de [Le Manacha et al. \(2011\)](#).

Dans cet article, les auteurs présentent :

- une estimation des prises de certaines espèces d'intérêt de 1950 à 2008 ;
- une estimation de la pêche récréative de 1950 à 2008 ;
- l'évolution du nombre d'exploitants de 1950 à 2008 ;

Leurs estimations sont discutables, en effet il semble y avoir des années manquantes ou non cohérentes dans les données des sardines et leur protocole d'estimation n'est pas détaillé.

Elles sont cependant un exemple représentatif de ce que nous aurons à l'issue de la campagne de collecte de données de *MoonFish* et *DACOR*.

Ainsi, leurs estimations nous serviront de base pour tester nos approches. Nous avons donc choisi un modèle et possédons des données préliminaires de référence.

3.4

TRAVAUX EN COURS

Nos travaux en cours sont donc basés sur le modèle de *Graham-Schaefer* [Schaefer \(1954\)](#) afin de tester nos scénarii d'aide à la prise de décision. Nous avons pour perspectives de poursuivre les efforts d'acquisition de données conduits avec le programme *MoonFish*.

Dans cette section, nous allons revenir sur les recherches conduites dans deux thèses toujours en cours et qui doivent prendre fin en 2021. Ces travaux sont dans la continuité de l'approche prônée dans la thèse de [Franceschini et al. \(2017\)](#).

Après avoir posé les bases d'une méthode de modélisation et de simulation basée sur le paradigme agent (SMA) et le formalisme PDEVs, nous avons besoin de compléter cette approche pour qu'elle soit en mesure de décrire des agents "intelligents". C'est l'objectif conduit dans la section 3.4.2. Cette nouvelle architecture doit assurer aux agents une certaine autonomie de décision qui va pouvoir évoluer en fonction des influences extérieures et des objectifs

à atteindre. Pour les guider dans leur processus de décision, nous utilisons des méthodes d'optimisation. Elles seront présentées ci-dessous.

3.4.1 OPTIMISATION ET SIMULATION

L'objectif de ce travail, conduit dans le cadre de la thèse de *Nicolas Poiron-Guidoni*, est de développer tout un ensemble de méthodes afin d'affiner les données d'entrée et de sortie des modèles.

Nous souhaitons proposer un outil d'optimisation large basé sur de nombreuses méthodes comme les métaheuristiques mais également l'apprentissage et des approches à base de réseaux de neurones.

Dans un premier temps, il sera appliqué au projet *MoonFish* pour aider à la gestion des stocks de poissons et analyser les modèles de dynamiques de populations. Enfin, il permettra de compléter l'environnement de multi-modélisation de systèmes naturels complexes de l'Université de Corse.

C'est une étape essentielle vers la proposition de méthodes d'aide à la prise de décision.

L'ensemble de ces contributions pourra être utilisé comme module dans l'architecture *Soar* (c.f. 3.4.2).

Comme le montre la figure 3.8, l'optimisation est un processus cherchant à déterminer le meilleur ensemble de paramètres pour un problème et généralement de deux types de critères :

1. des objectifs : fonctions de coûts f , dont les valeurs de retour doivent être minimisées ou maximisées;
2. des fonctions représentant des contraintes d'égalités ou d'inégalités à respecter.

Généralement un problème d'optimisation peut être résolu par des méthodes itératives. Le principe général consiste, à chaque étape, à modifier les valeurs des variables en fonction des objectifs et des contraintes. Cependant tous les problèmes ne sont pas équivalents, on peut par exemple les différencier en fonction du nombre de transitions possibles à chaque itération. Dans le cas où une seule transition est envisageable, les problèmes peuvent être résolus par une machine de *Turing* déterministe en un temps polynomial. Nous parlons alors de problèmes de classe P. Dans le cas où plusieurs choix sont possibles, la résolution fait appel à une machine de *Turing* non déterministe et nous parlons alors de classe NP pour *Nondeterministe Polynomial time* en anglais.

De plus, selon la nature de la fonction objectif et des contraintes, nous distinguons deux

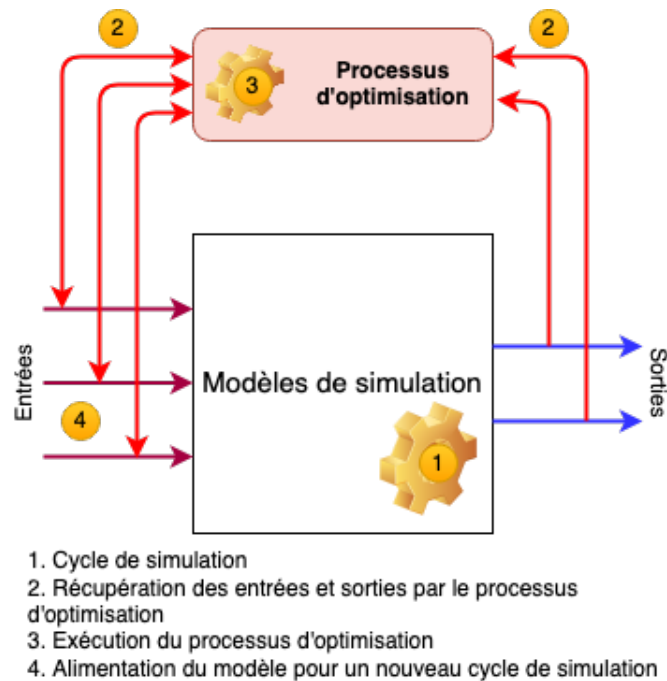


FIGURE 3.8 – Processus d’optimisation par simulation.

classes de problèmes : (1) les problèmes d’optimisation convexe pour lesquels nous disposons d’un grand nombre d’outils et (2) les problèmes non convexes pour lesquels il est nécessaire d’adapter les méthodes et les algorithmes.

En partant de cette différenciation, nous pouvons classer les méthodes d’optimisation selon deux grandes catégories : (1) les méthodes déterministes et (2) les méthodes stochastiques.

Parmi l’ensemble des méthodes déterministes, citons les traditionnelles méthodes de programmation linéaire [Dantzig \(2016\)](#), [Wagner \(1959\)](#), ou encore la descente de gradient [Rumelhart et al. \(1986\)](#) très utilisée en machine learning (comme dans [Bousquet and Bottou \(2008\)](#)) et pour des problèmes non linéaires. Il est à noter qu’il existe une variante stochastique plus simple à utiliser : [Frost \(1972\)](#).

Dans les cas d’optimums multiples, de discontinuité des fonctions, de difficulté à obtenir les gradients, ou d’un trop grand nombre de possibilités offertes à chaque itération (NP-complet), ces méthodes sont inapplicables pour cause d’explosion combinatoire. Les méthodes stochastiques sont alors des alternatives. Nous pouvons noter que, si à partir des mêmes données, un algorithme déterministe exécutera toujours la même suite d’opérations et donnera toujours le même résultat, les algorithmes stochastiques, qui font des choix à chaque itéra-

tion, donneront des résultats différents d’une optimisation à l’autre.

Un des problèmes principaux que présentent les méthodes d’optimisation est l’équifinalité. Elle est définie pour la première fois par **Von Bertalanffy (1956)**. En effet, il est fortement possible qu’un ensemble infini de jeux de paramètres puisse permettre de vérifier les données de référence **Aronica et al. (1998)**. On parle d’équifinalité lorsque plusieurs, très souvent une infinité, de solutions peuvent permettre de résoudre un problème donné.

Dans le cas du calage de modèle, nous ne pouvons exclure les minimums locaux du fait de la non exactitude des données d’entrée. Il est donc impossible de considérer que la seule solution acceptable est l’optimum global même en supposant son unicité.

Les métaheuristiques sont l’une des familles de méthodes d’optimisation.

3.4.1.1 LES MÉTAHEURISTIQUES

Elles se différencient des méthodes exactes par le fait qu’elles ne visent pas forcément à obtenir la solution optimale, mais une solution acceptable en un temps de calcul raisonnable.

Les algorithmes stochastiques les plus connus sont les métaheuristiques qui font partie des méthodes d’optimisation combinatoire approchées, comme nous pouvons le voir sur la figure 3.9.

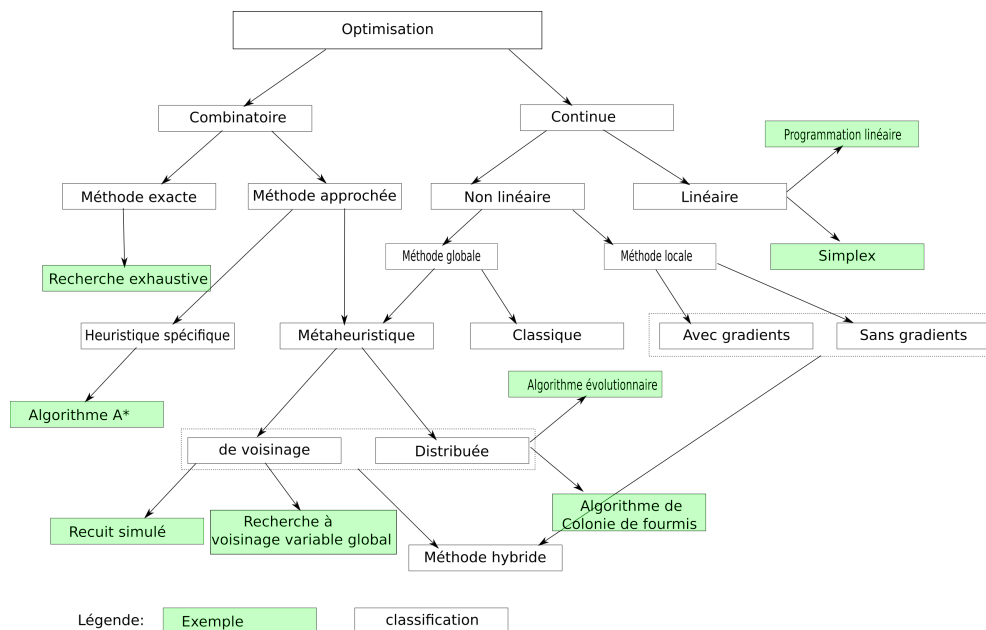


FIGURE 3.9 – Classification des méthodes d’optimisation d’après **Poggi (2014)**

Les métaheuristiques peuvent être séparées en deux groupes :

1. les métaheuristiques de voisinage qui n'utilisent qu'une solution sur laquelle des transformations seront appliquées afin de l'améliorer ;
2. les métaheuristiques distribuées, qui se basent sur un ensemble de solutions, appelé population, qui seront modifiées à chaque itération afin de les améliorer au regard de la fonction d'évaluation.

Les algorithmes distribués s'inspirent de la théorie de l'évolution. Le principe consiste à faire évoluer de manière aléatoire un ensemble de solutions et de n'en conserver que certaines, souvent les meilleures. Puis les utiliser pour en générer de nouvelles plus performantes, ceci dans l'optique de trouver des optimums, comme le montre la figure 3.10.

Les algorithmes d'intelligence en essaim correspondent à une classe qui s'inspire du comportement des colonies d'insectes. Dans ce cas des agents autonomes au comportement simple et sans stratégie prédéfinie cherchent à évoluer vers des "attracteurs" correspondant à des "bonnes" situations. Ces algorithmes sont particulièrement bien adaptés lorsque l'environnement est changeant.

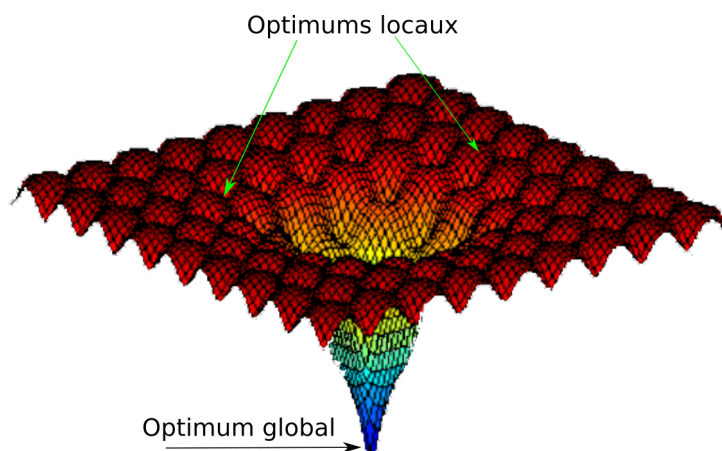


FIGURE 3.10 – Fonction de Ackley en dimension 2 : illustration du concept d'optimum global/local.

Toutes ces méthodes, qui sont partiellement ou totalement guidées par des processus stochastiques, permettent, lorsque l'on considère un problème NP-difficile, de ne pas avoir à explorer toutes les possibilités. Par ce biais, les métaheuristiques permettent de pallier l'explosion combinatoire, bien que dans certains cas les temps de calcul restent élevés.

Enfin, les métaheuristiques sont soumises à un théorème, appelé "*no free lunch theorem*" [Wolpert and Macready \(1997\)](#), énonçant qu'il est impossible de déterminer à l'avance quelle métaheuristique sera la plus efficace sur un problème donné. Il est donc important de pouvoir en tester plusieurs afin de déterminer laquelle utiliser.

3.4.1.2 L'OPTIMISATION PAR MÉTAHEURISTIQUES

Le processus est décrit par la figure 3.11. La première étape consiste à générer la population initiale de façon aléatoire. Bien que la distribution utilisée puisse varier en fonction des cas et des connaissances sur le problème, la plupart des méthodes cherchent à répartir la population initiale de façon la plus uniforme possible afin d'explorer au mieux tout l'espace des solutions. Ainsi, le choix d'un générateur de nombres pseudo-aléatoires de qualité est nécessaire. L'algorithme de *Mersenne Twister* de [Matsumoto and Nishimura \(1998\)](#) est aujourd'hui un choix éprouvé, mais d'autres sont bien sûr possibles.

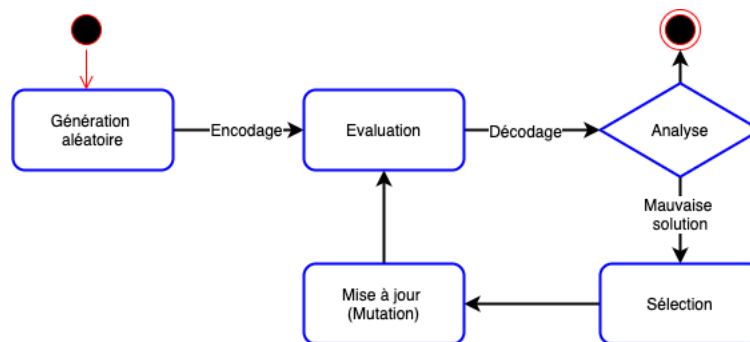


FIGURE 3.11 – Déroulement d'une métaheuristique.

La phase d'évaluation est certainement la plus importante, elle est commune à toute métaheuristique, mais également à d'autres algorithmes d'optimisation. C'est elle qui permet de définir si une solution est de qualité ou non. Elle se base sur la fonction d'évaluation afin d'attribuer une note représentant la qualité de la solution par rapport aux critères à optimiser.

Cette fonction traduit le but à atteindre. La population évolue au regard des notes obtenues par les individus. Aussi, si la fonction ne reflète pas correctement le but à atteindre l'algorithme convergera vers de mauvais optimums. C'est pourquoi il est crucial de bien définir cette fonction. C'est également durant cette phase que sont, dans la plupart des cas, prises en compte les contraintes.

La phase d'analyse permet de déterminer s'il faut continuer le déroulement de l'algorithme ou pas. En effet, si les solutions trouvées sont acceptables, l'algorithme s'arrête. Il faut bien sûr définir la notion de solution acceptable ce qui peut ne pas être facile si nous ne connaissons pas l'espace de définition de la fonction d'évaluation.

D'autres critères d'arrêt peuvent alors être définis, comme un nombre d'itérations maximum ou bien la vitesse de convergence, c'est-à-dire, à quel point les solutions évoluent d'une itération à l'autre. Si aucun critère d'arrêt n'est satisfait, l'algorithme se dirige vers la phase de sélection qui permet de déterminer quelles solutions devront être utilisées par la suite.

Cette phase peut être stochastique afin d'éviter une convergence trop rapide et garder une certaine diversité dans la population. Des sélections déterministes peuvent cependant être utilisées. Nous pouvons citer la sélection élitiste utilisée par certaines variantes d'algorithmes génétiques. C'est lors de la mise à jour que les solutions sont modifiées, afin d'en considérer de nouvelles, potentiellement plus intéressantes. La plupart du temps, les solutions présentes sont utilisées dans la population pour croiser les caractéristiques de chacune, essayant ainsi de combiner les avantages que chaque solution peut présenter.

Actuellement une attention particulière est portée à la calibration par optimisation des modèles de stocks.

3.4.1.3 CALIBRATION DE MODÈLES

Dans le cadre de ce travail de thèse, il y a déjà plusieurs contributions, comme :

- l'implémentation en C++ d'une librairie (API) de méthodes d'optimisation (qui fait l'objet d'un dépôt à la SATT SE valorisé dans le cadre du programme *MoonFish*) ;
- l'étude de méthodes d'optimisation robuste, cette appellation fait référence à la prise en compte de données incertaines. Nous utilisons un coefficient de robustesse pour permettre une meilleure représentation de la qualité des solutions proposées par optimisation [Poiron-Guidoni et al. \(2018\)](#) ;
- la comparaison entre méthodes d'optimisation et l'apprentissage par renforcement [Poiron-Guidoni et al. \(2019\)](#) ;
- nous proposons dans [Poiron-Guidoni et al. \(2020a\)](#) une approche basée sur apprentissage profond par renforcement hiérarchique⁵ pour aider à la gestion d'une pêcherie formalisée par un jeu de Markov⁶. L'approche a ensuite été étendue pour aider à la prise de décision dans un système de ressources communes. Elle permet de modéliser le comportement des décideurs, de déterminer les quotas d'exploitation durable, de modéliser les pêcheurs souhaitant maximiser leur rentabilité. Le tout en tenant compte des incertitudes et des connaissances partielles concernant les ressources ;
- l'utilisation de méthodes d'optimisation pour la calibration de modèles [Poiron-Guidoni et al. \(2020b\)](#).

Nous avons choisi de développer nos travaux sur l'aide à la calibration des modèles.

L'outil informatique au travers des méthodes de modélisation et de simulation nous permet d'étudier des systèmes environnementaux, les stocks de poissons dans notre cas. Cepen-

5. deep hierarchical reinforcement learning en anglais.

6. Markov game en anglais.

dant dû au manque de données sur l'état des ressources le système est compliqué à modéliser et l'étude de son évolution par simulation nécessite de bonnes connaissances sur le système réel. Nos modèles théoriques, puis informatiques sont composés d'un ensemble de paramètres : données d'entrée, états, etc. Comme l'indique Vidal (2005), dans le cas de connaissances incomplètes, où les données sont parcellaires et où le système est difficile à observer, il peut être nécessaire d'estimer certains de ces paramètres. C'est la phase de calibration, permettant de passer du modèle théorique générique à un modèle correspondant aux espèces étudiées.

Pour parvenir à une adéquation satisfaisante entre les comportements du système réel et de son modèle numérique, le modélisateur doit "caler" le modèle, c'est-à-dire déterminer ou estimer ses paramètres Vidal (2005).

En science économique, il y a une distinction entre estimation, calibration ou étalonnage Iskrev (2019).

La calibration peut se baser plutôt sur les théories de l'approximation, alors que l'estimation dérive des statistiques et des probabilités. Nous retiendrons comme approche que la calibration consiste à chercher une valeur des paramètres pour que le modèle fonctionne ou colle aux données observées, puis l'estimation est l'utilisation de ces valeurs pour simuler le modèle et étudier son évolution.

Dans Wallach et al. (2018) et Jørgensen and Fath (2011), les auteurs listent les raisons d'utiliser la calibration :

- la plupart des paramètres, en sciences de l'environnement et en écologie, ne sont pas exactement connus. Les méthodes d'estimation des paramètres doivent être utilisées lorsqu'aucune valeur ne peut être trouvée dans la littérature.
- Les modèles sont des simplifications de la réalité. Par conséquent, les paramètres peuvent différer des valeurs réelles souvent inconnues, voire même ne pas correspondre à une réalité directement mesurable. C'est le cas par exemple lorsqu'un paramètre agrège plusieurs variables biologiques complexes en un seul nombre.

Le calage vise à déterminer les paramètres du code de calcul afin que la simulation colle le plus possible à un jeu de données de référence. Il est alors basé sur un processus itératif de modification des valeurs des paramètres en fonction des différences entre résultats trouvés et attendus. On peut alors séparer deux approches non exclusives, manuelle et automatique.

La première propose, en général, de réaliser une première simulation à partir d'une estimation des paramètres, dans le but de retrouver des résultats expérimentaux passés. Un expert compare ensuite visuellement les résultats réels et simulés afin de modifier les paramètres grâce à son expertise. Il réitérera l'opération jusqu'à satisfaction. Comme le souligne Vidal

(2005), sous condition du niveau d'expertise de l'utilisateur, ce processus présente souvent des résultats fiables. Il pose cependant le problème de la non reproductibilité du processus, implique une parfaite confiance en l'expert et nécessite de bonnes connaissances préliminaires. Dans le cadre de la dynamique des populations halieutiques, les connaissances peuvent souvent s'avérer limitées, rendant ainsi cette approche difficile.

Les méthodes automatiques, elles, sont principalement réalisées via l'utilisation de méthodes d'optimisation. On se base alors sur trois points :

1. une fonction objectif : représentant la qualité de la solution proposée, en général proportionnelle à l'écart entre données de référence et de simulation ;
2. un algorithme d'optimisation, dont le but est de minimiser ⁷ la fonction objectif ;
3. un test d'arrêt, visant à arrêter le processus, généralement un critère de vraisemblance ou un temps maximum d'exécution.

Le calage par optimisation est très populaire dans la littérature. Par exemple, Moles et al. (2003) proposent une comparaison de différentes méthodes d'optimisation globale dans le contexte de calage de modèles biochimiques sous contraintes. Par les différences de résultats entre les méthodes comparées, ils montrent l'importance du choix de la méthode utilisée.

Il est également possible de proposer une approche plus statistique telle que la méthode Generalized Likelihood for Uncertainty Estimation (GLUE) présentée dans Beven and Binley (1992). Cette méthode permet d'estimer la vraisemblance des solutions proposées, voire de l'ensemble des paramètres. Elle peut donc être utilisée afin de pallier, dans une certaine mesure, le problème d'équifinalité Schulz et al. (1999). En revanche comme l'indique Rankinen et al. (2006), même si ces méthodes peuvent s'avérer efficaces, certains résultats suggèrent que l'utilisation d'une plus grande quantité de connaissances préalables est un moyen de réduire efficacement ce problème. Ainsi, d'après Seibert and McDonnell (2002), même si les modélisateurs préfèrent disposer de données précises pour le calage de modèles ("hard data"), l'utilisation de données peu précises supplémentaires ("soft data") peut permettre de bien meilleurs résultats.

Dans Rodriguez-Fernandez et al. (2006b,a), les auteurs montrent que dans un contexte de calage de modèle, les algorithmes déterministes ne permettent pas de résoudre les problèmes du monde réel. En revanche, les algorithmes stochastiques montrent de bons résultats quand le coût de calcul devient important. Ainsi, dans Rodriguez-Fernandez et al. (2006b), les auteurs proposent d'utiliser des méthodes hybrides stochastiques-déterministes. Par la suite, ces

7. Cette fonction peut aussi être maximisée mais, sauf précision inverse, on supposera par la suite un processus de minimisation.

mêmes auteurs proposent, dans [Rodriguez-Fernandez et al. \(2006a\)](#), une approche stochastique basée sur une nouvelle métaheuristique pour le calage d'un modèle biologique dynamique non linéaire. Elle leur permet de réduire le coût en calcul sans perdre en robustesse. Cette approche peut cependant s'avérer insuffisante dans certains cas. En effet, ne pas avoir de connaissances préalables sur le système réel peut mener à des résultats aberrants du point de vue de la réalité. Ainsi, [Batiot \(2014\)](#) utilise la méthode d'optimisation par *essaim particulaire* pour caler un modèle de dégradation thermique et affine les résultats via expertise. Cela permet également de vérifier la cohérence physique des solutions trouvées.

Nous pensons qu'il peut être nécessaire de présenter l'ensemble des solutions à une expertise humaine, nous proposerons donc une approche basée à la fois sur des métaheuristiques mais également sur l'utilisation de connaissances expertes afin de s'assurer de la cohérence biologique des solutions générées.

Cette approche peut aider à contrer le problème d'équifinalité bien qu'elle soit très sensible à la qualité des données d'entrée comme le souligne [Anderson \(2002\)](#) ce qui, nous le verrons en section 3.4.1.7, peut être problématique.

En conclusion, l'approche par expertise seule n'est pas assez fiable dans le cadre de calage de modèles d'exploitation halieutique. De plus, les faibles quantité et fiabilité des données à notre disposition ne nous permettent pas de nous passer de connaissances expertes. Ainsi, nous proposons une méthode hybride appliquée dans la section suivante, où nous allons essayer de calibrer les paramètres du modèle de *Graham-Schaeffer*.

3.4.1.4 APPLICATIONS

Nous allons maintenant détailler le processus de calage à partir de données parfaitement "fiables" générées algorithmiquement à partir d'un modèle maîtrisé c'est-à-dire déjà calé. L'intérêt est de partir de données générées pour retrouver les paramètres initiaux du modèle.

Dans notre cas d'application il est très difficile d'utiliser une grande quantité de données *propres*. Elles sont trop incomplètes. Dans un premier temps, nous avons envisagé de calibrer notre modèle en nous basant sur un scénario totalement maîtrisé pour déterminer les espaces de validité de ses quatre paramètres. Par la suite, nous avons affiné le calage des paramètres en nous basant sur les prises obtenues lors de campagnes de mesures.

Ainsi, une première approche servira principalement à tester l'efficacité des algorithmes. Une fois ce travail réalisé, nous présenterons une démarche pour caler les paramètres à partir des prises et efforts estimés dans [Le Manacha et al. \(2011\)](#).

CALAGE À PARTIR DE DONNÉES PARFAITEMENT FIABLES

La première étape permet de vérifier la robustesse des algorithmes. Le principe consiste à fixer aléatoirement des valeurs pour les paramètres internes du modèle de *Graham-Schaefer* $[r, q, k, B0]$, puis à générer aléatoirement une série d'efforts de pêche sur une période donnée. A partir de ces jeux de données on calcule les captures théoriques liées à une telle configuration.

Il peut être intéressant de tester les résultats en fonction de séries d'efforts très différents d'une année sur l'autre, et de différents jeux de paramètres internes. En effet, à efforts fixes ou trop réguliers, il peut ne pas y avoir de variations significatives des biomasses, alors que d'importantes variations peuvent mettre à mal les algorithmes les moins robustes.

Après avoir fixé des valeurs pour les paramètres internes du modèle, nous générons des séries d'effort de pêche, en nous basant sur l'algorithme 2, qui permet d'obtenir des variations importantes sur les valeurs.

Ainsi, pour chaque année (*nbAnnee*) l'algorithme va utiliser l'effort normalement appliqué (*baseEffort*) auquel sera ajouté un certain taux de variation (*variationMax*) afin d'obtenir des efforts différents entre les années et ainsi pouvoir tester la stabilité des algorithmes sur un problème à complexité variable. Afin d'éviter d'obtenir des résultats biaisés, nous devons également vérifier que le niveau de stock ne tend pas vers 0, car dans ce cas les algorithmes trouvent trop facilement des solutions acceptables, et il est impossible d'évaluer leur qualité ou leur robustesse.

La connaissance des deux séries $[E_0, \dots, E_n]$ et $[C_0, \dots, C_n]$ fiables peut alors être utilisée par les algorithmes d'optimisation pour retrouver les valeurs des paramètres ayant permis de les générer. Le modèle de Graham-Schaefer ([Schaefer \(1957\)](#)) est très stable. Ainsi, nous pouvons nous permettre une génération pseudo-aléatoire de ces paramètres tout en gardant une cohérence entre eux, et en s'assurant que ceux-ci sont acceptables.

En effet, afin d'éviter une trop grande dispersion des solutions le champ de recherche des variables est volontairement restreint. Ceci correspond en réalité à une pré-analyse par un expert du domaine, qui est alors en mesure de donner un ordre de grandeur des valeurs des paramètres à caler. Ainsi, nous générons aléatoirement des valeurs pour chaque paramètre dans le domaine défini dans le tableau 3.2, afin d'obtenir une population de départ acceptable.

ÉVOLUTION DES SOLUTIONS

Dans un premier temps, la population est initialisée en suivant la génération des paramètres présentée précédemment. À chaque itération et pour chaque solution potentielle, une

Algorithm 2 Génération des efforts

Require : $variationMax \geq 0$ $baseEffort > 0$ $nbAnnee > 0$

```

1: for  $i = 0$ ;  $i < nbAnnee$ ;  $i++$  do
2:   if  $randBooleen()$  then
3:      $effort[i] = base / (1 + random(0, variationMax))$ 
4:   else
5:      $effort[i] = base \times (1 + random(0, variationMax))$ 
6:   end if
7: end for

```

TABLE 3.2 – Bornes des paramètres du modèle.

Paramètre	Borne inférieure	Borne supérieure
q	0.05	0.5
r	0.05	0.5
Biomasse initiale	100	5000
k	100	5000

simulation de la pêche va être réalisée en se servant des efforts de pêche connus. Cela va déterminer des captures associées à la dynamique de population proposée. La solution est alors évaluée en comparant captures "réelles", C , et captures simulées, C_s , suivant la fonction d'évaluation (ou de fitness) :

$$f(x) = \frac{1}{nbAnnee} \sum_{i=0}^{nbAnnee} \frac{|C_{S_i} - C_i|}{C_i}$$

Les solutions proposées seront alors modifiées de différentes façons en fonction de l'algorithme utilisé afin de caler le plus possible aux captures réelles au cours des itérations. Trois critères d'arrêts sont définis :

- $f(x) < 10^{-5}$, correspondant à un écart moyen entre captures réelles et simulées de 0.001%;
- un temps de calcul maximum de 0,05 unité standard de calcul (STU) c.f. [Shcherbina et al. \(2002\)](#);
- un critère de convergence, arrêtant l'algorithme s'il n'y a plus d'évolution.

Même si le critère d'arrêt de fitness est assez exigeant, en pratique nous considérons qu'une solution est acceptable à partir de $f(x) < 10^{-3}$ soit 0.1% d'écart moyen. En effet, nous pouvons voir sur la figure 3.12, que pour une telle évaluation, les courbes données réelles / simulées sont quasiment superposées alors qu'en pratique, il est impossible d'être sûr de l'exactitude

TABLE 3.3 – Résultat calage par Levenberg-Marquardt avec données complètes et sûres.

VariationMax	Moyenne (10^{-3})	EcartType (10^{-3})	% acceptable	Durée (10^{-3} stu)
0	0.00	0.00	100	0,08
10	0.05	0.02	94	0,47
20	0.12	0.03	81	1,54
50	0.14	0.09	64	2,53
100	0.35	0.05	18	2,53

de ces données d'entrée. Il est donc incohérent d'exiger de l'algorithme de caler les solutions avec plus de précision. Cette exigence n'est présente ici que pour pouvoir comparer les algorithmes entre eux de manière plus précise.

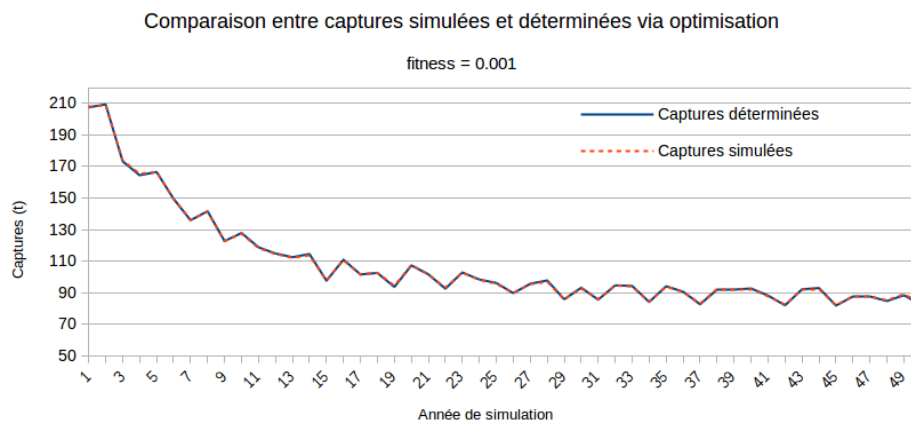


FIGURE 3.12 – Comparaison captures réelles et simulées pour une fitness de 0.001.

3.4.1.5 RÉSULTATS

Pour commencer, nous avons comparé les résultats de certaines métaheuristiques à un algorithme bien connu dans la résolution du problème des moindres carrés, l'algorithme de Levenberg-Marquardt détaillé dans [Moré \(1978\)](#).

Plusieurs métaheuristiques ont été testées [Poiron-Guidoni et al. \(2019\)](#), mais nous ne présenterons ici que les meilleurs résultats. Ceux-ci viennent de la colonie d'abeilles artificielles de [Karaboga and Akay \(2009\)](#).

Les résultats de ces deux méthodes sont présentés dans les tableaux 3.3 et 3.4 pour 50 ans de simulation. Les moyennes, médianes et écarts-types des fitness ne sont calculés qu'à partir des solutions acceptables pour éviter que des solutions divergentes ne viennent fausser les résultats.

TABLE 3.4 – Résultat par colonie d’abeilles artificielles.

VariationMax	Moyenne (10^{-3})	EcartType (10^{-3})	% acceptable	Durée (10^{-3} stu)
0	0.0014	0.0005	100	4,39
10	0.0012	0.0002	100	5,07
20	0.0015	0.0002	100	4,36
50	0.0016	0.0003	100	3,94
100	0.0022	0.0008	100	3,52

Il semblerait donc que dans le cas d’un problème relativement simple, l’algorithme de Levenberg-Marquardt soit extrêmement efficace. En effet, pour un effort fixe nous arrivons à des solutions parfaites très rapidement. Cependant, plus il y a de variations dans les données, moins ces résultats sont intéressants. La colonie d’abeille artificielle, elle, présente des résultats quasi parfaits même face à de grandes variations d’effort.

Ainsi, nous avons vu qu’il est relativement facile de trouver un jeu de paramètres permettant de caler aux données théoriques. Cependant, le modèle présente potentiellement une infinité de points d’équilibre, correspondant à ces données. Il est donc impossible de tous les présenter à notre équipe d’experts. Nous allons donc par la suite proposer une évaluation de la densité de l’espace des solutions afin de ne présenter que les solutions représentatives. En effet, en identifiant différentes zones de l’espace, nous serons en mesure de ne proposer qu’un ensemble réduit de solutions, chacune ayant des caractéristiques spécifiques intéressantes. Ainsi, un expert sera plus facilement à même de les différencier et d’identifier les caractéristiques représentatives de l’espèce.

3.4.1.6 PROBLEME D’ÉQUIFINALITÉ

Une première approche a été de découper l’espace de définition de chacune des solutions en intervalles de valeurs afin de confirmer que la répartition n’était pas uniforme au sein de cet espace. Pour cela, nous avons dans un premier temps effectué 1000 calages sur les mêmes données en suivant le protocole de la section 3.4.1.5. Afin de vérifier la démarche proposée, les valeurs suivantes [$r=0.278$, $q=0.222$, $k=1055$, $B_0=249$] des paramètres internes sont utilisées pour calculer les prises. Comme on peut le voir sur la figure 3.13, aucun des paramètres ne présente de répartitions uniformes. Celles-ci semblent même correspondre à des lois normales et l’on peut remarquer que les deux paramètres de biomasse k et B_0 suivent la même distribution. Il en est d’ailleurs de même pour le couple q et r .

Nous proposons uniquement les solutions dont chacun des paramètres est dans un intervalle de forte population. Cependant, cette approche exclut trop souvent des solutions ac-

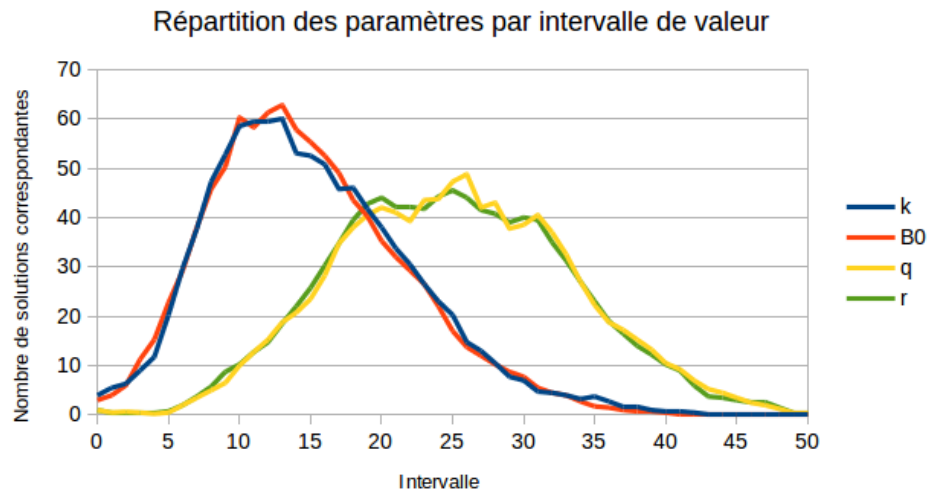


FIGURE 3.13 – Répartition des valeurs de chaque paramètre sur 50 intervalles

ceptables. Nous nous sommes donc orientés vers une analyse de la densité de l'espace des solutions. Nous avons alors réalisé une estimation de densité par noyau à plusieurs variables en suivant la règle empirique de [Silverman \(2018\)](#).

Les résultats sont donnés sur la figure 3.14 avec :

- à gauche (a) le résultat d'un calage avec effort parfaitement connu
- à droite (b) le résultat d'un calage avec de larges bornes pour l'effort

Chaque point de la figure 3.14 représente une solution du calage. La couleur de celui-ci représente le niveau de densité de la zone, plus la couleur est foncée, plus la zone est dense en solutions. Nous avons volontairement retiré une dimension, le paramètre r , afin de pouvoir montrer une représentation graphique. L'estimation de densité est cependant réalisée sur les 4 paramètres du modèle.

On remarque que lorsque l'on connaît parfaitement l'effort de pêche, les solutions sont très groupées autour du point solution et la zone de plus forte densité correspond parfaitement à celui-ci (figure 3.14 a). En revanche, sans connaissance quant à l'effort de pêche (figure 3.14 b), une grande partie de l'ensemble de définition des paramètres est couvert par les solutions du calage. La zone de densité maximale est très proche de la solution exacte dans notre exemple mais cela n'est pas toujours le cas et nous n'avons pas été en mesure de déterminer les conditions quant à l'exactitude ou non des résultats présentés par la zone de plus forte densité. De plus, il est possible de prouver mathématiquement que pour des efforts parfaitement inconnus et des relevés de capture exacts, il existera toujours une infinité de solutions dans un espace continu. Dans ce cas là, l'approche n'est donc pertinente que pour déterminer

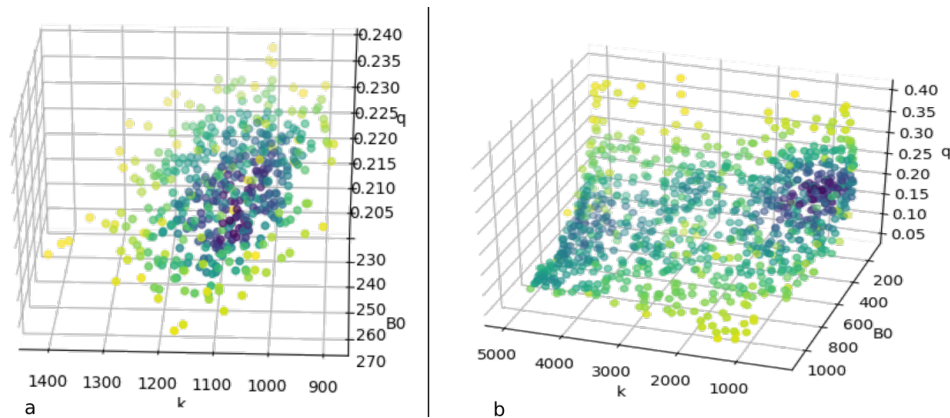


FIGURE 3.14 – Estimation de densité de l'espace des solutions acceptables. (a) Efforts parfaitement connus. (b) Efforts complètement inconnus.

les frontières de l'espace des solutions et plus particulièrement les bornes de la biomasse de l'espèce, paramètre très important et difficile à estimer en biologie marine.

Ainsi, même avec ces méthodes, nous ne pouvons pas proposer une solution unique à un calage avec peu de connaissances expertes. Des estimations de l'effort de pêche sont un minimum afin de réduire l'espace des solutions jusqu'à avoir des bornes suffisamment réduites pour une exploitation directe. Une intervention humaine ou de solides connaissances préalables sont donc nécessaires à une application réelle.

Dans la suite de ce document, nous verrons ce que nous sommes en mesure de réaliser à partir de données réelles et de connaissances expertes dans le cadre du projet MoonFish.

3.4.1.7 APPLICATION AU PROJET MOONFISH

Pour nos tests nous partons du postulat que les données présentées dans [Le Manacha et al. \(2011\)](#) sont cohérentes afin de tester nos algorithmes et pouvoir mettre en lumière leur efficacité, mais également leurs problèmes.

On peut se servir des données de captures totales pour estimer les valeurs de C sur la période étudiée (1950-2008) et estimer les efforts de pêche associés en nous basant sur le nombre de bateaux professionnels, auxquels on ajoutera la proportion de pêche récréative.

La formule suivante est utilisée :

$$Effort(t) = \frac{nombreBateaux(t)}{1 - priseRecreative(t)/priseGlobales(t)}$$

De plus, comme il est plus facile et cohérent de manipuler un effort relatif, c.f. [Rafalimanana \(2003\)](#), nous utiliserons l'effort calculé pour l'année de départ, 1950, comme référence.

On obtient alors la formule :

$$Effort(t) = \frac{\text{nombreBateaux}(t)}{1 - \text{priseRecreative}(t)/\text{priseGlobales}(t)} \times \frac{1}{Effort(1950)}$$

Les estimations des prises pour chaque espèce sont également intéressantes mais il est irréaliste de supposer que l'effort global est représentatif de chaque espèce. Ainsi, nous allons commencer par déterminer la dynamique de la biomasse globale.

DÉTERMINATION DE LA DYNAMIQUE DE POPULATION GLOBALE

En utilisant les mêmes algorithmes qu'en section 3.4.1.5, nous n'obtenons pas mieux que les résultats présentés en figure 3.15.

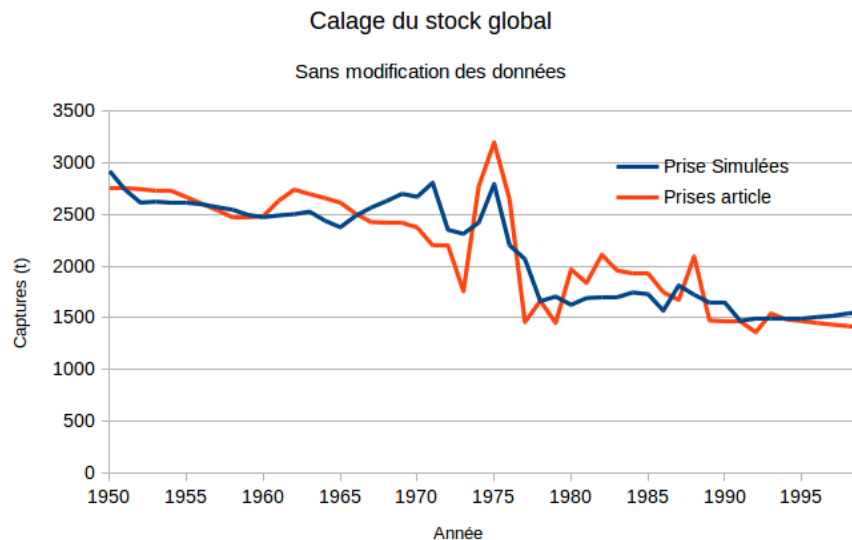


FIGURE 3.15 – Résultat calage par rapport aux prises globales

Les différences sont nettement plus importantes que dans nos tests en situation optimale. Deux explications s'offrent à nous.

La première étant que le modèle n'est pas assez précis pour représenter la complexité d'un écosystème marin réel.

La deuxième étant que les données d'entrée sont imparfaites. Il nous est, à ce stade de nos travaux, impossible de conclure quant à la première.

En revanche, nous avons montré que si les relevés de captures/efforts sont cohérents entre eux, il existera toujours des solutions au calage. L'acquisition et les estimations de ce type de données étant particulièrement complexes et sujettes à imprécisions, il est normal que des

erreurs soient présentes. Ainsi il est nécessaire de proposer des méthodes pour pallier ce problème, au moins de façon théorique.

Dans Jaqaman and Danuser (2006), les auteurs proposent de modifier les données d'entrée en utilisant des méthodes de régression.

Dans le même esprit, nous partons du postulat que le calage est correct et nous nous en servons pour progressivement modifier les données d'entrée. Une progression lente est nécessaire afin d'éviter des biais. En effet, il n'est pas pertinent de considérer les résultats du premier calage comme parfaits si on considère que les données d'entrée ne le sont pas. Ainsi, une trop grande modification dans le sens de l'optimisation pourrait biaiser les résultats.

Algorithm 3 Modification des données en fonction des résultats de l'optimisation

Require : $variationMax \geq 0$

while Critère d'arrêt, 200 itérations pour nous **do**

 Générer 1000 solutions au calage

 Filtrer ces solutions selon leur cohérence (critère d'évaluation ou filtre selon la densité de l'espace des solutions)

 Parmi les solutions cohérentes, identifier quelle année, A, simulée est la plus loin des données

$captures(A) = captures(A) + random(0, variationMax) * (MoyenneCapturesSimules(A) - captures(A))$

end while

Pour tester cette approche, nous sommes repartis des données simulées présentées en figure 3.12 et avons volontairement ajouté des erreurs. La figure 3.16 (a) montre le résultat du calage sur ces données. On y constate également des erreurs de calage. En revanche, sur la figure 3.16 (b), représentant les différences entre les données avant modifications et les données modifiées auxquelles nous avons appliqué 200 itérations de l'algorithme 3, on peut voir que nous sommes en mesure de retrouver presque parfaitement les données d'origine et donc un calage optimal.

Ainsi, après 200 itérations sur les données de prises globales, nous obtenons les résultats visibles en figure 3.17. Bien qu'il soit impossible de prouver qu'elles correspondent mieux à la réalité, elles semblent toutefois plus cohérentes. Par exemple, le pic de 1975 a été atténué et, bien que toujours présent, celui-ci est plus facilement justifiable d'un point de vue biologique.

De plus, l'utilisation de la méthode présentée en section 3.4.1.6 permet d'identifier des bornes pour chaque paramètre, ainsi qu'un ensemble de solutions qu'un expert pourra encore réduire à partir de ses connaissances.

La figure 3.18 montre la densité de l'espace des solutions pour le calage du stock global. Les bornes des paramètres sont déjà relativement serrées et on voit bien une agglomération

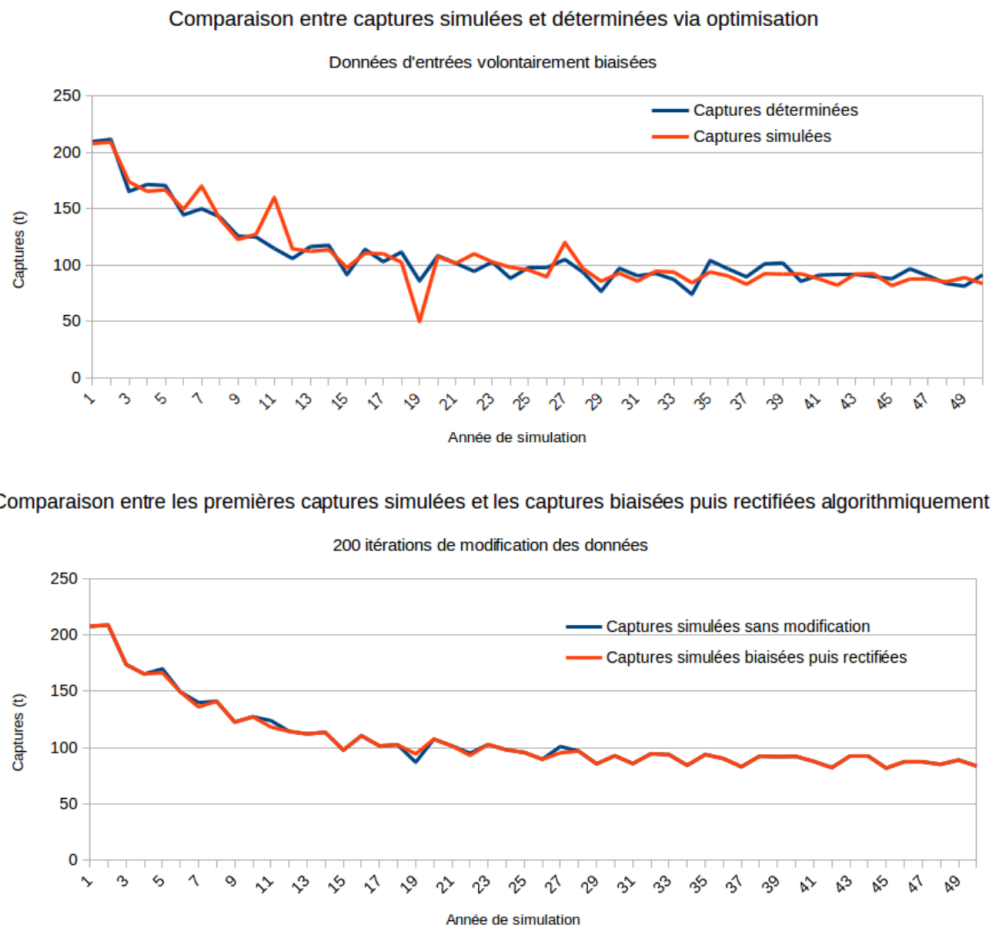


FIGURE 3.16 – Validation de l’algorithme de modification de données.

autour d’un point central. De plus, en filtrant selon la densité des points, nous obtenons les bornes présentées dans le tableau 3.5.

Nous connaissons maintenant la dynamique de population du stock global, nous allons donc pouvoir utiliser cette nouvelle donnée ainsi que quelques connaissances expertes afin de déterminer la dynamique de population des 15 espèces principalement exploitées en Corse.

APPLICATION À LA DYNAMIQUE DES ESPÈCES D’INTÉRÊT

À l’échelle d’une seule espèce, il est difficilement justifiable d’utiliser une mesure d’effort de pêche uniquement basée sur le nombre de bateaux. En effet, certaines espèces sont plus intéressantes commercialement que d’autres, plus facilement ciblables par un engin donné, etc., nous devons donc nous même déterminer l’effort de pêche dans notre processus optimisation.

Les données présentées en annexes de [Le Manacha et al. \(2011\)](#) montrent l’évolution des

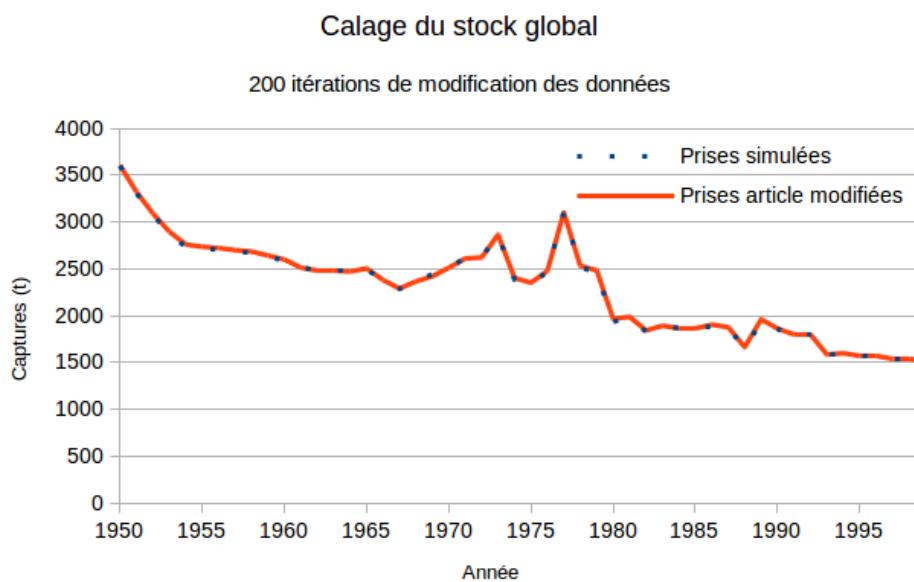


FIGURE 3.17 – Résultat calage par rapport aux prises globales après modification.

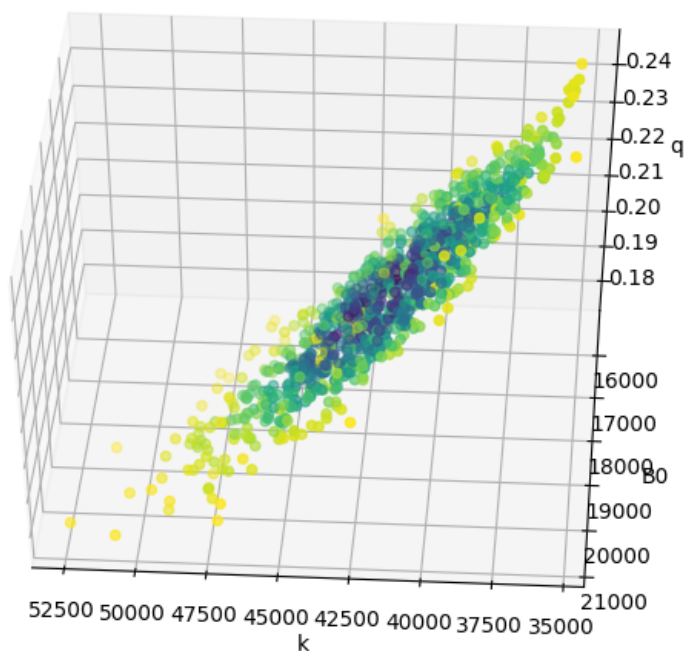


FIGURE 3.18 – Estimation de densité de l'espace de solution du calage.

captures au cours du temps pour 6 espèces d'intérêt. Ces espèces font également partie de la liste des espèces d'intérêt du projet *MoonFish*. Ainsi, nous pouvons utiliser des estimations

TABLE 3.5 – Bornes des paramètres du stock global.

	k	B1950	q	r
Minimum	38914	16614	0,1967	0,2470
Maximum	45058	18705	0,2219	0,2836

peu précises de chaque paramètre afin de fortement limiter l'espace des solutions et ainsi, pallier l'accentuation du problème d'équifinalité engendré par la détermination via optimisation des efforts de pêche. Nous avons donc réutilisé les méthodes présentées en section 3.4.1.5 en ajoutant la liste d'efforts de pêche à la liste de paramètres à caler et en bornant les paramètres selon les connaissances expertes à notre disposition. On sait par exemple que sur certaines espèces, l'effort ne varie pas de plus de 20% entre les années. Nous obtenons donc la dynamique de population de chacune de ces espèces.

Par la suite, cette section va se révéler très théorique, elle n'est là que pour montrer ce que l'on pourrait faire avec un minimum de connaissances expertes (connaissances que nous n'avons pas encore à l'heure actuelle). Nous ferons donc des suppositions afin de pouvoir montrer l'intérêt théorique de cette méthode. Nous ne sommes cependant pas en mesure de l'appliquer en situation réelle. Nous allons donc supposer la connaissance de bornes quant à la biomasse de chacune des espèces d'intérêt. Connaissant la difficulté d'une telle estimation, ces bornes sont relativement larges par soucis de crédibilité avec le système réel.

Nous avons donc $borneSupérieur = 4 \times borneInférieure$.

Le tableau 3.6 présente les bornes utilisées pour les paramètres de chacune des 9 espèces d'intérêt qui ne sont pas encore calées. A cela s'ajoute une dernière espèce représentant l'ensemble des espèces non ciblées par notre étude et très peu impactées par l'activité de pêche. Pour celle-ci nous autorisons des bornes bien plus élevées pour k et B1950 car ces paramètres représentent un groupement d'espèces et non une unique. Enfin, nous réutilisons les dynamiques de populations des 6 espèces précédemment calées. Nous avons donc un total de 620 paramètres à caler.

Ne connaissant que l'évolution de la biomasse globale et des captures globales au cours du temps, la fonction d'évaluation va naturellement chercher à représenter ces deux aspects. Ayant deux objectifs, il semble naturel d'utiliser un algorithme d'optimisation multi-objectif. Or, comme ces données sont censées représenter la réalité, nous supposons qu'un optimum de pareto existe (c.f. [Pareto \(1919\)](#)), état dans lequel il n'est plus possible d'améliorer la situation). Il n'est donc pas nécessaire de chercher le front de Pareto, représentant l'ensemble des compromis possibles entre les objectifs. Un algorithme d'optimisation globale avec une fonc-

TABLE 3.6 – Bornes des paramètres de chacune des espèces d'intérêts.

Paramètres	Minimum	Maximum
k	1	2000
B1950	x	$4 \times x$
r	0.001	0.5
q	0.001	0.5
Effort[58]	0	5

tion d'évaluation scalarisant les deux objectifs est donc acceptable.

Nous utilisons la fonction d'évaluation suivante :

$$f(x) = \sum_{i=0}^{nbAnnee} [B_{global}(i) - \sum_{j=0}^{nbEspece} B_j(i)]^2 + \sum_{i=0}^{nbAnnee} [C_{global}(i) - \sum_{j=0}^{nbEspece} C_j(i)]^4$$

Parmi les algorithmes que nous avons testés sur ce problème, la Recherche à Voisinage Variable Générale [Siarry \(2014\)](#) est la plus performante. Bien qu'il y ait beaucoup de paramètres, l'évaluation n'est pas gourmande en temps de calcul. Ce type de méthode peut donc être utilisé même si elle nécessite un très grand nombre d'évaluations. Elle n'est cependant pas recommandée dans le cas d'un modèle plus complexe pouvant demander un grand temps de calcul par évaluation.

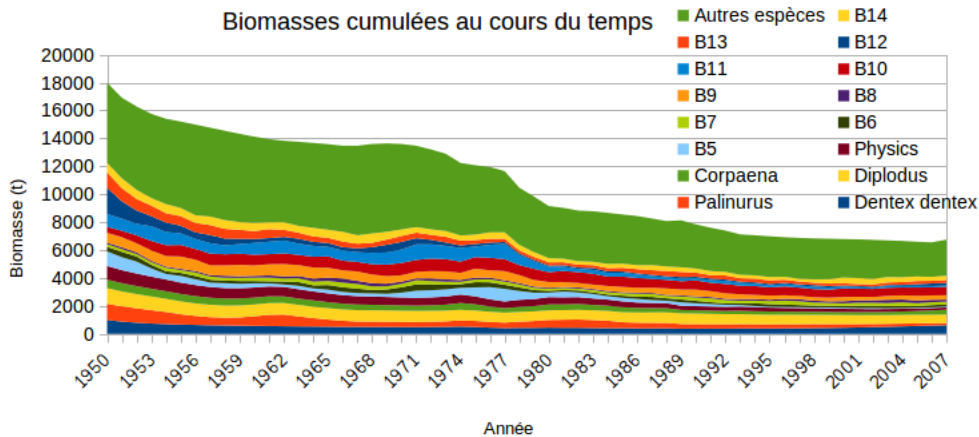


FIGURE 3.19 – Biomasse cumulée de 15 espèces d'intérêt au cours du temps.

Nous obtenons ainsi les résultats présentés sur les figures 3.19 et 3.20.

Nous pouvons y constater que les captures cumulées suivent parfaitement celles présen-

tées en figure 3.17. De même, la biomasse cumulée correspond à peu de chose près à la biomasse du stock global estimée précédemment.

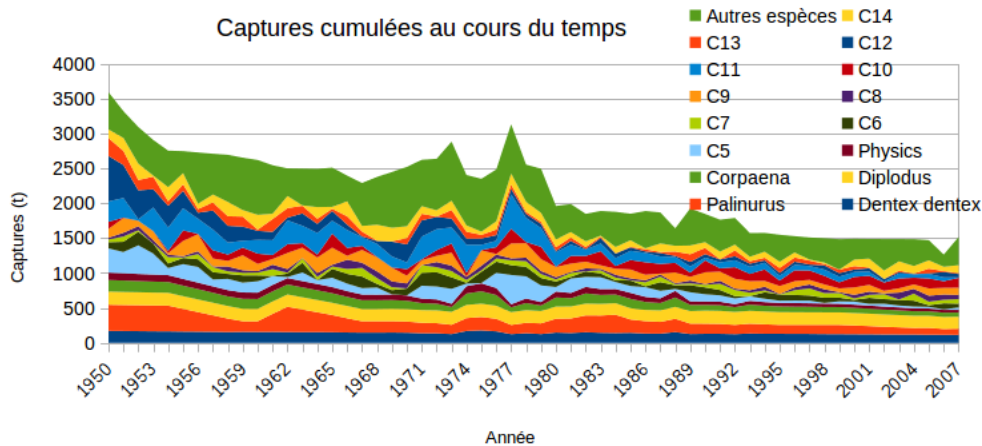


FIGURE 3.20 – Captures cumulées de 15 espèces d'intérêt au cours du temps.

Ainsi, l'utilisation de la puissance des méthodes d'optimisation alliée à des connaissances expertes relativement faibles peut permettre l'émergence de connaissances impossibles à déterminer telle que la biomasse de chacune des espèces. Cela permettant, à terme, de représenter fidèlement l'évolution des stocks et de l'exploitation marine.

Ces travaux sont toujours en cours, la soutenance de thèse est prévue pour fin décembre 2021. L'objectif de proposer une évaluation des politiques de gestion des ressources n'est pas encore atteint. S'il est facile de montrer que la situation actuelle aurait pu être évitée avec la mise en place de politiques de régulation ambitieuses, il n'est pas évident de trouver le juste équilibre aujourd'hui entre respect de l'environnement et maintien de l'activité de pêche.

Nous nous intéressons également aux approches d'apprentissage par renforcement pour compléter la *phase* d'optimisation. Un premier exemple est donné dans [Poiron-Guidoni et al. \(2020a\)](#). Nous souhaitons maintenant généraliser l'approche en nous inspirant des travaux de [von der Osten et al. \(2017\)](#); [Zhu and Kirley \(2019\)](#).

Dans cette optique, nous pouvons également noter que l'approche peut-être étendue aux systèmes multi-agents comme le propose [Perolat et al. \(2017\)](#).

3.4.2 VERS DES AGENTS COGNITIFS

Plusieurs types d'agents et par conséquent d'architectures sont considérés dans le domaine des SMA. [Wooldridge \(2002\)](#) propose de distinguer les agents réactifs des agents cognitifs,

mais nous pouvons lister :

- les agents logiques, dont le fonctionnement est basé sur des déductions logiques ;
- les agents réactifs dont le fonctionnement est basé sur une simple correspondance entre les situations et les actions (interagissent avec leur environnement mais sans raisonner dessus) ;
- les agents cognitifs où l'agent décide des actions à entreprendre à partir de ses états internes qui sont exprimés sous la forme de croyances (Belief), de désirs (Desire) et d'intentions (Intention) comme dans l'approche BDI ;
- et, les agents multi-niveaux dont les connaissances internes sont organisées en différents niveaux d'abstraction, permettant ainsi différents niveaux de traitement.

Ces différents types d'agents répondent à des objectifs différents. Si dans [Franceschini et al. \(2017\)](#), nous nous étions principalement intéressés aux agents réactifs, notre positionnement vis-à-vis du paradigme agent est de considérer l'agent comme une entité dont le corps est distinct de l'esprit. Ainsi, dans DPDEMAS, le système multi-agents (SMA) est décrit par des modèles d'environnements (physiques et/ou sociaux), eux-mêmes composés par le corps des agents, et des modèles correspondant aux esprits des agents. L'esprit est vu comme le système cognitif de l'agent.

Dans ces nouveaux travaux, nous souhaitons exploiter le potentiel du système cognitif. Ils ont aussi pour objectif de compléter l'approche DPDEMAS en proposant aux modélisateurs une architecture cognitive.

L'application est basée sur le programme *MoonFish* qui dicte nos choix et notamment le contexte, l'objectif de la simulation, et les divers paramètres à prendre en compte. Comme dans tout processus de modélisation, il faut trancher et trouver la juste proportion entre simplicité et complexité. Ils impactent fortement le niveau de détails du modèle. A partir des données collectées et des données historiques, nous souhaitons tester une première méthodologie de décision basée sur le modèle de [Schaefer \(1954\)](#) et sur la représentation des pêcheurs sous forme d'agent cognitif.

Les modèles basés sur les agents (ABM) présentent une grande variété d'architectures d'agents, des architectures les plus simples (agents réactifs) aux architectures cognitives les plus complexes.

Lorsque l'on souhaite utiliser le paradigme agent pour effectuer des simulations, une question importante à laquelle il faut répondre est de savoir comment modéliser les processus de prise de décision des agents.

Il y a dans la littérature un grand nombre d'architectures ou de modèles de prise de décision pour les agents, chacun étant inspiré par des objectifs et des applications différents (c.f. [Balke and Gilbert \(2014\)](#)). Nous retrouvons également une proposition basée sur le formalisme DEVS [Zhang et al. \(2013\)](#); [Zhang and Verbraeck \(2014\)](#).

[Balke and Gilbert \(2014\)](#) ont publié une étude très intéressante sur quatorze architectures décisionnelles pour les agents, plutôt orientée simulation sociale⁸. Elle liste plusieurs types d'architectures des plus simples, seulement à base de règles, aux plus complexes, prenant par exemple en compte les aspects émotionnels. L'objectif est de nous guider afin de savoir laquelle utiliser pour une question de recherche donnée.

Les architectures sont divisées en grande famille :

- seulement à base de règles;
- de type BDI et ses extensions comme eBDI (Emotional BDI de [Pereira et al. \(2005\)](#) et [Jiang and Vidal \(2006\)](#)), BOID (Croyances-Désirs-Obligations-Intentions) de [Broersen et al. \(2002\)](#), et BRIDGE de [Dignum et al. \(2008\)](#);
- les modèles normatifs comme EMIL-A de [Andrighetto et al. \(2007\)](#);
- les modèles cognitifs comme Consumat de [Jager and Janssen \(2002\)](#);
- et enfin, les modèles inspirés par la psychologie et les neuro-sciences comme CLARION de [Sun et al. \(2001\)](#), ACT-R (Contrôle adaptatif de la pensée-rationnelle) de [Anderson and Lebiere \(2014\)](#), et Soar⁹ de [Laird et al. \(1986\)](#).

D'après [Edmonds and Moss \(2004\)](#), les architectures BDI pour Croyance-Désir-Intention et les architectures cognitives permettent aux modélisateurs de traiter les processus cognitifs des agents. Cependant, selon [Adam and Gaudou \(2016\)](#) ces deux types d'architecture sont très différentes. Par exemple, leurs inspirations conceptuelles, c'est-à-dire l'origine des concepts sous-jacents diffèrent. Les architectures cognitives s'appuient sur les sciences cognitives et visent à décrire le plus précisément possible les processus cognitifs humains.

Les architectures BDI et cognitives diffèrent également au niveau de l'abstraction des concepts manipulés. Les concepts de BDI sont dits *de plus haut niveau*. Par exemple, ils s'attachent à décrire les attitudes informationnelles plutôt que des éléments en mémoire.

Selon [Sun \(2001\)](#), les architectures BDI peuvent être considérées comme la partie explicite et symbolique des architectures cognitives.

D'après [Norling \(2004\)](#), elle se concentrent sur le niveau conscient de l'esprit, c'est-à-dire un niveau où les êtres humains peuvent consciemment manipuler les concepts et les commu-

8. ABSS : Agent-based social simulation en anglais.

9. SOAR signifiait à l'origine *State, Operator And Result (état, opérateur et résultat)*, il n'est plus aujourd'hui considéré comme un acronyme.

niquer aux autres. Cela permet de mettre en correspondance les connaissances des experts et le comportement des agents, et aide les non-informaticiens à comprendre le comportement des agents.

Enfin, elles diffèrent sur leur degré de standardisation théorique. Chaque implémentation d'architecture cognitive repose sur sa propre théorie, par exemple :

- CLARION présentée dans Sun et al. (2001) est basée sur les travaux de Sun (2001); Sun et al. (2006). Elle s'intéresse à la dichotomie implicite et explicite du processus d'apprentissage.
- Soar proposée par Laird et al. (1986) et Rosenbloom et al. (1993) est basée sur les travaux de Newell (1992);
- et, ACT-R décrite dans Anderson and Lebiere (2014) est basée sur les travaux de Anderson (1996, 2014). Elle se concentre sur le processus d'activation.

Il n'y a pas de consensus sur la composante mémoire de l'architecture, que ce soit sur le nombre de mémoires ou sur leur nature. Au contraire, dans toutes les implémentations existantes de BDI et les formalisations de la logique modale sous-jacente, les concepts à implémenter sont clairement définis, ce qui permet à la communauté scientifique de travailler à son amélioration et à ses extensions (eBDI, BOID, etc.).

Le travail de Bratman et al. (1987) est formalisé principalement par des logiques modales Rao and Georgeff (1991) et est basé sur le courant philosophique de la rationalité. L'architecture BDI est fondée sur un modèle cognitif de l'intentionnalité proposé par Georgeff (1988) et Rao and Georgeff (1991). Ces logiques décrivent les trois principaux états intentionnels : Croyances, Désirs, Intentions (BDI) comme le montre la figure 3.21. Elles conduisent l'agent en fonction de sa connaissance du monde, à choisir un ensemble d'actions à effectuer, puis à les exécuter. L'architecture BDI offre donc une description plus précise qui rend les modèles plus faciles à comprendre pour les modélisateurs et les utilisateurs finaux.

Il existe de nombreuses variantes, mais un agent qui implémente l'approche BDI doit suivre le processus de raisonnement suivant :

1. perception : trouver tout nouvel **événement** qui peut avoir été déclenché, soit au sein de l'agent, soit à l'extérieur comme dans l'environnement. Phase de perception de la figure 3.21 ;
2. mise à jour : mettre à jour ses **croyances** avec les nouvelles informations fournies par l'événement ;
3. revoir ses intentions : si le changement de croyances signifie qu'une **intention** ou un objectif n'est plus valable, soit parce qu'il a déjà été atteint, soit parce qu'il n'est plus

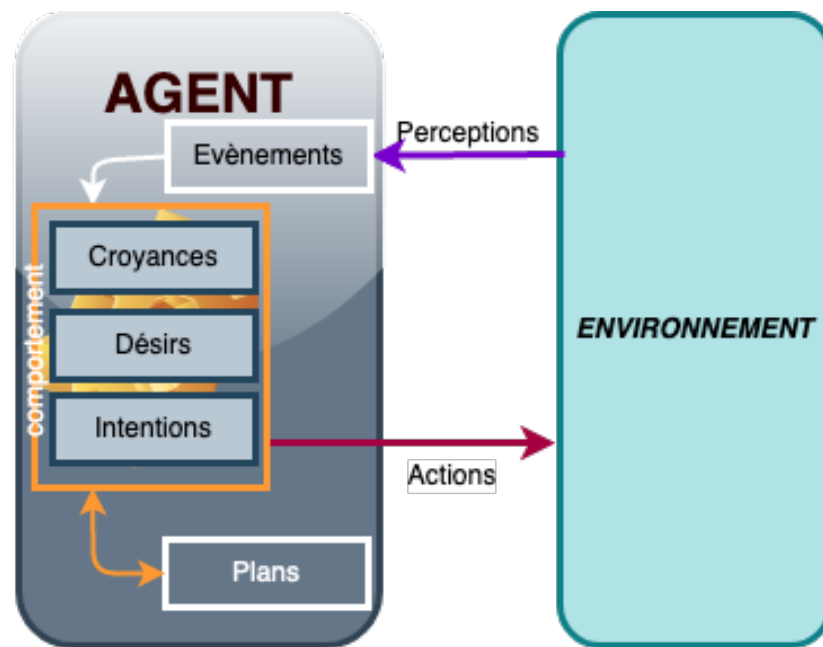


FIGURE 3.21 – L'architecture BDI.

possible, il faut le supprimer ;

4. affiner les plans : si l'intention a été révisée, déterminer l'ensemble des **plans** applicables à l'événement en cours, qui sont appropriés au contexte actuel, et qui sont définis comme en capacité d'atteindre l'objectif associé à l'événement, c'est-à-dire le **désir** ;
5. sélectionner les plans : s'il n'y a pas de plan en cours, sélectionner un nouveau **plan** ayant la plus grande utilité puis ajouter ses étapes à la liste des intentions ;
6. action : exécuter l'étape suivante du plan en cours, ce qui peut impliquer l'exécution d'une **action** ou l'extension d'un sous-objectif en déclenchant un nouvel événement.

Décrire l'architecture BDI nous semble important pour expliquer un processus de raisonnement simple. Si l'on exclut les approches les plus simples à base de règles, l'architecture BDI propose un processus facile à comprendre. Comme le fait remarquer [Edmonds and Moss \(2004\)](#) les architectures BDI et les architectures cognitives permettent de décrire des agents cognitifs, mais il y a bien des différences et BDI n'est pas réellement une architecture cognitive. Nous avons choisi de présenter également Soar, qui est l'une des architectures les plus utilisées.

L'approche Soar est décrite dans [Laird et al. \(1986\)](#) et [Rosenbloom et al. \(1993\)](#). Elle permet de représenter les processus de décision comme comportement orienté vers un but, mais également l'apprentissage de résultats. Elle a été utilisée dans de nombreux cas, notamment

pour traiter des problèmes prenant en compte des interactions avec le monde extérieur. Une des raisons de ce large éventail d'applications est que les sciences cognitives intéressées par la compréhension du comportement humain et la recherche en intelligence artificielle intéressée par la résolution efficace de problèmes ont participé à son développement.

La figure 3.22 détaille l'architecture. En fait, il y a deux approches présentées sur la figure. Les parties orange décrivent l'architecture initiale de Laird (2012). Le schéma complet décrit l'une des dernières versions (Soar 9) proposée dans Laird (2008).

L'architecture Soar classique se compose de deux types de mémoires :

1. une mémoire symbolique à long terme qui est codée à base de règles,
2. et, une mémoire de travail implémentée sous forme de graphe pour représenter des objets décrits par des propriétés et des relations.

Comme dans d'autres architectures, la mémoire de travail est utilisée pour évaluer la situation actuelle de l'agent. Pour cela, elle utilise les informations de perception qu'elle reçoit par ses capteurs d'entrée et les informations stockées dans la mémoire à long terme. Elle est également chargée de créer des commandes ou des actions motrices choisies par le module de procédure de décision. Ce dernier sélectionne des opérateurs et détecte les éventuelles impasses.

Le processus de prise de décision dans Soar consiste à faire correspondre et à appliquer des règles représentant des connaissances. Les conditions décrivent la situation actuelle de l'agent et les propositions des règles (Si condition Alors proposition) définissent des actions à appliquer à la situation actuelle. Elles sont stockées dans la mémoire de travail. Les règles dans Soar agissent comme une mémoire associative pour récupérer des connaissances pertinentes en rapport à la situation de l'agent. Alors que la plupart des algorithmes de prise de décision ne permettent de déclencher qu'une seule règle et que la prise de décision proprement dite porte principalement sur la règle à choisir, Soar permet de déclencher des règles en parallèle, en récupérant plusieurs éléments de connaissance en même temps. En situations incertaines avec des connaissances limitées, il est difficile de choisir une seule règle, il vaut mieux pouvoir s'appuyer sur le plus de connaissances possibles. C'est pourquoi les contributeurs introduisent des connaissances supplémentaires dépendantes du contexte dans le processus de prise de décision. Ils utilisent des opérateurs pour le contrôle, la sélection et l'utilisation des règles ainsi que pour l'évaluation et l'application des opérateurs. Les opérateurs Soar ne sont pas des structures de données monolithiques, mais sont répartis sur plusieurs règles. Cela permet une représentation flexible des connaissances sur les opérateurs ainsi que la mise à jour continue des connaissances. S'il n'y a pas suffisamment d'informations pour sélectionner ou appliquer un opérateur, une impasse se produit et un sous-état est créé pour la résoudre, et ainsi de

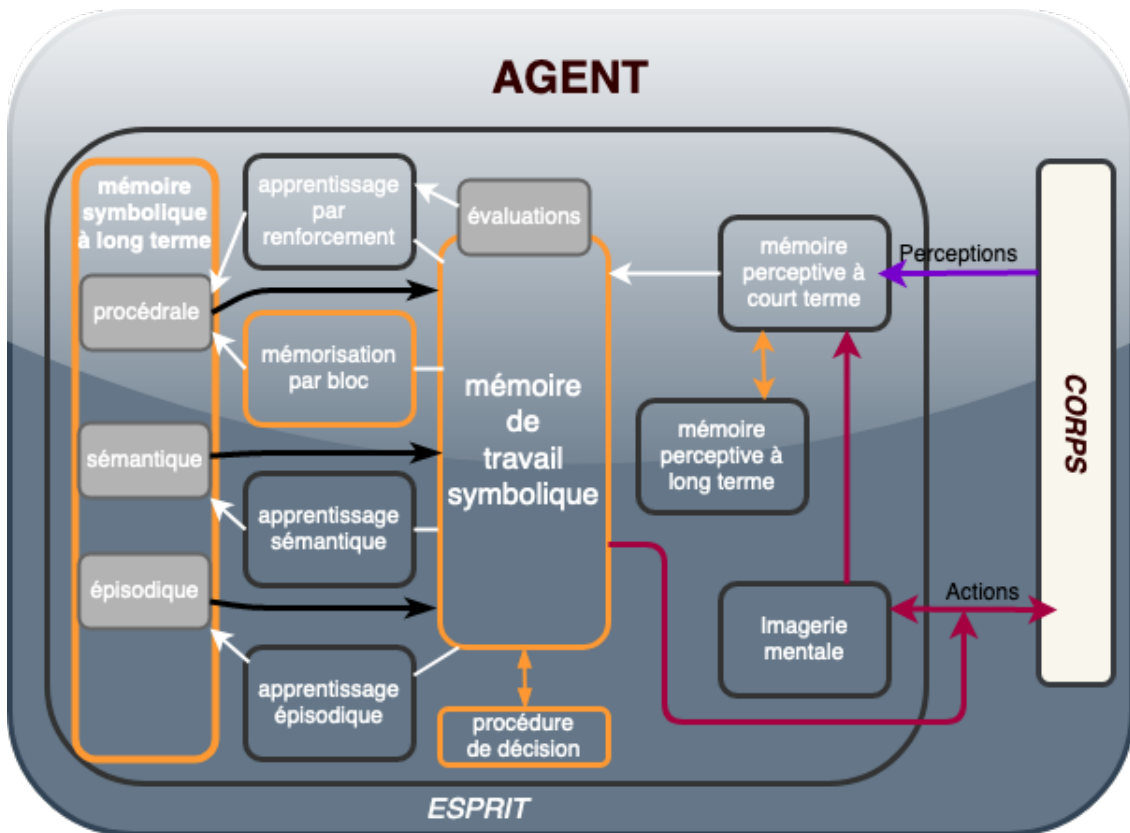


FIGURE 3.22 – L’architecture Soar reproduite à partir de Laird (2012). Les composants Soar classiques sont en orange, l’extension de Soar est constituée de tous les composants affichés Laird (2008).

suite, la procédure est récursive. L’approche classique propose également un mécanisme d’apprentissage par bloc (chunking). L’algorithme de chunking convertit le résultat solution du sous-objectif en nouvelles règles qui peuvent être utilisées dans le processus de raisonnement ultérieur.

Dans Soar 9, l’architecture classique est étendue via l’ajout :

- de nouveaux modules d’apprentissage et de mémoire qui permettent de saisir les connaissances plus facilement,
- et, d’une représentation non symbolique des connaissances ainsi que des modules de traitement, d’apprentissage et de mémoire associés.

Le module d’apprentissage par renforcement est lié aux connaissances procédurales ainsi qu’à la mémoire de travail comme on peut le voir sur le figure 3.22. Il permet d’ajuster la sélection des actions en fonction de récompenses en lien avec l’environnement et la situation de l’agent. Les récompenses spécifient la valeur attendue par un opérateur pour un état. Lors-

qu'un opérateur est sélectionné, toutes les règles qui déterminent les valeurs attendues sont mises à jour en fonction de nouvelles récompenses. Cette évaluation des opérateurs est appliquée à tous les objectifs et sous-objectifs du système, ce qui permet d'identifier rapidement les bons et les mauvais opérateurs pour une situation donnée. L'évaluation est liée à la phase d'apprentissage par renforcement, et à la mémoire de travail comme le montre la figure 3.22. C'est une première tentative de représenter les émotions dans Soar. L'idée est qu'un agent évalue continuellement les situations auxquelles il est confronté selon de multiples dimensions telles que la pertinence de l'objectif, sa capacité à l'atteindre, la causalité, etc. Ces évaluations permettent de déterminer dans quelle mesure l'objectif est atteignable, ce qui a une incidence sur les émotions de l'agent. Ces émotions expriment l'intensité d'un sentiment et fonctionnent ainsi comme une récompense pour l'apprentissage par renforcement. Actuellement dans Soar, les émotions ne font qu'établir un lien entre l'apprentissage par renforcement et la mémoire de travail, mais à l'avenir, les auteurs veulent explorer l'effet des émotions sur d'autres modules.

Soar a déjà été utilisée pour des simulations à grande échelle du comportement humain. La version courante est la 9.6, elle est décrite sur le [web](#). Le site fournit différents IDE pour le développement d'agents Soar ainsi que des exemples de code et un grand nombre de documents et de ressources. En plus de ces documents, il existe des forums et des groupes pour les utilisateurs de Soar ainsi qu'une liste de diffusion Soar où les utilisateurs peuvent demander de l'aide.

Le lecteur intéressé pourra trouver plus de détails sur chaque approche dans les articles les présentant et un résumé dans le survey de [Balke and Gilbert \(2014\)](#). Une comparaison entre BDI et Soar est aussi proposée par [Georgeff et al. \(1998\)](#). Elle souligne que les deux approches tendent vers le même but à partir d'idées assez similaires et qu'elles sont en fait plus complémentaires que concurrentes. Ainsi, alors que Soar est généralement utilisée par les sciences cognitives pour comprendre la théorie en adoptant une approche empirique, BDI est plutôt utilisée par des logiciens et des philosophes pour construire des modèles après avoir compris les fondements théoriques.

Pour conclure sur nos descriptions, comme le soulignent [Balke and Gilbert \(2014\)](#), il y a beaucoup de modèles ou d'architectures proposées par la communauté. Elles sont basées sur différentes idées, intentions et hypothèses; par exemple, certaines supposent un comportement rationnel des agents comme BDI, et d'autres tentent d'ajouter des composantes "irrationnelles" telles que les émotions ou encore l'apprentissage. Finalement, nous en revenons à l'un des énoncés précédents, à savoir que l'objectif doit conditionner le choix. Dans notre cas, nous avons choisi l'architecture Soar car, nous souhaitons une architecture en mesure de représenter les processus de décisions complexes des pêcheurs. Nous considérons également

BDI plus comme un modèle conceptuel qu’une architecture précise. Proposant plutôt un processus descriptif de haut niveau qu’une architecture formelle. Partir sur un modèle trop vague laisse place à trop de choix d’implémentations.

Notre choix est également dicté par des travaux développés en parallèle et qui concernent l’optimisation par simulation ainsi que le développement et le test de plusieurs approches basées sur les métaheuristiques ou les réseaux de neurones. Elles pourront parfaitement s’intégrer dans le module d’apprentissage par renforcement de Soar. Nous allons maintenant décrire les contributions de ces travaux.

3.4.2.1 CONTRIBUTIONS

Pour l’instant, nous avons proposé dans [Martelloni et al. \(2018\)](#) une implémentation dans VLE (c.f. [Quesnel et al. \(2009\)](#)) de *l’approche multi-composants* de [Zeigler et al. \(2000\)](#). Cet apport nous permet d’utiliser une représentation spatiale de l’environnement d’un SMA à partir de modèles cellulaires (c.f. [von Neumann \(1988\)](#)). Les modèles cellulaires sont souvent utilisés pour décrire un espace bi-dimensionnel. L’intérêt de *l’approche multi-composants* est de modéliser un l’environnement physique et de s’abstraire, pour la communication entre composants (cellules), du mécanisme d’envoi et de réception des messages du formalisme DEVS.

Nous montrons dans [Martelloni et al. \(2018\)](#) et dans [Foures et al. \(2018\)](#) que l’usage de *l’approche multi-composants* est plus véloce qu’une modélisation classique basée sur Cell-DEVS ¹⁰.

Puis, dans [Martelloni et al. \(2020\)](#), nous détaillons une approche d’aide à la décision basée sur un algorithme de Q-learning ¹¹ afin d’améliorer les politiques de pêche. L’objectif est de tester et identifier les limites d’une méthode d’apprentissage par renforcement sur un modèle de stocks calibré à partir de données de la littérature et de nos travaux sur l’optimisation (c.f. section 3.4.1.7). C’est également un premier test en vue de l’utilisation d’un module Soar d’apprentissage par renforcement.

Au niveau théorique, la formalisation de Soar dans DPDEMAs et plus précisément la description de l’esprit de l’agent est presque finalisée. Nous avons complété la description de l’esprit de l’agent proposée dans [Franceschini et al. \(2017\)](#) en y intégrant les modules Soar de décision : *sélection, optimisation, apprentissage*.

Le processus d’apprentissage a été représenté sous forme de processus qui consiste à essayer des actions et en observer les conséquences. Nous allons détailler son déroulement.

La première phase dite d’*initialisation* (1) de l’apprentissage permet de définir et de mettre

10. Extension de DEVS qui intègre les automates cellulaires [Wainer \(2015\)](#).

11. Technique d’apprentissage par renforcement.

en place le système. Ensuite, nous exécutons le déroulement de l'apprentissage en deux phases. Celui-ci comprend de nombreux épisodes complets de simulation du modèle, cela se déroule ainsi : (2) en début de cycle, nous fixons les paramètres d'apprentissage α et ϵ . (3) Puis nous lançons la simulation du modèle.

À chaque pas de simulation, l'algorithme va suivre le processus suivant :

La *sélection* (phase 3.1) consiste à activer le module d'apprentissage pour choisir l'action à effectuer. L'étape de sélection au cours de l'apprentissage est très importante. Elle dépend de ϵ et se déroule en deux temps :

1. (a) l'exploration, qui consiste à essayer des actions dont les conséquences sont encore peu estimées afin d'en augmenter les connaissances. Ce processus se fait souvent de façon aléatoire ;
2. (b) l'exploitation, qui consiste à exécuter l'action que nous connaissons pour avoir les conséquences les plus favorables. Cela permet d'affiner les connaissances déjà acquises.

Conformément à [Sutton and Barto \(2018\)](#), nous décrivons notre méthode de sélection par l'équation :

$$A_t = \text{Arg} \max_a Q_t(a)$$

Cette méthode de sélection convient pour les décisions simples. Dans le cas de sélection plus compliquée, l'algorithme peut être complété par une distribution de probabilité ϵ . Cela permet d'augmenter le niveau d'exploration des solutions mais ralentit l'apprentissage. Nous avons choisi de paramétrer dynamiquement ce mécanisme. En début d'apprentissage, nous privilégions *la phase d'exploration* pour tester le plus de solutions possibles. En fin d'apprentissage, par contre, c'est *la phase d'exploitation* qui est privilégiée afin de renforcer les connaissances acquises.

Passée l'étape de *sélection*, il est nécessaire d'*activer le modèle* pour exécuter son comportement grâce aux fonctions de transitions. Celles-ci vont déterminer le nouvel état en fonction de l'action choisie. Nous pouvons nommer cette étape : *l'étape comportementale 3.2*.

Vient ensuite l'étape d'*évaluation* pour activer le module d'apprentissage afin d'évaluer le nouvel état du modèle et l'action choisie, étape 3.3. Cela permet de déterminer la récompense. Le module d'apprentissage met à jour *la fonction de valeur*, étape 3.4.

Dans le cas du Q-Learning, cette fonction prend la forme de l'équation suivante :

$$Q : S \times A \rightarrow R$$

avec :

$$Q(s_n, a_n) = Q(s_n, a_n) + \alpha(r + \max_a Q(s_{n+1}) - Q(s_n, a_n)) \quad (3.3)$$

La fonction de valeur associe une valeur au couple (*etat*, *action*) et fixe la nouvelle action la plus adaptée en fonction de l'état. Le processus est ainsi répété.

Une fois que la simulation est arrivée à son terme, on passe au cycle suivant en bouclant sur l'étape de mise à jour des paramètres d'apprentissage. Enfin si l'ensemble des cycles ont été exécutés l'algorithme sauvegarde la fonction de valeur puis se termine. La fonction de valeur pourra alors servir de base de connaissance pour effectuer des choix dans le futur.

Ce processus est en phase de validation dans le cadre d'une application de modélisation d'une pêcherie, un premier exemple sera donné dans la section suivante.

3.4.2.2 APPLICATIONS

Nous allons présenter l'application proposée dans [Martelloni et al. \(2020\)](#). L'objectif était d'appliquer une méthode d'apprentissage par renforcement pour définir un niveau de capture respectant le renouvellement des ressources.

A partir du modèle de *Graham-Schaefer* et des données publiées dans [Le Manacha et al. \(2011\)](#), nous avons défini un pas de simulation discret d'une année.

La phase de calibration du modèle a été présentée dans la section 3.4.1.7 et nous repartons des mêmes estimations. Les paramètres de notre modèle sont présentés dans le tableau 3.7.

TABLE 3.7 – Paramètres utilisés.

q	r	k	B0
0,18	0,229171	44930,48	20136,09

Pour appliquer des politiques de pêche, nous devons estimer l'effort de pêche. Afin de le simplifier et de pouvoir le calculer à partir des données à notre disposition, nous définissons un effort relatif (c.f. [Rafalimanana \(2003\)](#)) à partir du nombre de bateaux de pêche de l'exploitation et du nombre de sorties en mer à l'année. Nous prenons également en compte la proportion de pêche récréative et de loisir.

A chaque étape de notre processus d'apprentissage, nous avons besoin de connaître : (s_n, a_n, g_n, s_{n+1}) où :

- s_n : l'état courant, de la biomasse et les caractéristiques de la population. Chaque état représente l'ensemble des valeurs possibles pour une des caractéristiques du modèle ;
- $a_n \in \mathbb{N}$: l'action à effectuer, donc l'effort de pêche à appliquer ;

- g_n : la récompense ou gratification engendrée par l'action choisie ;
- s_{n+1} : l'état résultant de l'action choisie, c'est-à-dire la biomasse au temps $n + 1$, et les caractéristiques de la population qui, elles, restent les mêmes entre deux pas de temps.

Comme nous l'avons indiqué, l'algorithme consiste à essayer des actions et en observer les conséquences, il doit également gérer le compromis entre les étapes d'exploration et d'exploitation.

À chaque pas de simulation, l'algorithme va :

1. choisir l'action à effectuer. Ce choix dépend de ϵ . Ce paramètre va déterminer la probabilité d'effectuer un tirage aléatoire d'une action (exploration) ou choisir la meilleure action connue en fonction de l'état courant (exploitation) ;
2. exécuter la fonction de transition (δ) du modèle. Elle détermine le nouvel état s_n en fonction de l'action (a_n) choisie et détermine la récompense engendrée (g_n) ;
3. mettre à jour la fonction de valeur (Q). Elle associe une valeur au couple *etat, action* et ainsi sélectionne l'action (a_n) la plus adaptée en fonction de l'état (s_n). Elle prend la forme de l'équation suivante : $Q : s \times a \rightarrow g$

$$Q(s_{n+1}, a_{n+1}) = Q(s_n, a_n) + \alpha(g_n + \max_a(Q(s_{n+1})) - Q(s_n, a_n)) \quad (3.4)$$

A la fin des cycles de simulation les paramètres d'apprentissage sont mis à jour et la fonction de valeur est enregistrée. Le système est proche d'un processus de décision *Markovien*.

TABLE 3.8 – Récompenses obtenues à chaque pas de simulation.

Situation	Récompense
B normal	capture(t)
$B \leq B_{critic}$	-10
$B \approx 0$	-10000

B_{critic} caractérise un niveau de biomasse critique, c'est-à-dire un seuil ne permettant pas son renouvellement. Nous avons entraîné cet algorithme à choisir un effort de pêche fictif compris entre 0 et 5. 0 pour représenter un faible effort et 5 un effort beaucoup plus important. Enfin, l'effort est appliqué chaque année en fonction de la biomasse et de la population concernée.

Sur la figure 3.23, nous retrouvons les données de la figure 3.15 où nous pouvons observer l'évolution des captures estimées en rouge, simulées en bleue, et avons ajouté les captures obtenues par apprentissage en jaune. Il est à noter qu'au début de la simulation, les captures

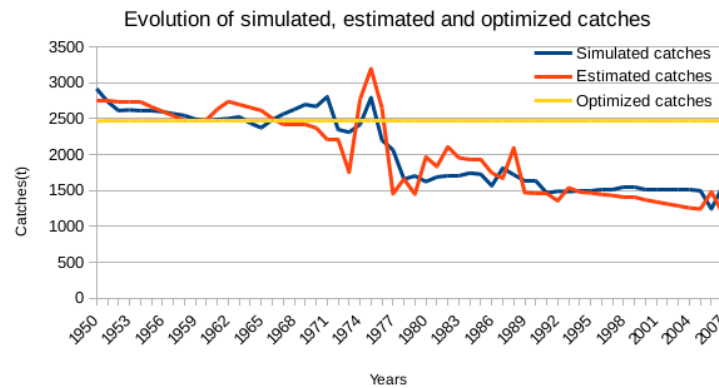


FIGURE 3.23 – Comparaison de l'évolution des captures, estimées (rouge), simulées (bleue) et optimisées (jaune).

optimisées sont plus faibles, mais restent stables et presque constantes tout au long de la simulation. L'algorithme trace le *Rendement Maximal Durable*¹², qui est la plus grande quantité de biomasse que l'on peut extraire en moyenne et à long terme d'un stock halieutique dans les conditions environnementales existantes sans affecter le processus de reproduction.

L'apprentissage par renforcement est une façon d'aborder un comportement adaptatif. Nous avons un agent qui essaie d'améliorer ses revenus en recevant une récompense pour ses prises, et une éventuelle pénalité si la biomasse (B) devient trop faible. Bien que la réalité du problème soit bien plus complexe, nous pensons que ce type d'approche est intéressant à exploiter.

Ces travaux sont toujours en cours. Il faut finaliser l'approche puis la valider avec les données du programme *MoonFish*.

Il est à noter que la librairie d'optimisation utilisée dans ce travail a été développée et présentée dans la section 3.4.1. Un lien concret existe et fournit déjà une première brique de support d'aide à la prise de décision pour les agents.

12. RMD pour Maximum Sustainable Yield en anglais MSY.

3.5

CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des travaux développés dans le cadre du programme MoonFish.

Après sa description, nous sommes revenus sur nos travaux préliminaires sur la courantologie en Méditerranée et la dispersion larvaire.

Puis, nous avons détaillé une première thèse soutenue en décembre 2017 par [Franceschini et al. \(2017\)](#). Elle a permis de faire le lien entre la théorie de la modélisation et de la simulation et les systèmes multi-agents.

Ensuite, après une section d'état de l'art sur les modèles d'évolution de stocks, nous avons présenté les travaux que nous menons dans le cadre de la thèse de *Nicolas Poiron-Guidoni*. Ils sont axés sur l'usage de méthodes d'optimisation pour améliorer les processus de décision des agents, proposer des stratégies de planification le tout afin d'aider et de tester la mise en place de politique de gestion.

Enfin, une autre thèse en cours, conduite par *Paul-Henri Martelloni*, vise à poursuivre et compléter nos travaux en complexifiant la description de l'esprit des agents afin de proposer des agents cognitifs à partir de l'architecture Soar. La soutenance est prévue à l'été 2021.

A travers ces travaux, nous souhaitons élargir nos domaines de recherche et notamment investiguer le domaine vaste de l'intelligence artificielle, tout en approfondissant les travaux menés par l'équipe ces dernières années sur la théorie de la modélisation et de la simulation. L'objectif était, et est toujours, d'aller vers l'aide à la prise de décision.

Chapitre 4 :

Projets de recherche

Sommaire

4.1	Notions de base : émergence des théories de la décision	127
4.2	Projets théoriques	133
4.2.1	Processus de modélisation et de simulation	135
4.2.2	Problèmes d'incertitude	137
4.3	Projets collaboratifs	139
4.3.1	Projet Moonfish	139
4.3.2	Projet GOLIAT	140
4.4	Transfert de connaissances	141
4.4.1	Optimisation d'un système de tarification	141
4.4.2	Adaptation et optimisation du processus d'apprentissage	143
4.5	Conclusion du chapitre	144

DANS ce dernier chapitre, nous allons décrire les thématiques et projets de recherche que nous souhaitons développer dans le futur.

Outre les nombreuses perspectives présentées et énumérées tout au long de ce manuscrit qui vont animer nos recherches à court terme, nous proposons trois niveaux de lecture dans les travaux que nous allons mener.

Ce chapitre ne décrit pas de manière directe ce que nous allons faire à court, moyen ou long terme mais plutôt la démarche qui sera développée puis suivie, et les projets qui verront son application.

(1) Au niveau *théorique*, toujours dans le cadre de la théorie de la modélisation et de la simulation, qui restera notre cœur d'activité, nous allons renforcer nos recherches dans les domaines de l'intelligence artificielle et totalement embrasser la direction de la formalisation des processus d'aide à la prise de décision. Un petit historique du domaine sera proposé dans la première section de ce chapitre.

La méthode scientifique, la reproductibilité et la crédibilité de nos modèles et de nos résultats de simulation seront également des éléments centraux.

Dans ce contexte l'un de nos objectifs sera de réfléchir et d'identifier une méthodologie permettant de modéliser le processus de décision de l'être humain. La méthode sélectionnée, sûrement enrichie, sera appliquée à la description du processus de raisonnement des pêcheurs dans le cadre de travaux connexes au projet *MoonFish*.

(2) Au niveau des applications et des *projets collaboratifs* de recherche qui vont dicter nos actions, il y a le projet *GOLIAT* mais surtout de nombreuses perspectives pour poursuivre voire proposer une nouvelle version du programme *MoonFish*. Dans ces deux projets, les aspects pluridisciplinaires sont très importants.

Nous envisageons déjà pour la suite de *MoonFish* de collaborer avec l'équipe d'économie de notre Université (UMR LISA) pour développer la composante économique de nos modèles et clairement mesurer l'impact de l'économie de la pêche artisanale au niveau du territoire.

D'autres éléments seront intégrés au programme comme quantifier l'impact du changement climatique sur la ressource afin d'essayer de prévoir et d'anticiper ce futur bouleversement.

(3) Enfin, un dernier aspect nous semble primordial, et il rejoint nombres d'éléments présentés dans les parties pédagogie et administration de ce document, section 6.2.

La Corse est à un tournant résolument numérique et aujourd'hui plus qu'à aucun autre moment, nous avons la possibilité de nous rapprocher des entreprises du secteur. Il va donc falloir forger un *lien entre nos recherches et ces entreprises* enfin en capacité d'assumer une com-

posante de recherche et développement (R&D) ou recherche et innovation (R&I).

Dans ce sens nous proposons pour l'année scolaire 2020/2021 deux sujets de thèse en CIFRE. Ils seront détaillés dans la dernière section dédiée au transfert avec la société civile.

Le sujet déposé avec l'entreprise *Volpy* a été accepté pour financement par l'ANRT et a débuté en novembre 2020.

L'objectif de ces travaux sera d'hybrider l'optimisation par simulation et les méthodes à base de réseaux de neurones comme l'apprentissage automatique, profond ou renforcé.

Une analogie pourra d'ailleurs être étudiée entre processus d'optimisation par méta-heuristiques et apprentissage renforcé.

Enfin, toujours dans cet objectif d'ouverture, un projet de *Chaire : Mutations Innovations Territoriales (MIT)* sur 4 ans dans le domaine des mutations et de l'innovation à l'échelle du territoire a été déposé fin 2020. Le projet a été accepté et débutera en septembre 2021 (c.f. 6.3.1.1).

4.1

NOTIONS DE BASE : ÉMERGENCE DES THÉORIES DE LA DÉCISION

Comme pour les chapitres précédents, nous proposons de débiter par un état de l'art qui introduit *les théories de la décision* à partir d'un résumé du très intéressant historique de [Tsoukiàs \(2006\)](#). Ce dernier montre clairement l'évolution de la discipline et permet de faire des correspondances avec nos travaux théoriques passés et en cours.

Dans une première partie, [Tsoukiàs \(2006\)](#) présente l'historique de la discipline que nous pouvons résumer ainsi :

- réappropriation et développement dans les années 50;
- critique et extensions dans les années 60;
- maturité dans les années 70;
- innovation dans le domaine de la décision dans l'incertain dans les années 80.

La contribution principale est la mise en évidence du manque d'une "méthodologie¹ d'aide à la décision : un corpus de connaissances et une structure de raisonnement cohérente sur les théories et les pratiques qui concernent la décision et l'aide à la décision" et l'énoncé des principes à suivre pour la définir.

Le message de l'auteur est que l'aide à la décision est une activité humaine, donc subjective, et que les théories de l'incertain ont grandement contribué à son développement. Il y a différentes "théories et pratiques de la décision" avec des caractéristiques diverses, soit comme validation d'hypothèses théoriques soit comme conséquence de l'expérience d'aide à des décideurs réels.

L'idée soutenue est que ces théories et ces pratiques doivent constituer une "*démarche d'aide à la décision*", démarche au sens de raisonnement sur des méthodes. Il peut y avoir plusieurs méthodes, mais pas de démarche affirmée et/ou formelle.

Pour pouvoir aider une personne à prendre une décision nous devons connaître ou déduire ses préférences, ses buts, ses objectifs, etc. Ce que nous connaissons, ce sont "ses problèmes" et ses "désirs".

Le passage du problème à un modèle d'aide à la décision et les actions possibles que ce modèle implique, demande l'utilisation *d'un modèle de rationalité*. L'outil de transposition de l'information "informelle" et naturellement ambiguë en une représentation formelle est fondé sur l'usage d'un langage formel.

Ce qui caractérise donc l'aide à la décision est son approche qu'il est possible de qualifier de "formelle" et "d'abstraite".

Formelle, car elle utilise et est basée sur les langages formels, langages qui font l'effort de réduire l'ambiguïté présente dans la communication humaine (c.f. apport du formalisme DEVS).

Abstraite, car elle utilise des langages indépendants de l'univers du discours (ensemble de termes utilisés dans un discours spécifique).

Ces deux éléments correspondent à l'adoption d'un modèle de **rationalité**, un concept-clé en aide à la décision.

L'utilisation d'une approche formelle et abstraite présente plusieurs désavantages :

- elle est beaucoup moins efficace si on la compare à la puissance et à l'efficacité de la

1. Nous préférons utiliser le terme *démarche* et rappelons que pour l'[Académie Française \(2019\)](#) : la méthode est une manière de conduire sa pensée, d'établir ou de démontrer une vérité suivant certains principes et avec un certain ordre, alors que la méthodologie est, elle, l'étude des méthodes de recherche et d'analyse propres à une science, à une discipline. La méthodologie est une branche de l'épistémologie, précisément celle qui étudie les méthodes scientifiques.

communication naturelle ;

- elle a toujours un coût (d'apprentissage par exemple) ;
- la réduction de l'ambiguïté peut être indésirable ;
- elle représente l'imposition d'un carcan à l'intuition et à la créativité de l'esprit humain.

Néanmoins, d'après [Bouyssou et al. \(2000\)](#), cette approche présente plusieurs avantages :

- elle permet à tous ceux qui participent au processus de décision de parler le même langage, ce qui, a priori, augmente la transparence du processus et la participation (c.f. [Bana e Costa et al. \(2001\)](#)) ;
- elle permet d'identifier des structures sous-jacentes aux problèmes traités et donc de réutiliser éventuellement ces structures (c.f. [Vallin and Vanderpooten \(2002\)](#)) ;
- elle évite les biais du raisonnement humain dus à la tradition et à la formation (c.f. [Rivett \(1994\)](#)) ;
- elle évite les erreurs associées à l'utilisation informelle de méthodes formelles ;

Bref, une approche formelle et abstraite permet de mieux analyser, comprendre, expliquer, justifier un problème et/ou une solution.

Ces premiers travaux et expériences sont caractérisés par la recherche de structures formelles sous-jacentes aux problèmes concrets et l'utilisation des mathématiques et de la logique comme langage de modélisation.

Les premiers pas dans cette direction vont renforcer l'idée que des problèmes complexes de décision sont modélisables à travers l'imposition d'un modèle de rationalité simple : c'est-à-dire la maximisation d'une fonction d'utilité ([Fishburn \(1989\)](#)) exprimant les préférences du décideur - l'optimisation de cette fonction apportant la solution du problème de décision.

Les travaux de [Neumann and Morgenstern \(1944\)](#) et de [Nash et al. \(1950\)](#) montrent exactement sous quelles conditions ces fonctions et ces solutions existent.

[Simon \(1955\)](#) observe et décrit déjà les processus de décision dans les organisations et remarque que le comportement réel de décideurs est loin d'être représentable par les postulats de la théorie de la décision, au moins dans la forme qu'elle a à cette époque.

Dans [Simon \(1955, 1956, 1957\)](#), il développera sa théorie de la *rationalité limitée* selon laquelle un décideur confronté à un problème de choix se comportera selon un critère de *satisfaction*, au sens où il va choisir la première solution qui satisfait ses nécessités, et non pas selon un critère d'optimisation idéal, irréaliste et inutilisable.

Les travaux de *Simon* vont ouvrir plusieurs pistes de recherche orientées à la fois vers la création de nouvelles approches d'aide à la décision et vers ce qui ensuite sera connu sous le nom d'intelligence artificielle (c.f. [Simon \(2019\)](#) réédition du livre de 1969).

L'idée de recherche d'une solution satisfaisante va trouver une correspondance immédiate dans [Vincke \(1992\)](#), pour les problèmes de compromis acceptables où l'on cherche une décision en présence de critères multiples.

Dans les années 60 paraît le papier de [Zadeh \(1965\)](#) sur les ensembles flous. Il va introduire une nouvelle perspective dans le traitement de l'incertitude, de l'ambiguïté et des variables linguistiques. L'innovation de *L. Zadeh* aura un impact majeur dans le futur de la discipline parce qu'elle concerne une partie fondamentale du langage formel : la théorie des ensembles. L'extension du concept d'ensemble avec l'introduction du concept de fonction d'appartenance, une mesure de l'appartenance d'un élément à un ensemble, va permettre d'augmenter l'expressivité et la flexibilité des langages formels et par conséquent des modèles d'aide à la décision.

Les années 60 voient également l'apparition des sciences cognitives, la programmation multi-objectifs et de la complexité algorithmique avec l'énoncé des problèmes NP-difficiles.

Ces travaux sur la complexité ouvrent un problème non négligeable : le fait que plusieurs algorithmes utilisés pour résoudre des problèmes classiques de la recherche opérationnelle (entre autres) sont inutilisables dans la pratique, car en présence d'instances de grande taille le temps nécessaire pour arriver à une solution optimale peut-être énorme, indépendamment de l'ordinateur utilisé.

L'idée de la recherche d'une solution *satisfaisante* sera une réponse au problème des ressources nécessaires pour arriver à une conclusion dans un processus de décision quelconque.

La question sera reprise dans une formulation *logique* par [McCarthy and Hayes \(1981\)](#), qui vont ouvrir la voie à ce que nous appelons aujourd'hui le raisonnement non-monotone, ainsi que par [Minsky \(1974\)](#), qui va proposer de nouvelles techniques orientées vers la représentation des connaissances.

Toujours dans les années 60, paraissent les premiers travaux liés à un problème très pratique : l'existence de plusieurs critères de décision, éventuellement en conflit entre eux (moins de pêche mais plus de revenu).

Le problème de la présence de plusieurs critères pose une question fondamentale. Le concept d'optimum vectoriel n'existe pas ou n'est pas définissable en termes purement mathématiques.

La seule définition *objective* est celle de solution efficace définie par [Pareto \(1919\)](#).

Une solution est dite efficace s'il n'y a pas d'autres solutions qui sont au moins aussi bonnes qu'elle sur tous les critères et strictement meilleures sur au moins un critère.

Ensuite, dans les années 70, 5 axes seront principalement développés :

1. la structuration et la formulation des problèmes de décision;

4.1. NOTIONS DE BASE : ÉMERGENCE DES THÉORIES DE LA DÉCISION

2. l'apport des sciences cognitives ;
3. l'intelligence artificielle et la décision ;
4. le traitement de l'incertitude ;
5. l'aide multicritères à la décision.

Ces axes ont été suivis à la fois par des chercheurs dans les communautés de la recherche opérationnelle, de la théorie de la décision et par des chercheurs provenant d'autres disciplines qui partagent un intérêt pour l'aide à la décision.

Par la suite, une autre innovation majeure dans le cadre de la théorie de la décision sera l'apparition de la théorie des sous-ensembles flous dans Zadeh (1973, 1978) et la théorie des possibilités Dubois and Prade (1988b,a).

L'introduction de la théorie des possibilités a permis l'utilisation des formalismes de représentation de l'incertitude autres que celui de la probabilité et sa nature de mesure additive. La nature ordinale des distributions de possibilité a permis de les utiliser de façon plus flexible dans plusieurs domaines de l'aide à la décision.

L'ensemble de ces travaux a donné naissance à plusieurs approches dites : *Normative, Descriptive, Prescriptive, et Constructive*.

Elles sont décrites dans Tsoukiàs (2006) par le tableau 4.1 ci-dessous :

TABLE 4.1 – Description et différences des approches de décision.

Approches	Caractéristiques	Utilisation	Comment obtenir le modèle
Normative	Rationalité exogène	Economie	Postuler
Descriptive	Rationalité exogène	Modèles empiriques du comportement	Observer
Prescriptive	Rationalité endogène	Situations problématiques	Découvrir
Constructive	Processus d'apprentissage	Processus de décision	Etablir un consensus

L'aide à la décision n'est pas une action mais un processus qui doit produire les artefacts suivants :

- une représentation de la situation problématique ;
- une formulation du problème ;

- un modèle d'évaluation ;
- une ou des recommandation(s) finale(s).

D'un point de vue formel, il est possible de décrire ces quatre éléments. La situation problématique est décrite par le triplet : $P = S_p, S_g, S_e$ où :

- S_p est l'ensemble des participants au processus de décision ;
- S_g est l'ensemble des enjeux que les participants amènent dans le processus de décision ;
- S_e est l'ensemble des engagements que les participants prennent sur leur enjeux et sur les enjeux des autres.

Il en est de même pour la formulation du problème. Elle est décrite par le triplet : S_a, S_v, Π avec :

- S_a l'ensemble des actions potentielles que les participants peuvent entreprendre dans le cadre de la situation problématique représentée dans P ;
- S_v est l'ensemble des points de vue sous lesquels il est envisagé d'observer, d'analyser, d'évaluer, de comparer, les actions potentielles ;
- Π est la problématique décisionnelle, la typologie d'application envisagée sur l'ensemble S_a , une anticipation sur ce que les participants attendent.

Le modèle d'évaluation est un n-uplet : $M = S_{am}, S_{at}, E, S_c, S_d, S_o$ avec :

- S_{am} est l'ensemble des alternatives sur lesquelles va s'appliquer le modèle ;
- S_{at} est l'ensemble des attributs sur lesquels les éléments de S_{am} sont observés, mesurés, décrits ;
- E est l'ensemble des échelles associées à chaque élément de S_{at} ;
- S_c est l'ensemble des critères sur lesquels chaque élément de S_{am} est évalué de façon à prendre en compte les préférences des participants ; un critère étant un modèle de préférence ;
- S_d est l'ensemble des distributions d'incertitudes associées à S_{at} et/ou S_c ;
- S_o est l'ensemble des opérateurs qui permettent d'obtenir des informations sur les éléments de S_{am} ou de $S_{am} \times S_{am}$, notamment les opérateurs d'agrégation.

Selon Landry et al. (1983), les modèles d'évaluation sont soumis à des processus de validation, comportant :

- une validation conceptuelle (vérification des concepts utilisés) ;
- une validation logique (vérification de la cohérence logique du modèle) ;

- une validation expérimentale (vérification des résultats sur des données expérimentales);
- une validation opérationnelle (vérification de la mise en œuvre).

En conclusion le concept d'aide à la décision est plus large que les *théories de la décision*, du moment qu'il contient à la fois des contributions théoriques et des pratiques sur la conduction de ce qui est appelé le **processus d'aide à la décision**.

Cette réflexion est déjà mise en pratique dans le cadre de la thèse en cours qui doit formaliser l'architecture Soar dans l'agent DPDEMAS mais sera également notre point de mire dans les années à venir, et nous souhaitons la compléter avec les approches définies dans les *théories de la décision*.

4.2

PROJETS THÉORIQUES

Comme nous l'avons déjà présenté, le processus de modélisation et de simulation peut être découpé en plusieurs phases :

1. l'identification de l'objet d'étude et de la problématique à résoudre ;
2. l'acquisition de connaissances sur le système qui va représenter l'objet ;
3. la modélisation du système à partir d'hypothèses et des outils conceptuels adéquats ;
4. l'implémentation d'un modèle informatique afin de le rendre exécutable sur ordinateur ;
5. la simulation du modèle afin d'obtenir des données et vérifier les hypothèses de modélisation ;
6. enfin, l'analyse des résultats afin de valider le modèle en rapport avec les hypothèses et connaissances acquises sur l'objet.

Ces phases sont plus ou moins basées sur la nécessité de représenter de manière correcte, c'est-à-dire de manière lisible et compréhensible, les connaissances acquises.

Ces connaissances peuvent être issues d'observations de terrain ou de laboratoire; déduites ou tirées de l'expérience d'un être humain (expert), etc.

Il est donc primordial de cerner toutes les problématiques qui en découlent.

- Quels sont les types de connaissances nécessaires pour réaliser un bon modèle?
- Comment les représenter et les exprimer?
- Comment prendre en compte leur évolution?
- Comment s'assurer de leur fiabilité?

La connaissance peut être définie comme une activité intellectuelle visant à obtenir la compétence de quelque chose, c'est un système d'explication des rapports entre la pensée et des objets.

La représentation des connaissances revient à établir une correspondance entre l'objet d'étude et une représentation symbolique qui peut être traitée par un ordinateur : notre modèle.

Les sciences dites cognitives sont à l'origine de travaux sur la connaissance, elles ont ainsi contribué à l'élaboration de multiples approches théoriques. D'après [Russell \(1993\)](#) les philosophes, les psychologues, les linguistes, les sociologues, les informaticiens, les mathématiciens cherchent à analyser et à représenter la connaissance. L'ambition est de permettre à l'ordinateur d'utiliser lors de calculs le même type d'informations que l'homme.

Cette définition est très proche de l'objectif initial de l'intelligence artificielle.

En 1949, un peu avant Turing, Warren Weaver énonce, en parlant de traduction automatique des langues, que l'ordinateur pourrait très bien effectuer une tâche qui relève de l'intelligence humaine [Weaver \(1949\)](#).

La représentation des connaissances est étroitement liée à la conceptualisation, qui est un problème étudié en psychologie. La difficulté de **validation** des informations acquises réside dans le fait que l'on ne contrôle pas les connaissances d'un individu mais l'expression de ces connaissances.

Le problème de la représentation se pose et provoque des difficultés de compréhension, de représentation, d'expression et de communication.

Cette problématique nous a amenés à utiliser la logique floue [Zadeh \(1965\)](#), [Dubois and Prade \(1993\)](#) car elle permet de représenter et de manipuler des connaissances imparfaites.

Les outils méthodologiques qu'elle propose permettent de prendre en compte des informations de manière graduelle, exprimées en langage naturel ; c'est-à-dire, très proche du mode de raisonnement et d'expression de l'être humain. Dans notre cas, c'est un avantage très intéressant.

Généralement la modélisation est définie comme une étape qui permet de créer une représentation simplifiée (équation, expérience, boîte noire) du système étudié : un modèle. Ce modèle est donc une description fidèle ou simplifiée du système dans son environnement. Nous souhaitons enrichir cette définition, plus axée sur la cognition : "un modèle ne décrit pas le système, mais un état de connaissances ; connaissances acquises à partir de l'étude ou de l'observation du système".

Cette interprétation nous semble plus conforme avec la définition de la connaissance énoncée.

4.2.1 PROCESSUS DE MODÉLISATION ET DE SIMULATION

Ces éléments doivent nous faire réfléchir au processus au cœur de nos travaux : le processus de modélisation et de simulation.

Comme nous l'avons indiqué en introduction ce processus initialement composé de trois éléments (système, modèle, simulateur) et de deux relations (de modélisation et de simulation) a été étendu avec l'ajout d'un cadre expérimental dans la première édition de [Zeigler et al. \(2018\)](#), puis dans [Traoré and Muzy \(2006\)](#) avec les notions de contexte de modélisation et de simulation.

Nous pensons qu'il serait intéressant d'y ajouter les éléments proposés dans [Sargent \(2010\)](#) qui dissocie monde réel et monde de la simulation. Il s'attache à décomposer l'ensemble des étapes de conception d'un modèle de simulation afin d'identifier les sources d'introduction d'erreurs pendant le processus de modélisation en lien étroit avec le domaine de la vérification et la validation (V&V).

L'image 4.1 reprise de [Sargent \(2010\)](#) décrit les étapes à suivre :

- l'expérimentation, qui permet de rassembler des données à propos du système étudié (l'objet d'étude) ;
- la formulation d'hypothèses à partir des données récoltées et la théorisation du système observé ;
- la réalisation du modèle, qui passe lui-même par plusieurs étapes (modèle conceptuel, sa spécification et son implémentation) ;
- enfin, la simulation est une expérimentation qui génère des données comparables à celles du système source.

Ces données peuvent aider à mieux comprendre le fonctionnement du système réel, de confronter les résultats aux observations du système réel et ainsi, servir à émettre d'autres hypothèses à intégrer dans le processus de modélisation.

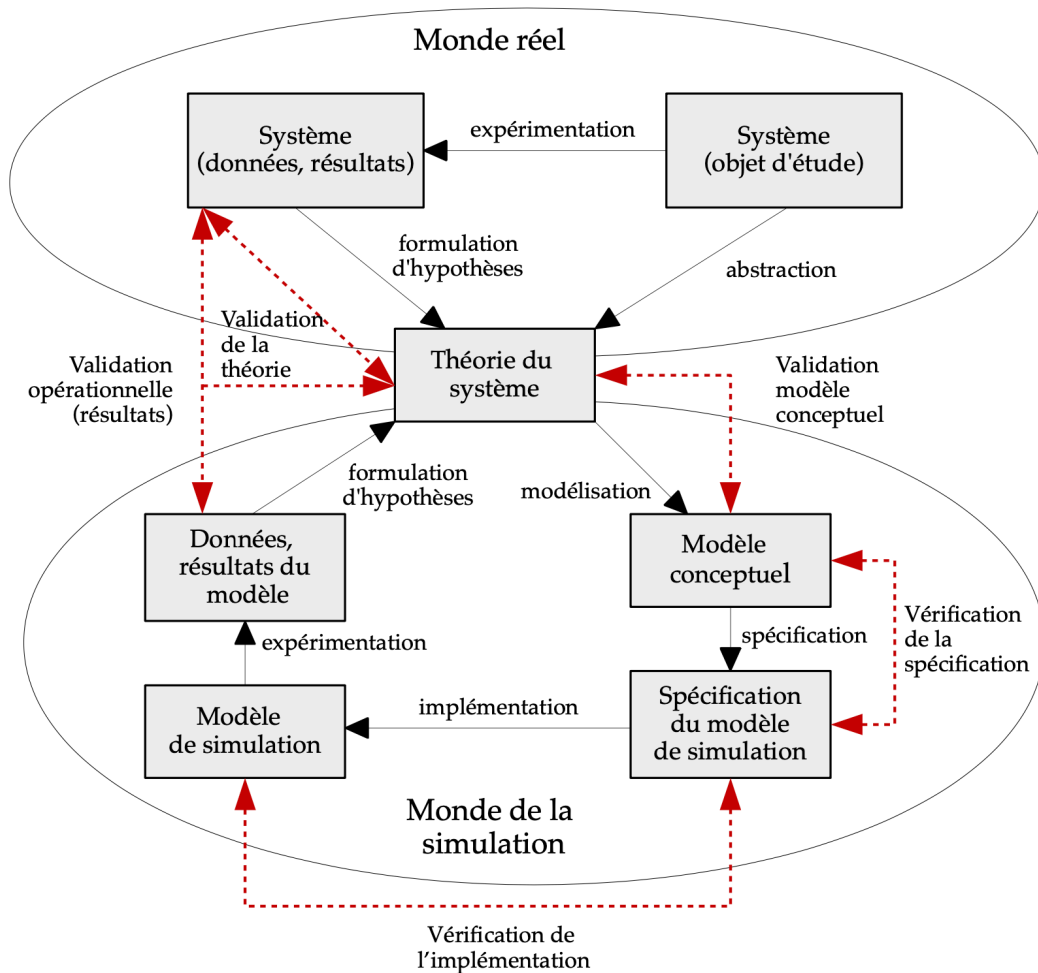


FIGURE 4.1 – Relations entre monde réel et monde de la simulation selon Sargent (2010).

Nous souhaitons approfondir l'ensemble de ces notions pour réfléchir et proposer un processus plus général qui intègre à la fois la distinction entre les différents mondes et les éléments du processus de modélisation et de simulation. L'état de nos réflexions est décrit par la figure 4.2.

Le monde de la simulation de Sargent (2010) est scindé en deux blocs.

Cette inspiration est issue des explications de Chauviré (2005) qui décrit la vision de la science de Wittgenstein : *Si la base empirique de la science est descriptive, la théorie a pour vocation de permettre des prédictions testables, non de recopier le réel, le lien entre base empirique et théorie pouvant devenir alors extraordinairement compliqué...*

Le premier bloc désigné **monde conceptuel** doit contenir le schéma de l'objet d'étude. C'est le lieu de la conceptualisation, de l'abstraction et comme en mathématiques un espace imaginaire source de théories. Afin de rester conforme à l'idée des cadres proposée dans Zei-

gler (1976) et étendue dans Traoré and Muzy (2006), chaque élément doit être accompagné de la description de son contexte, et n'est valide que dans ce cadre précis.

Enfin, le **monde expérimental** est la source des expériences sur l'objet d'étude, elles peuvent être de nature physique comme la mise en place d'un brûlage dirigé ou virtuel (numérique) dans le cadre de simulation informatique.

Pour faciliter la reproductibilité des expériences virtuelles, comme dans les sciences classiques qui consignent tout leur protocole dans un cahier de laboratoire, nous pensons que l'ensemble des données de simulation doivent être mises à disposition de la communauté. L'ensemble de ces éléments (environnement informatique, conditions initiales, simulateur, etc.) sont des éléments de spécification du modèle informatique.

La simulation est toujours en charge d'animer le modèle informatique ou d'exécuter le protocole expérimental afin d'obtenir des résultats qui permettront de valider les concepts et théories.

Le bloc initial est toujours le **monde réel**, il contient l'objet d'étude dans son environnement (contexte). Il peut inclure la problématique à traiter et l'état de nos connaissances ou des connaissances de l'expert à l'origine de la définition du problème.

Pour ces deux derniers éléments, qui à notre sens sont bien réels, leur positionnement est encore à affiner car nous pouvons définir que tout mode de raisonnement modélise la pensée humaine et est donc une conceptualisation.

Nous proposons également 4 à 5 liens fondamentaux dans ce schéma (c.f. figure 4.2) :

- l'abstraction qui permet de transposer nos observations de l'objet d'étude en système. Le système peut être décrit à partir de la systémique ;
- la modélisation qui permet toujours de passer du système à un modèle conceptuel ;
- l'expérimentation et/ou l'implémentation ont elles pour objectif la vérification et la validation des observations et des concepts.
- la simulation, enfin, permet d'exécuter les expériences et d'obtenir des données qui une fois analysées permettront de valider toute l'approche.

Toutes les approches nécessitant l'expertise humaine sont sources d'incertitude, nous travaillons depuis toujours sur leur prise en compte mais il nous reste encore beaucoup de pistes à explorer.

4.2.2 PROBLÈMES D'INCERTITUDE

Enfin, pour faire un lien entre nos premiers travaux sur les *théories de l'incertain* et les travaux actuels sur l'optimisation par simulation, nous souhaitons réfléchir à la prise en compte

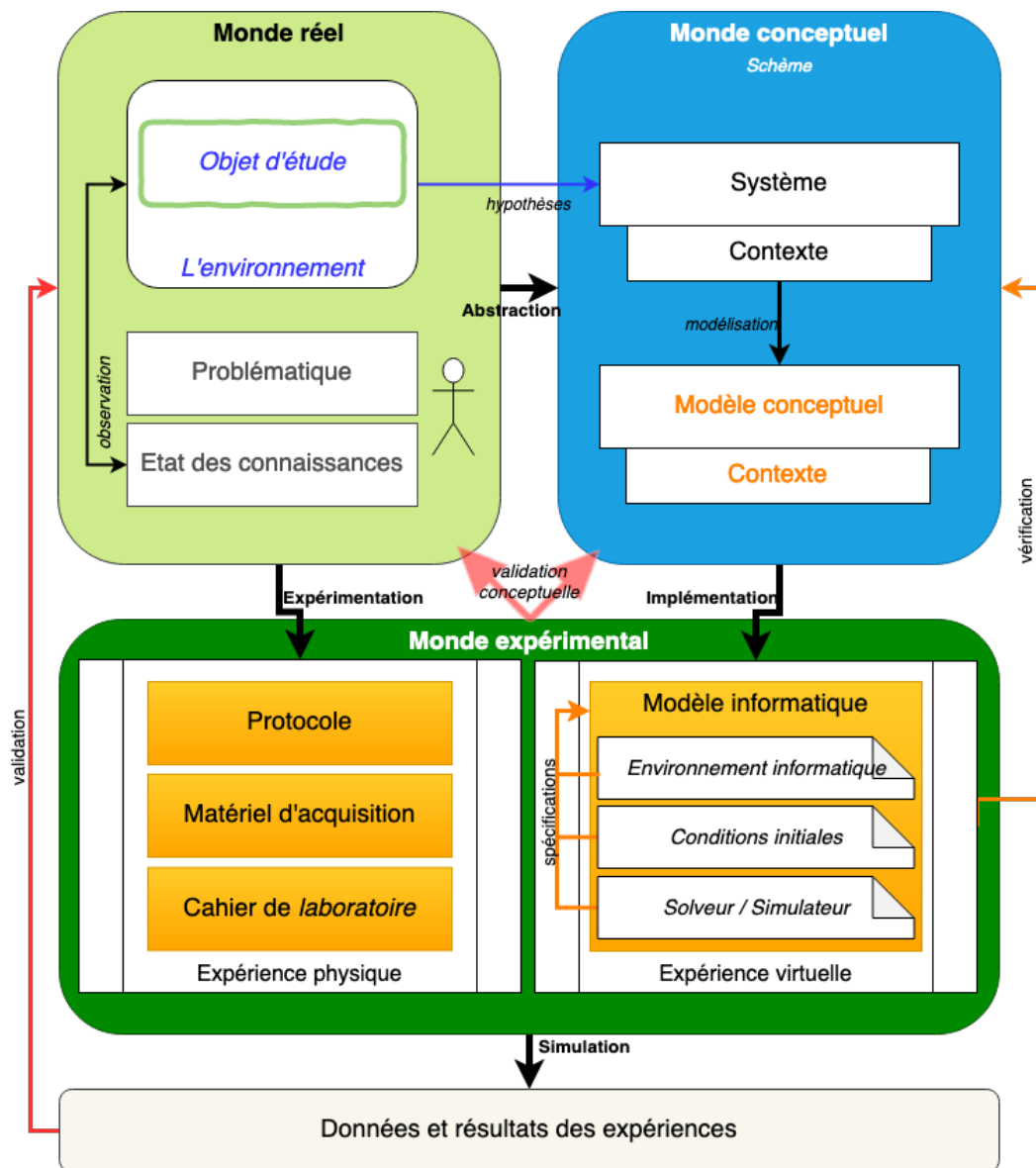


FIGURE 4.2 – Réflexion sur le processus de modélisation et de simulation.

des incertitudes dans les modèles d'apprentissage.

Cette problématique poursuivie par [Dencœur \(2000, 2008\)](#) à l'Université de technologie de Compiègne est rapidement présentée dans un [focus du CNRS \(2019\)](#) : " ... (elle) se situe à la frontière de l'intelligence artificielle et de la statistique.

(Elle) concerne la modélisation des incertitudes dans les algorithmes d'apprentissage automatique (machine learning) et dans les techniques d'inférence statistique. La problématique sur laquelle je travaille depuis plusieurs années vise à proposer des modèles de raisonnement et de décision basés sur des formalismes qui généralisent les approches probabilistes classiquement utilisées en informa-

tique et en statistique. Mes travaux portent principalement sur la théorie des fonctions de croyances, qui est plus adaptée que la seule théorie des probabilités en situation de forte incertitude et lorsque les connaissances sont partielles et imparfaites.

En apprentissage automatique, on cherche à faire des prédictions et à prendre des décisions à partir de données. La théorie des fonctions de croyance fournit un cadre adapté pour résoudre ces problèmes, notamment dans le cas où les observations sont peu fiables. Je m'intéresse également à la quantification de la fiabilité des prédictions effectuées par des modèles numériques et des méthodes d'inférence statistique."

Ce nouveau projet doit donc, nous amener à nous intéresser aux fonctions de croyance (c.f. [Vannoorenberghe \(2003\)](#), [Denoeux and Masson \(2012\)](#), [Dubois and Prade \(1990\)](#), [Shafer \(1990\)](#)).

Après les aspects théoriques, nous allons présenter les projets de recherche et leurs applications.

4.3

PROJETS COLLABORATIFS

4.3.1 PROJET MOONFISH

Initialement le programme **Moonfish** avait été pensé pour la période 2014-2020. Finalement il a débuté en juin 2017, bien que nous ayons revu à la baisse nos objectifs initiaux dans notre deuxième version validée par les services de la Collectivité de Corse en 2017, ces derniers étaient toujours très ambitieux. D'ailleurs une prolongation jusqu'en octobre 2021 a été actée.

L'opportunité de déposer une deuxième mouture en 2022 est en réflexion.

Nous aurions ainsi la possibilité de collecter de plus grandes quantités de données, d'obtenir enfin un jeu complet et de consolider les séries temporelles actuelles. Nous aurions également plus de recul sur les modèles et même sur les possibles impacts et répercussions du projet sur la profession.

Les nouvelles pistes exploratoires et de développement du projet pour les aspects infor-

matiques seront de faire de la composition de modèles (multi-modélisation) en intégrant à la fois (1) un modèle d'évolution du climat et (2) un modèle économique.

1. Au niveau des données, l'analyse des débarquements de la pêche artisanale corse devrait permettre de détecter les modifications liées aux changements climatiques, puis d'évaluer la vulnérabilité de l'exploitation des ressources en Corse face au changement climatique.
2. Nous l'avons déjà évoqué rapidement, nous souhaitons intégrer une forte composante économique portée par nos collègues de l'UMR LISA.

Cette collaboration est le fruit de travaux menés par *E. Innocenti* et *D. Prunetti* depuis plusieurs années sur les MASLUC (Multi-Agent Systems for Land-Use/Cover Change) puis aujourd'hui sur les ABMLUC (agent-based models of land-use change), composante et vision agent ou multiagents pour l'économie [Prunetti et al. \(2014\)](#), [Parker et al. \(2003\)](#).

Des travaux en lien avec la pêche ont débuté par la thèse de [Idda \(2014\)](#), [Idda et al. \(2009\)](#).

Ils se poursuivent encore aujourd'hui et seront intégrés à la suite du programme *MoonFish* avec pour objectif de définir un modèle bio-économique. Les prémisses de ces travaux sont présentées dans [Idda et al. \(2020\)](#). L'article propose un modèle conceptuel à base d'agents pour la modélisation des pêcheries. Ce modèle permet la description mathématique de la dynamique globale non linéaire d'un système de pêcheries à l'aide d'agents économiques hétérogènes. Le modèle informatique correspondant repose sur une structure de modélisation hiérarchique et modulaire inspirée par les paradigmes multicomposants et le formalisme DEVS.

Il faudra affiner le modèle et le valider avec les données de terrain.

Enfin, en lien avec nos travaux sur l'architecture cognitive SOAR mais surtout avec la formalisation présentée en introduction de ce chapitre sur le processus de décision, nous souhaitons modéliser le savoir empirique des pêcheurs pour développer des modèles de décision, et y ajouter un mécanisme d'évaluation de soutenabilité des actions engagées sur le long terme.

4.3.2 PROJET GOLIAI

Le projet **GOLIAI** est porté par *L. Rossi* et *T. Marcelli* de l'équipe FEUX. Il a pour objectif de développer des outils pour la lutte incendie et l'aménagement du territoire. Il y a un gros travail d'ingénierie pour le développement de plusieurs outils logiciels. Ce qui nous intéresse est la possibilité de travailler sur une base de données d'historique des feux, de compléter ces données avec les caractéristiques exogènes renseignées au moment de l'arrivée des secours (données météorologique, caractérisation du terrain, etc.) pour y appliquer des approches d'apprentissage afin d'essayer de prévoir des possibles départs de feu mais surtout

essayer d'identifier les conditions propices à la transformation d'un foyer en feu éruptif.

4.4

TRANSFERT DE CONNAISSANCES

Dans cette section, nous allons présenter deux sujets de thèse déposés pour l'année scolaire 2020-2021 et financés à partir du dispositif CIFRE par les entreprises **Volpy**, qui est une startup de l'économie circulaire qui rachète et vend des téléphones mobiles et **Aflokkat** qui est un organisme de formation.

Ces sujets ont un lien avec nos travaux sur l'optimisation et l'usage des méthodes d'apprentissage machines.

4.4.1 OPTIMISATION D'UN SYSTÈME DE TARIFICATION

Volpy est un acteur de l'économie circulaire qui propose d'acheter les anciens téléphones et de les vendre une fois reconditionnés.

Durée de vie, réparabilité et prix du produit sont les 3 axes essentiels à l'économie circulaire. Les problématiques associées et partagées par tous les acteurs de ce marché sont :

- de proposer le juste prix de collecte. Réussir à proposer un prix de reprise multifactorielle : tendance du marché et des consommateurs, obsolescence et durabilité du produit, capacité de revente, fidélité du client etc. ;
- de réussir à faire comprendre et accepter le prix de collecte au client. Les utilisateurs ont un lien fort avec certains de leurs produits à forte valeur ajoutée comme les smartphones et ils ne comprennent pas toujours les importantes dévaluations appliquées.
- de proposer le juste prix de vente d'un produit reconditionné. Prendre en compte les informations internes et externes à l'entreprise afin de proposer le meilleur prix pour le client et l'entreprise ;
- de pouvoir discerner suivant le profil type client les meilleurs arguments et services lui permettant de passer à l'acte d'achat.

- de définir l'obsolescence, la durabilité des produits, le degré de réparabilité des appareils.

Notre objectif est de personnaliser et expliquer aux clients les propositions de prix de collecte et de vente d'un produit reconditionné, en temps réel, en prenant en compte les données internes et externes de l'entreprise, mais également toutes les caractéristiques du produit. Nous allons nous inspirer des travaux de [Yan et al. \(2020\)](#) qui propose un modèle pour définir un prix pour des objets reconditionnés.

Nous pouvons retrouver notre problématique présentée dans [Dallery et al. \(2009\)](#) : "Le projet d'entreprise renvoie à l'activité concrète de l'entrepreneur, celle qui consiste à prendre des décisions stratégiques en matière d'investissements, en vue de la production de biens ou de services, qui seront par la suite échangés sur un marché. Mais, tout entrepreneur qui souhaite entrer sur un marché, rencontrer des consommateurs, et s'engager dans un processus transactionnel afin de réaliser des ventes, doit avant tout "annoncer" un prix. Plus fondamentalement, le prix reflétera la délicate recherche d'un compromis, d'un "équilibre" précaire entre les différentes "parties prenantes" (stakeholders) de l'entreprise [Dallery and Van Treeck \(2008\)](#) pour une analyse au niveau, etc. : l'entrepreneur lui-même, les salariés, les fournisseurs, les concurrents et les clients.

Au niveau méthodologique de nombreuses études portent sur cette problématique, elles se proposent d'appliquer différentes approches comme : la décision multicritères, l'optimisation multiobjectifs (voir [Baray and Pelé \(2005\)](#)), l'apprentissage machine (voir [Rafiei and Adeli \(2016\)](#), [Park and Bae \(2015\)](#)), l'apprentissage par renforcement [Kutschinski et al. \(2003\)](#), [Vengerov \(2008\)](#).

Aujourd'hui les méthodes récentes d'intelligence artificielle et la masse de données à notre disposition doivent pouvoir nous guider afin de proposer des solutions en temps réel.

Nous allons traiter les problématiques de : (1) choix de la "bonne" méthode à utiliser, (2) biais des données dans l'apprentissage, (3) confiance dans les résultats, (3) tester des résultats en temps réel, (4) prise en compte de jeux de données incomplets et incertains dans le processus d'apprentissage, etc.

Dans un autre registre mais fondé sur une approche très similaire, nous allons détailler la problématique d'un autre projet de thèse.

4.4.2 ADAPTATION ET OPTIMISATION DU PROCESSUS D'APPRENTISSAGE

Dans ce projet, le sujet est différent mais la démarche scientifique à appliquer devrait pouvoir être répliquée.

La digitalisation de la formation permet de repenser les modalités d'apprentissage et d'enseignement tant sur les méthodes pédagogiques que sur l'articulation des parcours. Elle offre des atouts essentiels pour l'accessibilité, la fluidité et la personnalisation des parcours de formation : en facilitant l'entrée en formation, en adaptant les parcours au positionnement préalable et au rythme des individus dans une logique de modularisation accrue, en minimisant les contraintes géographiques et temporelles.

Or, le développement des solutions d'apprentissage en ligne au cours de ces dernières années a démontré qu'il existe de nombreux facteurs d'échec à la mise en place de ces dispositifs. En effet, les taux d'échec ou d'abandon sont bien supérieurs dans l'apprentissage en ligne comme la littérature scientifique le prouve [McLoughlin \(1999\)](#), [Page-Lamarche \(2004\)](#), [Piombo \(2007\)](#), [Frayssinhes \(2012, 2016\)](#) ; [Frayssinhes and Pasquier \(2018\)](#).

Différents éléments peuvent expliquer ces échecs :

- technologiques : problèmes d'accessibilité aux réseaux et/ou médias (ordinateurs, tablettes, smartphones, etc.) ;
- physiologiques : périodes dédiées aux apprentissages, fatigue oculaire, etc. ;
- Cognitives : difficultés d'adaptation des modalités pédagogiques aux besoins spécifiques des apprenants, difficultés de mise en place d'outils de remédiation pédagogique, etc. ;
- motivationnelles : sentiment d'isolement de l'apprenant, auto-apprentissage, difficultés d'appropriation de certaines notions, etc. ;

Ainsi les travaux de recherche et de développement que nous souhaitons mener avec la société **Aflokkat** tendent à expérimenter de nouvelles solutions numériques permettant de construire des parcours pédagogiques uniques et personnalisés tout en favorisant le social learning et l'adaptive learning.

Ces travaux permettront de répondre aux problématiques suivantes :

- Comment les sciences informatiques peuvent être utilisées pour améliorer les processus d'apprentissage en prenant en compte les spécificités de chaque individu ?
- Comment peuvent-elles favoriser un engagement plus actif des apprenants et le réinvestissement des acquis en situation de travail ?

L'intérêt est d'optimiser les apprentissages en fonction du profil de l'apprenant : analyse des connaissances, des préférences, des aptitudes, etc. afin de proposer plusieurs niveaux d'adaptabilité avec parcours pédagogique individualisé, séquençement des contenus selon les résultats obtenus et évaluations formatives.

Nous pourrions nous appuyer sur les travaux suivants : Graf (2007); Graf et al. (2009a, 2008, 2009b); Castro et al. (2007)) en essayant de les adapter et les approfondir. Il reste notamment à déterminer quels outils ou techniques informatiques conviendraient le mieux à la réalisation d'un Learning Management System (LMS) permettant de proposer des contenus adaptés en fonction des profils d'apprentissage des utilisateurs tout en favorisant un ancrage mémoriel adapté.

L'objectif est de proposer de nouvelles techniques ou des techniques hybrides permettant de tirer profit de l'existant tout en améliorant les résultats obtenus. Il conviendra également de s'assurer que le gain est effectif en comparant les résultats de l'existant avec ce qui sera proposé.

4.5

CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce dernier chapitre, nous avons détaillé les pistes envisagées pour nos futurs travaux de recherche.

Elles suivent trois axes.

Le premier en lien avec nos travaux **théoriques** sur la représentation des connaissances, l'usage des méthodes d'optimisation, d'apprentissage et la définition d'un processus de décision.

Le second revient sur les perspectives du projet MoonFish en ouvrant ses thématiques aux aspects économiques et également à la modélisation des processus de décision des pêcheurs.

L'application des concepts définis dans le premier axe doivent être validés dans le cadre de ce projet.

Enfin, dans une dernière section consacrée au **transfert** vers la société, nous détaillons deux sujets de thèse qui ont pour objectif la combinaison des méthodes d'optimisation avec les réseaux de neurones dans deux domaines d'application bien distincts. Dans ces deux cas

d'applications, les processus de décision pourront également être testés et validés.

Chapitre 5 :

Conclusion de la partie

Le demi-savoir triomphe plus facilement que le savoir complet : il conçoit les choses plus simples qu'elles ne sont, et en forme par la suite une idée plus saisissable et plus convaincante.

Friedrich Nietzsche

C E manuscrit a été compilé et écrit pendant le confinement de 2020, conséquence de la pandémie du Coronavirus COVID-19.

Cette période très particulière a divisé la société, une fois encore, mais cette fois sur un sujet particulièrement lié à la science et à la recherche. Sans jamais donner les différences entre la science (corpus de connaissances à un temps t) et la recherche (les hypothèses pouvant conduire à de nouvelles connaissances) les médias ont largement contribué à la confusion et à la naissance du populisme scientifique. Ils ont à la fois indiqué que "la science était (détenait) la vérité" et que "la science c'est le doute systématique". Cette confusion entre science et recherche est problématique.

On peut lire à ce sujet un **Tracts de crise** paru aux éditions *Gallimard*, écrit par [Klein \(2020\)](#) et intitulé : "Je ne suis pas médecin, mais je ...". Au-delà des critiques adressées aux politiques, aux experts, et à la médiatisation des travaux du professeur *Raoult*, critiques elles-mêmes vilipendées sur le web, l'une des conclusions est particulièrement intéressante : "*Cela n'a rien de certain, mais par son ampleur et sa radicalité, la pandémie en cours éclairera sans doute d'une lumière neuve les relations ambivalentes que notre société entretient avec les sciences et la recherche.*"

Dans la même veine, nous pouvons lire dans *Science* ('A completely new culture of doing

research.' Coronavirus outbreak changes how scientists communicate) de [Kupferschmidt \(2020\)](#) des conclusions qui rejoignent ce constat mais plutôt orientées sur nos pratiques de publication avec la mise en ligne précoce de recherches (peer review) et leurs discussions sur les réseaux sociaux : "il y a une tension entre la rigueur et la rapidité". On peut également retrouver un article du journal *Le Monde* daté de février 2021 [Larousserie \(2021\)](#) qui revient sur "les pratiques douteuses des publications scientifiques".

Peu importe nos avis sur la gestion et la communication de crise au niveau scientifique, cette période bouleverse la méthode scientifique et sa saine culture du doute et de la preuve.

Des travaux et des études sont publiés avec rapidité sans suivre de réels protocoles et ils devraient être utilisés comme solution à la crise car l'opinion l'a décidé et le débat public a supplanté le débat scientifique. Toute la méthodologie de mise en place du processus de décision est bâclée, prônée et défendue avec virulence par des "followers", des consultants *experts*, plus que de vrais scientifiques experts.

La nouvelle culture qui tend à émerger va totalement à l'encontre des nécessaires préconisations de la méthode/rigueur scientifique, le débat public ne doit pas supplanter le débat scientifique.

Les articles rétractés dans le *Lancet* et le *NEJM* sont un désastre. Ces errements illustrent que le temps scientifique doit être déconnecté du temps médiatique.

Le problème n'est pas la publication, mais la méthode, est-ce que l'urgence vaut validation ?

Ce qui est sûrement valable pour la médecine en temps de guerre, peut-être même en temps de crise, est-il toujours valable (pour la science) peu importe les circonstances ?

La conclusion de [Kupferschmidt \(2020\)](#) semble trancher la question : "Mais, pour l'instant, les médecins font face à une crise et la meilleure information est celle qui est disponible rapidement et non une information parfaite inaccessible ou accessible seulement lorsqu'elle ne sera plus utile."

Parce qu'il faut bien conclure, voici un bilan de la première partie de ce document. Une conclusion est définie comme un argumentaire final, dans notre cas c'est plutôt une porte ouverte sur les prémises de nombreux projets.

Dans ces chapitres, nous avons présenté une grande partie des travaux que nous avons entrepris depuis maintenant plus de 15 ans.

La première partie de ce manuscrit est composée d'une introduction, d'une conclusion et de trois chapitres. Ils décrivent notre activité de recherche à partir des projets sur lesquels

nous avons collaboré (FEUX et GEM).

Un autre découpage aurait très bien pu être proposé, mais ce plan nous semble bien correspondre à l'évolution de nos recherches et de nos objectifs. Il contribue, nous l'espérons, à montrer progressivement notre montée en compétences, l'élargissement de nos domaines d'intérêts et, la construction personnelle de notre vision de la recherche et de notre travail.

Après une introduction, où nous posons les bases théoriques de nos recherches à savoir la théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S : Zeigler et al. (2018)), nous proposons dans le deuxième chapitre de revenir sur nos travaux dans le cadre du projet FEUX. Nous présentons les problématiques abordées pendant notre thèse et les perspectives qui en ont découlé et qui, pour une bonne partie, ont été explorées jusqu'à maintenant.

Ces premières recherches nous ont progressivement menés vers des problématiques d'aide à la prise de décisions. Elles nous ont également fortement interrogés sur la crédibilité de nos résultats et leurs possibles usages réels. Ce questionnement a été renforcé par les problématiques de reproductibilité des expériences numériques de simulation.

L'ensemble de ces éléments nous ont conduits à petit pas à réfléchir et à forger notre positionnement scientifique.

Karl Popper disait : "La critique est le seul instrument de vérification d'une théorie économique."

Cela est sûrement adaptable à bon nombre de théories scientifiques.

Au niveau théorique justement, nous avons proposé d'étendre les champs de la TM&S vers les théories de l'incertain (Fuzzy Logic : Zadeh (1965)) pour prendre en considération des données imprécises (iDEVs : Bisgambiglia et al. (2009b)) et des systèmes imparfaitement définis (Fuzz-iDEVs : Bisgambiglia et al. (2018a)).

L'un des résultats majeurs de ces premiers travaux est la réalisation avec l'équipe du projet FEUX du logiciel DimZal (Bisgambiglia et al. (2017b)). Il a pour objectif de fournir une aide à la décision dans le cadre du dimensionnement des coupe-feux ou zone d'appui à la lutte.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté nos travaux en lien avec le projet GEM sur la *bonne* gestion des ressources halieutiques. Cette problématique prend forme au sein du projet collaboratif *MoonFish* financé sur fonds FEDER par la région corse.

L'objectif est de mesurer et quantifier l'impact des politiques de gestion actuelles qualifiées empiriquement de *défaillantes*. La thématique centrale est toujours l'aide à la prise de décisions.

Dans ce domaine, nous travaillons sur le paradigme agent afin de modéliser l'objet d'étude à partir d'un système multiagents (Ferber (1995a)).

Théoriquement, avec DPDEMAs (Franceschini (2017)), nous avons proposé une extension des formalismes DSDE et PDEVs pour décrire formellement des agents à partir de la décomposition corps/esprit et de l'approche influence/réaction proposée dans IRM4S (Michel (2007b)). Ces travaux avaient aussi pour objectif de renforcer la confiance dans les modèles à base d'agents grâce à l'apport d'une description formelle et une réflexion poussée sur les problèmes de reproductibilité.

Au niveau des travaux en cours, en lien direct avec cette première approche, nous travaillons maintenant sur l'extension de DPDEMAs (SMA + PDEVs) pour intégrer l'architecture cognitive Soar (Laird et al. (1986)). Le processus de décision sera implémenté dans le modèle décrivant l'esprit de nos agents. Ce travail doit permettre la définition (formelle) d'agents *intelligents* et de simuler par la suite des scénarii de processus de décision autonomes et optimisés.

L'optimisation du processus nous mène à d'autres travaux en cours sur l'optimisation par simulation (OvS). Ces derniers travaux sont orientés vers les métaheuristiques et les méthodes d'apprentissage machine comme les réseaux de neurones, l'apprentissage par renforcement, etc. (Martelloni et al. (2020), Poiron-Guidoni et al. (2020b)).

Ici, l'objectif est de tester plusieurs méthodes afin de trouver celle qui donne les meilleurs résultats. Nous pensons ainsi pouvoir tester et évaluer plusieurs scénarii de décision. Ces travaux seront intégrés dans le modèle Soar.

Dans le chapitre quatre, nous décrivons nos perspectives de recherche à partir de trois axes.

Le premier est centré sur les aspects théoriques, nous souhaitons nous orienter vers les théories de la décision et définir une *démarche* de décision pour modéliser le processus de décision des pêcheurs.

Le deuxième vise à proposer une extension du programme *MoonFish*. Nous souhaitons intégrer une composante bio-économique, tester notre processus de décision, et élargir la problématique à la quantification de l'impact du changement climatique sur la pêche.

Enfin, le dernier axe est ouvert aux entreprises insulaires afin de transférer vers la société nos travaux de recherches théoriques. Pour cela, nous proposons en collaboration avec les entreprises Volpy et Aflokkat, deux sujets de recherche qui seront portés par des doctorants dans le cadre du dispositif CIFRE. La thématique dominante de ces deux sujets est l'apprentissage machine et l'optimisation de processus. Dans un cas, il s'agit d'améliorer le processus de formation à distance ; et, dans l'autre d'optimiser la détermination d'un prix de vente.

Nous sommes partis du formalisme DEVS et de la théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S) pour l'étendre à la logique floue. Nous avons ensuite débuté des travaux sur le paradigme agent et les systèmes multi-agents (SMA). Puis, toujours en lien avec les SMA, nous avons exploré le potentiel de l'optimisation par simulation (OvS). Elle nous a guidés vers les méthodes d'apprentissage comme les réseaux de neurones (RdN). A présent, nous souhaitons investiguer les théories de la décision.

Pour finir j'emprunte ces quelques mots à [Picault \(2013\)](#) : " *L'Informatique en général, la simulation multi-agents en particulier, sont des "sciences de l'artificiel" [Simon \(2019\)](#) qui, comme les Mathématiques, créent leurs propres objets d'étude. Mais, contrairement aux Mathématiques, l'informatique peut également restaurer de l'intelligibilité en donnant une réalité structurelle et algorithmique à des concepts que la démarche scientifique, depuis Galilée, a disqualifiés mais que l'on peut souhaiter préserver pour leur capacité à rendre la nature intelligible.* "

Deuxième partie

Curriculum Vitae détaillé

Chapitre 6 :

Curriculum Vitae

Sommaire

6.1	CV synthétique	153
6.2	Activités pédagogiques et administratives	155
6.2.1	Enseignement	155
6.2.2	Administration	162
6.3	Administration de la recherche	164
6.3.1	Projets, Valorisation et Vulgarisation	165
6.3.2	Encadrement	171
6.3.3	Conférences	173
6.4	Bilan	175

6.1

CV SYNTHÉTIQUE

PAUL-ANTOINE BISGAMBIGLIA

Né le 14 septembre 1981, marié deux enfants

MAITRE DE CONFERENCES EN INFORMATIQUE

Adresse personnelle : Les Soleils de Mezzavia, Bâtiment D3 20167 MEZZAVIA

Adresse professionnelle : Université de Corse, FST, campus Grimaldi, Bâtiment PPDB 20250
Corte

Tel : 06 24 31 51 11 / 04 95 45 02 08

Mail : bisgambiglia@univ-corse.fr

Url :

- <https://pa-bisgambiglia.universita.corsica/>
- https://www.researchgate.net/profile/Paul-Antoine_Bisgambiglia
- <https://orcid.org/0000-0003-3026-2258>

EXPERIENCES

- Depuis 2017 : Responsable pédagogique Master Informatique parcours DFS
- 2014-2017 : Responsable pédagogique Master Informatique parcours S2I
- Depuis 2013 : Directeur du département informatique
- 2012-2015 : Directeur des études à la Faculté des Sciences
- 2011 : Maître de conférences à l'Université de Corse
- 2010-2011 : Professeur contractuel à l'Université de Corse
- 2008-2010 : Attaches Temporaires d'Enseignement et de Recherche à l'Université de Corse
- 2008 : Qualifié CNU 27 et 61
- 2008 : Doctorat spécialité Informatique - étude de systèmes complexes

ENSEIGNEMENTS

- Conception et programmation web : HTML, CSS, PHP, javascript (du référencement aux web services).
- Réseau, pile TCP / IP et protocoles applicatifs ; administration et supervision.
- Sécurité informatique.
- Conception et développement d'objets communicants (IoT).
- Algorithmique et programmation C, JAVA, Python, PHP, etc.

DOMAINES DE RECHERCHE

- Théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S).
- Systèmes à événements discrets (DES).
- Systèmes multi-agents (MAS).
- Systèmes flous (FS).
- Automates cellulaires (CA).
- Logique floue (FL).
- Optimisation via simulation (OvS).

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

- Journaux internationaux : 6 / Journaux francophones : 3.
- Une section d'ouvrage dans la dernière version du livre de [Zeigler et al. \(2018\)](#).
- Conférences internationales : 30 / Conférences francophones : 10.
- Déclaration d'invention : 1 (la 2nd est en cours).
- Direction d'ouvrage (actes de conférence ou numéros de revue) : 6.

TIMELINE

La figure 6.1 synthétise dans le temps nos missions et actions.

6.2. ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET ADMINISTRATIVES

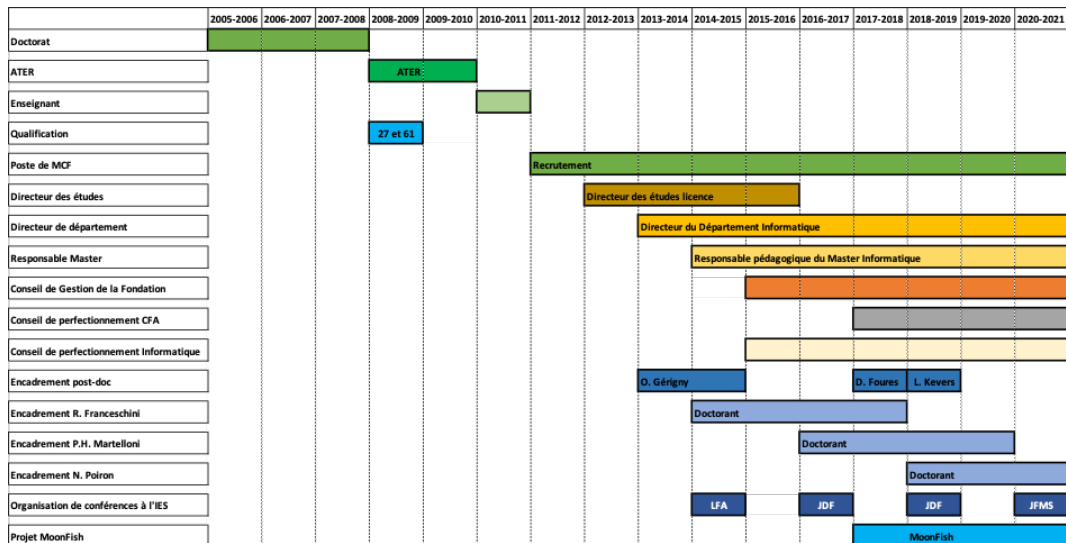


FIGURE 6.1 – Timeline.

6.2

ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET ADMINISTRATIVES

Dans cette section, nous allons détailler notre activité d'enseignement et les tâches communes de vie de la structure.

6.2.1 ENSEIGNEMENT

Elle a débuté lors de l'année scolaire 2005-2006 par un contrat de 3 ans de moniteur CIES remplacé aujourd'hui par les contrats doctoraux. Notre service était alors de 64h équivalents TDs. Pendant ces trois ans avec les autres moniteurs de l'Université, nous avons suivi plusieurs formations de sensibilisation à la pédagogie, nous avons également participé aux doctorales de Provence Alpes Côte d'Azur Corse.

Ce contrat de moniteur a été suivi de deux ans de contrat d'Attaché Temporaire à l'En-

seignement et à la Recherche (ATER) puis d'un an de contrat d'enseignant contractuel. Ces trois ans à 192h équivalents TD ont largement renforcé mon expérience.

Avec l'équipe pédagogique, nous avons pu mettre en pratique plusieurs projets, nous initier à la pédagogie par projet justement, commencer à donner des cours magistraux, et enfin gérer complètement un module au travers d'interventions en cours, TD, TP et concevoir des évaluations comme les examens terminaux.

Ces expériences ont été poursuivies après mon recrutement de Maître de conférences en 2011. Nous avons pu mettre en pratique de nombreuses expériences pédagogiques comme la participation à des challenges, la pédagogie inversée, etc.

6.2.1.1 INNOVATION PÉDAGOGIQUE

Par exemple, dans le cadre d'un cours de programmation mobile à partir de la plateforme Android, cours dispensé en Master 1 et Master 2, nous avons demandé aux étudiants de Master 2 de réaliser en groupe une sous-partie du cours à destination des Master 1, le plan du cours était imposé.

Les objectifs affichés étaient : (1) de leur faire prendre conscience de la difficulté de synthétiser la masse d'informations à leur disposition (supports de cours, documentation, tutorial, etc.), (2) de choisir les éléments importants à transmettre ; (3) de parvenir à les expliquer ; (4) de bien réussir à les appliquer ; (5) de dégager les notions pédagogiques à évaluer ; (6) de proposer un exercice d'évaluation. Afin de les motiver, nous avons décidé d'utiliser les exercices produits comme base pour leur examen final. Bien que le rendu ait été décevant (nous n'avons pas utilisé les supports en Master 1), l'expérience a été bien accueillie et enrichissante pour certains étudiants.

Un autre exemple de projet, qui fonctionne très bien, est l'organisation d'un hackathon ¹, nous y reviendrons.

Parallèlement aux enseignements, nous avons pris de plus en plus de responsabilités. Un an après notre recrutement, nous avons intégré l'équipe du décanat de la Faculté des Sciences et Techniques (FST) avec comme mission la gestion des Licences. Nous avons occupé le poste de Directeur des études Licence pendant 3 ans.

L'année suivante, suite au départ en mise à disposition du Directeur du Département informatique, nous avons pris - et conservons toujours - sa succession.

Puis, en 2014-2015, nous avons pris la responsabilité du Master informatique.

Cet investissement nous a rapproché de nombreux animateurs de la vie universitaire comme la Fondation de l'Université, et le Centre de Formation des Alternants (CFA univ), mais éga-

1. <https://dptinfo.universita.corsica> rubrique hackathon

lement des acteurs de terrain au travers de diverses manifestations, des visites d'alternance et de la mise en place du conseil de perfectionnement des filières informatiques que nous dirigeons et qui se réunit tous les ans depuis 2015. Nous avons également rejoint le conseil de perfectionnement du CFA univ en 2017.

La Fondation est aujourd'hui un partenaire très important. Le but de la Fondation est de faciliter le lien entre le milieu académique (enseignement-recherche) et les entreprises et institutions du territoire. Elle a aussi un rôle d'éclairage de la société notamment dans des domaines à fort enjeux comme la santé, la transition numérique, l'intelligence artificielle, etc.

Nous avons contacté la Fondation en 2013 dans le cadre de nos responsabilités au décanat afin d'organiser des conférences métiers à destination des étudiants de Licence. Ces conférences avaient comme objectifs de présenter le parcours de personnalités remarquables et d'inspirer nos étudiants. Nos étudiants devaient par la suite, dans le cadre d'un autre module "Projet Personnel et Professionnel" présenter sous forme de poster un métier.

Ce lien avec la Fondation a été renforcé en 2014 avec la participation des étudiants du Master informatique au Challenge Innovation. Ce concours de trois jours réalisé en équipes transdisciplinaires a pour objectif de passer d'une idée "innovante" à la création d'une entreprise. Ces premières collaborations m'ont permis d'intégrer le Conseil de gestion de la Fondation en 2015 et de co-construire avec la Fondation, son staff et les enseignants du Département un projet pédagogique d'envergure pour nos étudiants en Informatique.

En 2018, nous avons pu organiser notre premier hackathon, les troisième et quatrième éditions ont eu lieu en 2020 (janvier et décembre), totalement financées par des partenaires. L'édition de décembre 2020 a été organisée totalement en ligne avec l'outil Teams. Le projet est basé sur des défis proposés par des entreprises partenaires et financeuses. Le défi doit être réalisable en 36h et nos étudiants de Licence 3, Master 1 et Master 2 groupés par équipes de 4 doivent réaliser un prototype logiciel ou une application répondant aux besoins de l'entreprise. L'exercice est une grande réussite, il permet de faire rapidement monter en compétences nos étudiants; de développer leurs compétences relationnelles et organisationnelles; de créer un lien entre les différentes promotions; de faciliter les rencontres avec les professionnels du secteur. L'évènement mobilise entre 60 et 80 étudiants, plus de 10 représentants des entreprises partenaires et plus de 20 coaches d'entreprises du secteur qui n'hésitent pas à nous accompagner pendant l'évènement afin d'identifier de potentielles recrues. C'est également devenu un moment important pour discuter entre nous de nos diplômes, des besoins en ressources humaines des entreprises et nous profitons de cet évènement pour organiser formellement notre conseil de perfectionnement.

6.2.1.2 EXEMPLE DE COURS

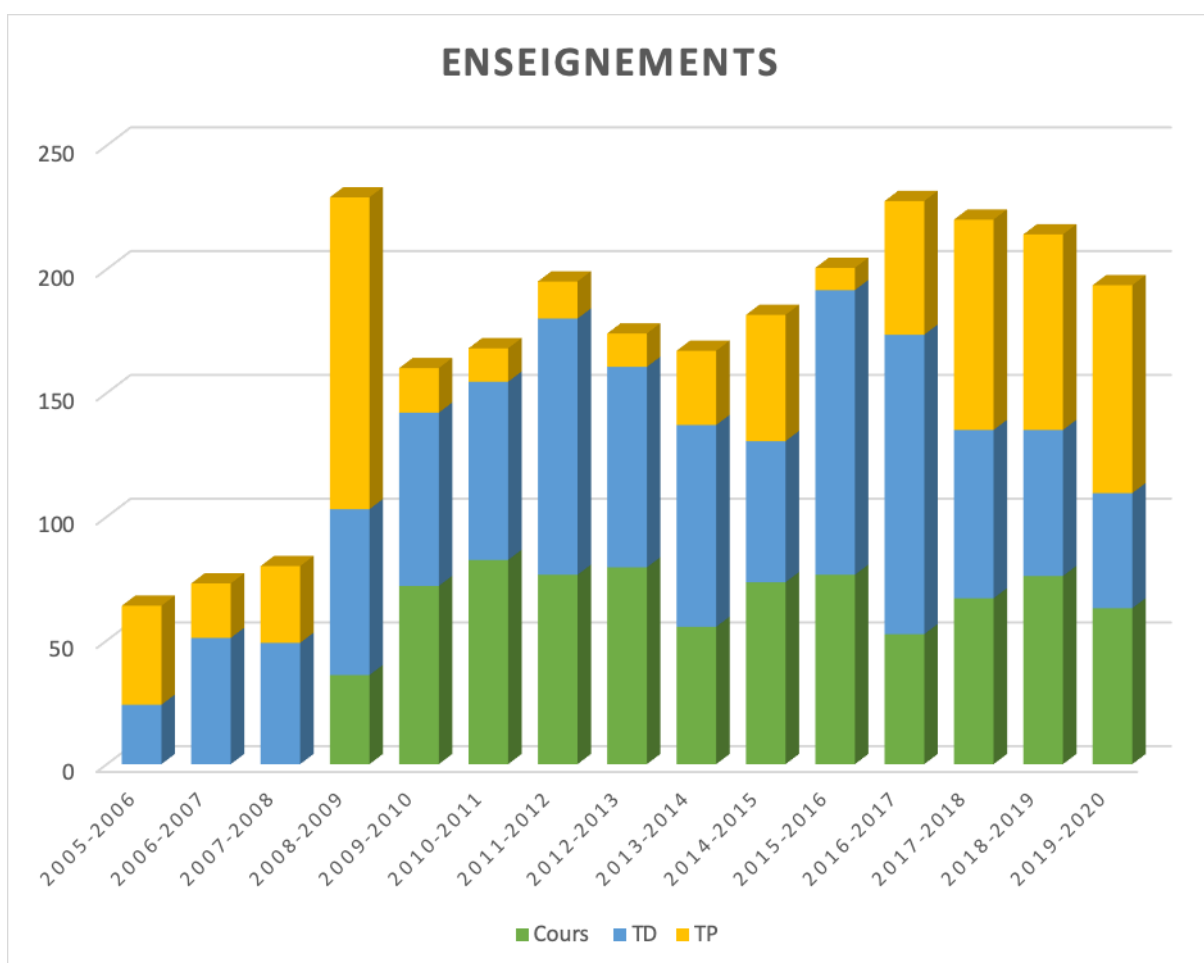


FIGURE 6.2 – Bilan des enseignements par année.

Pour revenir sur l’enseignement, nous enseignons depuis maintenant plus de 10 ans pour presque 3000h de cours (c.f. figure 6.2).

La répartition des enseignements en cours - TD - TP est détaillée figure 6.3.

Depuis 2014-2015 la majeure partie de nos enseignements sont en Master informatique, avec la gestion de deux modules de développement web. La première partie, au premier semestre, permet d’aborder tous les concepts de base :

- la terminologie ;
- les différentes technologies client (HTML, CSS, JavaScript), serveur (PHP) et réseau (HTTP, etc.) ;
- le référencement (SEO) ;

- le web-sémantique ;
- l'ergonomie, le design et l'expérience utilisateur (UX).

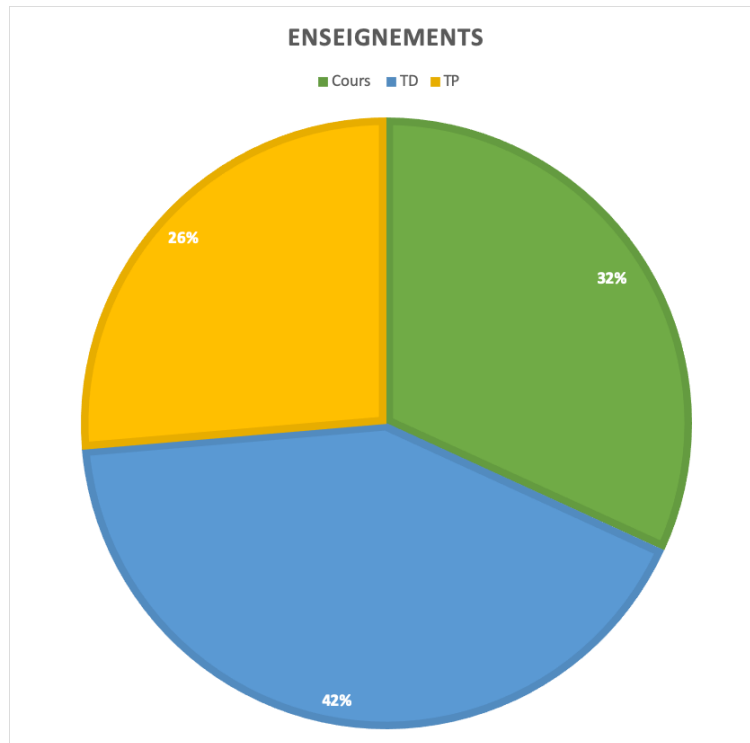


FIGURE 6.3 – Bilan des enseignements Cours / TD / TP.

Ensuite, au second semestre, nous abordons le développement de web services (micro-services) et l'utilisation de frameworks (PHP et JavaScript). Le web évoluant énormément, c'est un cours très vivant qui doit être mis à jour tous les 6 mois.

Nous avons également eu la charge d'intervenir devant un public très varié :

- les licences 1, 2 et 3 Sciences Fondamentales Appliquées (SFA) puis Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) ;
- les étudiants du master Informatique ;
- les étudiants du DUT 1 et 2 Métiers du Multimédia et d'Internet (MMI) ;
- les étudiants du DUT 1 et 2 Génie Biologique (GB) ;
- les enseignants du secondaire dans le cadre des formations ISN puis SNT ;
- les élèves infirmiers ;
- les doctorants, dans le cadre d'une formation annuelle pour notre école doctorale.

6.2.1.3 ENCADREMENT

Nous allons maintenant lister par année les étudiants que nous avons encadrés au travers du dispositif de l'alternance.

Ce dispositif permet à une entreprise de participer à la formation de l'étudiant. Comme tuteur pédagogique, nous suivons l'étudiant pendant son immersion en entreprise et nous veillons à l'adéquation des missions avec le référentiel de compétences de la formation.

- 2011-2012
 - Jean-Vincent Quilichini M2 S2I société EDF
 - Kévin Flori M2 S2I Association GSSMA A Stella
- 2012-2013
 - Jean-Vincent Quilichini M2 S2I société EDF
 - Kévin Flori M2 S2I Association GSSMA A Stella
 - Julien Mosconi M2 S2I UMS Stella Mare
- 2013-2014
 - F. Giansily aux éditions Corse.
- 2014-2015
 - Thomas Gonet M1 S2I à l'Office Hydrolique en collaboration avec Orange ;
 - Simon LeBras M1 S2I chez Good-Barber ;
- 2015-2016
 - Jean-Baptiste Andarelli M1 S2I dans le groupe Olandini ;
 - Kevin Coeffe M1 S2I chez CLC DISPLAY ;
 - Vincent Debain M1 S2I chez NEUROMEDIASOFT ;
 - Thomas Gonet M2 S2I à l'Office Hydrolique en collaboration avec Orange ;
 - Simon LeBras M2 S2I chez Good-Barber ;
- 2016-2017
 - Jean-Baptiste Andarelli M2 S2I dans le groupe Olandini ;
 - David Araujo M1 S2I au laboratoire sur le projet MoonFish ;
 - Nicolas Poiron M1 S2I au laboratoire sur le projet MoonFish ;
 - Jean-Pierre Jouault M1 S2I au laboratoire sur DImZal ;
 - Alois Beck M1 S2I au laboratoire LISA sur la BDLC ;

- 2017-2018
 - David Araujo M2 S2I au laboratoire sur le projet MoonFish;
 - Nicolas Poiron M2 S2I au laboratoire sur le projet MoonFish;
 - Jean-Pierre Jouault M2 S2I au laboratoire sur DImZal;
 - Aloïs Beck M1 S2I au laboratoire LISA sur la BDLC;
 - Steven Geny M2 S2I dans le groupe Ollandini;
 - Frédéric Dumas M1 S2I dans le groupe Ollandini;
- 2018-2019
 - Camille Rubio M1 DFS au laboratoire sur le projet MoonFish;
 - Christophe Nascia M1 DFS chez Good-Barber;
 - Frédéric Dumas M2 DFS dans le groupe Ollandini;
 - Damien Petetin M2 DFS dans le groupe Ollandini;
- 2018-2019
 - Camille Rubio M2 chez Volpy;
 - Christophe Nascia M2 DFS chez Good-Barber;
 - Stéphane Lanfranchi M2 DFS chez Good-Barber;
 - Loris Plason M1 DFS chez Good-Barber;
 - Saveriu Battesti M1 DFS chez Good-Barber;
 - Loïc Medori M1 DFS chez SAGES Informatique;
 - Marc-Antoine Luneschi M1 DFS à la Bibliothèque Universitaire;
- 2020-2021
 - Loris Plason M2 DFS chez Good-Barber;
 - Saveriu Battesti M2 DFS chez Good-Barber;
 - Loïc Medori M2 DFS chez SAGES Informatique;
 - Marc-Antoine Luneschi M2 DFS à la Bibliothèque Universitaire;
 - Martin Colonna M1 DFS à l'UMR CNRS LISA;

Pour les stagiaires, en tant que responsable pédagogique, nous avons à encadrer de nombreux étudiants tous les ans. Depuis 2011, nous avons dû encadrer plus d'une dizaine d'étudiants.

Après cette énumération, nous allons revenir sur nos tâches administratives.

6.2.2 ADMINISTRATION

Dans cette section, nous allons détailler les tâches réalisées dans le cadre de nos responsabilités.

6.2.2.1 DIRECTEUR DES ÉTUDES LICENCE 2012-2015

Nous avons rejoint l'équipe du décanat en 2012 avec comme mission la gestion de quatre filières :

- les trois années de la licence Sciences Fondamentales Appliquées (SFA) ;
- les trois années de la licence Science du Vivant (SV) ;
- les trois années de la licence Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS) ;
- les deux années du DEUST Analyse des Milieux Biologiques (AMB) ;

La mission principale du Directeur des études est de coordonner ces quatre diplômes. Pour cela, il est nécessaire de construire la première version des emplois du temps en bloquant les créneaux des cours transversaux (C2I ou PIX, langues, etc.).

Il est souvent nécessaire de recruter des vacataires pour certains cours spécifiques comme l'expression orale, la présentation du monde de l'entreprise, etc. Ensuite, le Directeur des études doit préparer et organiser les délibérations à chaque fin de semestre. Et, enfin, préparer, organiser et animer les réunions pédagogiques.

6.2.2.2 DIRECTEUR DU DÉPARTEMENT INFORMATIQUE 2013-2021

Les missions du directeur de département sont assez hétéroclites. La principale est de faire vivre le département et d'organiser plusieurs réunions par an en coordination avec les responsables pédagogiques.

Dans notre cas il y a deux responsables pédagogiques, un pour la troisième année de la licence SPI parcours informatique, et l'autre pour le Master Informatique parcours Développeur Full Stack.

Le responsable de Département doit également gérer le budget en équipement du département. Par exemple, sous ma responsabilité, nous avons créé une salle de TP de type laboratoire avec de l'équipement électronique à disposition des enseignants qui donnent des cours d'Internet des Objets (IoT). Il a été nécessaire de remplacer le mobilier et d'investir dans du petit matériel électronique. Ce dernier, à base de carte Arduino, doit être renouvelé tous les ans. Nous avons également fait transformer une salle "Windows" en salle "Mac" pour les cours

de programmation mobile sous iOS. Enfin, avec pour objectif la visibilité de nos diplômés dans les différents salons d'orientation, nous avons acquis deux robots de type Nao.

D'autres missions sont relativement importantes, comme la gestion et l'organisation des services des enseignants. Cela demande une prise de renseignements dans tous les diplômés où il y a de l'informatique : bureautique, statistique, PIX (ex. C2I), etc.

Le directeur de département est également en charge des demandes de recrutement : ATER et Enseignant-Chercheur. Il doit justifier les demandes et rédige le profil pédagogique.

C'est également un lien entre les entreprises et/ou organisations et les enseignants et surtout les responsables pédagogiques. Dans cette optique, il peut organiser des rencontres recruteurs-étudiants, des conférences, voire même, mettre en place des formations comme ça a été longtemps le cas avec le Rectorat pour la formation des enseignants du secondaire dans le cadre de la mise en place de l'ISN.

L'ensemble de ces missions demande de l'organisation et beaucoup d'écoute.

6.2.2.3 RESPONSABLE PÉDAGOGIQUE MASTER INFORMATIQUE 2014-

Les tâches de responsable pédagogique sont nombreuses. Pour une formation professionnalisante comme un master, elles sont souvent très proches des missions de directeur du département, notamment tous les aspects relationnels avec les entreprises, la gestion des stages et de l'alternance, l'organisation de rencontres ou de conférences.

Evidemment, notre première mission est d'être à l'écoute et au service de nos étudiants. Dans un domaine porteur comme l'informatique, nous sommes très sollicités, tout aussi bien les enseignants que les étudiants. Notre master tourne sur ses deux années autour de 40 étudiants avec entre 10 et 20 alternants et un taux d'insertion de plus de 96% (étude du Pôle d'Orientation et d'Insertion Professionnelle).

L'un des enjeux d'une formation est de trouver le juste équilibre entre les attentes des entreprises en terme de compétences et le socle de connaissances théoriques indispensables. La pédagogie est l'art de la répétition, et il faut souvent répéter que l'université apprend avant tout à apprendre et doit développer la curiosité de ses étudiants.

Sous ma responsabilité, nous avons fait évoluer le master en 2018 lors de la campagne d'accréditation. Le Master Systèmes Informatique et Internet (S2I) est devenu le Master Développeur Full Stack (DFS). L'objectif du diplôme est avant tout de former des développeurs, il était donc important de faire figurer cette notion dans son nom. C'était notamment une proposition d'un de nos vacataires. Le parcours Full Stack a été choisi afin d'essayer de coller au mieux aux besoins locaux, notre écosystème étant composé de petites entreprises, il faut que nos diplômés soient le plus polyvalents possible. La définition de Full Stack correspond assez

bien à ce besoin de polyvalence et d'adaptation. Notre diplôme est donc axé sur la programmation appliquée à des domaines comme le web et les applications mobiles. Il offre également des ouvertures vers le Big Data, l'Intelligence Artificielle (IA), l'Internet des Objets (IoT), et enfin le calcul haute performance (HPC). Une description du cursus est proposée sur le site internet du département informatique rubrique formation ².

Pour revenir sur les missions, le responsable pédagogique gère le cursus, il doit s'occuper des emplois du temps, des vacataires qui représentent plus de 30% du volume de cours enseigné, des délibérations, des soutenances de stage, et comme indiqué de l'évolution de la maquette. Il faut impulser une dynamique de travail à la fois dans sa formation mais également avec son équipe pédagogique.

Dans le cadre de cette fonction, j'ai intégré en 2019 le comité de réflexion et de rédaction du Schéma Directeur d'Aménagement Numérique (SDAN) de Corse piloté par la Collectivité de Corse (CdC).

6.3

ADMINISTRATION DE LA RECHERCHE

Dans cette section, nous allons décrire la partie administration de la recherche au travers de notre implication dans l'UMR SPE, puis nous listerons les personnes avec qui nous avons collaboré dans le cadre de nos différents projets de recherche.

Une section sera dédiée à la valorisation et la vulgarisation de nos travaux. Enfin, nous reviendrons sur une partie importante du travail de chercheur, à savoir le "réseautage", et nous présenterons nos activités dans ce domaine.

Au niveau du laboratoire, je suis élu au conseil d'UMR depuis 2018 comme représentant du projet informatique SiSU.

Suite à cette élection j'ai accepté la fonction de correspondant partenariat et innovation, et à ce titre je participe aux réunions avec la SATT.

Le correspondant partenariat et innovation a été mis en place par l'INSIS en 2016. C'est un relais d'information entre l'Unité et le Pôle partenariat & Innovation de l'INSIS, en matière

2. <https://dptinfo.universita.corsica/>

de protection de la propriété intellectuelle et de valorisation des résultats ainsi que la stratégie partenariale de l'INSIS.

6.3.1 PROJETS, VALORISATION ET VULGARISATION

Dans cette section, nous listons nos activités en lien avec la communauté scientifique et la société civile.

6.3.1.1 COORDINATION DES PROGRAMMES SCIENTIFIQUES

RED Plus qu'un projet, le *réseau DEVS* (**RED**) est un réseau de chercheurs et d'ingénieurs. Il a été créé en septembre 2014 et est coordonné par Q. Quesnel (INRAE), P.-A. Bisgambiglia (UDCPP CNRS) et R. Duboz (CIRAD-IRD). Il a pour objectifs de développer, fédérer et promouvoir les travaux autour de la théorie de la modélisation et de la simulation (TM&S) initiée par B.P. Zeigler dans les années 70 et largement développée depuis Zeigler (1976) Zeigler et al. (2000) et Zeigler et al. (2018).

Il promeut une approche systémique et intégrée de la modélisation des systèmes complexes. Les principaux thèmes du réseau sont : la modélisation ; la simulation ; l'ingénierie des modèles ; la validation et la certification des simulateurs ; la performance des simulateurs ; l'utilisation de méthodes formelles ; la reproductibilité des expériences de simulation ; la validation et la vérification des modèles.

A ces thèmes viennent s'en ajouter d'autres comme les avancées sur le formalisme DEVS et ses extensions, des discussions autour d'applications particulières ou encore des démonstrations de plateformes (API) et d'outils de modélisation et de simulation.

Au travers de ce réseau, nous organisons des workshops annuels et tous les 2 ans une école à l'IES de Cargèse.

- Edition 2020 Bisgambiglia et al. (2020) (réalisée en visio).
- Edition 2018 Bisgambiglia et al. (2018b).
- Edition 2016 Bisgambiglia et al. (2016).

Coordinateurs	Participants	Budget
P.-A. Bisgambiglia UDCPP - CNRS R. Duboz CIRAD IRD G. Quesnel INRAE	plus de 30 participants	3 000€ par an

TABLE 6.1 – Carte d'identité du projet RED.

MoonFish Le projet *Outils de modélisation pour la gestion durable des ressources halieutiques en Corse* (MOONFISH) est financé entre 2017 et 2021 par le PO-FEDER 2016-2020. Il vise à développer des outils de modélisation et de simulation pour la bonne gestion des ressources halieutiques en Corse avec à la fois une approche écosystémique et une approche ciblant des espèces d'intérêt.

Il permet de compiler l'ensemble des données halieutiques historiques disponibles pour la Corse (allant de 1994 à 2015), de récolter des données de savoirs empiriques des pêcheurs, des données biologiques, de caractériser l'état des ressources à travers différents indicateurs, de construire un modèle Ecopath with Ecosim à l'échelle de la Corse, de développer des méthodes informatiques de gestion optimisée des stocks halieutiques.

Coordinateurs	Partenaires-Participants	Budget	Durée
P.-A. Bisgambiglia E. Durieux (UDCPP-CNRS)	UDCPP (9 permanents - 7 CDD) STARESO (2 permanents - 1 CDD) OEC (2 permanents - 1 CDD) CRPMEM (2 permanents - 1 CDD)	global : 1 168 569€ financé : 890 150€ UDCPP : 611 729€	51 mois

TABLE 6.2 – Carte d'identité du projet MoonFish.

Chaire MIT Au carrefour des savoirs, des compétences et des acteurs, la chaire "*Mutations Innovations Territoriales*" est portée par une équipe scientifique transdisciplinaire composée de chercheurs de l'UMR LISA et de l'UMR SPE. Elle se propose de questionner la mise en œuvre de la transition et de la transformation sur le territoire, de penser de nouveaux modèles de développement soutenable économiquement, socialement et écologiquement, d'approfondir des éléments de prospective territoriale. Elle débutera en septembre 2021.

Coordinateurs	Partenaires-Participants	Budget	Durée
G. Luisi (Fondation) N. Lameta (UMR LISA) P.-A. Bisgambiglia (UMR SPE)	UDCPP (10 permanents - 1 CDD)	global : 513 173€ financé : 267 250€	09/2021 au 08/2025

TABLE 6.3 – Carte d'identité de la Chaire MIT.

6.3.1.2 PARTICIPATION AUX PROGRAMMES SCIENTIFIQUES

DimZal Le projet, interne au laboratoire, de *Dimensionnement de Zone d'appui à la lutte* (DimZal) fédère Physiciens et Informaticiens avec pour objectif le développement d'un outil logiciel d'aide au dimensionnement d'ouvrage de lutte contre les incendies de forêt (ZAL).

Il a fait l'objet d'une déclaration d'invention à la SATT Sud-Ouest qui a été déposé à l'agence pour la protection des programmes IDDN.FR.001.170010.001.S.C.2014.000.31235.

Coordinateur	Participants
J.-L. Rossi (UDCPP-CNRS)	UDCPP (5 permanents + 2 CDD) T. Marcelli J. Chatelon L. Rossi P. Bisgambiglia P.-A. Bisgambiglia R. Franceschini (I.E.) J.-P. Jouault (alternant)

TABLE 6.4 – Carte d'identité du projet DimZal.

GOLIAT Le projet *Groupement d'Outils pour la Lutte Incendie et l'Aménagement du Territoire* (GOLIAT) a débuté en janvier 2020. Il est financé par la région Corse (CdC). C'est un projet transdisciplinaire porté par l'UMR SPE au travers de l'équipe du projet FEUX.

Coordinateurs	Partenaires-Participants	Budget	Durée
L. Rossi T. Marcelli (UDCPP-CNRS)	UDCPP (21 permanents) SIS 2A SIS 2B ONF PNRC AMU Arobase	global : 2 737 450€ financé : 1 779 316€	42 mois

TABLE 6.5 – Carte d'identité du projet Goliat.

Stella Mare programme "Modélisation et hydrodynamique" Le programme "Modélisation et hydrodynamique" de l'UMS *Stella-Mare* (FEDER 2012-2014) avait pour objectifs d'étendre nos connaissances sur les courants en Corse, au travers d'une thématique courantologie, et de développer une approche formelle de modélisation et de simulation pour étudier le comportement d'espèces ciblées dans les autres programmes.

Coordinateur	Partenaires-Participants	Budget	Durée
P. Bisgambiglia (UDCPP-CNRS)	UDCPP (3 permanents - 2 CDD) IFREMER (2 permanents)	financé : 204 000€	24 mois

TABLE 6.6 – Carte d'identité du projet Modélisation et hydrodynamique.

DACOR Le projet *Données halieutiques CORse* (DACOR) est financé par le FEAMP *mesure 28 : partenariat scientifiques-pêcheurs* sur la période 2017-2020. Il est coordonné par l'Office de l'Environnement de la Corse (OEC) et le consortium est composé du CRPMEM, de la Stareso et de l'Université de Corse (UMR SPE et UMS Stella Mare). Il a pour objectif de mettre en place un suivi halieutique (acquisition de données) standardisé à l'échelle de la Corse.

Coordinateur	Partenaires-Participants	Budget	Durée
M.-C. Santoni (OEC)	OEC (2 permanents - 1 CDD) STARESO (2 permanents) UDCPP (2 permanents - 1 CDD) CRPMEM (2 permanents - 1 CDD)	global : 752 434€ financé : 601 947€ UDCPP : 178 959€	36 mois

TABLE 6.7 – Carte d'identité du projet DACOR.

MoPaMFish Le projet *Monitoring Of Patrimonial Mediterranean FISHes – Suivi d'espèces patrimoniales de poissons méditerranéens* (MoPaMFish) est financé par l'agence de l'eau sur la période 2018-2020. Il permet de standardiser un suivi populationnel par recensement visuel et un suivi individuel des déplacements par télémétrie acoustique.

Coordinateur	Participants	Budget	Durée
E. Durieux (UDCPP-CNRS)	UDCPP (5 permanents - 1 CDD)	global : 546 081€ financé : 273 040€	36 mois

TABLE 6.8 – Carte d'identité du projet MoPaMFish.

DENTALE Le projet *DENTex dentex stock Assessment for corsican artisanal fishery* (DENTALE) est financé pour 18 mois (2021-2022) par France Filière Pêche (Enjeux actuels 2020). L'objectif général du projet est d'adopter une vision holistique du système et de développer un modèle ou un ensemble de modèles qui décrit au mieux la réalité biologique du stock de dentis et d'utiliser des outils d'estimation de stock appropriés pour tenir compte de l'incertitude associée à des données limitées (data poor stocks).

Coordinateur	Participants	Budget	Durée
E. Durieux (UDCPP-CNRS)	UDCPP (2 permanents - 1 CDD)	global : 129 366€ financé : 112 700€	18 mois

TABLE 6.9 – Carte d'identité du projet DENTALE.

ESTATE L'objectif de l'opération ESTATE, de l'UMR CNRS 6240 LISA, est de fournir les méthodes analytiques, les données idoines et un outil de simulation pour l'étude interdisciplinaire des recompositions territoriales de la Corse. L'objectif s'inscrit donc d'abord dans une démarche heuristique de formalisation de ce qui s'est passé au cours des 50 dernières années, et en particulier depuis la fin des années 1990, et de ce qui pourrait advenir de l'occupation et de l'aménagement du territoire corse au cours des deux prochaines décennies.

Coordinateur	Partenaires-Participants	Budget	Durée
D. Prunetti (UDCPP-CNRS)	UDCPP (19 permanents) GIRTEC (2 permanents) SAFER (2 permanents)	global : 1 103 190€ financé : 770 911€	36 mois

TABLE 6.10 – Carte d'identité du projet ESTATE.

BDLC La Banque de Données Langue Corse (BDLC) possède un volet textuel contenant des témoignages recueillis oralement et transcrits. Ce corpus, en cours d'enrichissement, a vocation tout à la fois à s'élargir à d'autres sources mais aussi à permettre un traitement automatique des données visant tout à la fois au traitement automatique de ces textes (TAL) et à développer des applications à vocation vulgarisatrice telles que de la traduction automatique au service de la diffusion et du développement de l'usage du Corse dans la société.

Coordinateur	Partenaires-Participants	Budget	Durée
S. Medori (UDCPP-CNRS)	UDCPP (8 permanents)		2020-2022

TABLE 6.11 – Carte d'identité du projet BDLC.

6.3.1.3 VALORISATION

Nous entendons ici valorisation des recherches et des compétences plutôt au sens de transfert de ces compétences.

Nous pouvons lister :

- la déclaration d'invention du logiciel DimZal;
- la première place au concours MyInnovationIs 2019 de *Nicolas Poiron-Guidoni* pour ses travaux de thèse appliqués au programme MoonFish.
- une nomination comme expert auprès de la région Corse (CdC) pour l'évaluation des projets FEDER en lien avec le numérique et les entreprises.

- la réalisation depuis maintenant 2012 de formations pour l'école doctorale.
- la participation au comité de suivi de thèse de *Vito Ciullo*, doctorant de l'équipe FEUX sur la vision par drone.
- enfin, la participation à 3 jurys de thèse en 2020 à l'Université de Corse pour la soutenance de *Vito Ciullo*, en 2017 à l'Université Clermont Auvergne pour la soutenance de *Van Toan Dao*, et en 2015 à l'Université de Toulouse pour la soutenance de *Damiens Foures*.

6.3.1.4 VULGARISATION

Nous participons régulièrement avec les doctorants et les étudiants en stage ou en alternance au laboratoire aux manifestations :

- la Fête de la Science ;
- Faites de la science ;
- et, aux doctoriales organisées par notre école doctorale.

Enfin, depuis 2018, nous portons le projet **MathC2+** en partenariat avec le Rectorat. Ce programme national a été initié par l'association **Animath**. Localement, il bénéficie d'un financement de 15 000€ de la Collectivité de Corse (CdC) dans le cadre du projet "l'Université transmette u so sapè 2018-2020".

En Corse, mais plus largement en France et en Europe, nous peinons à former les scientifiques dont la société et les entreprises ont besoin. Le programme MathC2+, partie intégrante du Plan Sciences, vise à conquérir de nouveaux territoires dans le processus de formation de scientifiques en proposant à un public ciblé des stages de mathématiques ou d'informatique dans un centre universitaire.

Coordinateurs	Partenaires	Budget	Durée
P.-A. Bisgambiglia M.-F. Saliceti UDCPP - CNRS	UDCPP - CNRS Rectorat de Corse Animath	15 000€ CdC 3 000€ Animath	36 mois

TABLE 6.12 – Carte d'identité du projet MathC2+.

Dans ce cadre, nous avons organisé des stages de trois jours pour accueillir dans nos laboratoires des lycéens de toute l'île. Ils ont pu assister à des conférences et participer à des cours donnés par les enseignants-chercheurs de l'Université. Avec la pandémie ce projet a été prolongé sur 2021.

6.3.2 ENCADREMENT

Dans cette section, nous allons lister les personnes que nous avons eu la chance d'encadrer au cours de nos travaux.

6.3.2.1 DOCTORANTS

- 2020- : *Camille Rubio* co-encadrement à 50% avec le Pr. *Paul Bisgambiglia* en thèse CIFRE avec l'entreprise Volpy. L'objectif est d'optimiser les prix d'achat et de vente de téléphones portables reconditionnés (thèse en cours) ;
- 2018- : *Nicolas Poiron* co-encadrement à 50% avec le Pr. *Paul Bisgambiglia* sur les apports des méthodes d'optimisation et du calcul haute performance à la théorie de la modélisation et de la simulation, appliqués à la gestion des ressources halieutiques (thèse en cours, soutenance prévue décembre 2021) ;
- 2016- : *Paul-Henri Martelloni* co-encadrement à 30% avec *Eric Innocenti* 40% (MCF) et le Pr. *Paul Bisgambiglia* 30% sur la modélisation et la simulation de systèmes complexes spatialisés à partir de Systèmes Multi-Agents et d'une approche par composants pour la gestion des pêcheries (thèse en cours, soutenance prévue automne 2021) ;
- 2013-2017 : *Romain Franceschini* co-encadrement à 50% avec le Pr. *Paul Bisgambiglia* sur la définition d'une approche formelle pour la modélisation et la simulation à événements discrets de systèmes multi-agents.

6.3.2.2 POST-DOCTORANTS

- 2019 : co-encadrement de *Romain Franceschini* post-doctorant accueilli à l'Université d'Anvers, en Belgique par le Pr. *Hans Vangheluwe*. Le projet avait pour objectif de compléter les travaux de thèse et d'aborder les notions de reproductibilité des résultats de simulation, méta-modélisation et abstraction adaptative ;
- 2019 : co-encadrement de *Laurent Kevers* avec le laboratoire LISA représenté par *Stella Medori*. Le projet avait pour objectif de travailler sur la Banque de Données Langue Corse (BDLC) : et d'appliquer des méthodes de traitement automatique de corpus textuels (TAL) pour la conception d'outils contemporains au service du Corse ;
- 2017 : *Damien Foures* accueilli dans notre équipe, le projet était de travailler sur le portage du formalisme PDEVS sur architecture hybride CPU/GPU, et de discuter des apports de la simulation massivement parallèle pour la validation des modèles. Projet en collaboration avec le Laboratoire CRESTIC de L'université de Reims ;

- 2013-2014 : *Olivia Gérigny* en IR équivalent post-doc sur le programme "Modélisation et hydrodynamique", de Stella-Mare (2012-2014). Ce programme avait pour objectif d'étendre nos connaissances sur les courants en Corse, au travers d'une thématique courantologie, et, de développer un outil d'aide à la décision, basé sur un formalisme de simulation, il doit permettre d'étudier le comportement d'espèces ciblées dans les autres programmes.

6.3.2.3 INGÉNIEURS

Ingénieurs d'étude recrutés sur les différents projets :

- 2020 *Céline Barrier*, recrutée sur le projet MoonFish pour la simulation de post-larves et la gestion de projet;
- 2019-2020 *Jean-Pierre Jouault*, recruté sur le projet MoonFish pour le développement d'outils de visualisation des données du projet;
- 2013 *Romain Franceschini*, recruté pendant 6 mois sur les crédits du projet de recherche pour travailler en collaboration avec l'équipe de physique sur le logiciel DimZal.

Ingénieurs de Recherche recrutés sur le programme MoonFish et co-encadrés avec *Eric Durieux* (MCF de Biologie) :

- 2019 *Khaled Horri* sur la partie dispersion larvaire;
- 2019-2020 *Lucie Vanalderweireldt* sur sur la partie modélisation eco-systémique;
- 2017-2020 *Christelle Paillon* sur la partie acquisition de données biologiques.

6.3.2.4 STAGES ET ALTERNANTS

Stages de 6 mois au laboratoire :

- 2019 *Norddine Biernas* sur le projet MoonFish sur la conception d'une base de données unifiée;
- 2011 *Remi Boury* en collaboration à l'IFREMER sur la partie courantologie.

Tuteur pédagogique au CFA pour des alternants ayant un sujet en rapport avec des projets de recherche :

- 2012-2013
 - Julien Mosconi M2 S2I UMS Stella Mare sur la prise en main des fichiers NeCDF;
- 2014-2015

- Thomas Gonet M1 S2I à l'Office Hydrolique en collaboration avec Orange sur un projet d'acquisition et de traitement de données qui n'a pu aboutir ;
- 2015-2016
 - Thomas Gonet M2 S2I à l'Office Hydrolique en collaboration avec Orange ;
- 2016-2017
 - David Araujo M1 S2I au laboratoire sur le projet MoonFish sur la conception d'une base de données unifiée ;
 - Nicolas Poiron M1 S2I au laboratoire sur le projet MoonFish, sur l'utilisation de méthodes d'optimisation par simulation ;
 - Jean-Pierre Jouault M1 S2I au laboratoire sur DimZal ;
 - Aloïs Beck M1 S2I au laboratoire LISA sur la BDLC (UMR LISA) ;
- 2017-2018
 - David Araujo M2 S2I au laboratoire sur le projet MoonFish ;
 - Nicolas Poiron M2 S2I au laboratoire sur le projet MoonFish ;
 - Jean-Pierre Jouault M2 S2I au laboratoire sur DImZal ;
 - Aloïs Beck M2 S2I au laboratoire LISA sur la BDLC ;
- 2018-2019
 - Camille Rubio M1 DFS au laboratoire sur le projet MoonFish sur la valorisation des données ;
- 2018-2019
 - Camille Rubio M2 chez Volpy sur un pré-projet de CIFRE en apprentissage machine ;

6.3.3 CONFÉRENCES

Au niveau de l'organisation de conférences ou de sessions spéciales, nous pouvons lister :

- une conférence invitée EPHESE 2016 Workshop - Epistémologie de la simulation informatique à l'Université Clermont Auvergne sur le thème du doute en modélisation et simulation : de la représentation et élaboration des connaissances à la validation des résultats, les apports de la logique floue.
- la co-organisation avec *Jimmy Lauber* de l'Université Polytechnique des Hauts de France (LAMIH, UVHC) des rencontres francophones sur la logique floue et ses applications en 2014 à l'IES de Cargèse (LFA 2014).

- la co-organisation avec *Gregory Zacharewicz, David Hill, Gauthier Quesnel, Eric Innocenti* d'une session spéciale intitulée : Discrete Event Simulation for Distributed Production Systems lors de la conférence IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS) 2014.
- la co-organisation avec le collectif RED des conférences JDF 2016 et 2018, et JFMS 2020 à l'IES de Cargèse.

Je suis membre du comité de programme des conférences :

- LFA 2013 à 2020;
- SpringSim 2018 et 2020;
- SummerSim 2019 et 2020;
- ANSS (Annual Simulation Symposium) 2021;
- WinterSim 2014 et 2017;
- FuzzIEEE 2020 et 2021;

et relecteur pour les journaux :

- Journal of Intelligent & Fuzzy Systems;
- AE Journal of Decision System;
- Journal of Computational Science;
- IEEE Transactions on Fuzzy Systems;
- Simulation Modelling Practice and Theory;
- Simulation : Transactions of the Society for Modeling and Simulation International;
- International Journal of Simulation and Process Modelling;
- Software : Practice and Experience;
- TSI;

6.4

BILAN

Dans cette partie, après un curriculum vitae qui synthétise nos activités, nous avons présenté les aspects organisationnels, administratifs et pédagogiques en listant ou détaillant les différentes tâches que nous accomplissons au jour le jour.

La diversité des actions qu'offre notre travail, les possibilités de rencontres et de collaborations, la transmission, etc. sont des éléments qui nous semblent à la fois indispensables et particulièrement enrichissants.

Troisième partie

Liste des publications

Chapitre 7 :

Publications

7.1

LISTE DES PRODUCTIONS

DANS cette partie, nous détaillons l'ensemble des travaux que nous avons publiés. Ils sont classés par année dans la figure 7.1 et par type dans la figure 7.2.

Le découpage proposé est en grande partie basé sur la classification du site [Computing Research and Education : CORE](#).

- A* : conférence de premier plan ¹;
- A : excellente conférence;
- B : bonne conférence;
- C : autres lieux de conférence classés qui répondent aux normes minimales.

7.1.1 JOURNAUX (7)

1. A noter qu'il n'y a pas de conférences en simulation de rang A* et A, par exemple *Winter Simulation* qui est une référence dans notre domaine est de rang B.

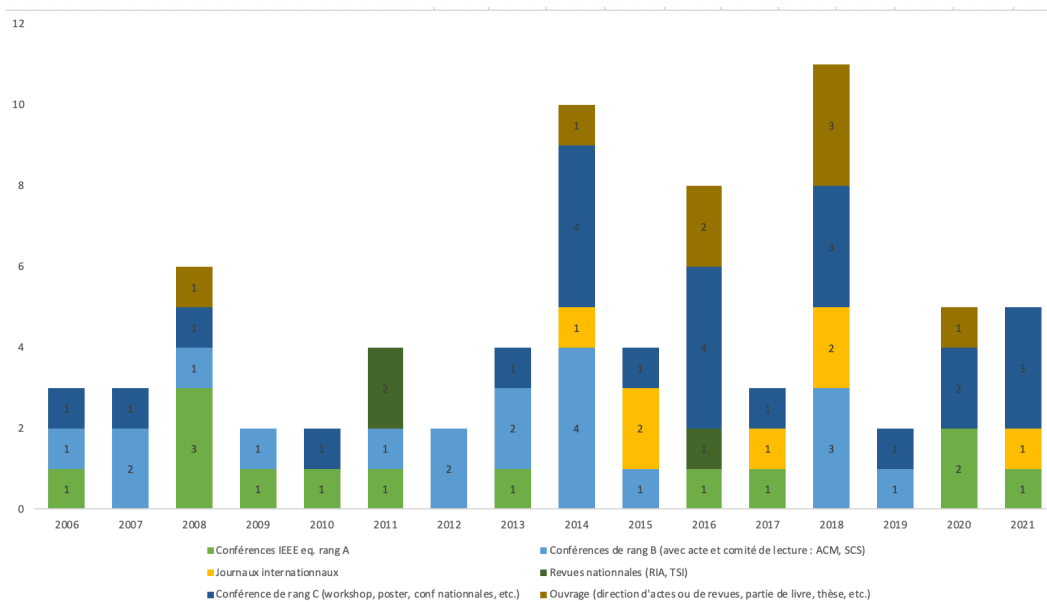


FIGURE 7.1 – Bilan des publications par année.

7.1.1.1 RÉFÉRENCÉS DANS JCR (5)

- [1] **P.-A. Bisgambiglia**, E. Innocenti, P. Bisgambiglia, *Fuzz-iDEVS : An approach to model imprecisions in Discrete Event Simulation*, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* **34** (2018) 2143-2157.
- [2] D. Foures, R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, B.P. Zeigler, *multiPDEVS : A Parallel Multicomponent System Specification Formalism*, *Complexity* **2018** (2018) 19.
- [3] O. Gérigny, S. Coudray, C. Lapucci, C. Tomasino, **P.-A. Bisgambiglia**, F. Galgani, *Small-scale variability of the current in the Strait of Bonifacio*, *Ocean Dynamics (Theoretical, Computational and Observational Oceanography) Topical Collection on the 17th biennial JONSMOD workshop in Brussels, Belgium 2014*, **65.8** (2015) 1165-1182.
- [4] B. Koeck, O. Gerigny, E.D.H. Durieux, S. Coudray, L.-H. Garsi, **P.-A. Bisgambiglia**, F. Galgani, S. Agostini, *Connectivity patterns of coastal fishes following different dispersal scenarios across a transboundary marine protected area (Bonifacio strait, NW Mediterranean)*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **154** (2015) 234-247.
- [5] J.-S. Gualtieri, **P.-A. Bisgambiglia**, *A Polyphony Learning Software (PLS) based on gesture recognition by fuzzy inference system*, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* **28.4** (2015) 1795-1803.

PUBLICATIONS

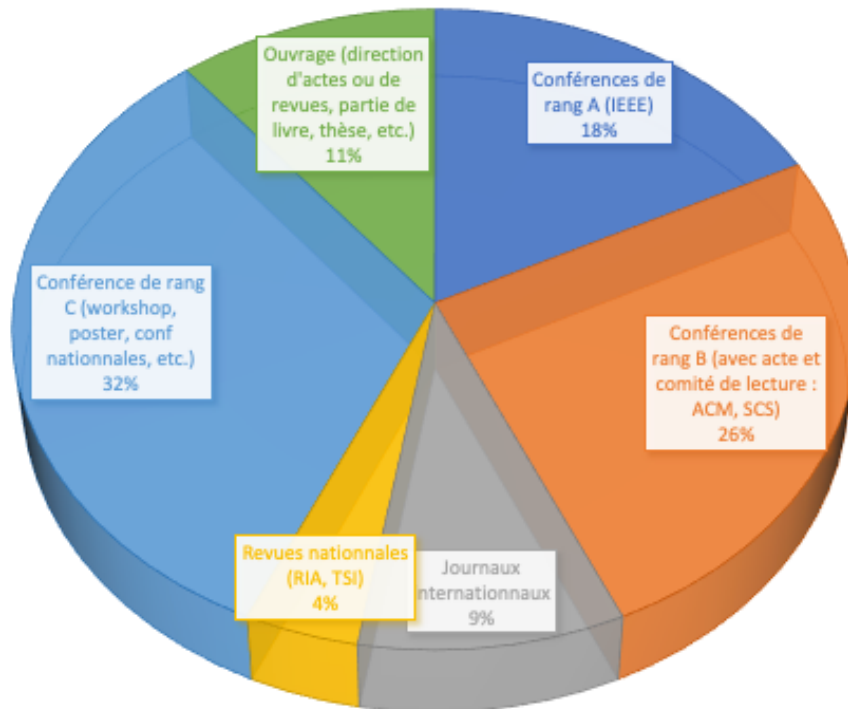


FIGURE 7.2 – Bilan des publications par type.

7.1.1.2 AUTRES (2)

- [1] **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, *DecPDEVS : New Simulation Algorithms to Improve Message Handling in PDEVS*, Open Journal of Modelling and Simulation (OJMSi) **9.2** (2021) 172-197.
- [2] **P.-A. Bisgambiglia**, J.-L. Rossi, R. Franceschini, F.-J. Chatelon, P. Bisgambiglia, L. Rossi, T. Marcelli, *DIMZAL : A Software Tool to Compute Acceptable Safety Distance*, Open Journal of Forestry (OJF) **7.1** (2017) 11-33.

7.1.2 SECTION D'OUVRAGE (1)

- [1] B.P. Zeigler, A. Muzy, E. Kofman, *Theory of Modeling and Simulation : Discrete Event & Iterative System Computational Foundations*, Academic Press (2018). Section 7.7 page 191 basée sur l'article "multiPDEVS : A Parallel Multicomponent System Specification

Formalism”.

7.1.3 CONFÉRENCES INTERNATIONALES DE RANG A DANS CORE (6)

Conférences internationales avec actes publiés dans une bibliothèque digitale, trois relecteurs et classées par Core Australia comme excellente conférence (rang A).

- [1] N. Poiron-Guidoni, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Deep hierarchical reinforcement learning to manage the trade-off between sustainability and profitability in common pool resources systems, Proceedings in IEEE International Joint Conference on Neural Network (IJCNN), virtual event, 18-22 Juillet 2021.
- [2] **P.-A. Bisgambiglia**, E. Innocenti, P.-R. Gonsolin, A new way to use fuzzy inference systems in activity-based cellular modeling simulations, Proceedings in IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Naples (Italy), 9-12 Juillet 2017.
- [3] **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, J.-S. Gualtieri, Cognitive Simulation-Based on Knowledge Evolution in Fuzzy Discrete Event Systems, Proceedings in IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Taipei (Taiwan), 27–30 Juin 2011.
- [4] **P.-A. Bisgambiglia**, L. Capocchi, P. Bisgambiglia, S. Garredu, Fuzzy Inference Models for Discrete Event Systems, Proceedings in IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Barcelona (Spain), 18-23 Juillet 2010.
- [5] **P.-A. Bisgambiglia**, E. de Gentili, P. Bisgambiglia, J.-F. Santucci, iDEVS : New Method to Study Inaccurate Systems, Proceedings in IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Jeju Island (South Korea), 20-24 Août 2009.
- [6] **P.-A. Bisgambiglia**, E. de Gentili, P. Bisgambiglia, J.-F. Santucci, Fuzzy Simulation for Discrete Events Systems, Proceedings in IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Hong Kong, 1-6 Juin 2008.

7.1.4 CONFÉRENCES INTERNATIONALES (21)

Conférences internationales avec actes publiés dans une bibliothèque digitale et trois relecteurs.

- [1] N. Poiron-Guidoni, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Deep hierarchical reinforcement learning in a markov game applied to fishery management decision making, Proceedings in IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), Canberra (Australia), 1-4 Décembre 2020.

- [2] N. Poiron-Guidoni, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, A probabilistic optimization approach to deal with uncertainties in model calibration, Proceedings in IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Glasgow (United Kingdom), 19-24 Juillet 2020.
- [3] R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, D.R.C. Hill, Reproducibility study of a PDEVS model application to fire spreading, Proceedings of the 50th Computer Simulation Conference (SummerSim), Bordeaux (France), 9-12 Juillet 2018. *Article invité*.
- [4] R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, D.R.C. Hill, An overview of the Quartz modelling and simulation framework, Proceedings of the 8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH), Porto (Portugal), 29-31 Juillet 2018.
- [5] P.-H. Martelloni, G. Quesnel, E. Innocenti, **P.-A. Bisgambiglia**, P.-R. Gonsolin, P. Bisgambiglia, Component-based simulation for spatial complex systems in vle environment, Proceedings of the 4th ACM International Conference of Computing for Engineering and Sciences (SpringSim) Baltimore, Maryland (USA), 15-18 Avril 2018.
- [6] E. Innocenti, D. Urbani, **P.-A. Bisgambiglia**, P.-R. Gonsolin, A Multicomponent Modeling Approach for Fishery Simulations, Proceedings in IEEE International Conference on Agents (ICA), Matsue (Japan), 28-30 Septembre 2016. *Article court*.
- [7] R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, A comparative study of pending event set implementations for PDEVS simulation, Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation : DEVS Integrative M&S Symposium (SpringSim) Alexandria, VA (USA), 12-15 Avril 2015.
- [8] R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Decentralized Approach for Efficient Simulation of DEVS Models, Proceedings in IFIP International Conference Advances in Production Management Systems (APMS), Ajaccio (France), 20-24 Septembre 2014.
- [9] E. Innocenti, **P.-A. Bisgambiglia**, D. Urbani, Activity-based Discrete Event Simulation of Spatial Production Systems : application to fisheries, Proceedings in IFIP International Conference Advances in Production Management Systems (APMS), Ajaccio (France), 20-24 Septembre 2014.
- [10] R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, D.R.C. Hill, DEVS-Ruby : a Domain Specific Language for DEVS Modeling and Simulation (WIP), Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation-DEVS Integrative (SpringSim), Tampa (USA), 13-16 Avril 2014.

- [11] **P.-A. Bisgambiglia**, R. Franceschini, F.-J. Chatelon, J.-L. Rossi, P. Bisgambiglia, Discrete event formalism to calculate acceptable safety distance, Proceedings in IEEE Winter Simulations Conference (WSC), Washington, DC (USA), 8-11 Décembre 2013.
- [12] S. Garredu, E. Vittori, J.-F. Santucci, **P.-A. Bisgambiglia**, From models based on states and transitions to MetaDEVS Models, Proceedings of the 3rd International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH), Reykjavik (Iceland), 29-31 Juillet 2013.
- [13] **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, R. Franceschini, Agent-Oriented Approach Based on Discrete Event Systems (WIP), Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation-DEVS Integrative M&S Symposium (SpringSim), San Diego, CA (USA), 7-10 Avril 2013.
- [14] S. Garredu, E. Vittori, J.-F. Santucci, **P.-A. Bisgambiglia**, A Meta-Model for DEVS designed following Model Driven Engineering specification, Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH), Rome (Italy), 28-31 Juillet 2012.
- [15] **P.-A. Bisgambiglia**, B. Poggi, C. Nicolai, Models-Based Optimization Methods for the Specification of Fuzzy Inference Systems in Discrete Event Simulation, Proceedings of the 7th conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT) and "les rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications" (LFA 2011), Aix-les-Bains (France), 18-22 Juillet 2011.
- [16] **P.-A. Bisgambiglia**, E. de Gentili, P. Bisgambiglia, J.-F. Santucci, Fuzz-iDEVS : Towards a Fuzzy Toolbox for Discrete Event System, Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools), Roma (Italy), 2-6 Mars 2009.
- [17] J.S. Gualtieri, **P.-A. Bisgambiglia**, J.F. Santucci, D. Federici, Gestural Simulation of Singing Voices for Polyphonic Songs Learning, Proceedings in International Simulation Multi-conference (SummerSim), Edinburgh (Ecosse), 16-19 Juin 2008. Version courte de "A Polyphony Learning Software (PLS) based on gesture recognition by fuzzy inference system".
- [18] **P.-A. Bisgambiglia**, E. de Gentili, P. Bisgambiglia, J.-F. Santucci, Discrete Events System Simulation-Based Defuzzification Method, Proceedings of the 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Ajaccio (France), 5-7 Mai 2008.
- [19] **P.-A. Bisgambiglia**, E. de Gentili, P. Bisgambiglia, J.-F. Santucci, Fuzzy Modeling for Discrete Events Systems, Proceedings of the 14th IEEE Mediterranean Electrotechni-

cal Conference (MELECON), Ajaccio (France), 5-7 Mai 2008.

- [20] **P.-A. Bisgambiglia**, E. De Gentili, J.-F. Santucci, P. Bisgambiglia, DEVS-FLOU : A Discrete Events And Fuzzy Sets Theory-Based Modeling Environment, Proceedings in IEEE International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, (ISSCAA), Harbin (China), 19-21 Janvier 2006.
- [21] **P.-A. Bisgambiglia**, E. de Gentili, J. Filippi, P. Bisgambiglia, DEVS-FLOU : A Discrete Events and Fuzzy Logic-Based New Method Of Modelling, Proceedings in Summer Computer Simulation Conference (SummerSim), Calgary (Canada), 31 Juillet–02 Août 2006.

7.1.5 AUTRES CONFÉRENCES (11)

- [1] N. Poiron-Guidoni, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Comparison between reinforcement learning and optimization methods applied to the management of the corsican multi-species fishery, Proceedings in International Conference on Optimization and Learning (OLA), Bangkok (Thailand), 29-31 Janvier 2019.
- [2] **P.-A. Bisgambiglia**, R. Franceschini, F.-J. Chatelon, J.-L. Rossi, P. Bisgambiglia, Mobile application based on a physical model to calculate Acceptable Safety Distance, Proceedings of the VII International Conference on Forest Fire Research (ICFFR), Coimbra (Portugal), 17-20 Novembre 2014. Version courte de "DIMZAL : A Software Tool to Compute Acceptable Safety Distance".
- [3] R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, L. Touraille, P. Bisgambiglia, D.R.C. Hill, A survey of modelling and simulation software frameworks using Discrete Event System Specification, Proceedings of the Imperial College Computing Student Workshop (ICCSW), London (United Kingdom), 25-26 Septembre 2014.
- [4] O. Gerigny, S. Coudray, **P.-A. Bisgambiglia**, C. Lapucci, D. Le Berre, F. Galgani, Modeling and hydrodynamics for applied research (larvae dispersion, marine litter, chlorophyll) (résumé), Systemic approach in a Marine Protected Area (Strait of Bonifacio – South of Corsica Oral communication in Joint Numerical Sea Modelling Group Conference, (JONSMOD), Brussels (Belgium), 12–14 Mai 2014.
- [5] B. Koeck, O. Gerigny, E.D.H. Durieux, S. Coudray, L.-H. Garsi, **P.-A. Bisgambiglia**, F. Galgani, S. Agostini, Connectivity Patterns of Coastal Fishes Following Different Dispersal Scenarii Across a Transboundary Marine Protected Area (résumé), Oral communication of the 144h Annual Meeting of the American Fisheries Society (AFS), Quebec City (Canada), 17-21 Août 2014.

- [6] **P.-A. Bisgambiglia**, R. Franceschini, F.-J. Chatelon, J.-L. Rossi, P. Bisgambiglia, XML-based solution and a Web Service for calculating a fuelbreak safety zone sizes, Poster of the 4th fire behavior and fuels conference (IAWF), St. Petersburg (Russia), 1-4 Juillet 2014. Poster basé sur l'article "*Discrete event formalism to calculate acceptable safety distance*".
- [7] S. Mattei, **P.-A. Bisgambiglia**, M. Delhom, E. Vittori, Towards Discrete Event Multi Agent Platform Specification, Proceedings of the Third International Conference on Computational Logics, Algebras, Programming, Tools, and Benchmarking (COMPUTATION TOOLS), Nice (France), 22-27 Juillet 2012.
- [8] S. Garredu, **P.-A. Bisgambiglia**, E. Vittori, J.-F. Santucci, A New Approach to Describe Devs Models Using Both UML State Machine Diagrams and Fuzzy Logic, Proceedings of the 22nd European Modeling & Simulation Symposium (I3M), Fes (Morocco), 13-15 Octobre 2010.
- [9] **P.-A. Bisgambiglia**, L. Capocchi, E. de Gentili, P. Bisgambiglia, Manipulation of Incomplete or Fuzzy Data for DEVS-Based Systems, Proceedings in SCS International Modeling and Simulation Multiconference (IMSM), Buenos Aires (Argentina), pp.87-92, 8-10 Février 2007.
- [10] S. Garredu, **P.-A. Bisgambiglia**, E. Vittori, J.-F. Santucci, Towards The Definition of an Intuitive Specification Language, Proceedings in SCS International Modeling and Simulation Multiconference (IMSM), Buenos Aires (Argentina), 8-10 Février 2007.
- [11] **P.-A. Bisgambiglia**, J.B. Filippi, E. De Gentili, A Fuzzy Approach of Modeling Evolutionary Interfaces Systems, Proceedings in International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area, (ISEIM), Corte (France), 10-13 Juin 2006.

7.1.6 JOURNAUX FRANCOPHONES (5)

7.1.6.1 DIRECTION DE NUMÉROS SPÉCIAUX (2)

- [1] Numéro spécial de Technique et Science Informatiques sur la Théorie de la Modélisation et la Simulation, dirigé par **P.-A. Bisgambiglia**, G. Quesnel, TSI 36.3-6/2017 (2018) 143-272. *Compilation des meilleurs articles de JDF 2016 et 2018.*
- [2] Numéro spécial de la Revue d'intelligence artificielle sur : La logique floue et ses applications, dirigé par : **P.-A. Bisgambiglia**, K. Guelton, J. Lauber, J.-L. Marichal, RIA 29.5/2015 (2016) 138pp. *Compilation des meilleurs articles de LFA 2013 et 2014.*

7.1.6.2 ARTICLES (3)

- [1] **P.-A. Bisgambiglia**, E. Innocenti, *Simulation dirigée par l'activité floue dans les modèles cellulaires Comparaison entre règles d'activité floues et stochastiques*, TSI 35.4-5/2016 (2016) 435-462. Version longue et en français de "A new way to use fuzzy inference systems in activity-based cellular modeling simulations".
- [2] **P.-A. Bisgambiglia**, E. de Gentili, P. Antoine Bisgambiglia, J.-F. Santucci, *Méthode de modélisation de systèmes à paramètres imprécis*, TSI 301/2011 (2011) 95-120.
- [3] J.-S. Gualtieri, **P.-A. Bisgambiglia**, J.-F. Santucci, D. Federici, *Reconnaissance de gestes par Systèmes d'Inférences Flous*, TSI 30/5 (2011) 571-590. Version française de "A Polyphony Learning Software (PLS) based on gesture recognition by fuzzy inference system".

7.1.7 CONFÉRENCES FRANCOPHONES (21)

7.1.7.1 COMPILATIONS SOUS FORME DE LIVRE D'ACTES DE CONFÉRENCES (4)

- [1] **P.-A. Bisgambiglia**, F. Michel, G. Quesnel, R. Duboz, G. Zacharewicz, D.R.C. Hill, *Compilation des actes des Journées Francophones de la Modélisation et de la Simulation (JFMS 2020)* : Convergences entre TMS et SMA, Workshop RED, Cargèse (Corse), Cépaduès, ISBN : 9782364937574.
- [2] **P.-A. Bisgambiglia**, G. Quesnel, R. Duboz, D.R.C. Hill, *Compilation des actes des Journées DEVS Francophones (JDF 2018)*, Applications de la théorie de la Modélisation et de la Simulation, Workshop RED, Cargèse (Corse), Cépaduès, ISBN : 9782364936379.
- [3] **P.-A. Bisgambiglia**, G. Quesnel, R. Duboz, *Compilation des actes des journées DEVS francophones (JDF 2016)* : Théorie et Applications, Workshop RED, Cépaduès, ISBN : 9782364935396.
- [4] J. Lauber, **P.-A. Bisgambiglia**, *Compilation des actes des Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA 2014)*, Cépaduès, 288 pages, ISBN : 9782364931565.

7.1.7.2 COMMUNICATIONS (17)

- [1] **P.-A. Bisgambiglia**, J. Garcia, C. Barrier, L. Vanalderweireldt, C. Paillon, M. Marengo, K. Horri, M. Patrissi, P. Lejeune, N. Poirion-Guidoni, P.H. Martelloni, E. Innocenti, P. Bisgambiglia, E.D.H Durieux, *Acquisition et usage de données pour la gestion des pêches en méditerranée, exemple du projet MoonFish*, Actes du 1er Colloque sur l'émergence de TERritoires INTelligents (TERINT), Cozzano (Corse), 24-26 Juin 2021.

- [2] L. Vanalderweireldt, C. Blestel, C. Albouy, F. Le Loc’h, R. Millot, M. Patrissi, M. Marengo, J. Garcia, C. Bousquet, C. Barrier, M. Lefur, **P.-A. Bisgambiglia**, A. Donnay, S. Ternengo, A. Aiello, P. Lejeune, E. Durieux, Modélisation des écosystèmes côtiers et gestion des ressources halieutiques en Corse : Cas de la plaine orientale, Résumé pour le 15ème colloque de l’Association Française d’Halieutique (AFH), Brest (France), 7-9 Juillet 2021.
- [3] J. Garcia, A. Aiello, **P.-A. Bisgambiglia**, M. Marengo, V. Pasqualini, P. Lejeune, E. Durieux, Utilisation du Random Forest afin de prédire la distribution spatiale potentielle de 3 espèces patrimoniales de poissons autour de la Corse, Résumé pour le 15ème colloque de l’Association Française d’Halieutique (AFH), Brest (France), 7-9 Juillet 2021.
- [4] P.-H. Martelloni, N. Poiron-Guidoni, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Processus de décision, basé sur le Q-learning, appliqué aux pêcheries, Actes des Journées de la Modélisation et de la Simulation (JFMS), Cargèse (Corse), 2-6 Novembre 2020.
- [5] N. Poiron-Guidoni, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Utilisation de l’optimisation robuste pour palier au problème d’équifinalité d’un modèle bio-économique de pêche, Actes des Journées de la Modélisation et de la Simulation (JFMS), Cargèse (Corse), 2-6 Novembre 2020.
- [6] P.-H. Martelloni, N. Poiron-Guidoni, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Comparaison entre optimisation et Q-learning : application pour l’aide à la décision de la pêche en Corse, Poster aux Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l’Apprentissage (JFPDA), Toulouse (France), 1-5 Juillet 2019.
- [7] N. Poiron-Guidoni, P. Bisgambiglia, **P.-A. Bisgambiglia**, B. Poggi, Optimisation robuste via simulation appliquée à la gestion durable des ressources, Actes des Journées DEVS Francophones (JDF), Cargèse (France), 29 Avril-05 Mai 2018.
- [8] R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, D.R. C. Hill, Une vue d’ensemble du framework Quartz, Actes des Journées DEVS Francophones (JDF), Cargèse (France), 29 Avril-05 Mai 2018. Version française de *”An overview of the Quartz modelling and simulation framework”*.
- [9] P.-H. Martelloni, G. Quesnel, E. Innocenti, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Modélisation basée composants pour les systèmes complexes spatiaux, Actes des Journées DEVS Francophones (JDF), Cargèse (France), 29 Avril-05 Mai 2018. Version française de *”Component-based simulation for spatial complex systems in vlc environment”*.
- [10] R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Approche formelle pour la modélisation et la simulation de systèmes multi-agents, **Actes des 25es Journées Franco-**

- phones sur les **Systèmes Multi-Agents**, (JFSMA), Caen (France), 3-7 Juillet 2017.
- [11] R. Franceschini, **P.-A. Bisgambiglia**, P. Bisgambiglia, Vers une nouvelle spécification formelle des systèmes multi-agents (résumé), Actes des Journées DEVS Francophones (JDF), Cargèse (Corse), 11-15 Avril 2016.
- [12] D. Prunetti, **P.-A. Bisgambiglia**, C. Detotto, E. Innocenti, C. Tafani, Y. Jouve, F. Gueniot, Formulation spatiale de données SIG pour la simulation de MAS/LUCC (résumé), Actes des Journées DEVS Francophones (JDF), Cargèse (Corse), 11-15 Avril 2016.
- [13] E. Innocenti, **P.-A. Bisgambiglia**, D. Urbani, Plateforme DEVS multicomposant dédiée à la gestion des pêcheries, Actes des Journées DEVS Francophones (JDF), Cargèse (Corse), 11-15 Avril 2016. Version française de "A Multicomponent Modeling Approach for Fishery Simulations".
- [14] **P.-A. Bisgambiglia**, R. Franceschini, D. Foures, E. Innocenti, Fuzzy-PDEVS : vers une méthode conceptuelle pour la gestion de conflits, Actes des Rencontres sur la Logique Floue et ses Applications (LFA), Poitiers (France), 5-6 Novembre 2015.
- [15] E. Innocenti, **P.-A. Bisgambiglia**, D. Urbani, Propagation par activité floue : application à la simulation du feu, Actes des Rencontres sur la Logique Floue et ses Applications (LFA), Cargèse (Corse), 22-24 Octobre 2014. Version courte de "Simulation dirigée par l'activité floue dans les modèles cellulaires".
- [16] J.S. Gualtieri, **P.-A. Bisgambiglia**, J.-F. Santucci, D. Federici, Utilisation des Systèmes D'inférence Floue pour la Reconnaissance des Gestes, Actes des Rencontres sur la Logique Floue et ses Applications (LFA), Lens (France), 16-17 Octobre 2008. Version courte et française de "A Polyphony Learning Software (PLS) based on gesture recognition by fuzzy inference system".
- [17] **P.-A. Bisgambiglia**, E. de Gentili, P. Bisgambiglia, J.-F. Santucci, Modélisation Floue Basée Sur Le Formalisme DEVS Et Sur La Méthode Des Fronts, Actes des Rencontres sur la Logique Floue et ses Applications (LFA), Nîmes (France), 22-23 Novembre 2007.

Table des figures

1	Chronologie.	4
1.1	Positionnement des hypothèses de modélisation.	11
1.2	Processus de modélisation et de simulation Traoré and Muzy (2006)	15
2.1	Exemple de trois fonctions d'appartenance pour un SEF A	39
2.2	Exemple d'un sous-ensemble flou C1 et sa fonction de défuzzification EEM associée.	45
2.3	Exemple de propagation vectorielle.	46
2.4	Nos approches	49
2.5	Principe de fonctionnement d'un Système d'Inférence Floue (SIF)..	51
2.6	Profil comportemental d'une cellule (règle de transition).	52
2.7	Evolution dans le temps des états physiques du modèle. Légende : ambiante : blanc, préchauffé : jaune, ignition : rouge, extinction : orange, brûlée : noir.	52
2.8	Quatre répliques représentant l'évolution de l'activité des cellules à t=78. Légende : inactive : blanc, active : orange.	53
2.9	Evolution dans le temps des états physiques du modèle flou.	54
2.10	Exemple de simulations avec modification des paramètres du SIF.	54
2.11	Architecture de l'application DimZal.	56
2.12	Vue de DimZal version 1, sélection de point (1/2).	57
2.13	Vue de DimZal version 1, affichage de la ZAL (2/2).	58
2.14	Vue de DimZal version 2, configuration d'une simulation (1/2).	59
2.15	Vue de DimZal version 2, affichage de l'historique des feux (2/2).	60
3.1	Exemple d'analyse de la circulation des courants dans les bouches de Bonifacio pour le 4 août 2012, effectuée entre le couplage des données modélisées MARS3D-Corse 400m et les données in-situ	69
3.2	Représentation d'un Agent.	70

3.3	Positionnement de DPDEMAs dans l'existant Franceschini and Duboz (2020).	73
3.4	Métamodèle UML du système multi-agents adopté par la spécification DP-DEMAs, source Franceschini et al. (2017).	74
3.5	Visualisation de l'environnement du modèle SugarScape à différents stades d'évolution, sur la plateforme Quartz.	77
3.6	Processus de modélisation et de simulation.	80
3.7	Evolution de la population des agents "proies" et des agents "prédateurs" au cours du temps, exemple présenté dans Franceschini et al. (2017).	84
3.8	Processus d'optimisation par simulation.	91
3.9	Classification des méthodes d'optimisation d'après Poggi (2014)	92
3.10	Fonction de Ackley en dimension 2 : illustration du concept d'optimum global/local.	93
3.11	Déroulement d'une métaheuristique.	94
3.12	Comparaison captures réelles et simulées pour une fitness de 0.001.	101
3.13	Répartition des valeurs de chaque paramètre sur 50 intervalles	103
3.14	Estimation de densité de l'espace des solutions acceptables. (a) Efforts parfaitement connus. (b) Efforts complètement inconnus.	104
3.15	Résultat calage par rapport aux prises globales	105
3.16	Validation de l'algorithme de modification de données.	107
3.17	Résultat calage par rapport aux prises globales après modification.	108
3.18	Estimation de densité de l'espace de solution du calage.	108
3.19	Biomasse cumulée de 15 espèces d'intérêt au cours du temps.	110
3.20	Captures cumulées de 15 espèces d'intérêt au cours du temps.	111
3.21	L'architecture BDI.	115
3.22	L'architecture Soar reproduite à partir de Laird (2012). Les composants Soar classiques sont en orange, l'extension de Soar est constituée de tous les composants affichés Laird (2008).	117
3.23	Comparaison de l'évolution des captures, estimées (rouge), simulées (bleue) et optimisées (jaune).	123
4.1	Relations entre monde réel et monde de la simulation selon Sargent (2010).	136
4.2	Réflexion sur le processus de modélisation et de simulation.	138
6.1	Timeline.	155
6.2	Bilan des enseignements par année.	158
6.3	Bilan des enseignements Cours / TD / TP.	159

TABLE DES FIGURES

7.1	Bilan des publications par année.	178
7.2	Bilan des publications par type.	179

Liste des tableaux

3.1	Résultats du test t de Student permettant de vérifier l'équivalence des résultats du modèle de NetLogo avec les résultats de notre implémentation. . . .	78
3.2	Bornes des paramètres du modèle.	100
3.3	Résultat calage par Levenberg-Marquardt avec données complètes et sûres.	101
3.4	Résultat par colonie d'abeilles artificielles.	102
3.5	Bornes des paramètres du stock global.	109
3.6	Bornes des paramètres de chacune des espèces d'intérêts.	110
3.7	Paramètres utilisés.	121
3.8	Récompenses obtenues à chaque pas de simulation.	122
4.1	Description et différences des approches de décision.	131
6.1	Carte d'identité du projet RED.	165
6.2	Carte d'identité du projet MoonFish.	166
6.3	Carte d'identité de la Chaire MIT.	166
6.4	Carte d'identité du projet DimZal.	167
6.5	Carte d'identité du projet Goliat.	167
6.6	Carte d'identité du projet Modélisation et hydrodynamique.	167
6.7	Carte d'identité du projet DACOR.	168
6.8	Carte d'identité du projet MoPaMFish.	168
6.9	Carte d'identité du projet DENTALE.	168
6.10	Carte d'identité du projet ESTATE.	169
6.11	Carte d'identité du projet BDLC.	169
6.12	Carte d'identité du projet MathC2+.	170

Bibliographie

- Academie Française (2019). Méthodologie pour méthode. <http://www.academie-francaise.fr/methodologie-pour-methode>.
- Adam, C. and Gaudou, B. (2016). Bdi agents in social simulations : a survey. *The Knowledge Engineering Review*, 31(3) :207–238.
- Anderson, E. A. (2002). Calibration of conceptual hydrologic models for use in river forecasting. *Office of Hydrologic Development, US National Weather Service, Silver Spring, MD*.
- Anderson, J. R. (1996). *The architecture of cognition*, volume 5. Psychology Press.
- Anderson, J. R. (2014). *Rules of the mind*. Psychology Press.
- Anderson, J. R. and Lebiere, C. J. (2014). *The atomic components of thought*. Psychology Press.
- Andrighetto, G., Conte, R., Turrini, P., and Paolucci, M. (2007). Emergence in the loop : Simulating the two way dynamics of norm innovation. In *Dagstuhl Seminar Proceedings*. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik.
- Anglani, A., Grieco, A., Nucci, F., Semeraro, G., and Tolio, T. (2000). A new algorithm to rank temporal fuzzy sets in fuzzy discrete event simulation. *Fuzzy Systems, 2000. FUZZ IEEE 2000. The Ninth IEEE International Conference on*, 2 :923–928. 00008.
- Aronica, G., Hankin, B., and Beven, K. (1998). Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data. *Advances in water resources*, 22(4) :349–365.
- Ayala, F. J., Gilpin, M. E., and Ehrenfeld, J. G. (1973). Competition between species : theoretical models and experimental tests. *Theoretical Population Biology*, 4(3) :331–356.
- Bachelet, B. (2016). Flexibilité et performance de codes de calcul en optimisation et simulation. *Habilitation à Diriger des Recherches*.
- Bajracharya, K. and Duboz, R. (2013). Comparison of three agent-based platforms on the basis of a simple epidemiological model (wip). In *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation-DEVS Integrative M&S Symposium*, pages 1–6.
- Balbi, J.-H., Rossi, J.-L., Marcelli, T., and Chatelon, F.-J. (2010). Physical Modeling of Surface Fire Under Nonparallel Wind and Slope Conditions. *Combustion Science and Technology*, 182(7) :922–939.
- Balke, T. and Gilbert, N. (2014). How do agents make decisions ? a survey. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 17(4) :13.
- Bana e Costa, C. A., Da Silva, F. N., and Vansnick, J.-C. (2001). Conflict dissolution in the public sector : A case-study. *European Journal of Operational Research*, 130(2) :388–401.
- Baray, J. and Pelé, M. (2005). La détermination du prix de vente grâce à l’analyse de la décision multicritères. *La Revue des Sciences de Gestion*, n°214-215(4) :63–73.
- Barros, F. (1995). Dynamic structure discrete event system specification : a new formalism for dynamic structure modelling and simulation. In *Proceedings of Winter Simulation Conference 1995*.

- Barros, F. J. (2003). Dynamic structure multiparadigm modeling and simulation. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 13(3) :259–275.
- Bastien, J. C. and Scapin, D. L. (1995). Evaluating a user interface with ergonomic criteria. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 7(2) :105–121.
- Batiot, B. (2014). *Etude expérimentale et numérique de la décomposition thermique du bois résineux*. PhD thesis, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique-Poitiers.
- Batton-Hubert, M. (2006). Modèles et heuristiques pour le traitement spatio-temporel de l'information environnementale. *Habilitation à Diriger des Recherches*.
- Bergero, F. and Kofman, E. (2011). PowerDEVS : a tool for hybrid system modeling and real-time. *SIMULATION*, 87(1-2) :113–132.
- Bernoulli, J. (1713). *Ars conjectandi*. Impensis Thurnisiorum, fratrum.
- Beven, K. and Binley, A. (1992). The future of distributed models : model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6(3) :279–298.
- Beverton, R. J. and Holt, S. J. (2012). *On the dynamics of exploited fish populations*, volume 11. Springer Science & Business Media.
- Bisgambiglia, P.-A., Michel, F., Quesnel, G., Duboz, R., Zacharewicz, G., and Hill, D. (2020). *Actes des Journées Francophones de la Modélisation et de la Simulation (JFMS2020) : Convergences entre TMS et SMA, Workshop RED*. Cépadués. Cépadués éditions, Cargèse (Corse).
- Bisgambiglia, P.-A. (2008). *Approche de modélisation approximative pour des systèmes à événements discrets : Application à l'étude de propagation de feux de forêt*. PhD thesis, Université de Corse Pasquale Paoli. Department of Computer Sciences, CNRS, SPE.
- Bisgambiglia, P.-A., Bisgambiglia, P. A., and Gualtieri, J.-S. (2011). Cognitive simulation-based on knowledge evolution in fuzzy discrete event systems. In *Proceedings of Fuzzy Systems (FUZZ), 2011*, pages 895–901. IEEE.
- Bisgambiglia, P.-A., Capocchi, L., Bisgambiglia, P., and Garredu, S. (2010a). Fuzzy inference models for Discrete Event systems. In *Proceedings of FUZZ-IEEE*, pages 1–8, Barcelona, Spain. IEEE.
- Bisgambiglia, P.-A., Capocchi, L., Bisgambiglia, P., and Garredu, S. (2010b). Fuzzy inference models for discrete event systems. In *International Conference on Fuzzy Systems*, pages 1–8. IEEE.
- Bisgambiglia, P.-A., Capocchi, L., Gentili, E. d., and Bisgambiglia, P. (2007a). Manipulation of incomplete or fuzzy Data for DEVS-based Systems. In SCS, editor, *Proceedings of the International Modeling and Simulation Multiconference (IMSM) - Conceptual Modeling Simulation (CMS)*, pages 87–92, Buenos Aires, Argentine.
- Bisgambiglia, P.-A., Filippi, J., and Gentili, E. d. (2006a). A fuzzy approach of modeling evolutionary interfaces systems. In IEEE, editor, *Proceedings of the ISEIM 2006, Corte (France)*, pages 98–103, Corte (France).
- Bisgambiglia, P.-A., Franceschini, R., Chatelon, F.-J., Rossi, J.-L., and Bisgambiglia, P. A. (2013). Discrete event formalism to calculate acceptable safety distance. In *2013 Winter Simulations Conference (WSC)*, pages 217–228. IEEE.
- Bisgambiglia, P.-A., Franceschini, R., Foures, D., and Innocenti, E. (2015). Fuzzy-pdevs : vers une méthode conceptuelle pour la gestion de conflits. In Editions, C., editor, *Actes Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications*. Cépadués.
- Bisgambiglia, P.-A., Gentili, E. d., Bisgambiglia, P., and Santucci, J. (2007b). Modélisation floue basée sur le formalisme DEVS et sur la méthode des fronts. In Editions, C., editor, *Actes Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications*, Nîmes. Cépadués.
- Bisgambiglia, P.-A., Gentili, E. d., Bisgambiglia, P., and Santucci, J. (2008a). Discrete Events System Simulation-based deFuzzification method. In *Proceedings of The 14th IEEE Mediterranean Electro-*

- technical Conference (MELECON)*, pages 132–138, Ajaccio. IEEE.
- Bisgambiglia, P.-A., Gentili, E. d., Bisgambiglia, P., and Santucci, J. (2008b). Fuzzy Simulation for Discrete Events Systems. In *Proceedings of the 2008 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 2008) - IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, pages 688–694.
- Bisgambiglia, P.-A., Gentili, E. d., Bisgambiglia, P., and Santucci, J.-F. (2009a). Fuzz-iDEVS : Towards a fuzzy toolbox for discrete event systems. In ACM, editor, *Proceedings of the SIMUTools'09, Rome (Italie)*, Rome Italie.
- Bisgambiglia, P.-A., Gentili, E. d., Bisgambiglia, P., and Santucci, J.-F. (2009b). iDEVS : new method to study inaccurate systems. In IEEE, editor, *Proceedings of the The Annual IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Jeju Island (Korea)*. 00001.
- Bisgambiglia, P.-A., Gentili, E. d., Filippi, J., and Bisgambiglia, P. (2006b). DEVS-Flou : a discrete events and fuzzy logic-based new method of modelling. In SCS, editor, *SIMULATION SERIES, VOL 38, PART 4*, pages 83–90.
- Bisgambiglia, P.-A. and Innocenti, E. (2016). Simulation dirigée par l'activité floue dans les modèles cellulaires. Comparaison entre règles d'activité floues et stochastiques. *Technique et Science Informatiques*, 35(4-5) :435–462.
- Bisgambiglia, P.-A., Innocenti, E., and Bisgambiglia, P. (2018a). Fuzz-iDEVS : An approach to model imprecisions in Discrete Event Simulation. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(4) :2143–2157.
- Bisgambiglia, P.-A., Innocenti, E., and Gonsolin, P. (2017a). A new way to use fuzzy inference systems in activity-based cellular modeling simulations. In *2017 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, pages 1–6.
- Bisgambiglia, P.-A., Quesnel, G., and Duboz, R. (2016). *Actes des Journées DEVS Francophones (JDF2016) : Théorie et applications, Workshop RED*. Cépadués. Cépadués éditions, Cargèse (Corse). 00000 OCLC : 951230308.
- Bisgambiglia, P.-A., Quesnel, G., Duboz, R., Zacharewicz, G., and Hill, D. (2018b). *Actes des Journées DEVS Francophones (JDF2018) : Théorie et applications, Workshop RED*. Cépadués. Cépadués éditions, Cargèse (Corse).
- Bisgambiglia, P.-A., Rossi, J.-L., Franceschini, R., Chatelon, F.-J., Bisgambiglia, P. A., Rossi, L., and Marcelli, T. (2017b). DIMZAL : A Software Tool to Compute Acceptable Safety Distance. *Open Journal of Forestry*, 07(01) :11–33. 00000.
- Bolduc, J. and Vangheluwe, H. (2002). A modeling and simulation package for classic hierarchical DEVS. Technical report, McGill.
- Bouchon Meunier, B. (1985). *La logique floue et ses applications*. addison Wesley.
- Bousquet, O. and Bottou, L. (2008). The tradeoffs of large scale learning. In *Advances in neural information processing systems*, pages 161–168.
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Perny, P., Tsoukias, A., and Vincke, P. (2000). *Evaluation and decision models : a critical perspective*, volume 32. Springer Science & Business Media.
- Bratman, M. et al. (1987). *Intention, plans, and practical reason*, volume 10. Harvard University Press Cambridge, MA.
- Broersen, J., Dastani, M., Hulstijn, J., and van der Torre, L. (2002). Goal generation in the boid architecture. *Cognitive Science Quarterly*, 2(3-4) :428–447.
- Calvez, B. (2007). Le calibrage de modèles à base d'agents pour la simulation de systèmes complexes. *These de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne*.
- Camus, B., Paris, T., Vaubourg, J., Presse, Y., Bourjot, C., Ciarletta, L., and Chevrier, V. (2018). Co-simulation of cyber-physical systems using a devs wrapping strategy in the mecsyco middleware. *Simulation*, 94(12) :1099–1127.

- Capocchi, L., Santucci, J., Poggi, B., and Nicolai, C. (2011). DEVSimPy : A Collaborative Python Software for Modeling and Simulation of DEVS Systems. In *Enabling Technologies : Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE), 2011 20th IEEE International Workshops on*, pages 170–175, Paris. IEEE.
- Cassandras, C. and Lafortune, S. (1999). *Introduction to Discrete Event Systems*. 2nd ed. 2008. Kluwer Academic Publishers, springer science & business media edition.
- Castro, F., Vellido, A., Nebot, A., and Mugica, F. (2007). Applying data mining techniques to e-learning problems. In *Evolution of teaching and learning paradigms in intelligent environment*, pages 183–221. Springer.
- Castro, R., Kofman, E., and Wainer, G. A. (2010). A formal framework for stochastic discrete event system specification modeling and simulation. *Simulation*, 86(10) :587–611.
- Chaloupka, M. and Balazs, G. (2007). Using bayesian state-space modelling to assess the recovery and harvest potential of the hawaiian green sea turtle stock. *Ecological modelling*, 205(1-2) :93–109.
- Chatelon, F.-J. (2017). Dimzal. <https://www.youtube.com/watch?v=0WOL5dWqBpw>.
- Chauviré, C. (2005). Wittgenstein, les sciences et l'épistémologie aujourd'hui. *Revue de métaphysique et de morale*, 1(2) :157–179.
- Chow, A. and Zeigler, B. (1994). Parallel DEVS : a parallel, hierarchical, modular modeling formalism. In *Simulation Conference Proceedings, 1994. Winter*, pages 716 – 722.
- Chow, A. C. and Zeigler, B. P. (2003). Revised DEVS : A Parallel Hierarchical Modular Modeling Formalism. Technical report, IBM Corp. Austin.
- Christensen, V. and Walters, C. J. (2004a). Ecopath with ecosim : methods, capabilities and limitations. *Ecological modelling*, 172(2) :109–139.
- Christensen, V. and Walters, C. J. (2004b). Trade-offs in ecosystem-scale optimization of fisheries management policies. *Bulletin of Marine Science*, 74(3) :549–562.
- CNRS (2019). Résoudre des problèmes d'incertitude au cœur de modèles informatiques. <https://ins2i.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/>.
- Coquillard, P. and Hill, D. R. (1997). *Modélisation et simulation d'écosystèmes : Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Masson, Recherche en Écologie. ISBN 2-225-85363-0.
- Dalle, O. (2012). On reproducibility and traceability of simulations. In *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, pages 1–12.
- Dallery, T., Eloire, F., and Mermiès, J. (2009). La fixation des prix en situation d'incertitude et de concurrence : Keynes et White à la même table. *Revue Française de Socio-Economie*, n° 4(2) :177–198.
- Dallery, T. and Van Treeck, T. (2008). Conflicting claims and equilibrium macroeconomic adjustment processes in a stock-flow consistent macromodel. *IMK Working Paper n° 9*.
- Dantzig, G. (2016). *Linear programming and extensions*. Princeton university press.
- Dao, V. T. (2017). *Calcul à haute performance et simulations stochastiques. Etude de la reproductibilité numérique sur architectures multicore et manycore*. PhD thesis, LIMOS – UMR CNRS 6158, Université Clermont Auvergne, Clermont. 00000.
- Dao, V. T., Breton, V., Nguyen, H., and Hill, D. R. C. (2016). La reproductibilité des simulations stochastiques parallèles et distribuées utilisant le calcul à haute performance. *Journées DEVS Francophone*, pages 109–117.
- David, N., Sichman, J. S., and Coelho, H. (2002). Towards an emergence-driven software process for agent-based simulation. In *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 89–104. Springer.
- De Lara, M. and Martinet, V. (2009). Multi-criteria dynamic decision under uncertainty : A stochastic

- viability analysis and an application to sustainable fishery management. *Mathematical Biosciences*, 217(2) :118–124.
- Demazeau, Y. (1995). From interactions to collective behaviour in agent-based systems. In *In : Proceedings of the 1st. European Conference on Cognitive Science. Saint-Malo*. Citeseer.
- Demazeau, Y. (2001). Voyelles. *Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, INP Grenoble*, page 103.
- Demazeau, Y. (2018). Systèmes multi-agents : Référence, état de l'art, perspective.
- Dempster, A. P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *The Annals of Mathematical Statistics*, 38(2) :1967.
- Dencœux, T. (2000). A neural network classifier based on dempster-shafer theory. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, 30(2) :131–150.
- Dencœux, T. (2008). Conjunctive and disjunctive combination of belief functions induced by nondistinct bodies of evidence. *Artificial Intelligence*, 172(2-3) :234–264.
- Denoeux, T. and Masson, M. (2012). Belief functions : theory and applications. In *Proceedings of the 2nd international conference on belief functions*, pages 9–11. Springer.
- Dignum, F., Dignum, V., and Jonker, C. M. (2008). Towards agents for policy making. In *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 141–153. Springer.
- Dinu, R., Stratulat, T., and Ferber, J. (2012). A Formal Model of Agent Interaction Based on MASQ. In *AMPLE'2012 : 2nd International Workshop on Agent-based Modeling for PoLicy Engineering*, Montpellier, France.
- Doyen, L., Thébaud, O., Béné, C., Martinet, V., Gourguet, S., Bertignac, M., Fifas, S., and Blanchard, F. (2012). A stochastic viability approach to ecosystem-based fisheries management. *Ecological Economics*, 75 :32–42.
- Dubois, D. and Prade, H. (1986). A set-theoretic view of belief functions : logical operations and approximations by fuzzy sets. *International Journal of General Systems*, 12 :193–226.
- Dubois, D. and Prade, H. (1988a). Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures. *Comput. Intell*, 4 :244–264.
- Dubois, D. and Prade, H. (1988b). *Théorie des possibilités : application à la représentation des connaissances en informatique*. Masson, Paris.
- Dubois, D. and Prade, H. (1990). Consonant approximations of belief functions. *International Journal of Approximate Reasoning*, 4(5-6) :419–449.
- Dubois, D. and Prade, H. (1993). Fuzzy set in approximate reasoning. *part 1, Fuzzy set and Systems*, vol 40.
- Duboz, R., Bonté, B., and Quesnel, G. (2012). Vers une spécification des modèles de simulation de systèmes complexes. *Stud. Inform. Univ.*, 10(1) :7–37.
- Duboz, R., Ramat, E., and Giambiasi, N. (2002). Utilisation du formalisme DEVS pour la spécification de systèmes d'agents réactifs. In *Dixièmes journées francophones sur les systèmes multi-agents*, pages 99–102, Lille, France.
- Duboz, R., Versmisse, D., Travers, M., Ramat, E., and Shin, Y.-J. (2010). Application of an evolutionary algorithm to the inverse parameter estimation of an individual-based model. *Ecological modelling*, 221(5) :840–849.
- Edmonds, B. and Hales, D. (2003). Replication, Replication and Replication : Some Hard Lessons from Model Alignment. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6.
- Edmonds, B. and Moss, S. (2004). From kiss to kids—an 'anti-simplistic' modelling approach. In *International workshop on multi-agent systems and agent-based simulation*, pages 130–144. Springer.
- Ferber, J. (1995a). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, volume 322. InterEditions, Paris.

- Ferber, J. (1995b). *Multi-agent systems : an introduction to distributed artificial intelligence*, volume 1. Addison-Wesley Reading.
- Ferber, J. and Gutknecht, O. (1998). A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems. In *Proceedings International Conference on Multi Agent Systems (Cat. No. 98EX160)*, pages 128–135. IEEE.
- Ferber, J., Gutknecht, O., and Michel, F. (2003). From agents to organizations : an organizational view of multi-agent systems. In *International workshop on agent-oriented software engineering*, pages 214–230. Springer.
- Ferber, J., Michel, F., and Báez, J. (2004). Agre : Integrating environments with organizations. In *International Workshop on Environments for Multi-Agent Systems*, pages 48–56. Springer.
- Ferber, J. and Müller, J.-P. (1996). Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *Proceedings of second international conference on multi-agent systems (ICMAS-96)*, pages 72–79.
- Fishburn, P. C. (1989). Retrospective on the utility theory of von neumann and morgenstern. *Journal of Risk and Uncertainty*, 2(2) :127–157.
- Fitzpatrick, B. G. (2019). Issues in reproducible simulation research. *Bulletin of mathematical biology*, 81(1) :1–6.
- Foures, D., Franceschini, R., Bisgambiglia, P.-A., and Zeigler, B. P. (2018). multiPDEVS : A Parallel Multicomponent System Specification Formalism. *Complexity*.
- Fouzai, N., Coll, M., Palomera, I., Santojanni, A., Arneri, E., and Christensen, V. (2012). Fishing management scenarios to rebuild exploited resources and ecosystems of the northern-central adriatic (mediterranean sea). *Journal of Marine Systems*, 102 :39–51.
- Fox Jr, W. W. (1970). An exponential surplus-yield model for optimizing exploited fish populations. *Transactions of the American Fisheries Society*, 99(1) :80–88.
- Franceschini, R. (2017). *Approche formelle pour la modélisation et la simulation à évènements discrets de systèmes multi-agents*. phdthesis, Université de Corse Pasquale Paoli.
- Franceschini, R., Bisgambiglia, P.-A., and Bisgambiglia, P. (2017). Approche formelle pour la modélisation et la simulation de systèmes multi-agents. In *Vingt-cinquièmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2017)*, Caen, France, page 22.
- Franceschini, R., Bisgambiglia, P.-A., Bisgambiglia, P., and Hill, D. R. C. (2018a). An overview of the quartz modelling and simulation framework. In *SIMULTECH*, pages 120–127.
- Franceschini, R., Bisgambiglia, P.-A., Bisgambiglia, P. A., and Hill, D. R. C. (2014a). DEVS-Ruby : a Domain Specific Language for DEVS Modeling and Simulation (WIP). In *CD Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation - DEVS Integrative M&S Symposium*, DEVS 14, Tampa, FL, USA. SCS.
- Franceschini, R., Bisgambiglia, P.-A., and Hill, D. R. C. (2018b). Reproducibility Study of a PDEVS Model Application to Fire Spreading. In *Proceedings of the 50th Computer Simulation Conference, SummerSim '18*, pages 29 :1–29 :11, San Diego, CA, USA. Society for Computer Simulation International.
- Franceschini, R., Bisgambiglia, P.-A., Touraille, L., Bisgambiglia, P., and Hill, D. (2014b). A survey of modelling and simulation software frameworks using Discrete Event System Specification. *Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik*, 43. 00004.
- Franceschini, R. and Duboz, R. (2020). Systèmes multi-agents et devs, une petite histoire commune. In *Les journées Francophones de la Modélisation et de la Simulation (JFMS)*, pages 40–51, Cargèse (Corse). Cepadues.
- Frayssinhes, J. (2012). *L'apprenant adulte à l'ère du numérique*. Paris : L'Harmattan.
- Frayssinhes, J. (2016). *Apprendre sur les réseaux numériques : collaboration, coopération et innova-*

- tion pédagogique. *Innovations Pédagogiques, nous partageons et vous*, pages 12–26.
- Frayssinhes, J. and Pasquier, F. (2018). Neurosciences et apprentissages via les réseaux numériques. *Éducation et socialisation. Les Cahiers du CERFEE*, 49.
- Freedman, L. P., Cockburn, I. M., and Simcoe, T. S. (2015). The economics of reproducibility in pre-clinical research. *PLoS Biol*, 13(6) :e1002165.
- Frost, O. L. (1972). An algorithm for linearly constrained adaptive array processing. *Proceedings of the IEEE*, 60(8) :926–935.
- Garredu, S., Bisgambiglia, P.-A., Vittori, E., and Santucci, J. (2007). Towards the definition of an intuitive specification language. In SCS, editor, *Proceedings of the International Modeling and Simulation Multiconference (IMSM) - Conceptual Modeling Simulation (CMS)*, pages 187–192.
- Garredu, S., Vittori, E., Santucci, J.-F., and Bisgambiglia, P.-A. (2012). A META-MODEL for DEVS Designed following Model Driven Engineering specifications. In *Proceedings in the 2nd International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH)*, Rome Italie.
- Georgeff, M. (1988). Communication and interaction in multi-agent planning. In *Readings in distributed artificial intelligence*, pages 200–204. Elsevier.
- Georgeff, M., Pell, B., Pollack, M., Tambe, M., and Wooldridge, M. (1998). The belief-desire-intention model of agency. In *International workshop on agent theories, architectures, and languages*, pages 1–10. Springer.
- Giambiasi, N. and Ghosh, S. (2001). Min-Max-DEVS : A new formalism for the specification of discrete event models with min-max delays. In *13th European Simulation Symposium*, pages 616–621.
- Glorennec, P. (1999). *Algorithmes d'apprentissage pour systèmes d'inférence floue*. Hermès Science.
- Graf, S. (2007). *Adaptivity in learning management systems focussing on learning styles*. PhD thesis, Vienna University of Technology.
- Graf, S., Kinshuk, and Liu, T.-C. (2009a). Supporting teachers in identifying students' learning styles in learning management systems : An automatic student modelling approach. *Journal of Educational Technology & Society*, 12(4) :3–14.
- Graf, S., Liu, T.-C., Chen, N.-S., Yang, S. J., et al. (2009b). Learning styles and cognitive traits—their relationship and its benefits in web-based educational systems. *Computers in Human Behavior*, 25(6) :1280–1289.
- Graf, S., Liu, T.-C., et al. (2008). Identifying learning styles in learning management systems by using indications from students' behaviour. In *2008 eighth IEEE international conference on advanced learning technologies*, pages 482–486. IEEE.
- Graham, M. (1935). Modern Theory of Exploiting a Fishery, and Application to North Sea Trawling. *ICES Journal of Marine Science*, 10(3) :264–274.
- Grignard, A., Taillandier, P., Gaudou, B., Vo, D. A., Huynh, N. Q., and Drogoul, A. (2013). GAMA 1.6 : Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation. In Boella, G., Elkind, E., Savarimuthu, B. T. R., Dignum, F., and Purvis, M. K., editors, *PRIMA 2013 : Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, pages 117–131. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Grishin, A. (1997). *Mathematical modelling of forest fires and new methods of fighting them*. House of the Tomsk State University.
- Guillaume, S. (2001). Designing fuzzy inference systems from data : An interpretability-oriented review. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(3) :426–443.
- Gérigny, O. (2011). *Hydrologie et hydrodynamisme dans les bouches de Bonifacio : mesures in-situ, modélisation, influence sur la biomasse*. PhD thesis, Université de Corse.
- Gérigny, O., Coudray, S., Lapucci, C., Tomasino, C., Bisgambiglia, P.-A., and Galgani, F. (2015). Small-

- scale variability of the current in the Strait of Bonifacio. *Ocean Dynamics*.
- Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *science*, 162(3859) :1243–1248.
- Haugeland, J. (1989). *Artificial Intelligence : The Very Idea*. MIT Press. A Bradford Book.
- Hill, D. R. (1995). Verification and validation of ecosystem simulation models. In *In proceedings of the SCS Summer Simulation Conference, July 24-26, 1995, Ottawa, Canada*, pages 176–182.
- Hill, D. R. (2015). Parallel Random Numbers, Simulation, and Reproducible Research. *Computing in Science & Engineering*, 17(4) :66–71. 00001.
- Hill, D. R. (2017). Numerical reproducibility of parallel and distributed stochastic simulation using high-performance computing. In *Chapter 4 in Computational Frameworks : Systems, Models and Applications*, pages 95–110. Elsevier.
- Hill, D. R., Dao, V. T., Mazel, C., and Breton, V. (2017). Reproductibilité et répétabilité numérique. constats, conseils et bonnes pratiques pour le cas des simulations stochastiques parallèles et distribuées. *Technique et Science Informatiques*, 36(3-6) :243–272.
- Idda, C. (2014). *Caractéristiques biologiques spatialisées et influence des stratégies individuelles dans la gestion des ressources halieutiques : une approche par les jeux différentiels*. PhD thesis, Université de Corse.
- Idda, C., Innocenti, E., and Prunetti, D. (2020). Un modèle hiérarchique à base d’agents pour les pêcheries. In *Les journées Francophones de la Modélisation et de la Simulation (JFMS)*, pages 90–96, Cargèse (Corse). Cépadués.
- Idda, L., Madau, F. A., and Pulina, P. (2009). Capacity and economic efficiency in small-scale fisheries : Evidence from the Mediterranean Sea. *Marine Policy*, 33(5) :860–867.
- IFREMER (2019). Bilan 2018 des ressources halieutiques françaises. <https://wwz.ifremer.fr/Actualites-et-Agenda/Toutes-les-actualites/Bilan-2018-des-ressources-halieutiques-francaises>.
- Igarashi, A. and Nagira, H. (2006). Union types for object-oriented programming. In *the 2006 ACM symposium*, page 1435, New York, New York, USA. ACM Press.
- Iliadis, L., Papastavrou, A., and Lefakis, D. (2001). A computer-system that classifies the prefectures of Greece in forest fire risk zones using fuzzy sets. *ELSEVIER, Forest Policy and Economics 4 (2002)*, pages 43–54.
- Innocenti, E., Bisgambiglia, P.-A., and Urbani, D. (2014). Propagation par activité floue : application à la simulation du feu. In *Actes Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications*, Cargèse (Corse). Cépadués éditions.
- Innocenti, E., Silvani, X., Muzy, A., and Hill, D. R. C. (2009). A software framework for fine grain parallelization of cellular models with OpenMP : Application to fire spread. *Environmental Modelling & Software*, 24(7) :819–831.
- Iskrev, N. (2019). What to expect when you’re calibrating : Measuring the effect of calibration on the estimation of macroeconomic models. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 99 :54–81.
- Jager, W. and Janssen, M. (2002). The need for and development of behaviourally realistic agents. In *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 36–49. Springer.
- Jaqaman, K. and Danuser, G. (2006). Linking data to models : data regression. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 7(11) :813.
- Jean-Sébastien, G. and Paul-Antoine, B. (2015). A Polyphony Learning Software (PLS) based on gesture recognition by fuzzy inference system. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 28(4) :1795–1803. 00000.
- Jiang, H. and Vidal, J. M. (2006). From rational to emotional agents. In *Proceedings of the AAAI Workshop on Cognitive Modeling and Agent-based Social Simulation*.

- Jørgensen, S. E. and Fath, B. D. (2011). *Fundamentals of ecological modelling : Applications in environmental management and research*. Elsevier.
- Juang, Y.-S., Lin, S.-S., and Kao, H.-P. (2007). Design and implementation of a fuzzy inference system for supporting customer requirements. *Expert Systems with Applications*, 32(3) :868 – 878.
- Karaboga, D. and Akay, B. (2009). A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Applied mathematics and computation*, 214(1) :108–132.
- Kaufmann, A. (1973). *Introduction à la théorie des sous-ensemble flous*, volume 1. MASSON.
- Kilic, E., Karasu, C., and Leblebicioglu, K. (2005). Fault diagnosis with dynamic fuzzy discrete event system approach. *Transactions in Artificial intelligence and neural networks (14th Turkish Symposium, TAINN 2005, Izmir, Turkey, June 16-17, 2005) (revised selected papers)*, 3949 :117 – 124.
- Klein, E. (2020). *Tracts de Crise (N°25) - Je ne suis pas médecin, mais...* Gallimard.
- Koeck, B., Gèrigny, O., Durieux, E. D. H., Coudray, S., Garsi, L.-H., Bisgambiglia, P.-A., Galgani, F., and Agostini, S. (2015). Connectivity patterns of coastal fishes following different dispersal scenarios across a transboundary marine protected area (Bonifacio strait, NW Mediterranean). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 154 :234–247.
- Kofman, E., Giambiasi, N., and Junco, S. (2000). Fdevs : A general DEVS based formalism for fault modeling and simulation. *European Simulation Symposium, volume 1. Hamburg (2000)*, pages 77–82.
- Kupferschmidt, K. (2020). 'a completely new culture of doing research.' coronavirus outbreak changes how scientists communicate. *sciencemag*.
- Kutschinski, E., Uthmann, T., and Polani, D. (2003). Learning competitive pricing strategies by multi-agent reinforcement learning. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 27(11) :2207–2218.
- Kwon, Y., Park, H., Jung, S., and Kim, T. (1996). Fuzzy-DEVS Formalisme : Concepts, Realization and Application. *Proceedings AIS 1996*, pages 227–234.
- Laird, J. E. (2008). Extending the soar cognitive architecture. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 171 :224.
- Laird, J. E. (2012). *The Soar cognitive architecture*. MIT press.
- Laird, J. E., Newell, A., and Rosenbloom, P. S. (1986). Soar : An architecture for general intelligence. Technical report, STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE.
- Landry, M., Malouin, J.-L., and Oral, M. (1983). Model validation in operations research. *European Journal of Operational Research*, 14(3) :207–220.
- Larousserie, D. (2017). La rigueur scientifique à l'épreuve de la reproductibilité. *Journal LeMonde science*, Publié le 02 octobre 2017 à 17h49.
- Larousserie, D. (2021). Plongée dans les pratiques douteuses des publications scientifiques. *Journal LeMonde science*, Publié le 23 février 2021 à 18h30.
- Laurec, A. and Le Guen, J.-C. (1981). *Dynamique des populations marines exploitées*. CNEXO/Centre Océanologique de Bretagne.
- Lawson, B. G., Park, S., et al. (2000). Asynchronous time evolution in an artificial society model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 3(1) :2.
- Le Floc'h, P., Daurès, F., Brigaudeau, C., and Bihel, J. (2008). A comparison of economic performance in the fisheries sector : A short-and long-term perspective. *Marine Policy*, 32(3) :421–431.
- Le Manacha, F., Durab, D., Perecd, A., Riutorte, J.-J., Lejeunec, P., Santonif, M.-C., Culiolif, J.-M., and Paulyg, D. (2011). Preliminary estimate of total marine fisheries catches in corsica. *Fisheries Centre Research Reports*, 19(3).
- Lefkovich, L. (1965). The study of population growth in organisms grouped by stages. *Biometrics*, pages 1–18.

- Leslie, P. H. (1945). On the use of matrices in certain population mathematics. *Biometrika*, 33(3) :183–212.
- Leslie, P. H. (1948). Some further notes on the use of matrices in population mathematics. *Biometrika*, 35(3/4) :213–245.
- Lin, F. and Ying, H. (2001). Fuzzy discrete event systems and their observability. In IEEE, editor, *Proceedings of IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Vancouver, (Canada)*, volume 3, pages 1271 – 1276.
- Lin, F. and Ying, H. (2002). Modeling and control of fuzzy discrete event systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics*, 32(4) :408 – 415.
- Lin, F., Ying, H., MacArthur, R. D., Cohn, J. A., Barth-Jones, D., and Crane, L. R. (2007). Decision making in fuzzy discrete event systems. *Inf. Sci.*, 177(18) :3749–3763.
- Lleonart, J. and Maynou, F. (2003). Fish stock assessments in the mediterranean : state of the art. *Scientia Marina*, 67(S1) :37–49.
- Lotka, A. J. (1956). Elements of mathematical biology. *Elements of physiological biology*.
- Macher, C., Guyader, O., Talidec, C., and Bertignac, M. (2008). A cost–benefit analysis of improving trawl selectivity in the case of discards : the nephrops norvegicus fishery in the bay of biscay. *Fisheries Research*, 92(1) :76–89.
- Mamdani, E. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12) :1585.
- Mamdani, E. (1977). Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 26 :1182–1191.
- Mamdani, E. and Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1) :1–13.
- Martelloni, P.-H., Poiron-Guidoni, N., Bisgambiglia, P.-A., and Bisgambiglia, P. (2020). Processus de décision, basé sur le q-learning, appliqué aux pêcheries. In *Les journées Francophones de la Modélisation et de la Simulation (JFMS)*, pages 81–89, Cargèse (Corse). Cépadués.
- Martelloni, P.-H., Quesnel, G., Innocenti, E., Bisgambiglia, P.-A., Gonsolin, P. R., and Bisgambiglia, P. (2018). Component-based Simulation for Spatial Complex Systems in VLE Environment. In *Proceedings of the Theory of Modeling and Simulation Symposium, TMS '18*, pages 8 :1–8 :12, San Diego, CA, USA. Society for Computer Simulation International.
- Masson, M.-H. (2005). Apports de la théorie des possibilités et des fonctions de croyance à l'analyse de données imprécises. *Habilitation à diriger des Recherches soutenue le, 2*.
- Matsumoto, M. and Nishimura, T. (1998). Mersenne twister : a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 8(1) :3–30.
- Mattei, S., Bisgambiglia, P.-A., Delhom, M., and Vittori, E. (2012). Towards Discrete Event Multi Agent Platform Specification. In *Proceedings of COMPUTATION TOOLS 2012*, pages 14–21.
- McArthur, A. (1966). *Weather and grassland fire behaviour*. the Forest and Timber Bureau.
- McCarthy, J. and Hayes, P. J. (1981). Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. In *Readings in artificial intelligence*, pages 431–450. Elsevier.
- McLoughlin, C. (1999). The implications of the research literature on learning styles for the design of instructional material. *Australasian Journal of Educational Technology*, 15(3).
- Merino, G., Quetglas, A., Maynou, F., Garau, A., Arrizabalaga, H., Murua, H., Santiago, J., Barange, M., Prellezo, R., García, D., Lleonart, J., Tserpes, G., Maravelias, C., Carvalho, N., Austen, M., Fernandes, J. A., Oliver, P., and Grau, A. M. (2015). Improving the performance of a Mediterranean demersal fishery toward economic objectives beyond MSY. *Fisheries Research*, 161 :131–144. 00006.

- Michel, F. (2004). *Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents*. PhD thesis, Université Montpellier 2.
- Michel, F. (2007a). The irm4s model : the influence/reaction principle for multiagent based simulation. In *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 1–3.
- Michel, F. (2007b). Le modèle irm4s. de l'utilisation des notions d'influence et de réaction pour la simulation de systèmes multi-agents. *Revue d'intelligence artificielle*, 21(5-6) :757–779.
- Michel, F. (2015). Approches environnement-centrées pour la simulation de systèmes multi-agents : Pour un déplacement de la complexité des agents vers l'environnement. *Habilitation à Diriger des Recherches*.
- Minsky, M. (1974). A framework for representing knowledge. *MIT Press, AI Laboratory*.
- Moles, C. G., Mendes, P., and Banga, J. R. (2003). Parameter estimation in biochemical pathways : a comparison of global optimization methods. *Genome research*, 13(11) :2467–2474.
- Moré, J. J. (1978). The levenberg-marquardt algorithm : implementation and theory. In *Numerical analysis*, pages 105–116. Springer.
- Mraz, M., Zimic, N., Lapanja, I., and Bajec, I. (2000). Fuzzy cellular automata : from theory to applications. In *12th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 2000. ICTAI 2000. Proceedings*, pages 320–323.
- Muzy, A., Innocenti, E., Aiello, A., Santucci, J.-F., and Wainer, G. A. (2002). Cell-DEVS quantization techniques in a fire spreading application. In *Simulation Conference, 2002. Proceedings of the Winter*, volume 1, pages 542 – 549 vol.1.
- Nash, J. F. et al. (1950). Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the national academy of sciences*, 36(1) :48–49.
- Neumann, J. V. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Champaign, IL, USA, burks, arthur w. edition.
- Neumann, J. V. and Morgenstern, O. (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton : Princeton Univ. Press.
- Newell, A. (1992). Unified theories of cognition and the role of soar. In *SOAR : A cognitive architecture in perspective*, pages 25–79. Springer.
- Norling, E. (2004). Folk psychology for human modelling : Extending the bdi paradigm. In *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1*, pages 202–209. IEEE Computer Society.
- Ntaimo, L., Hu, X., and Sun, Y. (2008). DEVS-FIRE : Towards an Integrated Simulation Environment for Surface Wildfire Spread and Containment. *Simulation*, 84(4) :137–155.
- Nutaro, J. (1999). Adevs (a discrete event system simulator). *Arizona Center for Integrative Modeling & Simulation (ACIMS), University of Arizona, Tucson*. Available at <http://www.ece.arizona.edu/nutaro/index.php>.
- Olivier, J.-C. (2017). De l'optimisation technico-économique à la simulation multi-échelles de temps : Outils et méthodes pour la conception des systèmes électriques. *Habilitation à Diriger des Recherches*.
- Padua, R. N. and Ontoy, D. S. (2010). The use of a kernel ecological system in a multi species predator-prey model and climate change impact on biodiversity. *Asian Journal of Biodiversity*, 1(1).
- Page-Lamarche, V. (2004). *Estilos de aprendizaje y rendimiento académico en los cursos en línea*. PhD thesis, Tesis doctoral, Universidad de Montreal, Montreal.
- Pareto, V. (1919). *Manuale di economia politica con una introduzione alla scienza sociale*, volume 13. Società editrice libraria.

- Paris, C. B., Helgers, J., Van Sebille, E., and Srinivasan, A. (2013). Connectivity modeling system : A probabilistic modeling tool for the multi-scale tracking of biotic and abiotic variability in the ocean. *Environmental Modelling & Software*, 42 :47–54.
- Park, B. and Bae, J. K. (2015). Using machine learning algorithms for housing price prediction : The case of fairfax county, virginia housing data. *Expert Systems with Applications*, 42(6) :2928–2934.
- Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Hoffmann, M. J., and Deadman, P. (2003). Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change : A Review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2) :314–337. 01399.
- Parunak, H. V. D., Savit, R., and Riolo, R. L. (1998). Agent-based modeling vs. equation-based modeling : A case study and users' guide. In *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 10–25. Springer.
- Pauly, D., Christensen, V., and Walters, C. (2000). Ecopath, ecosim, and ecospace as tools for evaluating ecosystem impact of fisheries. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 57(3) :697–706.
- Pella, J. J. and Tomlinson, P. K. (1969). A generalized stock production model. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, 13(3) :416–497.
- Pereira, D., Oliveira, E., Moreira, N., and Sarmiento, L. (2005). Towards an architecture for emotional bdi agents. In *2005 portuguese conference on artificial intelligence*, pages 40–46. IEEE.
- Perolat, J., Leibo, J. Z., Zambaldi, V., Beattie, C., Tuyls, K., and Graepel, T. (2017). A multi-agent reinforcement learning model of common-pool resource appropriation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30 :3643–3652.
- Picault, S. (2013). De la simulation multi-agents à la simulation multi-niveaux. *Pour une réification des interactions. Habilitation à diriger des recherches, Université de Lille*, 1.
- Piombo, C. (2007). *Modélisation probabiliste du style d'apprentissage et application à l'adaptation de contenus pédagogiques indexés par une ontologie*. PhD thesis, Université de Toulouse.
- Pnueli, A. (1986). Specification and development of reactive systems. In *IFIP Congress*, pages 845–858.
- Poggi, B. (2014). *Développement de concepts et outils d'aide à la décision pour l'optimisation via simulation : Intégration des métaheuristiques au formalisme DEVS*. PhD thesis, University of Corsica Pasquale Paoli, Corte, France.
- Poiron-Guidoni, N., Bisgambiglia, P.-A., and Bisgambiglia, P. (2019). Comparison between reinforcement learning and optimization methods applied to the management of the corsican multi-species fishery. In *Proceedings of OLA'2019 "International Conference on Optimization and Learning"*.
- Poiron-Guidoni, N., Bisgambiglia, P.-A., and Bisgambiglia, P. (2020a). Deep hierarchical reinforcement learning in a markov game applied to fishery management decision making. In *2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence SSCI 2020*, pages 1371–1378. IEEE.
- Poiron-Guidoni, N., Bisgambiglia, P.-A., and Bisgambiglia, P. (2020b). A probabilistic optimization approach to deal with uncertainties in model calibration. In *Proceedings of the 2020 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 2020) - IEEE*, pages 1–8. IEEE.
- Poiron-Guidoni, N., Poggi, B., Bisgambiglia, P.-A., and Bisgambiglia, P. (2018). Optimisation robuste via simulation appliquée à la gestion durable des ressources. In *Actes des Journées DEVS Francophones (JDF2018) : Théorie et applications, Workshop RED.*, pages 91–100, Cargèse (Corse). Cépadus. 00000.
- Popper, K. (1973). *Logique de la découverte scientifique*. édition originale : *Logic der Forschung*, Springer, Wien, 1934, payot edition.
- Popper, K. (1985). *Conjectures et réfutations, La Croissances du savoir scientifique*. édition originale : *Conjectures and refutations*, 1963, payot edition.

- Prunetti, D., Muzy, A., Innocenti, E., and Pieri, X. (2014). Utility-based multi-agent system with spatial interactions : The case of virtual estate development. *Computational Economics*, 43(3) :271–299. 00004.
- Quesnel, G., Duboz, R., and Ramat, E. (2009). The Virtual Laboratory Environment – An operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(4) :641–653.
- Quesnel, G., Duboz, R., Ramat, E., and Traoré, M. K. (2007). VLE : A Multimodeling and Simulation Environment. In *Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference, SCSC '07*, pages 367–374, San Diego, CA, USA. Society for Computer Simulation International.
- Rafalimanana, T. (2003). Les crevettes pénéides exploitées sur la côte ouest de madagascar : variabilités spatio-temporelles des paramètres biologiques et dynamique des populations. *Thèse Doct., Dép. Halieutique UPR MESH ENSA Rennes–France*.
- Rafiei, M. H. and Adeli, H. (2016). A novel machine learning model for estimation of sale prices of real estate units. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(2) :04015066.
- Ramsey, F. (1931). Truth and Probability. *The Foundations of Mathematics and other Logical Essays*.
- Rankinen, K., Karvonen, T., and Butterfield, D. (2006). An application of the glue methodology for estimating the parameters of the inca-n model. *Science of the total environment*, 365(1-3) :123–139.
- Rao, A. S. and Georgeff, M. P. (1991). Modeling rational agents within a bdi-architecture. *KR*, 91 :473–484.
- Ricker, W. E. (1958). Handbook of computations for biological statistics of fish populations. *Can Fish Res Board Bull*, 119 :300.
- Ricordel, P.-M. (2001). *Programmation orientée multi-agents : développement et déploiement de systèmes multi-agents voyelles*. PhD thesis, Grenoble INPG.
- Rivett, P. (1994). *craft of decision modelling*. J. Wiley.
- Rodriguez-Fernandez, M., Egea, J. A., and Banga, J. R. (2006a). Novel metaheuristic for parameter estimation in nonlinear dynamic biological systems. *BMC bioinformatics*, 7(1) :483.
- Rodriguez-Fernandez, M., Mendes, P., and Banga, J. R. (2006b). A hybrid approach for efficient and robust parameter estimation in biochemical pathways. *Biosystems*, 83(2-3) :248–265.
- Roopnarine, P. (2013). Ecology and the tragedy of the commons. *Sustainability*, 5(2) :749–773.
- Rosenbloom, P. S., Laird, J., and Newell, A. (1993). *The SOAR papers : Research on integrated intelligence*. Mit Press Cambridge, MA.
- Rossi, J., Simeoni, A., Moretti, B., and Leroy-Cancellieri, V. (2011). An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires. *Fire Safety Journal*, 46(8) :520–527. 00018.
- Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *Research Paper INT- 115*, Ogden, UT : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. :40p.
- Rouchier, J. (2003). Re-implementation of a multi-agent model aimed at sustaining experimental economic research : The case of simulations with emerging speculation. *Journal of Artificial Societies and social simulation*, 6(4).
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *nature*, 323(6088) :533.
- Russell, B. (1993). *Introduction to Mathematical Philosophy*. Publications, Dover.
- Santé, I., García, A. M., Miranda, D., and Crecente, R. (2010). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes : A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2) :108–122.

- Santucci, J.-F. and Capocchi, L. (2018). The legacy of norbert giambiasi to the university of corsica : from behavioral testing to devs fault simulation. *SIMULATION*, page 0037549718777625.
- Sargent, R. G. (2010). Verification and validation of simulation models. In *Proceedings of the 2010 winter simulation conference*, pages 166–183. IEEE.
- Sasikala, K. and Petrou, M. (2001). Generalised fuzzy aggregation in estimating the risk of desertification of a burned forest. *ELSEVIER, Fuzzy Sets ans Systems 118 (2001)*, pages 121–137.
- Saunier, J. (2015). De l'intérêt de la cognition incarnée pour les agents logiciels. In *23èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, pages 101–110, Rennes, France.
- Scapin, D. L. and Bastien, J. C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour & information technology*, 16(4-5) :220–231.
- Schaefer, M. B. (1954). Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, 1(2) :23–56.
- Schaefer, M. B. (1957). Some Considerations of Population Dynamics and Economics in Relation to the Management of the Commercial Marine Fisheries. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 14(5) :669–681.
- Schaefer, M. B. (1959). Biological and Economic Aspects of the Management of Commercial Marine Fisheries. *Transactions of the American Fisheries Society*, 88(2) :100–104.
- Schoener, T. W. (1976). Alternatives to lotka-volterra competition : models of intermediate complexity. *Theoretical population biology*, 10(3) :309–333.
- Schulz, K., Beven, K., and Huwe, B. (1999). Equifinality and the problem of robust calibration in nitrogen budget simulations. *Published in Soil Sci. Soc. Am. J. (1999)*, 63 :1934–1941.
- Secq, Y. (2003). *RIO : Rôles, Interactions et Organisations*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- Seibert, J. and McDonnell, J. J. (2002). On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology : Use of soft data for multicriteria model calibration. *Water Resources Research*, 38(11) :23–1.
- Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of evidence*. Press, Princeton University.
- Shafer, G. (1990). Perspectives on the theory and practice of belief functions. *International Journal of Approximate Reasoning*, 4(5-6) :323–362.
- Shah, M. and Sharma, U. (2003). Optimal harvesting policies for a generalized gordon–schaefer model in randomly varying environment. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 19(1) :43–49.
- Shcherbina, O., Neumaier, A., Sam-Haroud, D., Vu, X.-H., and Nguyen, T.-V. (2002). Benchmarking global optimization and constraint satisfaction codes. In *International Workshop on Global Optimization and Constraint Satisfaction*, pages 211–222. Springer.
- Siarry, P. (2014). *Métaheuristiques*. Editions Eyrolles.
- Silverman, B. W. (2018). *Density estimation for statistics and data analysis*. Routledge.
- Simon, H. A. (1955). A behavioral model of rational choice. *The quarterly journal of economics*, 69(1) :99–118.
- Simon, H. A. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological review*, 63(2) :129.
- Simon, H. A. (1957). A behavioral model of rational choice. *Models of man, social and rational : Mathematical essays on rational human behavior in a social setting*, pages 241–260.
- Simon, H. A. (2019). *The sciences of the artificial*. MIT press. first ed. 1969.
- Soulié, J.-C. (2001). *Vers une approche multi-environnements pour les agents*. PhD thesis, Université de la Réunion, 2001., Université de la Réunion.
- Soulié, J.-C. (2012). *Multi-modélisation & Simulation de Systemes Complexes : de la théorie à l'ap-*

- plication. *Habilitation à Diriger des Recherches*. 00000.
- Steenbeek, J., Buszowski, J., Christensen, V., Akoglu, E., Aydin, K., Ellis, N., Felinto, D., Guitton, J., Lucey, S., Kearney, K., Mackinson, S., Pan, M., Platts, M., and Walters, C. (2016). Ecopath with Ecosim as a model-building toolbox : Source code capabilities, extensions, and variations. *Ecological Modelling*, 319 :178–189. 00012.
- Stodden, V., Borwein, J., and Bailey, D. H. (2013). Setting the default to reproducible. *computational science research. SIAM News*, 46(5) :4–6. 00030.
- Sun, R. (2001). *Duality of the mind : A bottom-up approach toward cognition*. Psychology Press.
- Sun, R. et al. (2006). *Cognition and multi-agent interaction : From cognitive modeling to social simulation*. Cambridge University Press.
- Sun, R., Merrill, E., and Peterson, T. (2001). From implicit skills to explicit knowledge : A bottom-up model of skill learning. *Cognitive science*, 25(2) :203–244.
- Sutton, R. S. and Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning : An introduction*. MIT press.
- Tahara, T., Gavina, M. K. A., Kawano, T., Tubay, J. M., Rabajante, J. F., Ito, H., Morita, S., Ichinose, G., Okabe, T., Togashi, T., et al. (2018). Asymptotic stability of a modified lotka-volterra model with small immigrations. *Scientific reports*, 8(1) :7029.
- Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15(1) :116–132.
- Thébaud, O., Soulié, J.-C., et al. (2007). Fishing through fish communities : a simple bio-economic model. In *Proc. International Congress on Modelling and Simulation, Christchurch, New Zealand*. Citeseer.
- Tjørve, K. M. and Tjørve, E. (2017). The use of gompertz models in growth analyses, and new gompertz-model approach : An addition to the unified-richards family. *PloS one*, 12(6).
- Traoré, M. K. (2008). SimStudio : A Next Generation Modeling and Simulation Framework. In *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, Simutools '08*, pages 67 :1–67 :6, ICST, Brussels, Belgium, Belgium. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- Traoré, M. K. and Muzy, A. (2006). Capturing the dual relationship between simulation models and their context. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(2) :126–142.
- Tsoukiàs, A. (2006). De la théorie de la décision à l'aide à la décision. *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 1 : outils de modélisation*. D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot, & H. Prade, *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision*, 1.
- Uhrmacher, A. M. and Arnold, R. (1994). Distributing and maintaining knowledge : agents in variable structure environments. In *Fifth Annual Conference on AI, and Planning in High Autonomy Systems*, pages 178–184. IEEE Comput. Soc. Press.
- Usher, M. B. (1966). A matrix approach to the management of renewable resources, with special reference to selection forests. *Journal of Applied Ecology*, pages 355–367.
- Vakalis, D., Sarimveis, H., Kiranoudis, C., Alexandridis, A., and Bafas, G. (2004). A GIS based operational system for wildland fire crisis management I. Mathematical modelling and simulation. *ELSEVIER, Applied Mathematical Modelling* 28 (2004), pages 389–410.
- Vallin, P. and Vanderpooten, D. (2002). *Aide à la décision : une approche par les cas*. Ellipses.
- Van Tendeloo, Y. and Vangheluwe, H. (2015). PythonPDEVS : a distributed parallel DEVS simulator. In *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation : DEVS Integrative M&S Symposium*, pages 91–98. Society for Computer Simulation International. 00006.
- Van Tendeloo, Y. and Vangheluwe, H. (2016). An overview of PythonPDEVS. In *Collectif Workshop*

- RED, editor, JDF, pages 59–66. 00003.
- Van Tendeloo, Y. and Vangheluwe, H. (2017). An evaluation of devs simulation tools. *Simulation*, 93(2) :103–121.
- Vangheluwe, H. (2000a). DEVS as a common denominator for multi-formalism hybrid systems modelling. In *CACSD. Conference Proceedings. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design (Cat. No.00TH8537)*, pages 129–134, Anchorage, AK, USA. IEEE.
- Vangheluwe, H., De Lara, J., and Mosterman, P. J. (2002). An introduction to multi-paradigm modelling and simulation. In *Proceedings of the AIS'2002 conference (AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems), Lisboa, Portugal*, pages 9–20. 00166.
- Vangheluwe, H. and Lara, J. d. (2002). Meta-Models are models too. In *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. 00052.
- Vangheluwe, H. L. (2000b). Devs as a common denominator for multi-formalism hybrid systems modelling. In *Cacsd. conference proceedings. IEEE international symposium on computer-aided control system design (cat. no. 00th8537)*, pages 129–134. IEEE.
- Vannoorenbergh, P. (2003). Un état de l'art sur les fonctions de croyance appliquées au traitement de l'information. *Revue I3*, 3(2) :9–45.
- Vengerov, D. (2008). A gradient-based reinforcement learning approach to dynamic pricing in partially-observable environments. *Future Generation Computer Systems*, 24(7) :687–693.
- Verhulst, P.-F. (1845). Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population. *Nouveaux memoires de l'academie royale des sciences*, 18 :1–41.
- Versmisse, D. (2008). *Gestion de la complexité formelle et opérationnelle des systèmes complexes Application aux anthroposystèmes marins*. PhD thesis, Université du Littoral Côte d'Opale.
- Versmisse, D., Macher, C., Ramat, E., Soulié, J.-C., and Thébaud, O. (2007). Developing a bioeconomic simulation tool of fisheries dynamics : a case study. Post-Print hal-00368955, HAL.
- Vidal, J.-P. (2005). *Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale—Apports de l'intelligence artificielle*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.
- Vincke, P. (1992). *Multicriteria decision-aid*. John Wiley & Sons.
- Von Bertalanffy, L. (1938). A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws. ii). *Human biology*, 10(2) :181–213.
- Von Bertalanffy, L. (1956). General system theory. *General systems*, 1 :1–10.
- Von Bertalanffy, L., Chabrol, J.-B., László, E., and Paulre, B. (1973). *Théorie générale des systèmes*. Dunod Paris (réédition).
- von der Osten, F. B., Kirley, M., and Miller, T. (2017). Sustainability is possible despite greed-exploring the nexus between profitability and sustainability in common pool resource systems. *Scientific reports*, 7(1) :1–12.
- von Neumann, J. (1988). The principles of large-scale computing machines. *Annals of the History of Computing*, 10(4) :243–256.
- Wagner, H. M. (1959). An integer linear-programming model for machine scheduling. *Naval Research Logistics (NRL)*, 6(2) :131–140.
- Wainer, G. A. (2002). CD++ : a toolkit to develop DEVS models. *Software - Practice and Experience*, 32 :1261–1306.
- Wainer, G. A. (2015). The cell-DEVS formalism as a method for activity tracking in spatial modelling and simulation. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 10(1) :19–38. 00000.
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., and Brun, F. (2018). *Working with dynamic crop models : methods, tools and examples for agriculture and environment*. Academic Press.
- Walters, C., Christensen, V., and Pauly, D. (1997). Structuring dynamic models of exploited ecosystems

- from trophic mass-balance assessments. *Reviews in fish biology and fisheries*, 7(2) :139–172.
- Weaver, W. (1949). Translation. *Machine translation of languages*, 14 :15–23.
- Weber, R. (1991). Modeling fire spread through fuel beds. *Prog. Energy Combust. Sci*, vol. 11, pages 67–82.
- Wilensky, U. (1999). NetLogo.
- Wilensky, U. and Rand, W. (2007). Making models match : Replicating an agent-based model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 10(4) :2.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4) :625–636.
- Wolpert, D. H. and Macready, W. G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 1(1) :67–82.
- Wooldridge, M. (2002). *An Introduction to MultiAgent Systems*. Wiley and Sons, Chichester, West Sussex, Angleterre, wiley and sons edition. 07648.
- Wooldridge, M., Jennings, N. R., and Kinny, D. (2000). The gaia methodology for agent-oriented analysis and design. *Autonomous Agents and multi-agent systems*, 3(3) :285–312.
- Wooldridge, M. J. and Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents : theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(02) :115–152.
- Yan, G., Ni, Y., and Yang, X. (2020). Optimal pricing in recycling and remanufacturing in uncertain environments. *Sustainability*, 12(8) :3199.
- Zacharewicz, G. (2014). Transformation de modèles, approche sémantique & simulation–contribution à l’interopérabilité des systèmes d’entreprises. *Habilitation à Diriger des Recherches*.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information Control*, 8 :338–353.
- Zadeh, L. A. (1972). *A Fuzzy-Set Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges*. Journal of Cybernetics.
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, 1(1) :28–44.
- Zadeh, L. A. (1975). *The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning*, volume 8. Information sciences, 1975 - Elsevier. parts 1 and 2.
- Zadeh, L. A. (1976). A Fuzzy-Algorithmic Approach to the Definition of Complex or Imprecise Concepts. *Int. J. Man-Machine Studies*, 1(8) :199–249.
- Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy Sets as a Basics for a Theroy of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, pages 3–28.
- Zadeh, L. A. (1983). The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert Systems. *Fuzzy Sets and Systems*, pages 199–227.
- Zadeh, L. A. (1988). Fuzzy Logic. *Computer*, 21(4) :83–93.
- Zeigler, B. P. (1976). *Theory of modeling and simulation*. Academic press.
- Zeigler, B. P. (2013). *Guide to Modeling and Simulation of Systems of Systems - User’s Reference*. Springer Briefs in Computer Science. Springer.
- Zeigler, B. P., Kim, T. G., and Praehofer, H. (2000). *Theory of modeling and simulation*. Academic press.
- Zeigler, B. P., Muzy, A., and Kofman, E. (2018). *Theory of modeling and simulation : discrete event & iterative system computational foundations*. Academic press.
- Zhang, M., Seck, M. D., and Verbraeck, A. (2013). A devs-based m&s method for large-scale multi-agent systems. In *Proceedings of the 2013 SummerSim*, page 3. Citeseer.
- Zhang, M. and Verbraeck, A. (2014). A composable prs-based agent meta-model for multi-agent simulation using the devs framework. In *Proceedings of the 2014 Symposium on Agent Directed Simulation*, pages 1–8.
- Zhu, H. and Kirley, M. (2019). Deep multi-agent reinforcement learning in a common-pool resource system. In *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 142–149. IEEE.

Zárate, L., Arnaldos, J., and Casal, J. (2008). Establishing safety distances for wildland fires. *Fire Safety Journal*, 43(8) :565–575.