



École doctorale n° 130 : Informatique,
Télécommunications et Electronique

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

Sorbonne Université

Spécialité doctorale “Informatique”

Laetitia Zaleski

Assistant de décision et de négociation par analyse de viabilité - Application à la gestion participative d’espaces protégés

Directeur de thèse : **Jean-Pierre Briot**
Directrice de thèse : **Marta de Azevedo Irving**
Encadrante de thèse : **Isabelle Alvarez**

Jury

Mme Martin Sophie,
M. Bommel Pierre,
Mme Rouchier Juliette,
Mme Yessad Amel,
M. Maudet Nicolas,

Chercheuse (HDR), INRAE/LISC et ISC-PIF
Chercheur (HDR), CIRAD/UPR GREEN
Directrice de recherche, Université Paris-Dauphine - CNRS/ LAMSADE
Maître de Conférences, Sorbonne Université - CNRS/LIP6
Professeur, Sorbonne Université - CNRS/LIP6

Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examinatrice
Examineur

Sorbonne Université
LIP6

4 Place Jussieu, 75005 Paris, France

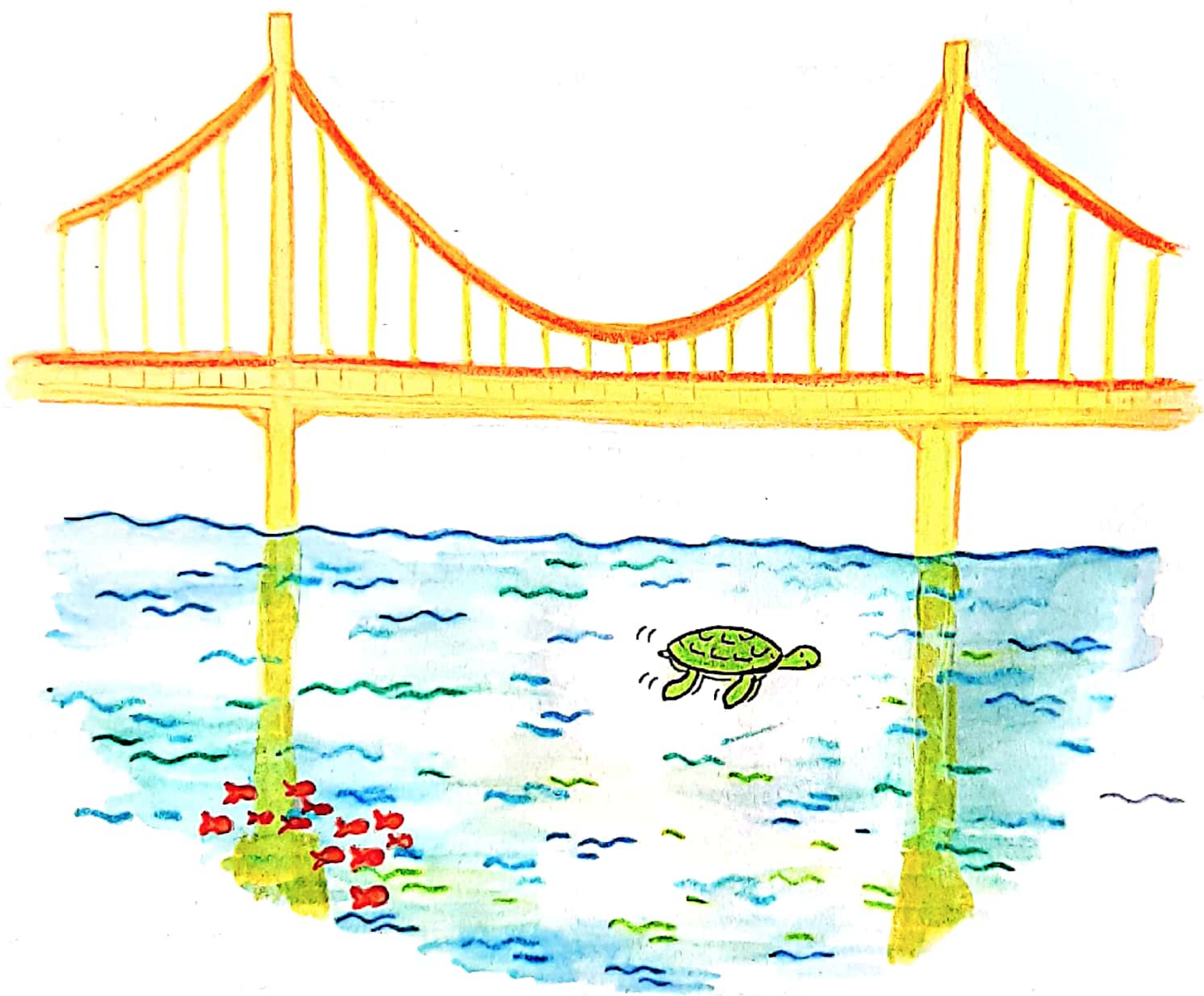


Table des matières

1	Introduction	15
1.1	Biens communs	15
1.1.1	Définition	15
1.1.2	Tragédie des communs : origine et critiques	15
1.2	Développement durable	16
1.2.1	Une notion à cheval sur le temps et l'espace	16
1.2.2	Base conceptuelle et contradictions	17
1.3	Territoires protégés : définitions et exemple d'aires protégées	18
1.3.1	Territoires protégés : définition et répartition	18
1.3.2	Les conflits liés à la protection des territoires	19
1.3.3	Un exemple : les unités de conservation	19
1.3.4	Éducation et territoires protégés	20
2	Problématique	21
2.1	Problèmes récurrents liés aux ressources et territoires partagés	21
2.1.1	Absence de consensus	21
2.1.2	Consensus sur une solution inefficace	22
2.2	Conjugaison d'une approche participative et d'une aide technique	22
2.2.1	Inspirations par rapport à l'existant	23
2.2.2	Une approche fondée sur la viabilité	23
2.3	Gestion des territoires et intérêts divergents : un sujet d'actualité	23
2.3.1	Exemples	23
2.4	Aide à la sensibilisation du grand public	24
3	Illustration : Le cas des réserves extractivistes au Brésil	27
3.1	Contexte	27
3.1.1	Origines historiques	27
3.1.2	Portée juridique	29
3.2	Objectifs principaux des réserves extractivistes	29
3.2.1	Protection des modes de vie des populations locales et de la pêche artisanale	30
3.2.2	Le développement du tourisme sauvage et de l'eco-tourisme	30
3.2.3	Préservation de la biodiversité	31
3.3	L'exemple d'Arraial do Cabo	32
4	Analyse des approches existantes	35
4.1	Techniques d'optimisation	35
4.1.1	Définitions et exemples	35
4.1.1.1	Optimisation multicritère et Front de Pareto	36
4.1.1.2	Choix d'une solution	37
4.1.2	Limites	40
4.2	Jeux de rôles et Jeux sérieux	41
4.2.1	Définitions et concepts	41
4.2.2	Apport et intérêt	41
4.2.3	Principes de Conception	42
4.2.4	SimParc : un exemple d'application	42
4.2.5	Limites et recommandations	42
4.3	Simulations multi-agents	44
4.3.1	Définitions et concepts	44
4.3.2	Exemple : Collectif ComMod, combinaison de systèmes multi-agent et jeu de rôle	45
4.3.3	Limites	47
4.4	Techniques d'aide à la négociation	47

4.4.1	Les différentes approches	47
4.4.2	Les systèmes de support à la négociation	48
4.4.3	Information complète et information incomplète	49
4.5	Viabilité	49
4.5.1	Principe de la viabilité	49
4.5.2	Prise en compte des incertitudes	52
4.5.3	Calcul	53
4.5.3.1	Algorithmes notables	53
4.5.3.2	Algorithme de Patrick Saint-Pierre	54
4.5.4	Exemples d'applications	55
5	Approche proposée : Un assistant pour jeu de rôle informatisé basé sur la théorie de la viabilité	57
5.1	Utilisation du jeu de rôle	57
5.1.1	Scénario d'espace protégé marin	57
5.1.2	Les différents rôles	59
5.1.2.1	L'opérateur de tourisme	60
5.1.2.2	Le pêcheur	62
5.1.2.3	L'écologiste	64
5.2	Conception d'un modèle mathématique pour la gestion d'espace protégé	65
5.2.1	La dynamique continue	66
5.2.2	Les paramètres	66
5.2.3	Comportement de la dynamique	70
5.2.4	Discretisation du modèle	72
5.3	Utilisation de la viabilité	73
5.3.1	Apports et intérêts de cette approche	74
5.3.2	Formuler et résoudre des problèmes de viabilité au niveau individuel	74
5.3.2.1	Calcul de noyaux de viabilité	74
5.3.2.2	Calcul de noyaux garantis	75
5.3.3	Formuler et résoudre des problèmes de viabilité au niveau collectif	76
5.4	Cadre du jeu	79
5.4.1	But du jeu	79
5.4.2	Protocole du jeu	80
5.4.3	Modes de partage d'information	81
6	Implémentation et prototype d'assistant	83
6.1	Introduction au contexte et modification de la dynamique	83
6.2	Propositions d'objectif de gestion personnel et calculs de noyaux individuels	86
6.2.1	Le recueil de l'objectif de gestion personnel	86
6.2.2	Le cas du noyau non vide	87
6.2.3	Le problème du noyau vide	87
6.3	Propositions d'objectifs collectifs de gestion	90
6.3.1	Intersection de contraintes et de contrôles	92
6.3.2	Calcul de noyaux dans l'intersection	93
6.3.3	Le cas des objectifs de gestion incohérents	95
6.3.4	Recherche d'un objectif de gestion alternatif pour tous	96
6.3.5	Choix d'une solution et résumé des efforts fournis	103
6.4	Recherche de noyaux non vides	104
6.4.1	Étapes préliminaires	105
6.4.2	Recherche dichotomique classique	108
6.4.3	Recherches dichotomiques alternatives	109
6.5	Viabilité garantie des objectifs de gestion	113
6.5.1	Noyaux garantis personnels	113
6.5.2	Noyau garanti pour l'objectif de gestion collectif	114

7 Évaluations du prototype	117
7.1 Un nouveau scénario et un nouvel assistant	117
7.1.1 Le scénario agricole	117
7.1.2 Comparaison entre Bridge et Viaduc	119
7.2 Indicateurs et Mesure	123
7.3 Déroulement des sessions	124
7.4 Questionnaires	125
7.4.1 Questionnaire sur le premier assistant	125
7.4.2 Questionnaire comparatif	125
7.5 Analyse des Résultats	126
7.5.1 Comparaison des assistants avec le test de Wilcoxon-Mann-Whitney	126
7.5.2 Comparaison des assistants sur le critère cohérent et consensuel : Test exact de Fisher	127
7.5.3 Analyse qualitative	129
7.5.3.1 Données concernant l'équité dans Bridge et Viaduc	129
7.5.3.2 Pertinence des assistants pour la prise de décision individuelle et collective	130
7.5.3.3 Réflexion sur les noyaux de viabilité	131
7.5.3.4 Objectif pédagogique des jeux	131
7.5.3.5 Intérêt pour le recueil des relaxations relatives de contraintes	134
7.5.3.6 Améliorations possibles et difficultés rencontrées pendant le jeu	134
7.5.4 Bilan des évaluations	135
8 Perspectives	137
8.1 Perspectives techniques et scientifiques	137
8.2 Perspectives d'applications en matière de gouvernance	140
9 Conclusion	143
A Fiches de rôles du scénario agricole	155
B Questionnaires	159
B.1 Premier questionnaire	159
B.2 Questionnaire comparatif	160
C Appel de l'exécutable ViabLab dans Viaduc	163

Remerciements

Le travail derrière cette thèse a été possible grâce aux collaborations, aux discussions inspirantes et au soutien infaillible de nombreuses personnes.

Je tiens tout d'abord à remercier Pierre Bommel, et Sophie Martin, rapporteurs de mes travaux de thèse, ainsi que Amel Yessad et Juliette Rouchier pour avoir évalué mes travaux de thèse et enfin Nicolas Maudet pour avoir présidé ma soutenance. Je les remercie également pour les améliorations qu'ils ont pu apporter à mon manuscrit, pour leur disponibilité, et la discussion scientifique que nous avons pu avoir ensemble.

Un immense merci aux personnes qui m'ont encadré : Isabelle Alvarez, Jean-Pierre Briot et Marta de Azevedo Irving qui m'ont soutenu tout au long de ces trois années. Je les remercie également pour leur patience et leurs vastes connaissances qu'ils m'ont transmises, chacun dans un domaine différent et complémentaire par rapport aux autres. Enfin, merci pour l'attention et des corrections qu'ils ont pu apporter à mon manuscrit, et à leur soutien infaillible pendant sa rédaction.

Je présente mes remerciements à toute l'équipe de l'Institut des Systèmes Complexes et particulièrement à François Lavalee, Romain Reuillon et Mathieu Leclaire pour leur amabilité et leur pédagogie lorsque j'ai été amené à travailler avec eux.

Un grand merci également à toutes les personnes qui ont accepté de participer aux tests de "Viaduc" : Caroline, Isabelle, Richard, Lina, Corentin, Lola, Ketley, Stéphane, Julian, Romain, Valentine, Virginie, Estelle, Marion, Séverine, Solène, Antoine, Élodie, Anaëlle, Camille, Éva, Maéva, Martin et Benjamin. Merci de vous être prêté au jeu (littéralement !), et merci de m'avoir fait rire en donnant des noms loufoques à vos parties. Merci pour vos encouragements, vos remarques et vos critiques précieuses.

Merci à toute l'équipe du Palais de la Découverte avec qui j'ai eu la chance de pouvoir travailler, merci de m'avoir permis de prendre du recul sur mes recherches et de les partager avec le grand public au travers d'expériences extrêmement enrichissantes.

Pour finir, je remercie profondément ma famille qui m'a soutenue inlassablement et encouragée tout au long de mes études et de mon doctorat. Et dans ma famille j'inclus bien évidemment ma fausse-vraie-famille avec qui je ne partage pas de lien de sang, mais avec qui j'ai passé assez de Noël (et d'étés près de l'étang rafraîchissant) pour que ça compte quand même. Merci à mes parents pour leurs précieux conseils et leurs nombreuses relectures. Merci à ma soeur Philippa pour son soutien hors du commun, et sa superbe illustration.

J'aimerais dédier cette thèse à Bruno dont le rayonnement et la bienveillance m'inspireront toujours.

Résumé

La gestion de l'environnement et le développement durable vont souvent de pair avec des conflits liés à une multiplicité de valeurs et de points de vues. Le terme même de "développement durable" est parfois critiqué pour son inhérente contradiction : la croissance économique peut-elle aller de pair avec la durabilité écologique et sociale ?

La bonne gestion des espaces partagés requiert la prise en compte d'une multiplicité d'acteurs ayant chacun leurs valeurs et leurs objectifs. Elle est soumise à deux problèmes récurrents. Le premier est l'absence de consensus, qui laisse un ou plusieurs acteurs sociaux insatisfaits de la solution finale. Le second est un consensus sur une solution inefficace dans sa réponse aux problèmes soulevés. En effet, il arrive que les acteurs sociaux s'entendent sur une politique de gestion qui ne leur permette pas d'atteindre leurs objectifs. Combiner l'aspect participatif avec une aide technique permet d'aborder chacun des deux aspects. Il est possible à la fois d'aider les acteurs dans la prise de décision, tout en aiguillant leur raisonnement vers un résultat cohérent.

Nous nous référons à de précédents outils d'aide à la gestion participative qui s'appuient sur différentes techniques de modélisation (systèmes multi-agents, systèmes dynamiques). Cependant, nos travaux présentent plusieurs aspects novateurs. Afin de fournir une aide technique, nous choisissons d'utiliser la théorie de la viabilité qui propose aux utilisateurs de définir un ensemble de contraintes regroupant les intérêts et objectifs de chacun. Cette méthode possède deux avantages. D'une part, il n'est plus nécessaire d'agréger ou de hiérarchiser les critères comme c'est le cas lors de l'utilisation de techniques d'optimisation par exemple. D'autre part, la viabilité permet la prise en compte d'un horizon temporel infini, impliquant le respect de l'équité intergénérationnelle. Nous utilisons pour la première fois la *viabilité multiutilisateur* qui permet à plusieurs acteurs de rechercher des objectifs de gestion communs, compatibles avec leurs hypothèses personnelles.

La participation active de tous les acteurs aux processus décisionnels est un ingrédient essentiel, afin que les contraintes de chacun soient prises en compte. La participation des acteurs au processus de négociation lui confère un caractère inclusif qu'il ne pourrait avoir si le processus décisionnel restait confiné aux acteurs gouvernementaux traditionnels. Se pose alors la question de la formation de ces acteurs ainsi que la sensibilisation du grand public à ces questions. Les jeux sérieux offrent une approche nouvelle et efficace pour explorer et tester des possibilités d'évolution dans un contexte réaliste, mais sans coût ni risque. Ils nous permettent de quitter le domaine des applications théoriques pour nous rapprocher des applications de terrain dans le domaine de l'environnement. Ils permettent non seulement de susciter l'intérêt, mais aussi de faire entrer les joueurs dans des démarches d'étude de cas ou de résolution de problèmes complexes. Nous nous inspirons des techniques utilisées pour la conception de jeux sérieux afin de conférer un aspect éducatif et de sensibilisation à notre outil pour la gestion participative.

Ce travail de thèse est axé sur la conception, le développement et l'étude de l'impact d'un outil pour la gestion participative basé sur la théorie de la viabilité. Nous avons implémenté un prototype d'assistant informatique concrétisant les idées proposées dans la thèse. Puis, nous avons mené une première expérimentation de son utilisation afin d'analyser son intérêt et les avantages apportés à la décision et à la négociation. Plus précisément, nous avons pu réaliser cette expérimentation à l'aide de sessions de tests avec des utilisateurs humains. Cette évaluation à la fois quantitative et qualitative nous a permis d'étudier l'influence de cet outil sous l'angle de l'aide à décision, de l'aide à la négociation et de la sensibilisation aux enjeux soulevés par le partage des ressources. Une application inspirée du cas des réserves extractivistes brésiliennes nous a permis d'illustrer cette démarche.

Abstract

Environmental management and sustainable development often go hand in hand with conflicts related to a multiplicity of values and points of view. The very term "sustainable development" is sometimes criticised for its inherent contradiction : can economic growth go hand in hand with ecological and social sustainability ?

Good management of shared spaces requires taking into account the multiplicity of stakeholders who each have their own values and objectives. It is subject to two recurring problems. The first is the lack of consensus, which leaves one or more stakeholder dissatisfied with the final solution. The second is consensus on a solution that is ineffective in addressing the problems raised. Indeed, stakeholders sometimes agree on a management policy that does not allow them to achieve their goals. Combining the participatory aspect with technical assistance makes it possible to address both aspects. It is possible both to help the actors in the decision-making process, while at the same time directing their reasoning towards a coherent result.

We refer to previous participatory management support tools which are based on different modelling techniques (multi-agent systems, dynamic systems). However, our work has several innovative aspects. In order to provide technical assistance, we choose to use viability theory, which invites users to define a set of constraints grouping the interests and objectives of each one. This method has two advantages. On the one hand, it is no longer necessary to aggregate or prioritise criteria as is the case when using optimisation techniques for example. On the other hand, viability allows an infinite time horizon to be taken into account, implying respect for intergenerational equity. For the first time, we are using *multi-user viability* which allows several actors to seek common management objectives, compatible with their personal hypotheses.

The active participation of all stakeholders in decision-making processes is an essential ingredient, so that the constraints of each are taken into account. Stakeholder participation in the negotiation process gives it an inclusive character that it could not have if the decision-making process remained confined to traditional government actors. This raises the question of the training of these actors as well as raising the awareness of the general public on these issues. Serious games offer a new and effective approach to exploring and testing possibilities for change in a realistic context, but without cost or risk. They allow us to move away from the field of theoretical applications to get closer to field applications in the environmental field. Not only do they allow us to generate interest, but also to bring players into case study approaches or complex problem-solving. We draw inspiration from the techniques used in the design of serious games in order to give an educational and awareness-raising aspect to our tool for participatory management.

In summary, this thesis work focuses on the design, development and impact study of a tool for participatory management based on sustainability theory. We have implemented a prototype of an IT assistant that gives concrete form to the ideas proposed in the thesis. Then we conducted a first experimentation of its use in order to analyse its interest and the benefits brought to decision making and negotiation. More precisely, we were able to carry out this experimentation with the help of test sessions with human users. This evaluation, both quantitative and qualitative, allowed us to study the influence of this tool in terms of decision support, negotiation support and awareness of the issues raised by resource sharing. An application inspired by the case of Brazilian extractive reservation allowed us to illustrate this approach.

Chapitre 1

Introduction : Du partage des ressources et des territoires

Dans ce chapitre, nous introduisons la notion de *biens communs* et de *développement durable*. Nous étudierons ce qui les lie, puis nous verrons un exemple de ces notions par le biais des territoires protégés brésiliens.

1.1 Biens communs

1.1.1 Définition

L'économiste Paul Samuelson, en 1954, différencie biens privés (réservés à ceux qui payent) et biens publics. Les premiers sont des biens rivaux : un seul peut les consommer une fois achetés. Les biens publics eux, sont à la fois non exclusifs (il n'est pas trivial d'empêcher quelqu'un qui ne paie pas de les consommer) et non rivaux (il est possible de les consommer à plusieurs). Puis, en 1965, James Buchanan ajoute un troisième type de biens : les biens de club, qui ne peuvent être consommés que par les membres d'une association ou d'un club. Quelques années plus tard, Vincent et Elinor Ostrom ajoutent un quatrième type de bien : les biens communs (*common-pool resources*) Ostrom (2010). Pour Elinor Ostrom, un bien commun est un bien géré par les appropriateurs (c'est-à-dire les usagers du bien commun) eux-mêmes.

1.1.2 Tragédie des communs : origine et critiques

La tragédie des biens communs est un modèle de sciences sociales et d'évolution selon lequel des ressources librement disponibles, mais limitées, ne sont pas utilisées efficacement. Elles sont sujettes à une surexploitation, finalement néfaste pour leurs utilisateurs. L'expression "tragédie des biens communs" est attribuée aux considérations de Lloyd (1833) sur le développement de la population. Elle remonte aux droits des roturiers, des agriculteurs qui cultivaient en commun les biens de l'État (en particulier les bergers qui utilisaient conjointement les pâturages). Cependant, Mankiw (2014) note qu'Aristote aurait déjà mis en avant le problème de la tragédie des communs en déclarant :

"Ce qui est commun à tous fait l'objet de moins de soins, car les Hommes s'intéressent davantage à ce qui est à eux qu'à ce qu'ils possèdent en commun avec leurs semblables."

Hardin (1968) propose un modèle basé sur un scénario initialement décrit par Lloyd. Ce modèle peut se résumer ainsi : soit un pâturage dont l'utilisation est partagée par un nombre quelconque d'éleveurs. Chaque éleveur a un nombre donné d'animaux sur ce pâturage. Hardin décrit l'utilité que chaque éleveur a à ajouter un animal de plus à son troupeau dans le champ commun comme étant la valeur de l'animal, tandis que le coût encouru par ce même éleveur est seulement celui de l'animal divisé par le nombre d'éleveurs ayant accès au champ. De ce fait, le bénéfice venant de l'appropriation du plus de ressources communes possible dépasse toujours le coût de l'utilisation de ces ressources. Ainsi, chaque éleveur emmène autant d'animaux que possible paître dans le champ commun pour empêcher, autant que faire se peut, les autres éleveurs de prendre un avantage sur lui en utilisant les ressources

communes. Mais à un certain moment de ce processus d'exploitation des pâturages, la capacité des pâturages à fournir suffisamment de nourriture aux animaux est dépassée, et par conséquent tous les animaux périssent.

Cependant, ce modèle a été fortement critiqué. En effet, l'un des postulats de la tragédie des biens communs est que la communauté est incapable de conclure des accords sur l'utilisation des ressources communes, ou bien est incapable de les respecter. Ainsi la seule solution possible serait d'introduire une entité extérieure à la communauté. Cette entité aiderait la communauté à établir des réglementations et à les faire respecter. En pratique, cela prend la forme soit d'un pouvoir étatique, soit d'acteurs privés motivés par leurs propres intérêts. Cela implique une autre hypothèse contestable : l'acteur privé ou public agira nécessairement de manière rationnelle, dans le sens où il cherchera non seulement à maximiser les profits, mais aussi à préserver la ressource. Cette hypothèse n'est pas nécessairement correcte.

Elinor Ostrom s'est intéressée aux institutions fondées sur la coopération : des terres communales en Éthiopie, des collecteurs de caoutchouc en Amazonie, des pêcheurs aux Philippines, les prairies et forêts de haute montagne (Törbel en Suisse, villages de Hirano, Nagaique et Yamanaka au Japon), les systèmes d'irrigation (Valence, Murcie et Orihuela, Alicante en Espagne) et les communautés d'irrigation (Philippines). Dans tous ces cas l'utilisation collective et auto-organisée des ressources remonte à plus de 100 ans, voire, pour le plus ancien, à 1,000 ans (Ostrom, 2010). Selon Ostrom l'élaboration d'un commun durable à long terme concernant une ressource limitée relève toujours d'une même démarche. Les appropriateurs, se trouvent en interdépendance. Ils se connaissent. Prendre leurs décisions de façon indépendante a deux inconvénients. D'une part les résultats obtenus seront inférieurs à ceux qui seraient procurés dans le cadre d'une stratégie coordonnée. D'autre part la ressource elle-même pourrait finalement être détruite. Afin de recueillir des bénéfices conjoints permanents ils décident de s'organiser. Il s'établit un climat de confiance et un sens de la communauté (Ostrom, 2010).

En 2009, Ostrom obtient le prix Nobel d'Économie pour ses travaux sur les communs, selon les termes du communiqué informant de l'attribution du prix :

Elinor Ostrom a remis en question l'idée reçue selon laquelle la propriété commune est mal gérée et devrait être soit réglementée par les autorités centrales, soit privatisée. Sur la base de nombreuses études sur les stocks de poissons, les pâturages, les bois, les lacs et les bassins d'eau souterraine gérés par les utilisateurs, Elinor Ostrom conclut que les résultats sont, le plus souvent, meilleurs que ce que prévoient les théories classiques. Elle observe que les utilisateurs des ressources développent fréquemment des mécanismes sophistiqués de prise de décision et d'application des règles pour gérer les conflits d'intérêts.

Ainsi, l'expérience montre que l'absence de propriété privée existant sur les ressources naturelles n'est pas nécessairement contraire à leur utilisation durable.

1.2 Développement durable

1.2.1 Une notion à cheval sur le temps et l'espace

Apparue pour la première fois en 1987 dans le rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations Unies, cette expression est décrite ainsi : "le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs". Dans d'autres sources, elle est définie comme le "développement économique et social concilié avec la protection de l'environnement et la conservation des ressources naturelles". On distingue donc d'une part, les questions sociales, environnementales et économiques, d'autre part, la question de la temporalité.

Haughton (1999) résume les idées du développement durable en cinq principes fondés sur l'équité :

- L'équité interespèces (importance de la biodiversité)
- La justice sociale (équité intragénérationnelle)
- L'équité procédurale (traitement des personnes transparent et équitable)
- La responsabilité transfrontalière (équité géographique)
- La "futurité" (équité intergénérationnelle)

En effet, pour être durable, le développement doit pouvoir prendre en compte à la fois le long et le court terme, le proche et le distant. Cela signifie qu'aucune génération particulière ne peut être privilégiée.

À la question d'échelle temporelle, s'ajoute le problème de l'échelle spatiale. Les priorités écologiques peuvent varier en fonction de l'endroit où l'on se trouve sur la planète et il est donc parfois difficile d'adapter les mesures globales à l'échelle locale de manière "environnementalement juste".

Le rapport de Porto (2005) qualifie l'injustice environnementale de mécanisme par lequel les sociétés inégales, d'un point de vue économique et social, font porter le plus grand fardeau des dommages environnementaux du développement sur les populations à faible revenu, les groupes sociaux discriminés, les peuples ethniques traditionnels, les quartiers populaires, les populations marginalisées et vulnérables. Martinez-Alier (2003) souligne comment les dommages et les risques causés par le développement touchent de manière disproportionnée les couches les plus pauvres et les plus vulnérables de la société. Selon lui, les importations de matières premières en provenance des pays relativement plus pauvres se fondent sur un prix qui ne tient pas compte des effets environnementaux négatifs de l'exploitation de ces matières premières. En ce sens l'échange est écologiquement inégal puisque grâce à ces importations les pays relativement plus riches peuvent produire des biens qu'ils revendront plus cher, sans compter les externalités négatives qui incombent aux pays exportateurs.

Zhou et al. (2007) s'opposent à l'idée d'une conscience environnementale universelle apparue notamment avec la tenue de conférences internationales abordant ces questions de développement durable. En effet, les besoins ne sont pas les mêmes selon les cultures ou selon la région du monde. Pour certains groupes d'individus, les besoins matériels, de développement, ou de soins viendront bien avant le fait de réduire la pollution. Cette universalisation fait apparaître une hiérarchisation des problèmes faisant des questions environnementales un problème prioritaire. Ainsi ces auteurs dénoncent la tendance des processus sociaux qui attribuent la dégradation de l'environnement aux populations les plus pauvres, en les élisant comme public cible de l'éducation à l'environnement. Les réflexions sur la hiérarchisation permettent de prendre en compte les conditions réelles des pays.

On peut par exemple penser au cas de l'urbanisation accélérée des pays en voie de développement. Bien que les villes ne représentent que 2 % de la surface de la Terre, elles sont responsables de près de 75 % de la consommation mondiale de ressources. Cette tendance semblerait s'intensifier au cours des prochaines décennies en raison des taux d'urbanisation élevés en Afrique ainsi qu'en Asie. Ces nouvelles mégalo-poles joueront un rôle clé dans la demande énergétique mondiale (Madlener and Sunak, 2011).

1.2.2 Base conceptuelle et contradictions

La définition du rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations Unies a permis de trouver un compromis entre ceux pour qui il était nécessaire de limiter la croissance, et par conséquent la consommation, pour protéger les ressources naturelles, et ceux pour qui cette croissance était indispensable pour réduire la pauvreté.

Cependant, cette définition est considérée comme vague par certains. Selon Redclift (2005), il s'agit d'un "consensus superficiel". Par ailleurs, Mebratu (1998) affirme :

L'imprécision du concept de développement durable, associée à son importance croissante dans les politiques nationales, internationales et des entreprises, a conduit à une grande bataille politique pour influencer notre avenir en liant une interprétation à ce concept. Il en a résulté une grande variété de définitions et d'interprétations qui sont biaisées en faveur des prérogatives institutionnelles et de groupe [...].

Ainsi, le fait qu'il n'existe aucun indicateur permettant de discriminer sur le critère de la "durabilité" laisse le champ libre aux contestations. On se rend aujourd'hui compte que sans définition d'un critère universel, il ne peut y avoir de rassemblement autour du développement durable. Les termes mêmes de "développement durable" sont parfois critiqués pour leur inhérente contradiction : la croissance économique peut-elle aller de pair avec la durabilité écologique et sociale ?

Le terme de *durabilité* est d'ailleurs préféré à celui de *développement durable* par le monde académique ainsi que par les ONGs.

Le débat sur la durabilité dépasse la notion strictement environnementale pour atteindre une dimension plus large, de la citoyenneté dans une perspective démocratique. Avec l'hypothèse que la nature

n'aurait de valeur que si elle est transformée en biens et services, celle-ci a été privée de sa valeur intrinsèque et a commencé à être comprise comme une ressource par la société capitaliste contemporaine (Irving, 2014).

Ainsi, pour tenter de répondre aux questionnements soulevés par cette notion de durabilité, nous devons comprendre dans quelle mesure la société serait prête à repenser ses modes de production et de consommation.

1.3 Territoires protégés : définitions et exemple d'aires protégées

1.3.1 Territoires protégés : définition et répartition

Les territoires protégés sont des sites visant à préserver les écosystèmes ou régions naturelles d'un territoire, ainsi que les zones ou éléments naturels ayant une valeur scientifique, culturelle, éducative, esthétique ou récréative particulière. Les typologies des zones protégées peuvent varier selon les pays. Connus comme le principal instrument de conservation de la nature (Dudley, 2008), ils couvrent environ 15% des surfaces terrestres et 8% des zones maritimes sous la juridiction des pays (Juffe-Bignoli et al., 2014).

Il existe plusieurs types de territoires protégés, qui offrent une protection de différentes intensités et avec différents objectifs spécifiques, selon la législation de chaque pays ou bien selon les accords internationaux. Le nombre et la superficie des territoires protégés ont fortement augmenté depuis l'adoption de la Convention sur la diversité biologique, lors du Sommet de la terre à Rio, au Brésil, en 1992. Une tendance qui s'est dessinée dans plusieurs régions du monde. Selon les chercheurs du Centre mondial de surveillance de la conservation, il existe aujourd'hui 202 467 aires protégées qui couvrent presque 20 millions de kilomètres carrés, soit 14,7% des terres du monde, Antarctique exclu. Ce pourcentage est donc un peu en dessous de l'objectif de 17% établi pour 2020 par la Convention sur la diversité biologique dans le cadre des Objectifs d'Aichi pour la biodiversité.

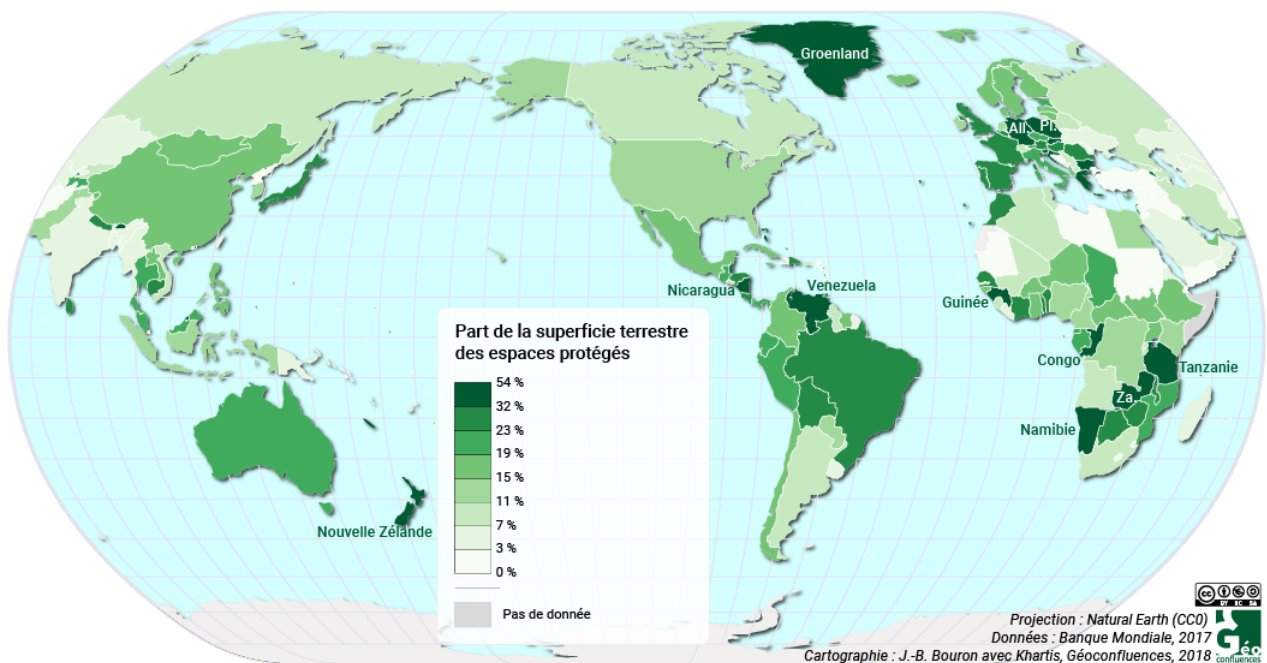


FIGURE 1.1 – Planisphère réalisé par : J.-B. Bouron¹ avec les données de la Banque Mondiale.

Le planisphère de la figure 1.1, illustre l'effort conséquent des pays de l'Amérique du Sud dont le Brésil (29 %) pour créer des espaces protégés.

Ces efforts entraînent pourtant une augmentation des conflits liés à la protection des territoires.

1.3.2 Les conflits liés à la protection des territoires

Pour Little (2001), les conflits sociaux et environnementaux naissent des rivalités entre des groupes sociaux ayant différentes façons d'interagir avec l'environnement. Il y a conflit car il existe différents intérêts dans l'utilisation de l'environnement, qu'il soit matériel ou immatériel. De la même manière, Zhou et Laschefski (2010) soulignent qu'en général, les conflits environnementaux révèlent des modes d'existence différents, remettant en question le concept de développement. Ces auteurs présentent une classification des conflits environnementaux, qui peuvent être :

- Dérivés des inégalités sociales dans l'accès et l'utilisation des ressources naturelles.
- Engendrés par les effets ou impacts environnementaux qui traversent les frontières.
- Liés à l'appropriation capitaliste des territoires de groupes sociaux.

Il appartient alors à la justice environnementale de garantir un accès juste et équitable aux ressources environnementales du pays, un accès aux informations les concernant, ainsi que de favoriser la constitution de mouvements et de modèles de développement alternatifs et démocratiques (Saisse, 2014).

Dans le cas du Brésil, la question de la compatibilité entre la société et la nature tend à être un sujet fondamental des politiques publiques de protection de la nature. Les unités de conservation, par exemple, sont des sources de conflit récurrent.

1.3.3 Un exemple : les unités de conservation

Dans la littérature francophone, les termes "aire protégée", "espace protégé" et "espace naturel protégé" sont utilisés indifféremment. Au Brésil cependant, on parle plutôt de *Unidades de Conservação* (Unités de Conservation) pour évoquer les espaces qui sont protégés pour des considérations écologiques. Les *áreas protegidas* (aires protégées) forment une catégorie plus large incluant les espaces protégés pour des considérations écologiques ainsi que des espaces protégés dans un but de protection des peuples traditionnels et de leurs cultures. Cependant, les Unités de Conservation sont encore exprimées de manière paradoxale, puisque la logique qui prévaut dans la mise en place d'une Unité de Conservation est encore inspirée par la notion du "mythe moderne de la nature intouchée" (Diegues). Cette notion est basée sur la nécessité de "défendre" un environnement naturel contre l'action humaine. Le Système National des Unités de Conservation (SNUC) distingue deux catégories d'unités de conservation. On retrouve d'un côté les espaces protégés plus restrictifs, les *unidades de conservação de proteção integral* (unités de conservation de protection intégrale). Dans celles-ci, seul un usage indirect de la nature y est permis (recherche scientifique, tourisme). De l'autre côté on retrouve les espaces protégés favorables aux activités de développement et à l'usage durable des ressources naturelles : les *unidades de conservação de uso sustentável* (unités de conservation à usage durable).

Irving et al. (2007) soulignent que la fragmentation des politiques publiques et la difficulté de la planification stratégique engendrent de graves problèmes tels que la création d'unités de conservation qui se superposent aux terres indigènes. En effet, la gestion de celles-ci se fait via une politique d'État imposant des intérêts et valeurs à des groupes déjà établis dans ces zones. Ce sont ces groupes qui sont impactés par les politiques de conservation : les habitants indigènes, les riverains, les pêcheurs, les extractivistes², etc. Des groupes de populations traditionnelles qui s'étonnent d'être jugés pour avoir menacé la nature avec laquelle ils ont toujours vécu, et dont ils doivent s'extraire afin qu'elle puisse être garantie comme le patrimoine de tous (Saisse, 2014).

Les mêmes terres peuvent simultanément être privilégiées par les politiques liées à la protection de la nature, à la réforme agraire, à l'agroalimentaire, à l'énergie et aux infrastructures. Plus problématique encore est la confrontation directe entre les priorités de protection de la nature et les stratégies de développement consolidées par les investissements gouvernementaux. Ainsi, un même territoire est priorisé dans les politiques publiques à des fins contradictoires. On pense par exemple à la création d'unités de conservation qui se superposent aux terres indigènes (Irving, 2010).

Face aux enjeux actuels, et s'il l'on admet qu'il n'y a pas de changement sans éducation, l'acquisition d'une base de réflexion sur la durabilité est nécessaire.

2. Selon les documents législatifs brésiliens, l'extractivisme est un « système d'exploration basé sur la collecte et l'extraction durable (ou soutenable) de ressources naturelles renouvelables » ("extrativismo : sistema de exploração baseado na coleta e extração, de modo sustentável, de recursos naturais renováveis" – Loi du SNUC).

1.3.4 Éducation et territoires protégés

Une critique fréquente concernant l'éducation à la durabilité est son instrumentalisation : on éduque pour quelque chose. Comme si l'éducation servait à créer des compétences, des capacités, des aptitudes et des comportements sans être nécessairement liée à la réflexion sur le monde et à l'action citoyenne (Loureiro, 2014). Ceci est fortement contesté par les enseignants qui remettent souvent en question l'excès d'"éducation" créé et rendu obligatoire dans les écoles. Ces écoles sont obligées de se conformer au contenu des programmes, ce qui surcharge le travail d'enseignement et les élèves. La critique ne porte pas sur l'importance des thèmes, mais sur le traitement qui doit leur être réservé, en négligeant la nécessité de s'éduquer tout au long de sa vie et dans une démarche citoyenne (Santos, 2013)

Au début de son introduction, le traité des Journées internationales de l'éducation à l'environnement de Rio-92³, approuvé à l'unanimité par les plus de 500 éducateurs de tous les continents, déclare :

Nous pensons que l'éducation environnementale pour une durabilité équitable est un processus d'apprentissage continu basé sur le respect de toutes les formes de vie. Cette éducation affirme des valeurs et des actions qui contribuent à la transformation humaine et sociale et à la préservation écologique. Elle encourage la formation de sociétés socialement justes et écologiquement équilibrées qui entretiennent entre elles une relation d'interdépendance et de diversité. Cela nécessite une responsabilité individuelle et collective au niveau local, national et planétaire. [...]

Nous considérons que l'érosion des valeurs fondamentales, l'aliénation et la non-participation de presque tous les individus à la construction de leur avenir sont inhérentes à la crise. Il est fondamental que les communautés planifient et mettent en œuvre leurs propres alternatives aux politiques actuelles.⁴

Ces déclarations insistent sur l'urgence d'une meilleure éducation à l'environnement et aux questions de durabilité afin que les communautés puissent reprendre la gouvernance des biens qu'elles partagent.

Les politiques menées par ICMBio⁵ et l'IBAMA.⁶ visent à mieux s'adapter aux pressions de l'éducation à l'environnement et aux exigences légales pour promouvoir l'environnement comme un bien d'usage commun. Par la participation populaire ainsi que la mobilisation et l'organisation sociale, cette transformation se fait d'une manière compatible avec les directives de développement du gouvernement fédéral brésilien, en mettant davantage l'accent sur les partenariats, les pratiques durables, les engagements individuels et la résolution des problèmes (Loureiro, 2014). Ainsi, il est nécessaire de réfléchir à la mesure dans laquelle ces politiques remplissent leurs engagements envers le public et en même temps favorisent la durabilité. Le budget de l'éducation étant réduit, l'Etat semble être dans l'incapacité de rendre viable des programmes à l'échelle nationale ce qui entraîne la naissance de partenariats public-privé. Selon Loureiro (2014), il est nécessaire d'assurer une plus grande articulation au sein des agences de l'environnement et de l'éducation. Pour cet auteur, cet aspect est crucial pour échapper à une situation qui oblige ce type de partenariats, allant à l'encontre de l'indépendance des institutions de l'État.

3. Jornada Internacional de Educação Ambiental na Rio-92.

4. Traduit du portugais : "Consideramos que a educação ambiental para uma sustentabilidade equitativa é um processo de aprendizagem permanente, baseado no respeito a todas as formas de vida. Tal educação afirma valores e ações que contribuem para a transformação humana e social e para a preservação ecológica. Ela estimula a formação de sociedades socialmente justas e ecologicamente equilibradas, que conservam entre si relação de interdependência e diversidade. Isto requer responsabilidade individual e coletiva em nível local, nacional e planetário. [...] Consideramos que são inerentes à crise a erosão dos valores básicos e a alienação e a não participação da quase totalidade dos indivíduos na construção de seu futuro. É fundamental que as comunidades planejem e implementem suas próprias alternativas às políticas vigentes."

5. L'institut Chico Mendes de conservation de la biodiversité (ICMBio) est une structure à régime spécial liée au Ministère de l'Environnement et intégrée dans le système national de l'environnement visant à gérer les réserves écologiques et biologiques de tout le Brésil.

6. L'Institut brésilien de l'environnement et des ressources naturelles renouvelables (IBAMA) est une autorité fédérale brésilienne dépendante du Ministère de l'Environnement.

L'ICMBio est l'agence gouvernementale prioritairement responsable de la gestion des espaces protégés et de la conservation de la biodiversité, tandis que l'IBAMA a un rôle plus général sur la politique environnementale, ce qui inclut par exemple les questions liées à la fiscalisation.

Chapitre 2

Problématique : Décisions consensuelles et techniquement fondées

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur les différents problèmes liés à la gestion des ressources et territoires partagés. Nous verrons comment nous nous sommes inspirés des méthodes existantes afin de construire une nouvelle approche répondant spécifiquement aux difficultés soulevées. Enfin, nous verrons en quoi notre approche est ancrée dans l'actualité et peut aider non seulement la prise de décision, mais aussi la sensibilisation du grand public aux questions de gestion durables.

2.1 Problèmes récurrents liés aux ressources et territoires partagés

Les outils et méthodes de modélisation et décision participatives mis à disposition des acteurs sociaux sont nombreux et divers (Voinov et al., 2018). En effet, en termes de procédures de prise de décision, il n'existe pas une manière uniforme pour aborder les problématiques de durabilité et d'utilisation des territoires. L'application d'un processus d'expertise traditionnel n'est pas suffisante (Funtowicz and Ravetz, 1993). Selon ces auteurs l'incertitude ne doit pas être bannie mais gérée, l'implication des acteurs est plus importante pour la décision : les savoirs scientifiques ne constituent qu'un maillon de la décision. Les panels de citoyens, les ateliers multi-acteurs, les interfaces experts/décideurs et les forums de réflexion sont autant d'exemples d'approches participatives utilisées dans le champ de la prise de décision en matière de durabilité et de gestion de territoires (Armour, 1995). Malgré cette variété des approches, l'objectif reste le même : inclure les acteurs sociaux dans la prise de décision. Cependant, ces approches sont soumises à deux problèmes récurrents. Le premier est l'absence de consensus, qui laisse un ou plusieurs acteurs sociaux insatisfaits de la solution finale. Le second est le risque d'aboutir à un consensus sur une solution inefficace dans sa réponse aux problèmes soulevés.

2.1.1 Absence de consensus

Dans un processus de décision participatif, plusieurs parties prenantes sont invitées à collaborer afin de résoudre un problème commun. Dès l'origine du processus participatif, il est préférable que les différents acteurs soient dans un état d'esprit collaboratif, le cas contraire risquant de mener à des attitudes d'opposition pure et simple. La littérature sur la résolution des conflits suggère deux influences principales sur la résolution des conflits. La première est l'ampleur de l'animosité entre les participants au début du processus : les participants sont-ils ouverts au dialogue ? La seconde est la question de l'approche proposée : dans quelle mesure le processus pourrait-il entraîner une résolution des conflits ? D'après une analyse quantitative, le processus semble être plus important que l'état d'esprit des participants dans la résolution des conflits, mais pour ces deux variables, les données sont limitées (Beierle and Konisky, 1999). Carpenter (1997) étudie un exemple de conflit relativement mal résolu : celui de la gestion de la rivière de Detroit aux États-Unis. Les commentaires des participants ont été résumés ainsi :

Il a été fait référence aux "camps" que les gens ont pris pendant les réunions ; un sentiment de "nous" contre "eux" était omniprésent. Chacun avait le sentiment que les autres avaient des intentions cachées. Le niveau de méfiance, de manque de coopération et de division entre les parties s'est accru.

Ce cas est loin d'être isolé : un certain nombre d'analyses de la gestion environnementale ont noté la tendance apparente des questions environnementales à se retrouver devant les tribunaux (Chertow, 1997).

Cependant, plusieurs mesures ont été identifiées comme pouvant favoriser le consensus. Ostrom (1990) suggère que la prise de décision en collaboration fonctionne mieux lorsque le groupe est petit et homogène. Beierle and Konisky (1999) prône d'une part les processus de décision encourageant une communication ouverte et équitable entre les parties prenantes, en mettant l'accent sur la délibération et le consensus, et d'autre part les processus permettant une bonne communication à double sens entre les participants et les scientifiques.

2.1.2 Consensus sur une solution inefficace

Le second écueil dans lequel peuvent tomber les processus de décisions participatives sont des consensus sur une solution inefficace. Les processus de consensus sont philosophiquement ancrés dans le *constructivisme social* (Hikins, 1989). Dans une perspective constructiviste, une idée peut être acceptée par consensus dans une communauté et ainsi être considéré comme "réalité" pour cette communauté. Les différentes communautés parviendront donc potentiellement à un consensus sur des idées différentes, créant ainsi des "réalités" différentes. On peut par exemple imaginer que pour des populations traditionnelles, une exploitation raisonnable de la nature ne constitue pas un danger écologique, alors que pour certaines organisations toute interaction humaine avec un écosystème constitue un danger pour celui-ci. Ainsi, deux "réalités" se forment. Une approche de la prise de décision environnementale ne prenant en compte qu'un des points de vue semble intuitivement maladroite. Selon (Czech, 2000) cette approche unidimensionnelle a été utilisée pour légitimer les modèles existants de dégradation de l'environnement. Par exemple, l'affirmation selon laquelle la conservation de l'environnement peut se conjuguer aux modèles de croissance économique actuels n'est valable que si la "réalité" est socialement construite de manière à négliger la recherche écologique.

Bien que les processus de consensus n'aboutissent pas nécessairement à un maintien du statu quo, ils tendent à aller dans ce sens (Peterson et al., 2005). En effet certains défenseurs de l'environnement avertissent que les conseils de planification environnementale vont produire des décisions qui font autorité et qui sont influencées par les intérêts économiques locaux (Echeverria, 2000). Cet auteur demande :

Où nous mènera finalement la voie qui remplace l'administration et la surveillance efficaces de nos lois par des groupes de consensus bavards et de faux partenariats ?

Comme ces décisions ont été prises par un comité de citoyens, les représentants du gouvernement ainsi que les agences de régulation environnementale peuvent trouver politiquement malaisé de les contester. Bien que le fait de confier à un groupe de citoyens des décisions environnementales puisse être un outil puissant pour sortir de l'impasse politique, il peut aussi ratifier des décisions égoïstes qui favorisent les membres les plus puissants ou les plus persuasifs du groupe de collaboration plutôt que le grand public (Kenney, 2000). Cependant prendre des décisions politiques en matière d'environnement sans solliciter la participation du public qui subira les conséquences de ces décisions semble inconsideré. Selon Peterson et al. (2005), un modèle décisionnel qui privilégie l'argumentation plutôt que le consensus offre un moyen pratique d'impliquer le public dans la politique environnementale sans renoncer à la science.

2.2 Conjugaison d'une approche participative et d'une aide technique

Afin de palier les problèmes soulevés dans la section précédente, nous proposons une approche participative axée sur la négociation couplée à une aide technique fournissant une base scientifique pour cette dernière. Nous nous référons à de précédents outils d'aide à la gestion participative qui s'appuient

sur différentes techniques de modélisation. Nous verrons que la particularité de notre approche nous permet de contourner les difficultés liées au consensus vues précédemment : constructivisme social, pression de certains participants, absence de cohérence scientifique.

2.2.1 Inspirations par rapport à l'existant

Depuis la fin des années 1990, le collectif ComMod réunit plusieurs chercheurs ayant développé une approche participative afin de soutenir les négociations sur les pratiques collectives dans le cadre de la gestion des ressources naturelles. Leur méthode comprends le couplage des systèmes multi-agents et des jeux de rôle avec les acteurs concernés. En effet, les jeux de rôles sont particulièrement bien adaptés pour favoriser la communication entre les acteurs. Grâce à cette méthode il est possible de réaliser plusieurs simulations, et d'alterner avec des étapes de discussions entre acteurs. Cela permet aux différents joueurs de mieux comprendre l'impact de leurs décisions sur leur environnement. Depuis sa création, cette méthode a été utilisée pour traiter différents types de conflits, comme la gestion de l'eau (De Doninck et al., 2015) ou les systèmes de cultures (Bos et al., 2020).

La seconde inspiration principale de notre approche est le jeu SimParc (Briot et al., 2007). SimParc propose une méthode participative appliquée à la gestion des ressources naturelles renouvelables dans un parc fictif Brésilien. Cette méthode s'appuie sur un jeu de rôle pour aider les acteurs à comprendre les différents points de vue et aider à la négociation dans le but de favoriser la décision collective. SimParc se base sur un processus de négociation qui se déroule dans le conseil du parc. Ce conseil est consultatif et réunit des représentants des différents acteurs (communautés locales, entreprises touristiques, associations écologistes non gouvernementales...). Nous nous pencherons plus en détail sur ces inspirations dans le chapitre 5.

2.2.2 Une approche fondée sur la viabilité

Nous reprenons ces idées d'approches participatives couplées à une aide technique et à un jeu de rôle, tout en les adaptant à la questions des aires protégées Brésiliennes. Ainsi, notre approche consiste en un assistant pour la négociation utilisant la théorie de la viabilité (Aubin, 1991), de manière individuelle et collective. L'utilisation de la théorie de la viabilité est alliée au jeu de rôle et permettra d'analyser de manière technique et objective les solutions potentielles. D'autre part, nous introduisons la *viabilité multi-utilisateur* qui permet à plusieurs acteurs de calculer si leurs objectifs concernant la réserve naturelle et leurs politiques de gestion sont compatibles les uns avec les autres.

Ainsi, notre outil propose un jeu de rôle s'appuyant un modèle mathématique permettant de prendre des décisions cohérentes avec le modèle choisi. Une innovation de cette approche est la possibilité pour les participants d'avoir des modèles différents. Les joueurs n'ont pas à atteindre un consensus sur le modèle proposé. En effet, nous verrons qu'il est possible que les joueurs trouvent un terrain d'entente sur les objectifs à atteindre, et sur les moyens de les atteindre, tout en ayant une vision différente du modèle. Cette approche sera détaillée dans le chapitre 6.

2.3 Gestion des territoires et intérêts divergents : un sujet d'actualité

Notre processus d'aide à la décision ne s'adresse pas uniquement aux parties prenantes déjà investies, mais s'applique également à la sensibilisation du grand public aux questions de gouvernance, toujours plus pertinentes.

2.3.1 Exemples

La gestion des territoires partagés est un problème qui revient souvent dans l'actualité. On peut penser notamment au cas de l'ours d'Ariège en juin 2020. Dans cette affaire, un ours brun fut retrouvé mort dans les Pyrénées, portant des traces de tirs par balle. Pratiquement disparu au début des années 1990, l'ours brun fut réintroduit dans les Pyrénées en 1991. Cette réintroduction provoque cependant des tensions avec les éleveurs, qui estiment leur présence incompatible avec l'activité pastorale. Ainsi se pose la question de la gestion des estives (c'est-à-dire le pâturage de montagne). Eychemme (2020) écrit :

Ainsi, la plus ou moins grande proximité des élus avec le monde pastoral pourra infléchir l'action des gestionnaires d'estive "collectivités" vers une logique plus sectorielle ou, a contrario, très éloignée du monde de pensée des éleveurs en matière de développement touristique ou de position par rapport aux réintroductions d'ours par exemple. Les profils des éleveurs, pour leur part, peuvent influencer le niveau de prise en compte des enjeux territoriaux [...] il apparaît que le statut d'ayant droit ou d'extérieur peut jouer un rôle non négligeable dans la définition des modalités de gestion.

Il semble donc que la gestion de ces espaces partagés se fasse au cas par cas, sans politique commune ni approche systématique Ostrom (2010).

On peut aussi évoquer les débats sur l'utilisation des pesticides corrélés à la disparition des abeilles. Bien que les pesticides les plus nocifs soient interdits depuis fin 2018, les "Tests Abeilles" que les industriels passent avant de commercialiser leurs pesticides font débat. Depuis des années, l'EFSA (l'autorité européenne de sécurité des aliments) demande à l'Europe de remettre à jour les conditions d'évaluation des risques des pesticides. Si le principal contrôle porte sur la toxicité à court terme sur les abeilles adultes, les recherches montrent que les insecticides peuvent avoir d'autres effets néfastes, notamment la contamination des sols (Humann-Guillemot et al., 2019).

Enfin, un dernier exemple de gestion des territoires partagés revenant souvent à l'actualité est la question des différentes formes de pêche. On peut par exemple citer le chalutage en eaux profondes, pour lequel les chaluts raclent le fond des océans avec des filets lestés. Toutes les espèces capturées sont ensuite remontées à la surface. En 2016, l'Union européenne interdit ce type de pêche à plus de 800 mètres.

Au cours de ce manuscrit, nous prendrons l'exemple des réserves marines extractivistes, détaillé au prochain chapitre, afin d'illustrer notre approche. Cependant, notons que le formalisme qui nous décrirons peut s'appliquer à tous les exemples cités précédemment.

2.4 Aide à la sensibilisation du grand public

Grâce à notre outil, utilisé sous la forme d'un jeu sérieux, nous pensons qu'il est de plus possible d'éduquer et de sensibiliser le grand public à la gestion de ces espaces partagés. Un processus décisionnel participatif peut aussi avoir des effets sur la confiance des différents acteurs dans les institutions (Van den Hove, 2001). La participation du public, de par la confrontation des divers points de vue, permet de prendre conscience de la complexité associée aux problèmes d'environnement et aux décisions qui s'y rapportent.

Cependant, des approches participatives peu appropriées ou mal gérées peuvent mener à une augmentation de la méfiance des acteurs envers les autorités, voire entre les différents acteurs (Irvin and Stansbury, 2004). Beierle and Konisky (1999) met cela en évidence dans le cas d'un processus participatif pour la réhabilitation environnementale d'un site militaire californien. Ce processus consistait en un comité consultatif composé de divers acteurs et dont le rôle était l'éducation du public et la recherche d'un consensus sur les décisions. L'expérience fut peu concluante, elle ne permit pas d'établir un niveau de confiance suffisant entre participants et vis-à-vis des autorités pour que puisse s'instaurer un dialogue. Ceci amena une méfiance accrue, en particulier vis-à-vis des institutions. Le choix du processus de sensibilisation est donc primordial.

Les progrès technologiques facilitent l'incorporation d'informations par le biais de jeux afin d'augmenter les expériences participatives. Les citoyens demandent de plus en plus à être impliqués dans les décisions de planification qui les concernent, eux et leurs communautés, à des échelles allant du local au mondial. Cela exige des changements dans la façon dont les modèles sont construits, présentés et diffusés. Les citoyens sont moins intimidés par les experts et les autorités externes, et ils sont de plus en plus conscients de leurs propres capacités à contribuer aux processus de planification, y compris aux modèles (Voinov et al., 2016). Des changements significatifs ne peuvent se produire sans des transformations dans le comportement et les perceptions des citoyens. Les modèles peuvent jouer un rôle important pour guider le comportement humain, ainsi que pour diffuser et accroître les connaissances de la société.

Avec notre outil, et dans une volonté de médiation des connaissances, nous proposons à différents joueurs de participer à la gestion d'un territoire protégé. À travers l'attribution de rôles, les joueurs peuvent comprendre différents points de vue, et l'ajout de l'aide technique rassure quant à la qualité des solutions proposées. Cela peut donc permettre de casser le mythe d'une activité humaine

nécessairement contraire à la préservation de la nature. Ainsi, notre processus d'aide à la décision peut être vu comme un jeu d'introduction à plusieurs notions comme le développement durable, la gouvernance des biens communs, l'aide à la décision ainsi qu'à la négociation et la théorie de la viabilité.

Ce travail de thèse est axé sur la conception, le développement et l'étude de l'impact d'un assistant fondé sur la théorie de la viabilité, couplé à un jeu sérieux. Nous étudierons son influence sous l'angle de l'aide à décision, de l'aide à la négociation et de la sensibilisation aux enjeux soulevés par le partage des ressources. Une application au cas des réserves extractivistes brésiliennes permettra d'illustrer cette démarche.

Chapitre 3

Illustration : Le cas des réserves extractivistes au Brésil

Le terme *réserve extractiviste* vient du portugais *reserva extrativista* utilisé pour désigner les territoires protégés acceptant l'utilisation de produits issus de la nature : exploitation forestière, formes traditionnelles de pêches et de chasses, cueillette... Dans ce chapitre, nous verrons quels sont les objectifs et origines historiques de ce type de réserves et quelle est leur place au niveau de la juridiction Brésilienne. Puis nous nous pencherons sur l'exemple d'Arraial do Cabo, réserve extractiviste marine, exemple que nous reprendrons au fil des chapitres.

3.1 Contexte

La création de réserves extractivistes répond d'une part aux pressions internationales pour la réduction du défrichement de la forêt amazonienne, et d'autre part aux revendications des travailleurs extractivistes. Au sommet de la Terre de Rio 92, les réserves extractivistes sont présentées comme une exploitation durable de l'Amazonie. Ces réserves sont construites en opposition à l'exploitation industrielle de l'Amazonie et ont acquis un statut de champ d'expérimentation.

3.1.1 Origines historiques

À la fin du XIXe siècle (1870/1890), les habitants du Nord-Est du Brésil fuient la sécheresse et arrivent dans l'État de l'Acre (figure 3.1a). Les premiers *seringais*, exploitations d'hévéas (figure 3.1b), se forment. En 1912, la Malaisie concurrence la production brésilienne de caoutchouc en proposant des prix beaucoup plus attractifs pour les acheteurs internationaux. La première grande crise de l'industrie du caoutchouc se produit.

Les *seringueiros* qui travaillent dans les exploitations Brésiliennes abandonnent en partie les plantations. Ils commencent alors à chasser et à cultiver des terres, ce qui complexifie progressivement l'économie extractiviste de la forêt.

Pendant la Seconde Guerre mondiale, le Japon occupe la Malaisie et coupe l'approvisionnement en caoutchouc des Alliés. Les États-Unis, en partenariat avec le gouvernement Brésilien, financent alors un grand programme de réactivation des seringais amazoniens. Les habitants du Nord-Est sont alors recrutés pour y travailler, ce qui déclenche la deuxième grande vague de migrants vers l'Amazonie.

Avec la fin de la guerre, la Malaisie redevient l'option privilégiée, mais l'économie du caoutchouc au Brésil est maintenue notamment grâce au monopole d'État.

En 1964, les militaires imposent une dictature au Brésil qui durera jusqu'en 1985. Afin d'affirmer le rôle de l'État et d'ouvrir le pays à la modernité, de grands projets sont lancés (Becker et al., 1990). Certaines institutions et lois de ce gouvernement sont encore actives aujourd'hui comme le Statut



(a) État de l'Acre au Brésil.



(b) Arbre hévéa, le latex se récolte en faisant une incision de l'écorce du tronc.

de la terre¹, la Banque centrale du Brésil ou le Code minier². Dans les années 1970, les plans de développement de l'Amazonie commencent, et c'est à ce moment que les groupes du Sud arrivent dans l'État d'Acre pour acquérir des terres des anciens caoutchoutiers. L'ouverture de routes et l'avancement des fronts pionniers³ menacent la forêt amazonienne ainsi que les populations indigènes.

En 1976, Chico Mendes organise les premières manifestations pacifiques contre le défrichement de l'Amazonie : les familles de *seringueiros* (ouvriers chargés de la collecte du caoutchouc) font face aux ouvriers chargés d'ouvrir les champs des grandes *fazendas* (domaine agricole consacré aux cultures ou utilisé pour l'élevage de bétail). Fils de *seringueiro* et *seringueiro* lui-même, Chico Mendes est une figure emblématique de l'écologie au Brésil. Ses actions permettront la création des premières réserves extractivistes.

Depuis la fin des années soixante-dix, la situation des *seringueiros* est de plus en plus difficile notamment à cause du déboisement de l'Amazonie pour le développement de l'agriculture et de l'élevage. Les politiques de l'État semblent aller vers la destruction de la forêt et de plus en plus d'usines de traitement du caoutchouc ferment. Avec l'avancée des routes, les terres utilisées depuis un siècle par les *seringueiros* brûlent.

La renommée de Chico Mendes s'étend lorsqu'il se présente aux élections législatives de l'Acre aux côtés du Parti des Travailleurs, dirigé par le syndicaliste Lula da Silva⁴. En 1985, à Brasília, le *Conselho nacional dos seringueiros* (Conseil National des Seringueiros) est créé. En janvier 1987,

1. Le statut de la terre (du portugais *Estatuto da Terra*) est la manière dont l'utilisation, l'occupation et les relations foncières au Brésil sont légalement réglementées. Selon le statut de la terre, créé en 1964, l'État a l'obligation de garantir le droit d'accès à la terre pour ceux qui y vivent et y travaillent.

2. Le Code minier (du portugais *Código de Mineração*) est une loi fédérale brésilienne qui régit l'administration des ressources minérales, de l'industrie de la production minérale et de la distribution ainsi que du commerce et de la consommation des produits minéraux au Brésil.

3. Un front pionnier est un mécanisme d'extension des surfaces cultivées visant l'augmentation de la production agricole.

4. Lula da Silva fut président de la République au Brésil de 2003 à 2011.

Chico Mendes interpelle la commission des Nations Unies pour dénoncer les dommages causés par la construction de la route transamazonienne. Deux mois plus tard, il est invité aux Etats-Unis et prononce un discours devant le Sénat américain et à la réunion de l'une des banques de financement du projet de déforestation : la Banque Inter-américaine de Développement. Le financement de ces projets de déforestation est suspendu et Chico Mendes est accusé par les agriculteurs et les politiciens locaux de nuire au progrès. Son combat est pourtant médiatisé à l'international. Les mouvements écologistes trouvent dans les paroles de Chico Mendes une solution durable pour la gestion de l'Amazonie. En 1988, Chico Mendes est assassiné à l'âge de 44 ans. En 1990, le cadre juridique des réserves extractivistes est décrit et quatre réserves sont établies. Les réserves extractives ne sont pas seulement un mode d'exploitation de ressources soutenables mais aussi une reconnaissance du mode de vie traditionnel. Plusieurs chercheurs se penchent alors sur le sujet et les points de vue s'opposent : si pour Allegretti et al. (1990) les réserves extractivistes sont une solution pour toute l'Amazonie, Homma (1989) ne leur prédit aucun avenir.

Aujourd'hui, si la plupart des réserves extractivistes sont terrestres, on remarque néanmoins une accélération dans la création de réserves marines. Les réserves extractivistes marines proviennent des revendications des pêcheurs et populations extractivistes de la mer du nord-est et du sud-est. En 1997, la première réserve extractiviste marine du Brésil est créée à Arraial do Cabo, dans l'état de Rio de Janeiro, pour protéger la communauté des pêcheurs à la senne⁵ et les ressources dont dépend leur subsistance (Da Silva, 2004). Les méthodes de pêche durable utilisées ont justifié la création de la réserve.

Aujourd'hui, selon le ministère de l'Environnement, on compte plus de 200 réserves extractivistes au Brésil. Elles sont gérées par l'Institut Chico Mendes pour la conservation de la biodiversité (ICMBio).

3.1.2 Portée juridique

La loi brésilienne pour les espaces protégés établit deux types d'espaces protégés : ceux où la protection est intégrale (comme par exemple les parcs nationaux et réserves écologiques) et ceux où l'usage durable est autorisé, dont les réserves extractivistes font partie. Afin de leur permettre de répondre aux différents intérêts de la société, les Unités de Conservation doivent être gérées avec une participation sociale. Il existe différents organes de gestion : les groupes d'habitants sans organisation formelle, des associations d'habitants, les institutions de gestion, les responsables légaux de l'unité (liés à ICMBio) et les conseils délibérants. Dans le cas des réserves extractivistes, le conseil est décisionnaire et est composé en majorité de membres des populations locales.

En 2000, un Système National d'Unités de Conservation de la nature (SNUC) est instauré dans le but de répondre aux enjeux soulevés par la Convention sur la diversité biologique (Irving, 2012). Il s'agit d'un ensemble de normes et de procédures officielles permettant la gestion des unités de conservation. Le SNUC a pour mission de veiller à ce que les différentes populations, les habitats et les écosystèmes soient représentés sur le territoire national et dans les eaux relevant de sa juridiction. À cette fin, il est géré par les trois sphères du gouvernement (fédéral, d'un état et municipal).

La gestion des réserves extractivistes doit reposer sur des instruments spécifiques de planification. Un plan d'utilisation communautaire peut apporter des normes pour l'utilisation des ressources naturelles et des règles de coexistence. Il est construit de manière participative par les habitants et librement accessible au public. Avant l'approbation de la loi SNUC, le plan d'utilisation exerçait partiellement le rôle actuellement exercé par le plan de gestion de l'unité (Federal, 2007). Pour être applicables, des règles de coexistence doivent être simples à comprendre et à contrôler, et prévoir des sanctions en cas de non-respect. Le processus d'élaboration du plan de gestion permet aux communautés de discuter et d'élargir ces règles de coexistence et d'utilisation des ressources naturelles.

3.2 Objectifs principaux des réserves extractivistes

Selon le site du ministère de l'environnement Brésilien, le SNUC a les objectifs suivants :

5. La pêche à la senne est une technique de pêche très ancienne qui consiste à capturer les poissons à la surface en pleine eau en les encerclant à l'aide d'un filet de pêche appelé senne.

- Contribuer à la conservation des variétés d'espèces biologiques et des ressources génétiques sur le territoire national et dans les eaux territoriales
- Protéger les espèces menacées
- Contribuer à la préservation et à la restauration de la diversité des écosystèmes naturels
- Promouvoir le développement durable à partir des ressources naturelles
- Promouvoir l'utilisation des principes et des pratiques de conservation de la nature dans le processus de développement
- Protéger les paysages naturels et peu altérés d'une beauté unique
- Protéger les caractéristiques pertinentes de nature géologique, morphologique, géomorphologique, spéléologique, archéologique, paléontologique et culturelle
- Récupérer ou restaurer les écosystèmes dégradés
- Fournir des moyens et des incitations pour les activités de recherche scientifique, les études et la surveillance de l'environnement
- Valoriser économiquement et socialement la diversité biologique
- Promouvoir l'éducation et l'interprétation de l'environnement et des loisirs en relation avec la nature
- Protéger les ressources naturelles nécessaires à la subsistance des populations traditionnelles, en respectant et en valorisant leurs connaissances et leur culture et en les promouvant sur le plan social et économique

Dans la suite de cette thèse, nous nous intéressons particulièrement à trois objectifs : la protection des populations traditionnelles, la préservation de la biodiversité, et la valorisation économique de la biodiversité, par le biais du tourisme.

3.2.1 Protection des modes de vie des populations locales et de la pêche artisanale

Les réserves extractivistes sont occupées par des *populations traditionnelles*, qui correspondaient initialement aux seringueiros de l'Amazonie. Aujourd'hui, le terme recouvre d'autres groupes, comme les collecteurs de noix du Brésil (les *castanheiros*), les collecteurs d'autres types de fibres (comme les *piçabeiros*) ou les populations riveraines (d'un cours d'eau) traditionnelles (les *ribeirinhos*). Ces populations traditionnelles ont en commun un passé de faible impact environnemental et un intérêt à maintenir ou à reprendre le contrôle du territoire qu'ils exploitent (Cunha, 2001). Les zones forestières initialement destinées à l'usage individuel des familles sont maintenant des zones à usage communautaire, avec pour priorité l'exploitation par ceux qui n'ont pas d'autres sources de revenus. L'agriculture est pratiquée dans une zone communautaire, où chaque résident a droit à une parcelle. Les pâturages sont également communaux, bien que les animaux qui y sont élevés soient privés (Federal, 2007).

Du côté des réserves extractivistes marines, les populations de pêcheurs côtiers ont dû se plier à une nouvelle logique économique pour tenir compte de l'introduction du tourisme. Bien que l'importance de la pêche artisanale soit reconnue sur la scène mondiale et nationale pour les questions liées au travail, à la sécurité alimentaire et à la production de poisson, sa pratique ne permet pas à elle seule de maintenir les revenus de nombreuses familles de pêcheurs (de Miranda Mendonça et al., 2013). En effet, en ce début de XXI^e siècle, on assiste à un déclin croissant de la pêche artisanale, en raison de sa précarité et des conflits liés à l'utilisation multiple de la mer (Soares, 2012). Des exemples de ces utilisations multiples sont : le tourisme, la pêche industrielle, la création de zones protégées, la pollution croissante des estuaires et des rivières.

3.2.2 Le développement du tourisme sauvage et de l'eco-tourisme

En fonction des types de réserves, différentes activités touristiques sont proposées. Des infrastructures appropriées (par exemple, restaurants, sentiers, tours d'observation, passerelles, bateaux, chalutiers, ports, amarrages) sont alors mises en place et des formations adéquates sont proposées aux membres de la communauté. Des forfaits et des itinéraires écotouristiques appropriés sont élaborés en tenant compte des intérêts des communautés.

Selon une étude socio économique du gouvernement Brésilien (Do Tribunal de Contas e de Janeiro, 2004) :

Le tourisme apporte plusieurs avantages à la communauté, tels que la création de nouveaux emplois, l'objectif étant d'améliorer la qualité de vie de la population. Il encourage

également la compréhension des impacts sur l'environnement. Il assure une répartition équilibrée des coûts et des bénéfices, en stimulant la diversification de l'économie locale. Il apporte des améliorations dans les systèmes de transport, les communications et d'autres aspects des infrastructures. Il contribue également à financer la préservation des sites archéologiques, des quartiers et des bâtiments historiques, améliorant ainsi la réputation de la communauté locale et apportant une meilleure compréhension aux personnes d'origines différentes.⁶

Cependant, les grandes entreprises touristiques contribuent à la dégradation des écosystèmes de la zone côtière, en excluant les populations locales. La situation ressemble au problème de la "tragédie des communs" étudié au chapitre précédent. Dans ce cas, les "biens communs" correspondent à l'intégrité du paysage et à la qualité de l'eau. Ces éléments sont valorisés par des entreprises touristiques et pourtant mises en danger par des législations permissives envers ces dernières (Jablonski and Filet, 2008). En effet, tandis que les entrepreneurs attirent leurs futurs clients en nommant la côte nord de l'État de Bahia la "Polynésie Brésilienne", les écologistes de la région se mobilisent contre la "dévastation des zones de préservation permanente" et la mise en danger du paysage de la région. De nouvelles lois municipales ont transformé des sections de la zone de protection environnementale de la côte nord de l'État de Bahia en "zone urbaine", favorisant les constructeurs et rendant caduques les demandes de préservation.

3.2.3 Préservation de la biodiversité

La diversité climatique brésilienne offre une riche biodiversité, attestée par la forte densité des espèces dans les principaux biomes (voir figure 3.2). La forêt tropicale amazonienne, au nord du pays, se distingue par un équilibre écologique complexe qui assure le maintien de la plus grande forêt tropicale du monde. Le long de la côte, il n'y a que des fragments de la forêt atlantique, déboisée depuis le début de la colonisation. Les plantes et les animaux du *cerrado* (genre de savane) et de la *caatinga* (forêt épineuse) se sont adaptés aux longues périodes de sécheresse qui touchent généralement la bande centrale du pays.

La zone littorale fait l'interface entre les environnements terrestres et marins. Cette zone marine comprend, outre la côte, les îles côtières et océaniques et la plate-forme continentale marine. Cette zone inclut les ressources marines et terrestres et comprend le cordon maritime, le sol et le sous-sol marins sous juridiction nationale, les étendues de *restingas*⁷, les systèmes lagunaires, les plaines et terres basses sous-littorales et les bassins versants à l'intérieur des terres. C'est là que sont localisées près de 400 communes, sur 17 États, et que se concentre 30% de la population brésilienne. Le littoral abrite plusieurs écosystèmes de grande importance environnementale, à la fois en terme de biodiversité et de ses utilisations. On peut par exemple citer ses forêts côtières, ses deltas, ses mangroves, ses marais salants, ses récifs de corail et ses champs de dunes.

L'ICMBio contribue à la préservation de biodiversité sur le littoral et notamment à la restauration de plusieurs espèces de tortues marines. Cependant, les pressions sur l'environnement sont plus fortes sur le littoral, en raison de la surexploitation de ses ressources, de la pollution, de la pression du tourisme, de la spéculation immobilière et de la perte de biodiversité, qui affectent et compromettent la durabilité des ressources côtières (Jablonski and Filet, 2008).

6. Traduction du portugais : O turismo proporciona diversos benefícios para a comunidade, tais como geração de empregos, produção de bens e serviços e melhoria da qualidade de vida da população. Incentiva, também, a compreensão dos impactos sobre o meio ambiente. Assegura uma distribuição equilibrada de custos e benefícios, estimulando a diversificação da economia local. Traz melhoria nos sistemas de transporte, nas comunicações e em outros aspectos infra-estruturais. Ajuda, ainda, a custear a preservação dos sítios arqueológicos, dos bairros e edifícios históricos, melhorando a auto-estima da comunidade local e trazendo maior compreensão das pessoas de diversas origens. A Companhia de Turismo do Estado do Rio de Janeiro, a Turisrio, apresenta os potenciais turísticos do Estado divididos em sete regiões distintas, conforme suas características individuais.

7. Une restinga est un cordon littoral sablonneux et salé, qui séquestre une portion de la mer entre elle et le continent et abrite une végétation caractéristique. Ce biome est présent à l'Est du Brésil.



FIGURE 3.2 – Différents biomes Brésiliens.

3.3 L'exemple d'Arraial do Cabo

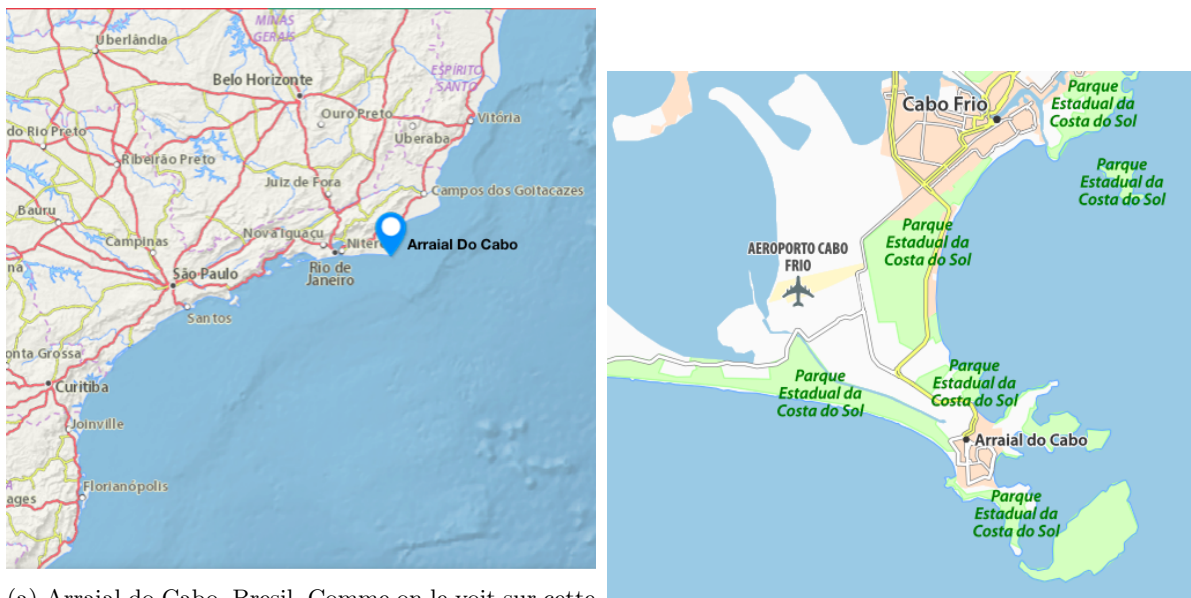
La réserve marine extractiviste de Arraial do Cabo, est située sur la municipalité de Arraial do Cabo, dans la région de Cabo Frio. Cette zone est située à 130 km à l'est de Rio, dans l'État de Rio de Janeiro, comme le montre la figure 3.3a. Il existe plusieurs parcs nationaux autour des deux villes principales de Cabo Frio et Arraial do Cabo (figure 3.3b). Les parcs et l'aéroport voisin en font une destination touristique privilégiée.

La réserve présente un intérêt social et écologique, et vise à protéger les moyens de subsistance des pêcheurs traditionnels, la flore et la faune locales. Les ressources naturelles présentes sur la réserve sont récoltées pour différentes utilisations : alimentaire, médicinale, technologique, bois de chauffage, construction et ornementale (Fonseca-Kruel and Peixoto, 2004).

Cette réserve possède une caractéristique physique rare : le phénomène de *résurgence*. Caractérisé par l'élévation des eaux profondes d'origine polaire, ce phénomène apporte avec lui un grand nombre de nutriments, contribuant à l'augmentation de la biodiversité. En effet, de nombreuses espèces sont attirées par la forte disponibilité alimentaire. La résurgence n'augmente pas seulement les stocks de poissons disponibles, mais facilite également les conditions de prévisibilité des activités de pêche, contribuant ainsi à l'efficacité de l'activité (Santana, 2018). Bien que ces températures plus froides semblent rendre les plages de cette région particulièrement impropres à la nidification régulière des tortues de mer (Barata and Fabiano, 2002), Arraial do Cabo⁸ semble être un lieu privilégié pour le passage de ces dernières.

Concernant sa population, la municipalité de Arraial do Cabo comptait (en 2004) 23 877 habitants (Fonseca-Kruel and Peixoto, 2004). Environ 300 familles sont enregistrées et travaillent dans la pêche depuis plus de cent ans. Les pêcheurs traditionnels font partie d'une association appelée APAC (Association des Pêcheurs de Arraial do Cabo) (figure 3.4a) et utilisent des méthodes de pêche traditionnelles. En raison des effets sur les stocks de la pêche industrielle, certains pêcheurs ont dû trouver

8. Arraial do Cabo signifie d'ailleurs "Village du Cap (froid)", le cap et la ville juste à côté s'appelant Cabo Frio (Cap Froid), voir la figure 3.3a.



(a) Arraial do Cabo, Brésil. Comme on le voit sur cette carte, la réserve est proche de Rio (130km), ce qui en fait une destination touristique privilégiée.

(b) Alentour d'Arraial do Cabo. On remarque la présence d'un aéroport qui facilite le tourisme.

FIGURE 3.3 – Plan d'Arraial do Cabo, source : OpenstreetMap.

d'autres sources de revenus en proposant des services aux touristes (excursions en bateau par exemple : figure 3.4b). Les touristes paient également une taxe de 5 Réaux⁹ (moins d'un euro) à l'entrée de la marina. Cette taxe est ensuite utilisée pour la restauration de l'environnement. En effet, la pollution par le plastique, dont les touristes sont en partie responsables, représente une menace pour la biodiversité. Cette menace est particulièrement importante pour les tortues marines (de Carvalho et al., 2015). L'ingestion de débris plastiques présente des risques pour les tortues de mer, car ils peuvent rester dans leur tube digestif pendant de longues périodes (Derraik, 2002), ce qui peut entraîner un blocage du tube intestinal et provoquer la mort.



(a) Local de l'association des pêcheurs de Arraial do Cabo.

(b) La marina d'Arraial do Cabo où l'on peut voir les pêcheurs emmener les touristes en excursion.

FIGURE 3.4 – Photographies de la réserve d'Arraial do Cabo prise par l'auteur en juillet 2018.

Bien que la réserve extractiviste de Arraial do Cabo fut créée pour protéger la tradition de la pêche artisanale, de nombreux changements ont bouleversé son fonctionnement. L'introduction de la pêche industrielle, du tourisme, des activités pétrolières et gazières imposent aux communautés traditionnelles

9. Le Réal (en portugais "Real", noté R\$) est la monnaie officielle du Brésil, au pluriel Réaux ("Reais").

d'adapter leurs modes de vie (Ambiental, 2016).

Chapitre 4

Analyse des approches existantes

La réserve d'Arraial do Cabo offre un exemple de territoire partagé où un groupe doit prendre des décisions de gestion sur un espace protégé en évolution. Ceci pose des questions liées à l'aide à la décision, l'aide à la négociation et à la sensibilisation aux enjeux soulevés. Dans la suite de cette thèse, nous cherchons à proposer un outil qui puisse aider les différentes parties prenantes de cette réserve à collaborer afin de résoudre un problème commun de gestion du territoire. Chacune des parties prenantes a des objectifs qui lui sont propres et ces objectifs peuvent entrer en conflit les uns avec les autres. Notre but est que les différentes parties prenantes trouvent une solution de gestion consensuelle et techniquement fondée.

Dans cette section, nous nous pencherons sur les méthodes et outils utilisés lors de problèmes similaires. Nous nous intéresserons notamment aux approches utilisées pour la prise de décision, la sensibilisation, la négociation et la gestion durable.

4.1 Techniques d'optimisation

Dans le cas le plus classique, un problème d'optimisation consiste à maximiser ou à minimiser une fonction réelle en choisissant des valeurs d'entrée dans un ensemble autorisé et en calculant la valeur de la fonction. Dans notre exemple de réserves marines, nous nous préoccupons de plusieurs critères, comme le nombre de tortues présentes dans la réserve ou encore le nombre de touristes. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes d'optimisation multi-critères, nous présentons l'approche Pareto qui adopte un point de vue global intégrant tous les critères et utilisant la notion de dominance au sens de Pareto.

4.1.1 Définitions et exemples

Dans un problème de décision, un *décideur* doit prendre une décision particulière, appelée *alternative*. L'ensemble de toutes les décisions qu'un décideur peut potentiellement prendre sera appelé *l'espace des alternatives*.

Définition 1 (Propriétés des relations binaires). *Étant donné un ensemble X , une relation binaire $\succeq$ sur X est dite :*

- réflexive, si et seulement si $\forall x \in X, x \succeq x$,
- symétrique, si et seulement si $\forall (x, y) \in X^2, x \succeq y \Leftrightarrow y \succeq x$,
- transitive, si et seulement si $\forall (x, y, z) \in X^3, x \succeq y \text{ et } y \succeq z \Leftrightarrow x \succeq z$,
- complète, si et seulement si $\forall (x, y) \in X^2, x \succeq y \text{ ou } y \succeq x$.

On peut voir $x \succeq y$ comme une relation de préférence ou d'indifférence entre x et y . Ainsi on observe que les propriétés précédentes sont assez naturelles. Par exemple la réflexivité correspond au fait que, lorsque le décideur compare deux alternatives identiques, il doit être indifférent entre elles. La propriété de complétude des préférences implique que deux alternatives quelconques sont toujours comparables. Donc, soit le décideur en préfère une des deux, soit il est indifférent entre les deux (puisqu'il s'agit ici d'une relation $\succeq$ et non $\succ$).

Il est intéressant de noter que si la symétrie et la réflexivité des préférences est vérifiée dans la réalité, la transitivité ne l'est pas toujours. Bien que non limitée à des ensembles de trois éléments, la situation est présentée ainsi :

Soient x , y et z , trois alternatives. Le décideur dit préférer x à y , y à z puis z à x , ce qui va à l'encontre de la règle de transitivité.

Tversky (1969) explique que ces préférences incohérentes peuvent être influencées par l'ordre dans lesquels sont présentés les choix, ainsi que par le contexte. Plus précisément les préférences intransitives peuvent dépendre de la manière dont les alternatives sont présentées. En effet, elles peuvent être affichées de manière séquentielle (c'est-à-dire une à la fois), ou bien les critères peuvent être présentés de manière séquentielle. On peut reprendre l'exemple de l'auteur qui illustre ses propos avec deux types de campagnes politiques. Dans un type de campagne, chaque candidat apparaît séparément et présente son point de vue sur toutes les questions pertinentes (alternatives présentées de manière séquentielle). Dans le second type, les différentes questions sont soulevées séparément et chaque candidat présente son point de vue sur cette question particulière (critères présentés de manière séquentielle). La différence du format influencera les préférences des utilisateurs ce qui peut donner des préférences intransitives.

Définition 2 (Pré-ordre complet). *Une relation binaire R est un pré-ordre complet, si et seulement si elle est transitive, réflexive et complète.*

Grâce à cette définition, on peut se servir des travaux de Debreu (1964) sur l'existence d'une représentation alternative de la relation de préférence : le préordre complet des préférences peut être représenté par une fonction d'utilité U .

Définition 3 (Fonction d'utilité). *Une fonction $U : X \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction d'utilité si pour tout couple $(x, y) \in X$:*

$$x \succeq y \Leftrightarrow U(x) \geq U(y)$$

$$x \succ y \Leftrightarrow U(x) > U(y)$$

Avec $\succ$ une relation de préférence stricte.

Une relation de préférence stricte est transitive, complète, non réflexive et non symétrique. Une fonction d'utilité est une fonction préservant l'ordre des préférences sur les alternatives. Elle constitue une mesure des préférences et est donc ordinale, il n'y a pas de commensurabilité entre deux alternatives et par conséquent pas de cardinalité. Même s'il est possible d'avoir par exemple $U(x) = 2U(y) (> 0)$, la seule information que révèle cette égalité est une préférence stricte pour l'alternative x . Une telle relation n'implique pas par exemple que "l'alternative x est deux fois plus satisfaisante pour le décideur que l'alternative y " : l'indice d'utilité est une mesure ordinale et non cardinale.

Dans la suite, nous nous situerons dans un problème à m critères, et nous associerons à chaque critère une fonction d'utilité $u_j : X \rightarrow \mathbb{R}$ pour $j \in \{1, \dots, m\}$.

4.1.1.1 Optimisation multicritère et Front de Pareto

Les travaux en décision multicritère utilisent généralement une comparaison de critères deux à deux pour évaluer des vecteurs entre eux. Cette comparaison s'appelle *la dominance de Pareto*. Elle s'explique ainsi : soient deux vecteurs : $v \in \mathbb{R}^m$ et $v' \in \mathbb{R}^m$, on sera sûr de préférer v à v' si v est au moins aussi bon que v' sur tous les critères, et est strictement meilleur sur au moins un critère.

Cette explication donne la définition suivante :

Définition 4 (Dominance de Pareto). *Soient $v \in \mathbb{R}^m$ et $v' \in \mathbb{R}^m$, le vecteur v domine v' au sens de Pareto et on note $v \succ_{\text{Pareto}} v'$, si, et seulement si $\forall i \in \{1, \dots, m\}$, $v_i \succeq v'_i$ et qu'il existe $j \in \{1, \dots, m\}$, tel que $v_j \succ v'_j$*

Pour reprendre l'exemple précédent des candidats, un électeur préférera le candidat A au candidat B si, pour au moins un point de leurs campagnes, l'électeur préfère la politique du candidat A à celle du candidat B et que pour tous les autres, l'électeur est indifférent.

Cette dominance de Pareto nous permet de procéder par élimination. En effet les vecteurs dominés au sens de Pareto ne nous intéressent pas puisqu'il existe une alternative meilleure en tout point. Ce constat fait apparaître un nouveau problème : la détermination d'un front de Pareto.

Définition 5 (Front de Pareto). *Soit X un espace d'alternatives, u une fonction d'utilité multicritère, et U l'espace des critères engendré par u . On appelle front de Pareto l'ensemble $F_{\text{Pareto}} = \{v \in U \mid \nexists v' \in U, v' \succ_{\text{Pareto}} v\}$*

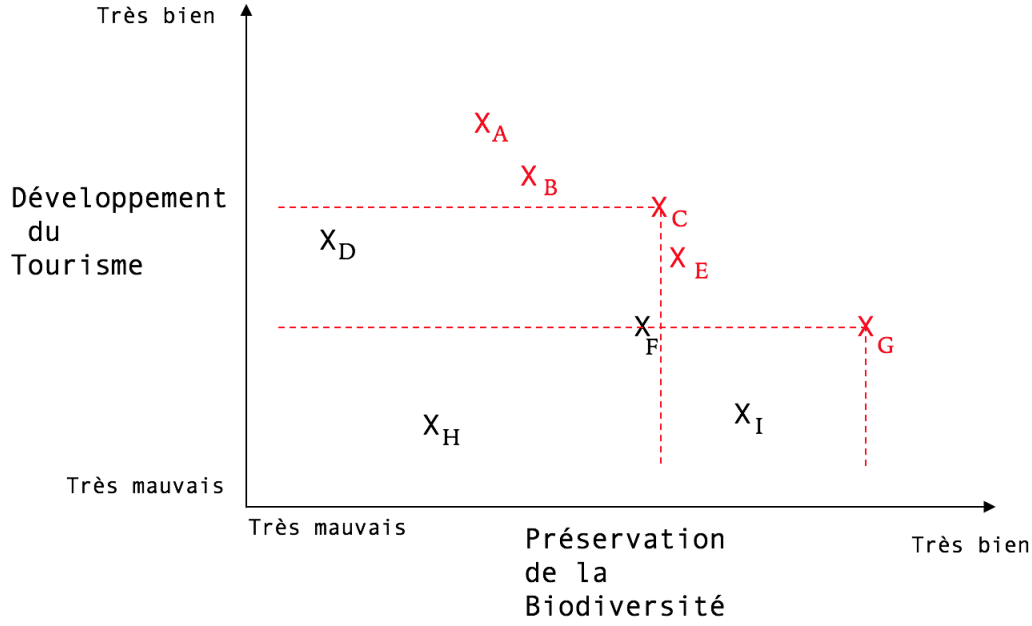


FIGURE 4.1 – Illustration du Front de Pareto : les points en rouge sont les points non dominés qui constituent ce front.

Afin d'illustrer cette notion, on peut comparer plusieurs candidats à une élection sur deux critères qui semblent importants à un décideur. Ces deux critères sont le développement du tourisme et la préservation de la biodiversité. Les candidats sont ensuite classés sur ces différents critères grâce à la fonction d'utilité du décideur. Comme montré sur la figure 4.1 : le candidat G propose la meilleure politique pour la préservation de la diversité selon le décideur. Tandis que le candidat A propose la meilleure politique pour le développement du tourisme. Les candidats A, B, C, D, E et G constituent les alternatives non dominées. Les candidats D, F, I et H constituent les alternatives dominées au sens de Pareto. En effet, le décideur préfère la politique du candidat G à celle du candidat I sur les deux critères observés. Sur la figure 4.1 on observe que G domine I, H et F et que C domine D, F et H .

En d'autres termes, le front de Pareto est l'ensemble des points non dominés. En choisissant un point du front de Pareto, aucune amélioration ne peut être faite sur un critère sans dégradation d'au moins un autre critère. Pour savoir quel point choisir, il est nécessaire de faire appel à des techniques de sélection.

Dans le paragraphe 6.4, nous utiliserons les notions de front de Pareto et de dominance de Pareto, afin de diriger une recherche de solutions à proposer aux parties prenantes.

4.1.1.2 Choix d'une solution

Définition 6 (Agrégateur). Soit X un espace d'alternatives, u une fonction d'utilité multicritère, et U l'espace des critères engendré par u . On appelle agrégateur de U toute fonction $A : U \rightarrow \mathbb{R}$. La valeur $A(u(x))$ est la solution agrégée de l'alternative $x \in X$.

Un agrégateur couramment utilisé est la moyenne (pondérée ou non) entre les valeurs d'utilité de chaque critère. Cette solution peut paraître simple et elle est la plus utilisée notamment dans le système scolaire, pour classer des étudiants.

Définition 7 (Moyenne Pondérée). Étant donné un espace des critères $U \subseteq \mathbb{R}^m$, et un vecteur de pondération $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_m\}$ vérifiant $\forall j \in \{1, \dots, m\}, \alpha_j \in \mathbb{R}^+$ la fonction $\bar{m}$ est une moyenne pondérée si, et seulement si :
$$\bar{m}(v_1, \dots, v_n) = \frac{\sum_{j=1}^m \alpha_j v_j}{\sum_{j=1}^m \alpha_j}$$

Malgré son utilisation courante, la moyenne pondérée est loin d'être idéale. Pour illustrer ce fait, reprenons l'exemple précédent de nos candidats. Le décideur donne à chacun des neuf candidats une note sur leur politique de développement du tourisme et de préservation de la biodiversité (ainsi, il y a 2 critères, $m = 2$). Les notes sont réparties comme dans le tableau ci-dessous et il est possible de placer les candidats sur une grille (voir figure 4.2). Grâce à ces notes, il est possible d'établir une moyenne pour chacun des candidats.

Candidat	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note développement du tourisme	7	4	3	3	2.5	2	2	1	1
Note préservation de la biodiversité	2	4	5	1	6	5	7	2	6
Moyenne	4,5	4	4	2	4,25	3,5	4,5	1,5	3,5

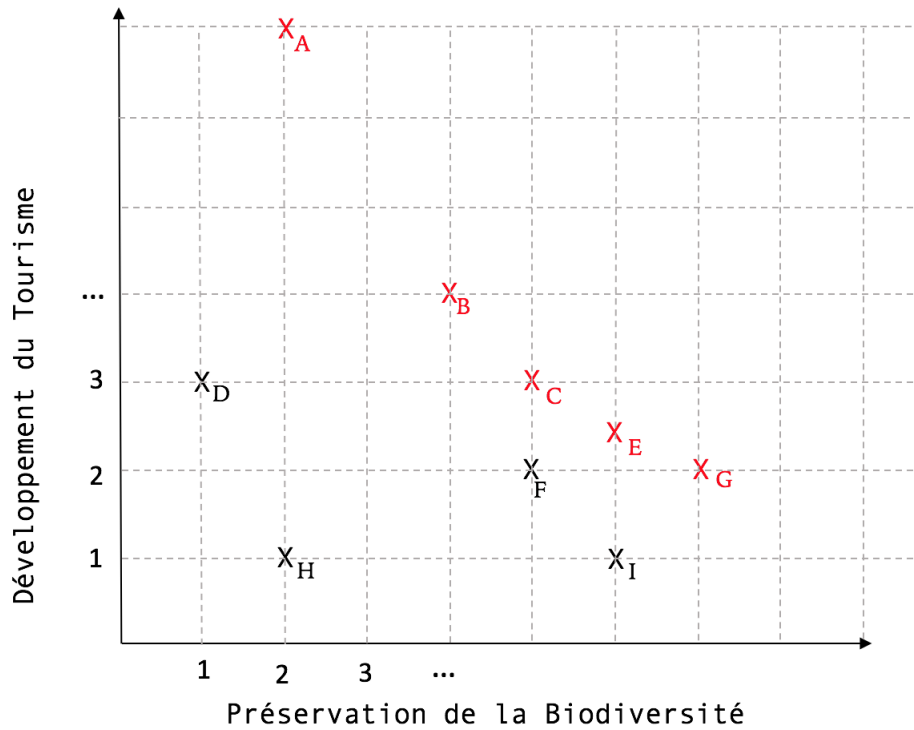


FIGURE 4.2 – Placement des candidats sur une grille.

Comme dans l'exemple précédent, les candidats A, B, C, D, E et G constituent les alternatives non dominées. Les candidats avec les meilleures moyennes sont les candidats A et G. En effet la moyenne fait ressortir les candidats ayant les meilleures notes dans un seul des domaines. La moyenne, même pondérée ne permet pas de choisir des candidats équilibrés. Ce phénomène s'explique assez simplement. Supposons que nous cherchions une pondération de manière à ce que le candidat B (4,4), le plus équilibré, soit avantagé par rapport au candidat G (2, 7). Il s'agit donc de déterminer deux coefficients λ_1 et λ_2 tels que $4\lambda_1 + 4\lambda_2 > 2\lambda_1 + 7\lambda_2$ soit $2\lambda_1 > 3\lambda_2$ et ainsi $\lambda_1 > \frac{3}{2}\lambda_2$. En reprenant ce raisonnement pour que le candidat B soit avantagé par rapport au candidat A, on en déduit que pour que B ait la meilleure moyenne, il faut que :

$$\begin{cases} \lambda_1 > \frac{3}{2}\lambda_2 \\ \lambda_1 < \frac{3}{2}\lambda_2 \end{cases}$$

Ce qui est impossible. Le candidat B ne pourra jamais être choisi en utilisant une moyenne pondérée, bien qu'il semble être le meilleur compromis.

Ainsi, la moyenne est un agrégateur défavorisant les solutions équilibrées et favorisant les solutions dites spécialistes. Cependant, elle peut être généralisée afin que des pondérations différentes permettent de faire ressortir chacune des solutions du front de Pareto (Yager, 1988).

Candidat	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note développement du tourisme	7	4	3	3	2.5	2	2	1	1
Note préservation de la biodiversité	2	4	5	1	6	5	7	2	6
OWA	3,66...	4	3,66...	1,66...	3,66...	3	3,66...	1,33...	2,66...

TABLE 4.1 – Comparons les candidats selon un agrégateur OWA avec $\mu = (\frac{1}{3}, \frac{2}{3})$.

Les moyennes pondérées ordonnées (OWA pour "Ordered Weighted Averages" en anglais) sont des agrégateurs qui permettent de pondérer les performances x_i en fonction de leur rang. L'idée fondamentale de l'agrégateur OWA est de ne pas assigner une pondération à un critère particulier, mais au positionnement des critères triés par ordre croissant. On réordonne (x_i) avec la permutation σ telle que $x_{\sigma(1)} \leq x_{\sigma(2)} \leq \dots \leq x_{\sigma(n)}$. $x_{\sigma(i)}$ est donc la i -ème plus petite valeur de (x_i) . Soit μ un vecteur de pondération $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_m)$.

Formellement, on a : $\text{OWA}(x) = \sum_{i=1}^m \mu_i x_{\sigma(i)}$

Ainsi, la moyenne est un OWA particulier en posant $\forall j \in \{1, \dots, m\}, \mu_j = \frac{1}{m}$.

Revenons à l'exemple précédent, comparons les candidats selon un agrégateur OWA avec $\mu = (\frac{1}{3}, \frac{2}{3})$. On obtient alors le tableau suivant 4.1

La pondération μ a pour solution optimale agrégée B.

Les agrégateurs présentés jusqu'ici supposent que de sommer les différentes valeurs d'utilité des critères a un sens. Cependant, nous avons vu précédemment que la fonction d'utilité préserve l'ordre des préférences, mais ne constitue qu'une mesure ordinale : $U(x) = 2U(y) (> 0)$ n'implique pas que "l'alternative x est deux fois plus satisfaisante pour le décideur que l'alternative y ". Ainsi, il est parfaitement possible d'avoir une fonction d'utilité pour le premier critère dont toutes les valeurs seront comprises dans l'intervalle $[1, 100]$, et une autre fonction d'utilité pour un second critère dont les valeurs seront comprises dans l'intervalle $[0, 10^{-10}]$. Dans ce cas, peu importe la pondération, un agrégateur OWA favorisera le premier critère.

La norme de Tchebycheff est une tentative d'agrégateur pour résoudre ce problème. Son principe repose sur la normalisation de l'espace des critères, afin qu'un critère ne soit pas prépondérant par rapport aux autres uniquement parce que les valeurs de son utilité sont significativement plus grandes. Cette normalisation se fait grâce à la définition de deux vecteurs : le point Idéal et le point Nadir.

Définition 8 (Point Idéal). *Soit X un espace d'alternatives, $u : X \rightarrow \mathbb{R}^m$ une fonction d'utilité multicritère formée à partir des fonctions d'utilités $(u_1, \dots, u_m)$. Le point idéal est le vecteur $I = (I_1, \dots, I_m)$ tel que $\forall j \in \{1, \dots, m\}, I_j = \max_{x \in X} u_j(x)$.*

Le point idéal est donc un vecteur composé des meilleures valeurs obtenues à partir des différentes fonctions d'utilité u_i . Il domine donc au sens de Pareto tous les autres vecteurs de U . Ce point nous servira de borne supérieure lors de l'élaboration de la norme de Tchebycheff.

Définition 9 (Point Nadir). *Soit X un espace d'alternatives, $u : X \rightarrow \mathbb{R}^m$ une fonction d'utilité multicritère formée à partir des fonctions d'utilités $(u_1, \dots, u_m)$. On note $x_j^* = \arg \max_{x \in X} u_j(x), \forall j \in \{1, \dots, m\}$. On note $(v_j^1, \dots, v_j^m) = u(x_j^*), \forall j \in \{1, \dots, m\}$. Le point Nadir est le vecteur $N = (N_1, \dots, N_m)$ tel que $\forall j \in \{1, \dots, m\}, N_j = \min_{i \in \{1, \dots, m\}} v_j^i$.*

Dans cette définition, x_j^* correspond à l'alternative la mieux notée dans sur le critère j . Le point Nadir consiste à prendre les pires valeurs des solutions les mieux notées sur au moins un critère. Ces deux points sont représentés sur la figure 4.3.

Définition 10 (Norme de Tchebycheff). *Soit X un espace d'alternatives, u une fonction d'utilité multicritère, et U l'espace des critères engendré par u . On considère I le point idéal selon u et N le point Nadir selon u . Une norme de Tchebycheff est un agrégateur défini par :*

$$N_{\text{Tchebycheff}}(v_1, \dots, v_m) = -\max_{j \in \{1, \dots, m\}} \frac{I_j - v_j}{I_j - N_j}$$

Il convient ensuite de minimiser cette norme pour obtenir le point suggéré par la méthode de Tchebycheff. Pour un critère donné, la différence entre la valeur pour une solution et celle du point idéal exprime le regret de choisir cette solution. La norme de Tchebycheff, aussi appelée max-regret,

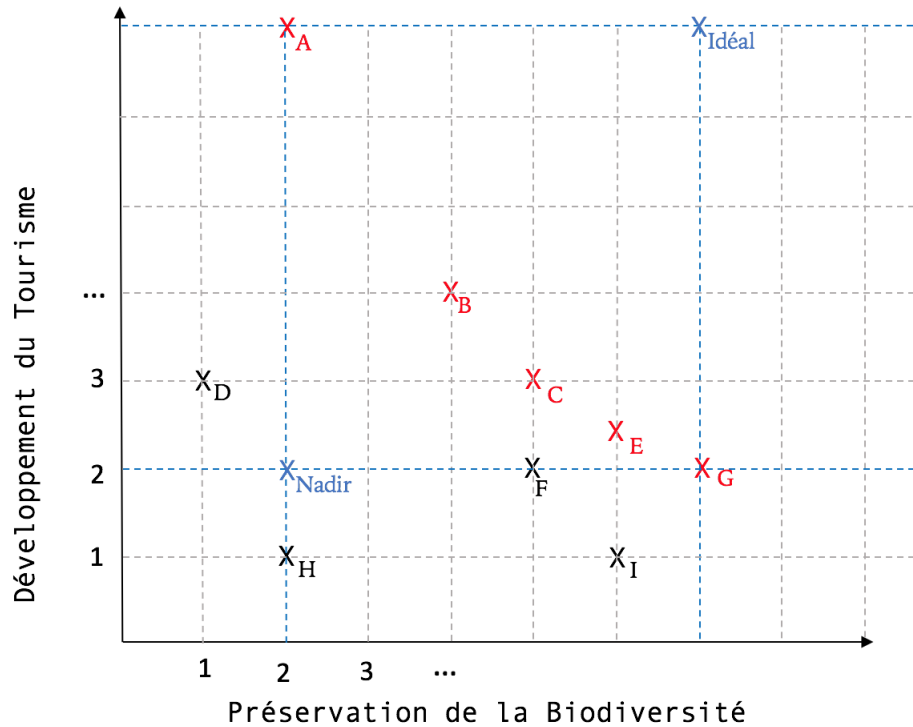


FIGURE 4.3 – Représentations des points Idéal et Nadir pour l'exemple précédent.

nous permet de choisir parmi plusieurs alternatives celles qui offrent le plus petit regret maximal sur les critères qui composent leur vecteur.

4.1.2 Limites

L'optimisation multicritère, comme nous l'avons vu, nécessite la définition de critères d'optimalités, qui doivent ensuite être minimisés ou maximisés selon le problème. Il s'agit de choisir un agrégateur et par conséquent de faire un choix dans le traitement des critères. Va-t-on privilégier un critère plutôt qu'un autre? Va-t-on privilégier les solutions équilibrées ou bien les solutions spécialistes? Ce choix dépendra nécessairement du point de vue des décideurs. Cependant, dans le cadre d'une décision entre plusieurs acteurs ayant des intérêts divergents, et qui impactera plusieurs générations, il semble impossible de définir un critère qui convienne à tous. Les problèmes de négociation multiacteurs sont souvent proie à une "dictature de la majorité" et ne favorisent pas nécessairement l'émergence de compromis (Bouyssou and Perny, 1997).

De plus, comme nous l'avons vu précédemment, la manière dont les alternatives sont proposées peut influencer les choix des utilisateurs.

Enfin, l'optimisation rend le traitement du futur difficile. Par exemple, bien que l'on ne connaisse pas le taux de dépréciation des infrastructures touristiques dans les 50 prochaines années, il devra être fixé avant de trouver un agrégateur.

Bien que l'optimisation constitue une méthode largement répandue, ces limites nous encouragent à proposer une nouvelle solution dans le cadre de la durabilité et de la décision multiacteur. Dans la suite de cette thèse (au paragraphe 5.3), nous proposerons une alternative en faisant appel à la théorie mathématique de la viabilité (que nous introduirons au paragraphe 4.5).

4.2 Jeux de rôles et Jeux sérieux

De nombreux obstacles peuvent entraver le processus de décision, par exemple : une approche trop hiérarchique et pas assez participative, des idées non partagées, le manque de dialogue entre la science et la politique (Pahl-Wostl and Sendzimir, 2005). Pour surmonter ces obstacles et construire un espace où les idées peuvent être comparées et où les scientifiques et les décideurs peuvent se réunir, les "serious games" (ou jeux sérieux) parfois utilisés. Les jeux sérieux sont des jeux dont le but premier n'est pas l'amusement du joueur. Dans le cadre de l'aide à la décision, les jeux de sérieux de type jeux de rôle (où chaque joueur se met dans le rôle d'un personnage) sont les plus fréquents. Dans ce type de jeu, les joueurs peuvent essayer de nombreuses possibilités, sans conséquences néfastes dans le monde réel.

4.2.1 Définitions et concepts

Bien que le concept de jeu ait été décrit de différentes manières, les définitions les plus souvent reprises dans la littérature sont celles des livres *Homo Ludens* (Huizinga, 1938) et *Les Jeux et les Hommes* (Caillois, 1958). Ils affirment qu'un jeu est une activité sociale caractérisée par certaines particularités : un jeu doit être une activité libre, non productive, et avoir un résultat incertain. De plus, un jeu doit être une activité séparée de la vie ordinaire : un jeu a son propre espace et son propre temps. Dans celui-ci, seules les limites des règles du jeu sont valables alors que celles de la vie ordinaire ne sont plus applicables. En effet, selon Huizinga (1938) :

Parmi les traits formels du jeu, la séparation locale de l'action par rapport à la vie courante en constituait le plus important. Un espace fermé est isolé, soit matériellement soit idéologiquement, séparé de l'entourage quotidien.

La notion de jeu sérieux vient cependant déranger ce principe. En effet, le propre d'un jeu sérieux est l'effet qu'il est censé produire hors de l'espace de jeu.

Il est assez difficile de donner une date satisfaisante à l'apparition de jeux sérieux. En effet, dans sa définition large, c'est-à-dire : un jeu dont la finalité est autre que le simple divertissement, on peut trouver des jeux sérieux remontant à l'Antiquité. Bien que ces jeux n'aient pas pour objectif premier l'éducation, ils sont généralement basés sur un raisonnement intellectuel, impliquant une réflexion. Cependant, cette approche n'est appliquée aux jeux vidéo que tardivement. En 1980, Atari développe *Army Battlezone*, conçu pour la formation des militaires américains, parfois considéré comme le premier jeu vidéo sérieux. La même année, Chris Crawford développe *Scram*, un jeu dans lequel le joueur contrôle une centrale nucléaire et doit éviter son implosion. Peu à peu, les jeux vidéos sérieux commencent à gagner de la notoriété et les chercheurs se penchent sur l'intérêt que le jeu peut présenter en tant qu'outil.

4.2.2 Apport et intérêt

Comme nous l'avons vu, le jeu crée son propre espace, séparé de la réalité. De nouvelles relations entre les joueurs peuvent alors se former. Le concept de l' "association" ¹ du sociologue Simmel (1917) sur les relations entre différentes personnes semble bien décrire les dynamiques sociales dans les jeux de rôles. Le sociologue allemand affirme que même si les personnes s'associent généralement selon des impulsions commerciales, religieuses ou sentimentales, il existe une forme d'association qui va au-delà des intérêts utilitaires. Ce qui est typique de ce type d'association est le fait qu'elle ne peut se produire qu'à un moment particulier, complètement détaché de la réalité, un moment pendant lequel les individus participent à l'interaction uniquement en tant qu'êtres humains, tandis que toute autre caractéristique (âge, sexe, statut social, apparence physique) qui n'est pas strictement requise est laissée de côté. C'est ce que l'on constate dans les jeux de rôles, comme le confirment les informateurs d'une étude menée par Isabella (2007) :

Beaucoup de ces personnes ont de bonnes relations à travers le jeu et on se fiche que vous pesiez 150 tonnes ... qui s'en soucie!!!²

1. "Vergesellschaftung" en allemand, que l'on peut aussi traduire par "socialisation".

2. Traduit de l'anglais : "Lots of these people have good relationships through the text and we don't care if you are 150 tons ... who cares!!!".

Ainsi, le jeu de rôle permettrait de mettre les décideurs/joueurs sur un pied d'égalité et de passer outre les différends qui peuvent être présents dans le monde réel.

4.2.3 Principes de Conception

Le jeu permet aussi d'engager la motivation des utilisateurs. Kenny and Gunter (2007) estiment que les concepteurs de jeux doivent tirer parti de la motivation naturelle des joueurs en développant les jeux de manière à promouvoir la motivation intrinsèque. Un exemple de motivation intrinsèque est un jeu enseignant la génétique en demandant au joueur de manipuler les gènes d'une créature afin d'effectuer un changement inédit dans la progéniture de cette créature. Au contraire, dans un jeu éducatif basé sur la motivation extrinsèque, les concepts génétiques seraient superposés à l'aspect ludique de telle sorte que le concepteur du jeu pourrait tout aussi bien enseigner n'importe quel sujet sans modifier l'histoire et sans perturber le déroulement du jeu.

Plus le joueur est engagé dans le jeu et immergé son univers, moins il sera distrait par les événements extérieurs au jeu. Cependant, il faut veiller, lors de la conception du jeu, à ne pas ajouter trop d'éléments trop excitants qui finissent par augmenter la charge extrinsèque. Les auteurs préconisent d'établir un contexte enthousiasmant dans le jeu pour intéresser le joueur, mais pas trop prenant pour ne pas le submerger.

Enfin ces auteurs ont pu identifier ce qu'ils estiment être trois principes de conception clés. Premièrement, les jeux doivent présenter le contenu souhaité d'une manière qui soit pertinente pour les joueurs, leurs besoins et le contenu précédemment introduit. Deuxièmement, le contexte et la conception doivent être conçus de manière à encourager la poursuite du jeu. Enfin, le jeu doit à la fois impliquer pleinement les joueurs de manière interactive et immerger le contenu d'apprentissage souhaité dans le contexte ludique du jeu (motivation intrinsèque). La création d'une atmosphère engageante est ainsi une condition nécessaire, mais insuffisante à l'apprentissage.

4.2.4 SimParc : un exemple d'application

Les jeux sérieux en général, et les jeux de rôle en particulier peuvent être utilisés en aide à la décision pour leurs différents avantages. Un exemple de ce type de jeu est SimParc.

SimParc est un jeu de rôle simulant la gestion d'un parc Brésilien. Ce jeu aide les acteurs sociaux à comprendre les différents points de vues, à négocier, et à prendre une décision collective (Briot et al., 2008). Il propose aux différents intervenants de définir et comprendre de manière collective les conflits qui peuvent apparaître dans la gestion de parcs naturels. SimParc s'appuie sur un jeu de rôle où chaque joueur incarne un personnage ayant un intérêt dans la gestion du parc. Pour faciliter l'identification, et illustrer le jeu, SimParc propose un ensemble de personnages pour représenter les acteurs au cours du jeu (voir figure 4.4).

Suivant son profil, le joueur aura des intérêts qui lui sont propres dans chacune des zones du parc (préservation des espèces menacées, développement du tourisme...). En effet, une fois que les rôles ont été attribués, le joueur reçoit des informations sur son rôle et sur les unités de paysage pour lesquelles il va devoir proposer un niveau de conservation. Ensuite, chaque joueur propose un type d'utilisation de chacune des unités de paysage (représentées sur la figure 4.5). Une fois que tous les joueurs ont fait leur choix, la proposition de chaque joueur est rendue publique. Le jeu alterne les phases où les joueurs déclarent le niveau de conservation qu'ils souhaitent pour une unité de paysage, avec des phases de négociation. Dans les phases de négociation, chaque joueur essaie d'influencer la décision finale pour qu'elle aille dans son sens. Des conflits vont ainsi apparaître et les joueurs peuvent adopter différentes stratégies de négociation (former des alliances entre différents joueurs par exemple).

SimParc a obtenu de bons résultats dans le sens où les joueurs, qu'ils soient novices ou qu'ils aient une expérience dans la gestion de parcs, ont apprécié le jeu, se sont identifiés à leurs personnages et ont donc défendu leurs intérêts dans les phases de négociation (Briot et al., 2017).

4.2.5 Limites et recommandations

Nous avons vu que le jeu de rôle et le jeu sérieux offrent de nombreux avantages, comme la possibilité pour les joueurs de se concentrer uniquement sur le problème en s'immergeant dans le jeu. Cependant, certaines études montrent que toutes les formes d'utilisation du jeu sérieux ne se valent pas forcément.



FIGURE 4.4 – Pour faciliter l’incorporation du rôle par le joueur, SimParc offre un ensemble de personnages pour représenter les acteurs au cours du jeu.

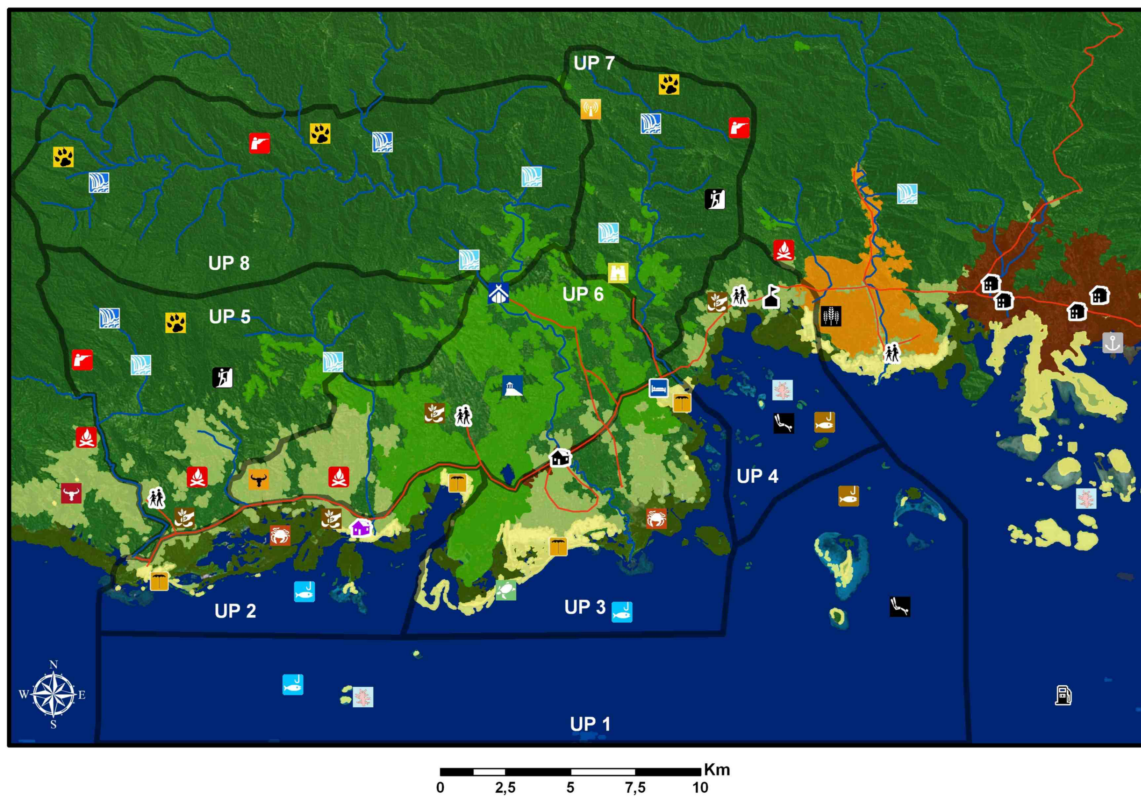


FIGURE 4.5 – Cartes des différentes zones, ou unités de paysage, dans SimParc.

Par exemple, Deci et al. (1999) conduit une méta-analyse de 128 études examinant les effets des récompenses extrinsèques (points dans le jeu, argent, bonbons...) sur la motivation intrinsèque (l’envie

du joueur de continuer le jeu pour l’amusement qu’il procure ou les choses qu’il enseigne). Les auteurs montrent que les récompenses liées à l’engagement, à l’achèvement de tâches et à la performance ont considérablement diminué la motivation intrinsèque. Les récompenses tangibles (par exemple : des bonbons) ont tendance à être plus préjudiciables pour les enfants que pour les étudiants, et les récompenses verbales ont tendance à être moins valorisantes pour les enfants que pour les étudiants (un exemple de récompense verbale est : ”Excellent, vous devriez continuer à faire du bon travail”). La conclusion la plus courante est que les récompenses tangibles liées à la tâche (c’est-à-dire celles données pour s’être engagé dans une tâche ou l’avoir achevée) étaient préjudiciables à la motivation intrinsèque. Bien que les récompenses puissent contrôler le comportement des gens (et c’est sans doute la raison pour laquelle elles sont si largement préconisées), leur principal effet négatif est qu’elles tendent à empêcher l’autorégulation. En d’autres termes, les récompenses empêchent les participants de prendre la responsabilité de se motiver ou de se réguler.

Rankin et al. (2008) explorent l’utilisation du jeu de rôle dans le cadre de l’apprentissage des langues à travers deux études. Même si les résultats des deux études expérimentales indiquent que les MMORPG³ peuvent servir d’outils pédagogiques pour l’apprentissage d’une deuxième langue, aucune différence significative n’a été constatée au niveau du vocabulaire appris entre les élèves ayant joué aux MMORPG et ceux ayant assisté au cours. Les auteurs constatent que le professeur fournit une instruction guidée, en insistant sur certains points de vocabulaire. En comparaison, les jeux proposent une exploration ouverte, donnant au joueur la liberté de faire ce qu’il veut. Cela diffère de l’enseignement en classe et introduit la possibilité pour les étudiants de négliger des informations importantes. Ainsi, il est intéressant dans certains cas de guider le joueur afin qu’il ou elle ne puisse pas compléter le jeu sans avoir rencontré les notions importantes. C’est notamment l’idée de la thèse de Regourd (1987), qui utilise un apprentissage par métaphore de jeu d’aventure, mais contrôlé.

Enfin, Gordon and Schirra (2011) montrent que par le biais de jeux de rôle, la conversation s’éloigne des plaintes personnelles pour s’orienter vers une discussion inclusive sur les différents acteurs d’une communauté. Ils suggèrent que, lorsqu’ils jouent au jeu, les participants font preuve d’empathie à l’égard des besoins et des désirs d’un personnage et prennent des décisions en conséquence. Cependant, cette empathie ne se transférerait pas de manière convaincante en dehors du contexte du jeu pour affecter les décisions prises lors de la réunion immédiatement après le jeu. Malgré cela, les joueurs ont indiqué que le jeu leur permettait d’élargir leur perspective sur les questions locales et même de se sentir plus proches de leur communauté. Selon les auteurs, ces sentiments de connexion peuvent transformer la manière dont se déroule la délibération et le processus de participation publique.

Pour implémenter notre jeu sérieux, nous tiendrons compte de ces limites et recommandations.

4.3 Simulations multi-agents

Dans la littérature, plusieurs types de modèles sont proposés lorsqu’il s’agit d’explorer les dynamiques sociales et écologiques. Les modèles multi-agents en font partie. Ils permettent de représenter des agents interagissant avec un environnement spatial. Ces agents sont capables de communiquer entre eux, d’observer et d’interagir avec leur environnement et de prendre des décisions en tenant compte des informations récoltées (Bousquet and Le Page, 2004).

4.3.1 Définitions et concepts

L’idée principale des systèmes multi-agents est d’obtenir des comportements complexes de par leur émergence à partir d’interactions entre des agents ayant des comportements simples.

Les simulations multi-agents sont un type de modélisation et de simulation selon cette approche, et visent à modéliser des comportements complexes à partir de comportements élémentaires. Différents types d’entités et de phénomènes (par exemple des individus, des arbres, des animaux, des gouttes d’eau, etc.) sont modélisés comme des agents (de différentes classes et granularités), avec pour chacun

3. Acronyme de ”Massive Multiplayer Online Playing Games”, soit jeux de rôle en ligne massivement multijoueur.

leurs comportements et interactions (reproduction, croissance, influence, etc.). Les simulations multi-agent ont suscité un engouement dans le domaine des sciences socio-environnementales, impliquant des interactions entre phénomènes naturels et dynamiques sociales. Lansing and Kremer (1994) étudient par exemple la gestion de l'eau par les agriculteurs des Balkans, alors que Bousquet (1994) se penche sur le cas de la pêche dans le delta central du Niger.

Les simulations multi-agent sont fréquemment utilisées pour la modélisation collaborative, car facilement abordables par un public de néophytes. Cela leur permet d'être utilisées dans des jeux de rôle, en support à des aides à la gestion de biens communs. On peut par exemple citer le jeu de rôle de Souchère et al. (2010) sur la gestion collective des risques de ruissellement érosif, ou bien l'évaluation participative de scénarios pour l'agriculture biologique de Delmotte et al. (2016). Dans ce dernier article, les auteurs constatent que l'un des freins majeurs au passage à l'agriculture biologique est l'incapacité à prévoir les conséquences socio-économiques de cette transition. Afin de surmonter ce problème, ils proposent de caractériser les systèmes agricoles à différentes échelles et de définir des scénarios relatifs à l'avenir de l'agriculture dans la région. Ces scénarios sont ensuite évalués avec les acteurs locaux. Ainsi grâce à ces simulations, des changements majeurs peuvent être appréhendés, tels que la réforme de la politique agricole commune européenne et les effets de la réduction de l'utilisation des pesticides sur le développement de l'agriculture.

Ces modèles permettent aux acteurs d'explorer différentes possibilités et de revenir en arrière, sans conséquence néfaste dans le monde réel.

4.3.2 Exemple : Collectif ComMod, combinaison de systèmes multi-agent et jeu de rôle

En 1994, l'unité GREEN du CIRAD questionne l'usage des modèles dans les processus d'aide à la décision dans des scénarios de gestion collective de ressources renouvelables (Bousquet et al., 1999). Suivant ce courant de pensée, le collectif *ComMod* (pour Companion Modelling) réunit des chercheurs s'opposant à la vision du modèle unique pour aider le décideur final (Le Page et al., 2004). Ces recherches proposent des théories et méthodologies jugées par les pairs, tout en étant issues de questions de terrain.

Cette démarche est explicitée dans la charte du collectif (ComMod, Collectif, 2005). Les auteurs y précisent :

En effet, face à une situation complexe, le processus de décision est évolutif, itératif et continu. Cela signifie qu'il produit des actes de "décision" toujours imparfaits, mais dont le but est d'être, à chaque itération, mieux compris et plus partagés. Autrement dit, ce qui est recherché n'est pas dans la qualité du choix, mais dans la qualité du processus qui y a conduit. Il ne s'agit pas de trouver la meilleure solution, mais de se donner les moyens de prendre en charge au mieux les incertitudes de la situation examinée en commun. Pour améliorer la qualité des processus collectifs de décision, la démarche cherche à rendre plus clairs et à faire partager les points de vue qui ont conduit à la situation étudiée. Elle se réfère à une perception dynamique du processus de décision, dans laquelle, en particulier, la perception scientifico-technique représente une simple option parmi d'autres dans le processus de prise de décision, et non pas une perception supposée juste vers laquelle doit tendre la décision.

La modélisation d'accompagnement est généralement utilisée dans un contexte de gestion de ressources naturelles renouvelables collectives, comme le problème de la conciliation de l'agriculture avec la conservation des paysages et de la biodiversité (Moreau et al., 2019), la gestion des ressources en eau au Ghana (Daré et al., 2018), ou encore la gestion des systèmes agroforestiers de café de Kodagu en Inde (Garcia et al., 2020).

Cette approche se base sur une co-construction du modèle avec les acteurs concernés. Ce processus doit permettre aux acteurs de partager leurs représentations concernant les ressources naturelles, leurs évolutions, et les moyens d'action possibles, et de contribuer à leur apprentissage. L'objectif n'est pas nécessairement d'atteindre un consensus, mais plutôt de construire une base commune (de connaissance, de points de vue, d'enjeux...). Les modalités de participation des acteurs à la co-construction

du modèle varient selon les cas. Dans certains cas, les acteurs participent à l'ensemble du processus de construction du modèle : délimitation du système représenté, structure du modèle, degré de complexité et sélection des données d'entrée utilisées (Campo et al., 2010). Dans d'autres cas, ils ne participent qu'à certaines étapes de la construction du modèle : apports de données ou amélioration du modèle préexistant par exemple (Souchère et al. (2010)). Enfin, ils peuvent ne participer qu'à une phase finale d'évaluation de scénarios via un modèle dont la construction a été non participative (Hossard et al. (2013)). Les interactions successives entre chercheurs et acteurs permettent d'accroître leurs connaissances personnelles et communes du système, ainsi que de la place de chaque acteur dans le processus. Une fois le modèle construit, il est possible d'évaluer les performances de ce modèle dans la situation actuelle. Par la suite, plusieurs scénarios peuvent être testés et présentés aux acteurs lors d'un atelier par exemple.

4.3.3 Limites

Bien que la modélisation d'accompagnement et les systèmes multi-agents présentent les nombreux avantages présentés précédemment, quelques limites sont à soulever.

Premièrement, la longueur de la démarche peut être un frein à la mise en place de ce type de modèles. En effet, certaines hypothèses faites sur le modèle peuvent être obsolètes lorsque les scénarios sont finalement présentés aux acteurs (Tardivo, 2016). Ces évolutions du système et de son contexte peuvent ainsi modifier les enjeux et problèmes considérés par les acteurs.

Dans sa thèse sur la modélisation collaborative pour stimuler l'émergence d'un système agricole plus durable sur le plateau de Valensole, Tardivo (2016) écrit :

Ainsi, bien que les enjeux de pollution des eaux par les nitrates aient été mentionnés par les acteurs lors du diagnostic préliminaire et la phase de formulation du problème, ils ont peu été mentionnés et discutés lors des premiers ateliers de co-construction du modèle et apparaissaient plutôt secondaires.

De plus, l'auteur précise que de longues périodes entre l'établissement du modèle avec les acteurs et la présentation des résultats à ces derniers peuvent aussi présenter le risque de limiter leur engagement, ceux-ci finissant par exprimer une certaine lassitude en l'absence d'obtention rapide de résultats opérationnels.

Enfin, l'élaboration de nouveaux scénarios pose la question des efforts et coûts à mettre en place pour de telles expériences. La mise au point des simulations multi-agents nécessite une accumulation très importante de connaissances sur le système étudié, et requiert un travail conséquent. De plus, les supports utilisés pour une expérience donnée ne se prêtent généralement pas à une réutilisation dans un contexte différent Manzo (2014).

4.4 Techniques d'aide à la négociation

La négociation est une discussion visant à parvenir à un accord ou à un consensus. C'est l'une des approches les plus courantes utilisées pour prendre des décisions collectives et gérer les litiges. Elle peut porter sur le prix d'un produit donné, la date d'une réunion, une stratégie de gestion, etc. Dans la littérature on retrouve plusieurs usages à la négociation. Elle peut être complètement automatisée et avoir lieu uniquement entre agents informatiques, ou bien elle peut être étudiée en tant qu'aide informatique à la négociation entre humains.

4.4.1 Les différentes approches

Les techniques de négociation sont souvent séparées en trois classes : les approches fondées sur la théorie des jeux, les approches heuristiques et les approches fondées sur l'argumentation. Cette classification a été proposée par Jennings et al. (2001).

La théorie des jeux modélise des situations dans lesquels le succès d'un individu à faire des choix dépend des choix des autres. Ces approches sont souvent basées sur un formalisme : les règles du jeu, les gains correspondants à différentes situations, les objectifs des agents négociateurs, etc. Cela permet de prouver qu'une stratégie donnée est (ou n'est pas) optimale pour un participant (Vesic, 2011). Il est également supposé que les participants sont rationnels, en ce sens qu'ils prennent des décisions conformes à leurs connaissances et à leurs objectifs. Toutefois, les approches de la théorie des jeux classiques présentent des limites importantes du point de vue du calcul (Dash et al., 2003). En effet, la plupart de ces approches supposent que les agents disposent de ressources informatiques illimitées et que l'espace des résultats est entièrement connu.

Afin de dépasser ces hypothèses limitantes sur la rationalité des agents et des ressources informatiques illimitées, un certain nombre d'approches de négociation basées sur l'heuristique ont été développées. Les heuristiques sont des règles empiriques qui produisent des résultats suffisamment bons. Ces systèmes sont plus efficaces et demandent moins de ressources. L'inconvénient étant que

chaque heuristique exige une évaluation et un ajustement des paramètres (Faratin, 2000). Par rapport aux approches de la théorie des jeux, ces méthodes offrent des approximations.

Dans la plupart des modèles basés sur la théorie des jeux et l'heuristique, les agents (pas forcément informatiques) échangent des propositions (des accords potentiels par exemple). Il peut s'agir, par exemple, d'une promesse d'achat d'un objet donné à un prix déterminé, ou bien d'une stratégie de gestion. Cependant, les agents n'échangent pas d'informations supplémentaires. Cela peut être problématique, par exemple, dans les situations où les agents disposent d'informations limitées. Une autre limite des approches conventionnelles de la négociation automatisée est que la relation de préférence de l'agent sur l'ensemble des offres est censée rester fixe pendant l'interaction. En d'autres termes, puisque les approches de la théorie des jeux et de l'heuristique supposent que les préférences des agents sur l'ensemble des options sont fixes, la seule direction de la négociation consiste à trouver un compromis. Un agent ne peut pas influencer directement le modèle de préférence d'un autre agent. Dans une approche fondée sur l'argumentation, chaque agent a la possibilité de donner des arguments en faveur de sa proposition. Cette approche est populaire et a notamment été utilisée par Amgoud et al. (2000), Kakas and Moraitis (2006) et Dimopoulos et al. (2019). L'argumentation est aussi utilisée en aide à la décision, Ouerdane et al. (2008) préconisent l'utilisation de schémas d'argumentation pour gérer les différentes étapes des processus d'aide à la décision.

4.4.2 Les systèmes de support à la négociation

Bien que la plupart des travaux en négociation se penchent sur la négociation automatisée, il y a des travaux intéressants sur les systèmes d'aide à la négociation.

Un système d'aide à la négociation (NSS) est un logiciel spécialement conçu pour aider les négociateurs humains à prendre de meilleures décisions et à négocier de manière plus productive.

Si les NSS sont des outils assez puissants, et peuvent souvent soutenir des négociations plus productives qu'elles ne le seraient sans eux (Beam and Segev, 1997), ils ne peuvent pas diriger seuls une négociation automatisée. Les NSS sont conçus pour avoir besoin d'une contribution humaine et toutes les décisions finales sont laissées aux négociateurs humains. Les NSS peuvent être utilisés dans différents contextes. Pommeranz et al. (2009) identifient deux champs d'applications. Ils peuvent être utilisés comme un outil de préparation et de formation à la négociation en offrant une structuration de l'environnement de la négociation comme la structuration des préférences, l'identification des alternatives possibles, etc. Ils peuvent aussi permettre aux utilisateurs un usage en temps réel pour négocier avec des adversaires via la plateforme. Il existe quelques systèmes interactifs d'aide à la négociation sur le Web, disponibles pour un usage public : INSPIRE⁴ de l'Université de Carleton est par exemple un système interactif qui aide deux utilisateurs humains à négocier une solution à un problème prédéterminé. Les utilisateurs se connectent au système, et reçoivent généralement une étude de cas et une position (vendeur ou acheteur, par exemple). Le système interactif aide chaque utilisateur à formuler et à évaluer une proposition, et renvoie ensuite cette proposition à son partenaire. Chaque utilisateur peut voir toutes les offres et contre-offres, ainsi que ses préférences, mais pas celles de son adversaire. C'est un système de soutien innovant qui combine des éléments de négociations traditionnelles (c'est-à-dire l'échange de messages et d'offres entre les parties) avec des caractéristiques supplémentaires telles que des outils analytiques et visuels d'aide à la décision. En effet, le système est implémenté avec des fonctions d'aide à la décision qui permettent de spécifier les préférences et de gérer les propositions au cours de la négociation. Le système INSPIRE trouve ses racines dans l'analyse des négociations et dans des systèmes d'aide à la négociation tels que Nego Kersten (1985) et Negotiation Assistant Rangaswamy and Shell (1997).

Un autre outil de formation et d'aide à la négociation est le système SmartSettle⁵ (Thiessen and Soberg, 2003) qui permet d'assister les utilisateurs lors de négociations complexes. Selon le site dédié, Smartsettle propose un processus en six étapes qui peuvent se chevaucher lors d'un processus itératif à la recherche d'une solution optimale. Un accord sera déclaré lorsque toutes les parties accepteront la même proposition. Les phases du processus sont :

1. Préparer la négociation : Deux ou plusieurs parties souhaitent négocier un accord sur certaines questions. Les parties peuvent participer à une orientation ou à une formation en fonction

4. www.business.carleton.ca/inspire/

5. www.smartsettle.com

de la taille et de la complexité de l'affaire. Les parties examinent et acceptent les directives de conduite. Les parties peuvent engager un seul facilitateur Smartsettle pour servir chacune d'entre elles ou avoir chacune leur propre facilitateur privé.

2. Qualifications des intérêts : Les facilitateurs aident les parties à travailler ensemble pour discuter de leurs intérêts et identifier les problèmes sans faire de demandes spécifiques. Les parties peuvent se rencontrer en ligne ou en face à face. Les parties conviennent d'un cadre de négociation unique qui représente les questions non résolues.
3. Quantifier la satisfaction : Pour chacune des questions, les parties s'accordent sur des options ou une fourchette de solutions. Le facilitateur travaille indépendamment avec chaque partie pour connaître ses préférences confidentielles.
4. Établir l'équité : Les parties échangent des informations et font des concessions. Smartsettle génère des suggestions basées sur les préférences et les concessions des parties.
5. Maximiser les avantages : Les représentations des préférences sont affinées et l'optimisation est utilisée pour générer une amélioration de la solution de base actuelle.
6. Engagement sécurisé : Lorsqu'une partie souhaite mettre fin à la négociation, le cadre de négociation est rempli avec la solution actuelle, signé et mis en œuvre.

Aujourd'hui, l'utilisation pratique des NSS, en particulier dans le domaine du commerce électronique, est largement débattue et progressivement mise en pratique (Shang et al., 2005).

Nous nous sommes inspirés de ces travaux pour le fonctionnement de notre assistant à la négociation, présenté au chapitre 6, ainsi que pour la recherche d'une forme d'équité.

4.4.3 Information complète et information incomplète

Dans le cadre d'une négociation, il existe plusieurs manières de partager l'information : l'information peut être complète ou incomplète.

Cette distinction vient de la théorie des jeux, on dit qu'un jeu est à information complète si les joueurs connaissent les stratégies et les gains disponibles pour tous les autres joueurs. L'information est incomplète dans le cas contraire. De nombreux jeux de cartes sont des jeux à information incomplète, comme le poker. Dans le paragraphe 5.4.3, nous présentons les modes de partage d'information que nous avons utilisés.

La négociation avec tiers de confiance est une négociation avec information incomplète. Elle s'apparente à une négociation avec un médiateur omniscient. Elle peut être utile lorsque les agents cherchent à cacher leurs informations de leurs partenaires, mais qu'ils sont prêts à les confier à quelqu'un d'autre. Myerson (1979) se place dans un contexte où l'information est imparfaite et où les agents cherchent alors à se partager un bien divisible. Une des particularités de la négociation dans les travaux de cet auteur est qu'elle porte sur une version comportant un médiateur. Ainsi, les agents ne négocient pas directement l'un avec l'autre, mais ils indiquent leurs préférences à un tiers de confiance. C'est ensuite à ce tiers de confiance de déduire une solution. Ce protocole permet au décideur d'avoir toutes les informations utiles sans pour autant que les informations secrètes des agents ne soient révélées. Voir Buron (2018) pour une bibliographie et une description plus détaillées sur les différents modes.

4.5 Viabilité

Nous présentons maintenant la théorie mathématique de la viabilité, sur laquelle nous nous sommes appuyés afin de proposer des solutions de gestion techniquement fondées lors d'un jeu sérieux pour l'aide à la décision et à la négociation.

4.5.1 Principe de la viabilité

Introduite par Aubin (1991), la théorie de la viabilité désigne l'étude de systèmes dynamiques contrôlés soumis à un ensemble de contraintes. Elle considère un système dynamique influencé par des contrôles, ces contrôles pouvant varier dans le temps afin de maintenir le système dans un ensemble de contraintes.

On considère un système dynamique défini par son état $x \in X \subset \mathbb{R}^n$, dont l'évolution peut être influencée par un contrôle u . Soit un système dynamique contrôlé défini par :

$$S_c = \begin{cases} x'(t) &= f(x(t), u(t)) \\ u(t) &\in U(x(t)) \end{cases} \quad (4.1)$$

où $x(t)$ est l'état du système, $u(t)$ le contrôle, avec $U(x) \subset \mathbb{R}^q$ l'ensemble des contrôles admissibles en x , et f une fonction qui associe l'évolution du système avec l'état actuel et le contrôle.

Dans le cas discret, une évolution $(x^n)_{n \in \mathbb{N}}$ décrit l'état du système pour tout $n \in \mathbb{N}$. Le système contrôlé discret est donné par :

$$S_d = \begin{cases} x^{n+1} = f(x^n, u^n) \text{ pour } n \in \mathbb{N} \\ u^n \in U(x^n) \end{cases} \quad (4.2)$$

Une évolution est viable dans K si sa trajectoire reste toujours dans l'ensemble de contraintes K :

$$\forall t \geq 0, x(t) \in K \quad (4.3)$$

dans le cas continu, et :

$$\forall n \in \mathbb{N}, x^n \in K \quad (4.4)$$

dans le cas discret.

Définition 11. *Un état viable est un état à partir duquel il existe au moins une solution au système (4.1) (resp. (4.2)) qui reste dans l'ensemble de contraintes K .*

Définition 12. *Un ensemble L est viable pour le système (4.1) (resp. (4.2)) si pour tout $x \in L$ il existe une évolution du système (4.1) (resp. (4.2)) partant de x et viable dans L .*

Définition 13. *Soit $L \subseteq K$ un ensemble viable pour le système contrôlé continu (4.1) (resp. discret (4.2)) soumis à des contraintes de viabilité K . On définit une correspondance⁶ de contrôles viable associée à $L : x \in L \rightarrow \tilde{U}(x) \subset U(x)$ telle que toutes les évolutions gouvernées par le système :*

$$S_c = \begin{cases} x'(t) &= f(x(t), \tilde{u}(t)) \\ \tilde{u}(t) &\in \tilde{U}(x(t)) \end{cases} \quad (4.5)$$

$$(resp. S_d = \begin{cases} x^{n+1} = f(x^n, \tilde{u}^n) \text{ pour } n \in \mathbb{N} \\ \tilde{u}^n \in \tilde{U}(x^n) \end{cases}) \quad (4.6)$$

restent dans L .

Définition 14. *Le noyau de viabilité associé au système dynamique contrôlé continu (4.1) (resp. discret (4.2)) et soumis à l'ensemble de contraintes de viabilité K , noté $\text{Viab}_c, f, U(K)$ (resp. $\text{Viab}_d, f, U(K)$), est l'ensemble des états à partir desquels il existe au moins une solution au système (4.1) (resp. (4.2)) qui reste dans l'ensemble de contraintes K .*

La figure 4.6 montre une illustration de noyau de viabilité : pour tous les points de la zone bleue, il existe au moins une correspondance de contrôle qui maintient la dynamique dans l'état souhaité.

6. (une correspondance est une généralisation des applications au cas où x a plusieurs images)

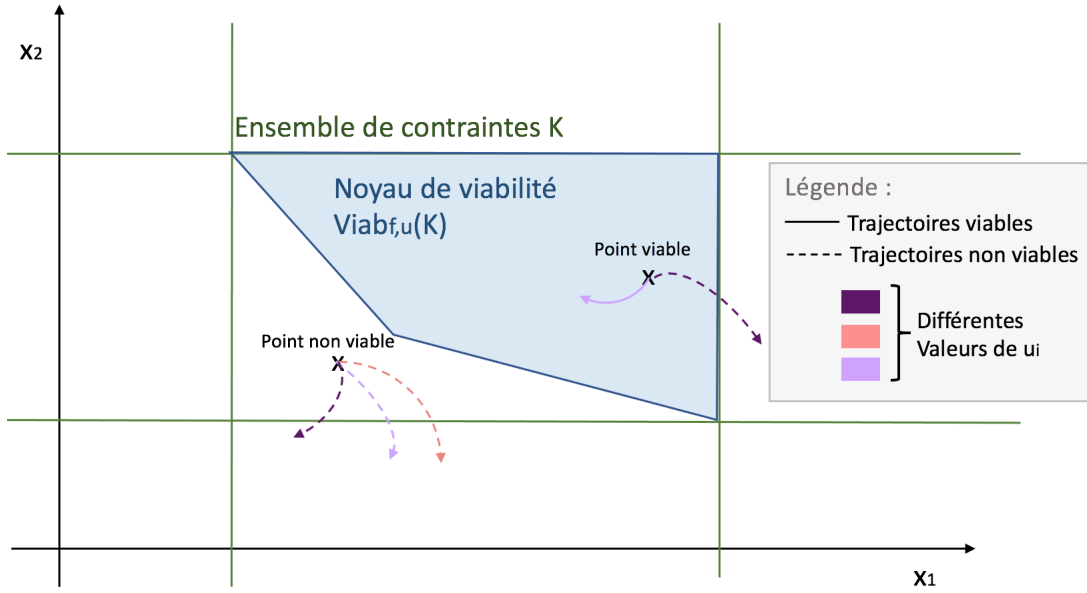


FIGURE 4.6 – Illustration d'un noyau de viabilité. La zone en bleu correspond au noyau de viabilité. Les lignes pointillées sont les trajectoires non viables et les lignes pleines sont les trajectoires viables. Les lignes de différentes couleurs représentent des contrôles différents.

Aubin (1991) a trouvé un ensemble de conditions suffisantes sur le système dynamique contrôlé pour que le noyau de viabilité associé soit fermé. Pour énoncer ce résultat, nous rappelons quelques définitions :

- Soit U une correspondance $U : A \rightarrow B$, le domaine de U est :

$$\text{Dom}(U) := \{x \in A \mid U(x) \neq \emptyset\}.$$

- Le graphe $\text{Graph}(U)$ de U est l'ensemble $\{(x, y) \in A \times B, y \in U(x)\}$
- Soit $U : X \rightarrow X$ une correspondance. U a une croissance linéaire s'il existe une constante positive c telle que $\forall x \in \text{Dom}(U), \|F(x)\| \leq c(\|x\| + 1)$.
- Soit $F : X \rightarrow Y$ une correspondance. F est λ -lipschitzienne pour la constante $\lambda > 0$ si :

$$\forall x_1, x_2, F(x_1) \subset F(x_2) + \lambda \|x_1 - x_2\| \mathcal{B}$$

où $\mathcal{B}$ est la boule unité. Quand F est une application $\|F(x_1) - F(x_2)\| \leq \lambda \|x_1 - x_2\|$

Définition 15. Soient $U : X \rightsquigarrow Y$ et $f : X \times Y \rightarrow X$. (U, f) est un système contrôlé Marchaud si

- $\text{Graph}(U)$ est fermé
- f est continue
- f et U ont des croissances linéaires
- les ensembles $\{f(x, u) \mid u \in U(x)\}$ sont convexes pour tout $x \in \text{Dom}(U)$.

Théorème 16. (Aubin, 1991) Si K est fermé et (f, U) est un système dynamique contrôlé Marchaud, alors $\text{Viab}_{c,f,U}(K)$ est fermé.

Et dans le cas discret :

Théorème 17. (détails dans Lavallée (2020)) Si K est fermé et (f, U) est un système dynamique contrôlé tel que $\text{Graph}(U)$ est fermé, f est continue et U a une croissance linéaire, alors $\text{Viab}_{d,f,U}(K)$ est fermé.

4.5.2 Prise en compte des incertitudes

Aubin (1997) définit aussi la notion de viabilité garantie pour les systèmes soumis à des perturbations (appelées tyches).

On considère un système dynamique défini par son état $x \in X \subset \mathbb{R}^n$, dont l'évolution peut être influencée par des perturbations $v(t)$, tel que :

$$\begin{cases} x'(t) &= f(x(t), v(t)) \\ v(t) &\in V(x(t)) \end{cases} \quad (4.7)$$

Les perturbations $v(t)$ appartiennent à un ensemble $V(x(t)) \subset \mathbb{R}^q$ qui dépend de l'état du système au temps t . La correspondance $V : X \rightsquigarrow Z$ décrit l'ensemble des perturbations $V(x) \subset Z$ admissibles lorsque le système est dans l'état x . À partir d'un état initial x_0 , il peut exister plusieurs évolutions possibles, en fonction des différentes perturbations au cours du temps $t \rightarrow v(t)$. Une solution du système (4.7) est une évolution $t \rightarrow x(t)$ telle qu'il existe une fonction de perturbations $t \rightarrow v(t)$ telle que les conditions de (4.7) soient vérifiées pour tout $t \geq 0$. La définition est similaire dans le cas discret.

Systèmes tychastiques contrôlés

Nous considérons des systèmes contrôlés par un contrôle $u(t) \in U(x(t)) \subset \mathbb{R}^p$ et perturbés par des tyches $v(t) \in V(x(t))$ avec $V(x) \subset \mathbb{R}^q$. Un système contrôlé tychastique continu est défini par :

$$S_v c(f, U, V) = \begin{cases} x'(t) &= f(x(t), u(t), v(t)) \text{ pour } t \geq 0 \\ u(t) &\in U(x(t)) \\ v(t) &\in V(x(t)) \end{cases} \quad (4.8)$$

où f associe l'évolution du système avec l'état courant, le contrôle et le tyeche actuels.

De la même manière, le système tychastique contrôlé discret est donné par :

$$S_v d(f, U, V) = \begin{cases} x^{n+1} &= f(x^n, u^n, v^n) \text{ pour } n \in \mathbb{N} \\ u^n &\in U(x^n) \\ v^n &\in V(x^n) \end{cases} \quad (4.9)$$

On désire qu'il existe au moins une fonction de contrôle telle que toutes les trajectoires perturbées issues d'un état initial soient viables.

Noyau de viabilité garanti

Définition 18. (Aubin, 1997) Un ensemble L vérifie la propriété de viabilité garantie pour la dynamique tychastique contrôlée (4.8) (resp. (4.9)) s'il existe une correspondance de contrôle $\tilde{u} : x \in L \mapsto \tilde{u}(x) \in U(x)$ telle que pour tous les x_0 dans L , toutes les évolutions commençant à x_0 et régies par (4.8) (resp. (4.9)) avec $u(t) = \tilde{u}(x(t))$ (resp. $u^k = \tilde{u}(x^k)$) sont viables dans L .

Définition 19. (Aubin, 1997) Le noyau de viabilité garanti associé à l'ensemble de contraintes (4.8) (resp. (4.9)) de viabilité K , est le plus grand ensemble $L \subset K$ ayant la propriété de viabilité garantie (pour des contrôles sélectionnés $\tilde{u}$ qui sont λ -Lipschitz dans le cas continu).

Dans le cas continu, le noyau de viabilité garanti est noté $\text{Guar}_{c,f,U,V,\lambda}(K)$. Il est noté $\text{Guar}_{d,f,U,V}(K)$ dans le cas discret.

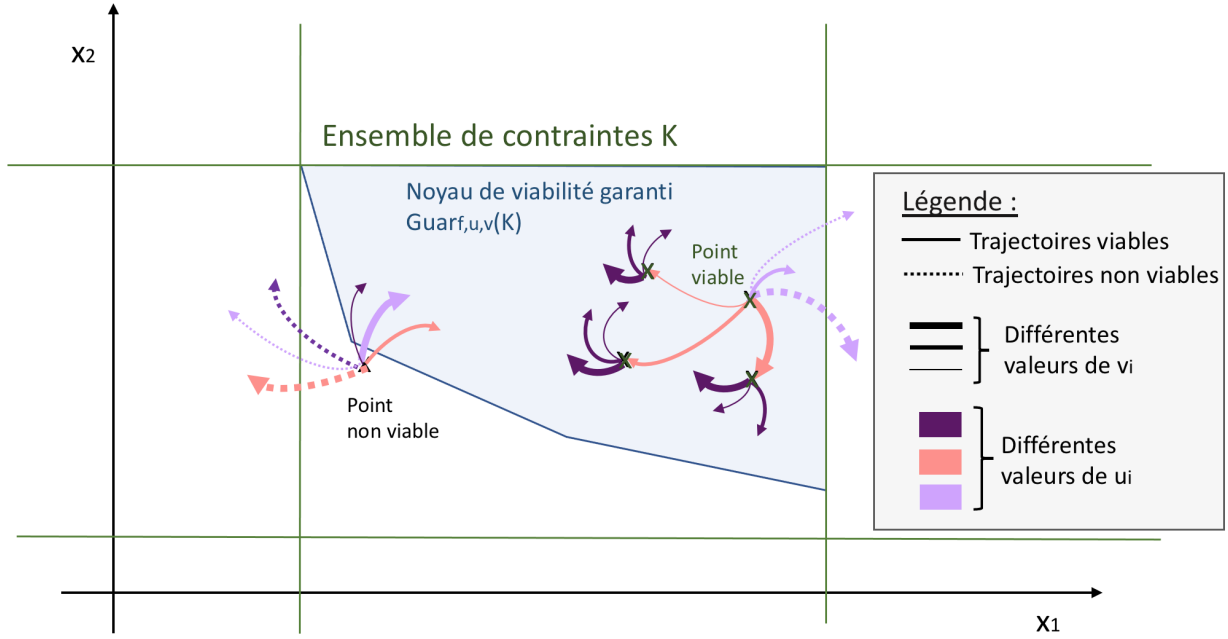


FIGURE 4.7 – Exemple d'un noyau de viabilité garanti. La zone en bleu correspond au noyau de viabilité. Les lignes pointillées sont les trajectoires non viables et les lignes pleines sont les trajectoires viables. Les lignes de différentes épaisseurs représentent différentes valeurs de v_i . Les lignes de différentes couleurs représentent des politiques de contrôle différentes.

Théorème 20. (Aubin (1997) dans le cas continu et Lavallée (2020) dans le cas discret) Le noyau de viabilité garanti associé à K est fermé si le système dynamique vérifie les conditions suivantes :

- Dans le cas continu, si K est fermé, f est Lipschitz, U et V sont Lipschitz et à images compactes.
 - Dans le cas discret, si f et V sont continues, $\text{Graph}(U)$ est fermé et U a une croissance linéaire.
- (Voir 4.5.1 pour les définitions.)

4.5.3 Calcul

Dans certains cas, il est possible de fournir une définition analytique d'un noyau de viabilité (voir les exemples d'Aubin (1991) et Aubin et al. (2011), le modèle de population d'Aubin and Saint-Pierre (2007) et le modèle de bilinguisme de Bernard and Martin (2012)). Mais en général, il est nécessaire de calculer des approximations.

4.5.3.1 Algorithmes notables

Pour le calcul du noyau de viabilité à horizon infini, un des problèmes soulevés est la vitesse de convergence qui n'est pas toujours connue. Pour contourner ces difficultés, certains algorithmes limitent leur objectif au calcul d'une approximation à un horizon donné (comme le font Maidens et al. (2013), avec une méthode lagrangienne très efficace pour les modèles linéaires, ou comme Doyen and De Lara (2010) avec une programmation dynamique dans le cas stochastique). D'autres algorithmes calculent un ensemble de trajectoires (comme le fait le logiciel Vikaasa de Krawczyk and Pharo (2014) et Bonneuil (2006) qui génèrent des trajectoires proches de la frontière). Une alternative s'appuyant sur des méthodes de classification est proposée par Deffuant et al. (2007). Lorsque la fonction de classification vérifie certaines conditions spécifiques, la convergence vers le noyau de viabilité est garantie.

Par exemple, avec la bibliothèque de calculs Viabilitytree (Alvarez et al., 2016), les ensembles de viabilité sont représentés et approximatés par des kd-tree particuliers. L'approximation est calculée de manière récursive et les équations de la dynamique sont utilisées pour définir une fonction indicatrice appropriée pour garantir la convergence.

4.5.3.2 Algorithme de Patrick Saint-Pierre

Le principal algorithme pour calculer le noyau de viabilité a été établi par (Saint-Pierre, 1994). Il propose un schéma numérique qui approche le noyau de viabilité par une séquence décroissante d'ensembles qui contiennent le noyau de viabilité (éventuellement vide). Cet algorithme a été utilisé comme base pour de nombreux problèmes (Aubin et al., 2011).

L'algorithme de Saint-Pierre est basé sur la discrétisation de l'espace d'états en répartissant les points selon une grille régulière. L'algorithme calcule une approximation numérique du noyau de viabilité qui est un sous-ensemble des points de cette grille. Dans le cas où aucune évolution viable n'existe en partant d'un point de la grille, cet état est supprimé de l'ensemble des états viables. Ce processus est itéré jusqu'à ce que le nombre d'états viables ne diminue plus. L'ensemble obtenu est donc une approximation du noyau de viabilité par l'extérieur. Le fonctionnement de cet algorithme est détaillé ici.

Soit X un espace vectoriel de dimension finie, et soit K un sous-ensemble compact de X . Considérons le système dynamique suivant :

$$\begin{cases} x'(t) & \in F(x) \\ x(0) & = x_0 \in K \end{cases} \quad (4.10)$$

avec F une correspondance Marchaud définie de X dans X (voir la définition 15).

Le noyau de viabilité de F soumis à l'ensemble de contraintes K , noté $Viab_F(K)$, est l'ensemble des états initiaux de K pour lesquels il existe une évolution partant de cet état et restant dans K . L'algorithme de Patrick Saint-Pierre étant basé sur la discrétisation de l'espace d'états en répartissant les points selon une grille régulière, il définit donc un système dynamique discret en temps associé au système (4.10). L'ensemble de contraintes K est également discrétisé en K_n . Lorsque les pas de temps et d'espace du noyau discrétisé tendent vers 0, alors, avec les hypothèses adéquates, les noyaux discrets convergent vers le noyau du système initial.

A partir du système dynamique (4.10), Saint-Pierre construit un système dynamique discret associé :

$$\begin{cases} x^{n+1} & \in G_\rho(x_n) \\ x(0) & = x_0 \in K_\rho \end{cases} \quad (4.11)$$

où G_ρ est une correspondance de X à valeurs dans X :

$$G_\rho = 1 + \rho F + \frac{Ml}{2} \rho^2 \mathcal{B}$$

avec ρ le pas de temps, $\mathcal{B}$ la boule unité pour la norme de X et dans le cas particulier où F est l -Lipschitz et M -bornée. K_ρ est l'ensemble des contraintes dilaté défini par :

$$K_\rho = K + \frac{\rho}{2} \mathcal{B}$$

On note $S_{G_\rho(x_0)}$ l'ensemble des solutions du système (4.11) partant de x_0 . Le noyau de viabilité discret pour le système (4.11) soumis à l'ensemble K_ρ , noté $Viab_{G_\rho}(K_\rho)$, est défini de la même manière que dans le cas continu : il s'agit d'un ensemble contenant tous les états initiaux x_0 tels qu'il existe une séquence (x^n) solution de (4.11) qui reste toujours dans K_ρ , $\forall n \geq 0, x^n \in K_\rho$.

Soit une séquence de sous-ensemble $K_\rho^0 = K_\rho, K_\rho^1, \dots, K_\rho^n, \dots$ définis par :

$$K_\rho^{n+1} = \{x \in K_\rho^n \text{ tel que } G_\rho(x) \cap K_\rho^n \neq \emptyset\}$$

Saint-Pierre montre que :

$$Viab_{G_\rho}(K_\rho) = \bigcap_{n=0}^{+\infty} K_\rho^n$$

De plus, Saint-Pierre démontre que lorsque ρ tend vers 0, alors $Viab_{G_\rho}(K_\rho)$ tend vers $Viab_F(K)$.

Il reste ensuite à discrétiser l'espace d'état. Pour ce faire, à tout $h \in \mathbb{R}$, Saint-Pierre associe un sous-ensemble dénombrable, appelé grille, de parties de X . De la même manière, il construit un système discret en temps et en espace dont le noyau tend vers $\text{Viab}_F(K)$.

Ainsi, en faisant des calculs de noyaux de viabilité discrets en temps et en espace à partir de ce nouveau système, sur des grilles de plus en plus petites, il est possible d'approcher le noyau de viabilité $\text{Viab}_F(K)$.

Cet algorithme est notamment utilisé par la bibliothèque ViabLab (Désilles, 2020), implémentée par Anya Désilles et utilisée dans Durand et al. (2017) et (Lavallée, 2020). ViabLab est à ce jour la seule bibliothèque permettant de calculer des noyaux garantis (pour l'instant uniquement dans le cas discret).

L'utilisation de ces algorithmes impose que l'évolution du système étudié soit décrite sous la forme d'un système d'équations différentielles prenant en compte les effets des contrôles. Par exemple, dans notre cas de décision sur une stratégie de gestion pour la réserve d'Arraial do Cabo, il est nécessaire pour utiliser la viabilité de représenter cette réserve à l'aide d'un système dynamique. De plus, le nombre de variables est limité, car le temps et l'espace nécessaires au calcul du noyau de viabilité augmentent exponentiellement avec le nombre de dimensions du problème considéré. Ce problème est l'objet de travaux de recherche (comme dans Brias (2016)).

4.5.4 Exemples d'applications

La théorie de la viabilité a fait ses preuves dans le domaine du développement durable. En pratique, les contraintes de viabilité s'expriment souvent comme la préservation de ressources au-dessus d'un seuil. Ensuite, il est nécessaire de déterminer s'il existe des fonctions de contrôle permettant la satisfaction de ces contraintes. Le calcul du noyau de viabilité nous indique alors la durabilité du système : si le noyau obtenu est vide, il est impossible de satisfaire les contraintes en utilisant uniquement les contrôles proposés. Au contraire, si le noyau n'est pas vide, il existe une politique de contrôle qui permette de garder le système à l'intérieur des contraintes proposées. En écologie, le problème peut être de maintenir la pérennité d'une ressource renouvelable. Dans ce cas, on cherche à maintenir la population au-dessus d'une certaine valeur pour laquelle l'extinction est, sinon, inévitable.

De nombreuses ressources renouvelables sont soumises à une pression extrême dans le monde entier, en particulier dans les pêcheries marines (Garcia and Grainger, 2005). L'une des raisons principales de cette situation est le statut de ressources collectives qui incite les entreprises de pêche à pousser la capacité de pêche au-delà des niveaux d'efficacité collective⁷ (Gordon (1954), Homans and Wilen (1997), Kompas et al. (2004)). Cela a conduit à la reconnaissance de l'importance d'une utilisation des ressources respectant les objectifs écologiques, économiques et sociaux.

Par exemple, De Lara et al. (2007) analysent la stabilité d'un écosystème constitué de merlus et d'anchois dans le golfe de Gascogne, en fonction du niveau de pêche et du *recrutement des espèces*, c'est-à-dire le nombre de jeunes poissons constituant la nouvelle classe d'âge annuelle. Ils ont pu identifier les mécanismes qui permettent de maintenir la population de chaque espèce au-dessus d'une certaine valeur. Gajardo et al. (2018) ont travaillé sur le même genre de problème, en utilisant la théorie de la viabilité pour calculer quelles contraintes peuvent être garanties à partir de la situation actuelle.

Pour Martinet and Doyen (2007) le problème est de maintenir la stabilité d'un écosystème, en conciliant des objectifs économiques et écologiques. Dans ce cas, en plus d'imposer un seuil à ne pas dépasser sur le nombre d'individus d'une espèce, il faut également imposer des objectifs économiques liés à l'exploitation de la ressource à atteindre. Les auteurs étudient les conditions qu'un système proie-prédateur, basé sur une ressource non renouvelable, doit respecter afin de garantir la consommation des espèces et le stock des ressources.

7. Pour plus de contexte sur cette pratique, voir le paragraphe 1.1 sur les biens communs.

Martin (2004) étudie la résilience en prenant l'exemple de l'eutrophisation des lacs. L'eutrophisation des lacs est causée par des apports excessifs de phosphates et de nitrates et entraîne la prolifération d'algues toxiques (Carpenter et al., 1998). Le système étudié se compose d'un lac et des populations qui profitent de ses services ou apportent des excédents de phosphates par l'intermédiaire de leurs activités agricoles. L'objectif des agriculteurs et des populations est d'assurer la rentabilité de leurs exploitations et de les maintenir dans un état oligotrophe (c'est-à-dire non eutrophe). En supposant qu'un lac devient eutrophe lorsque la quantité de phosphate P est supérieure à un seuil P_{max} , alors l'objectif se traduit par : $P \in [0, P_{max}]$. Martin suppose que les bénéfices des agriculteurs dépendent linéairement des apports en phosphates. Ainsi, leur objectif est atteint lorsque la valeur des apports de phosphates dépendant des activités humaines est supérieure à un seuil L_{min} . On considère qu'il est possible d'agir sur les variations temporelles des apports de phosphates, le contrôle u est donc égal à $\frac{dL}{dt}$. Ainsi l'utilisation de la théorie mathématique de la viabilité permet de définir les états viables (à partir desquels le lac peut rester oligotrophe grâce aux contrôles appropriés), et les états résilients (à partir desquels le lac peut redevenir oligotrophe même s'il perd temporairement cette propriété).

Enfin, Lavallée (2020) utilise la viabilité et notamment les noyaux garantis afin de comparer les différentes stratégies de gestion des espèces végétales exotiques envahissantes. Plus particulièrement, il étudie la croissance locale des renouées asiatiques (*Fallopia sp.*) à l'aide de modèles stochastiques et utilise la théorie de la viabilité pour étudier leur croissance et leur dispersion à l'échelle d'un cours d'eau.

Bien que nous nous focalisions sur l'utilisation de la viabilité dans le cadre du développement durable, il est intéressant de noter que son utilisation ne se limite pas à ce domaine. On peut par exemple citer Spiteri et al. (2000) qui utilisent cette même approche en robotique, Seube et al. (2000) en aérodynamique, Aubin et al. (2001) en économie, ou encore Sicard et al. (2012) en agroalimentaire.

La viabilité a donc fait ses preuves dans le cadre du développement durable, et présente des avantages intéressants par rapport aux autres méthodes habituelles. En effet, grâce à cette méthode Sabatier et al. (2015) définissent, testent et comparent des stratégies de contrôle pour les systèmes d'élevage basés sur le pâturage.

Dans cette thèse, nous proposons d'utiliser la viabilité comme outil d'aide à la décision multiacteur. Notre approche est détaillée dans le paragraphe 5.3 et tout au long du chapitre 6.

Chapitre 5

Approche proposée : Un assistant pour jeu de rôle informatisé basé sur la théorie de la viabilité

Nous nous plaçons dans le cadre d'un jeu sérieux portant sur la gestion d'une réserve protégée marine fictive, mais inspirée de celle d'Arraial do Cabo, décrite au chapitre 3. Nous nous intéressons à trois variables symboliques des problème de gestion des réserves extractivistes et qui nous permettent de décrire cette réserve : le nombre de tortues présentes dans la réserve, le nombre de touristes dans la réserve et le capital des infrastructures de pêche. Nous modélisons un conseil de gestion de la réserve. Ce conseil inclut différents acteurs sociaux. Ces derniers doivent se mettre d'accord sur un objectif de gestion de deux manières. D'une part, ils doivent, pour chacune des variables établir un minimum et un maximum acceptable. D'autre part ils doivent établir une stratégie de gestion afin que ces variables restent bien entre les minima et maxima fixés. Afin d'établir cette stratégie, deux moyens d'action sont proposés aux décideurs : modifier la taille de mailles de filet de pêche et modifier la proportion des zones ouverte au tourisme. Pour chacun de ces moyens d'action, les joueurs devront donner une borne inférieure et supérieure.

Afin de simuler cette prise de décision, nous proposons de définir trois rôles représentant les rôles clefs de la prise de décision dans la réserve extractiviste dont nous nous inspirons. Les populations traditionnelles vivant de l'extractivisme sont représentées par le rôle du pêcheur, les métiers du tourisme (hôtellerie, restaurations, etc.) sont représentés par l'opérateur de tourisme, et les organisations de protection de l'environnement sont représentées par l'écologiste.

Notons qu'il n'y a pas nécessairement une correspondance univoque entre les variables et la préoccupation principale d'un rôle. Il serait tout à fait possible, sans modifier le fonctionnement du jeu présenté par la suite, d'ajouter des rôles comme ethnologue, représentant de la mairie, etc.

Notre but est de montrer que d'une part il est possible, grâce aux méthodes proposées dans ce chapitre, qu'un groupe de personnes aux intérêts apparemment divergents arrive à une décision consensuelle et techniquement fondée. D'autre part, que ces méthodes permettent la sensibilisation à la complexité des enjeux de gestion de territoires protégés.

5.1 Utilisation du jeu de rôle

Afin de proposer une immersion ludique aux utilisateurs, nous nous sommes tournés vers un jeu de rôle.

5.1.1 Scénario d'espace protégé marin

Dans le scénario du jeu, chaque joueur incarne un membre d'un conseil de gestion de réserve extractiviste marine Brésilienne. Au début du jeu, le scénario est présenté grâce à un texte décrivant le contexte et grâce à une carte fictive (voir figure 5.1).

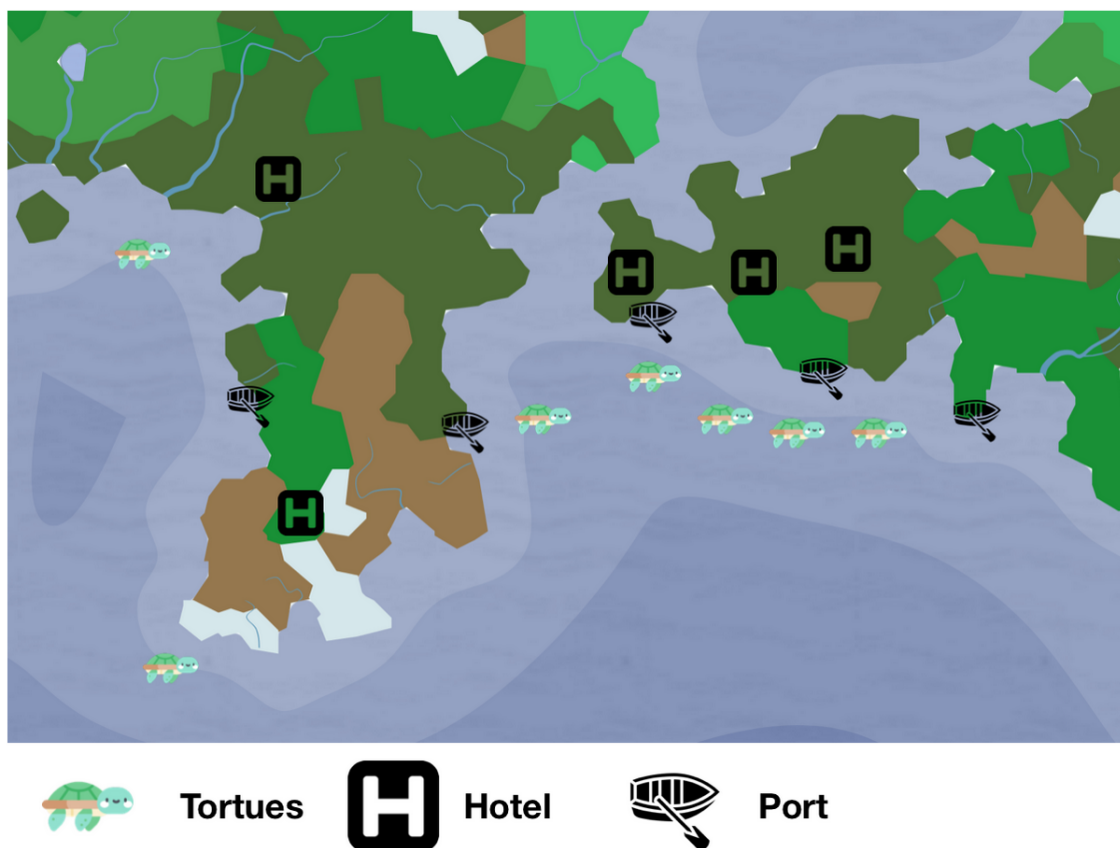


FIGURE 5.1 – Carte de la réserve fictive (capture d'écran du jeu).

Le texte de présentation associé à la carte résume rapidement le processus de création des réserves extractivistes et donne du contexte sur celles-ci :

Né dans le cadre des tentatives de définitions de politiques et stratégies de conservation ou de gestion des ressources naturelles, le concept de "réserve extractiviste" est un système proposé par Chico Mendes et les collecteurs de caoutchouc de l'Acre (Brésil) en 1985 afin de leur permettre une extraction raisonnable du latex tout en garantissant une protection durable de la forêt. Ce système s'oppose à la conversion à l'agriculture ou à la sylviculture papetière notamment, et permet une forme d'exploitation faisant intervenir les populations locales.

Quatre réserves extractivistes ont été créées en 1990, comme unités de conservation, couvrant au total plus de 2 millions d'hectares et faisant vivre plus de 20 000 personnes qui peuvent vivre en exploitant la forêt qui appartient à l'État, mais selon une concession de droit d'usage et un plan d'utilisation.

La réserve marine qu'il vous est demandé de gérer est l'une des premières réserves extractivistes marines.

Lorsque le joueur avance dans le jeu, le scénario est précisé grâce à une visualisation de la dynamique (voir figure 5.2). Ce schéma simplifié permet au joueur de comprendre les mécanismes principaux de la gestion de la réserve extractiviste.

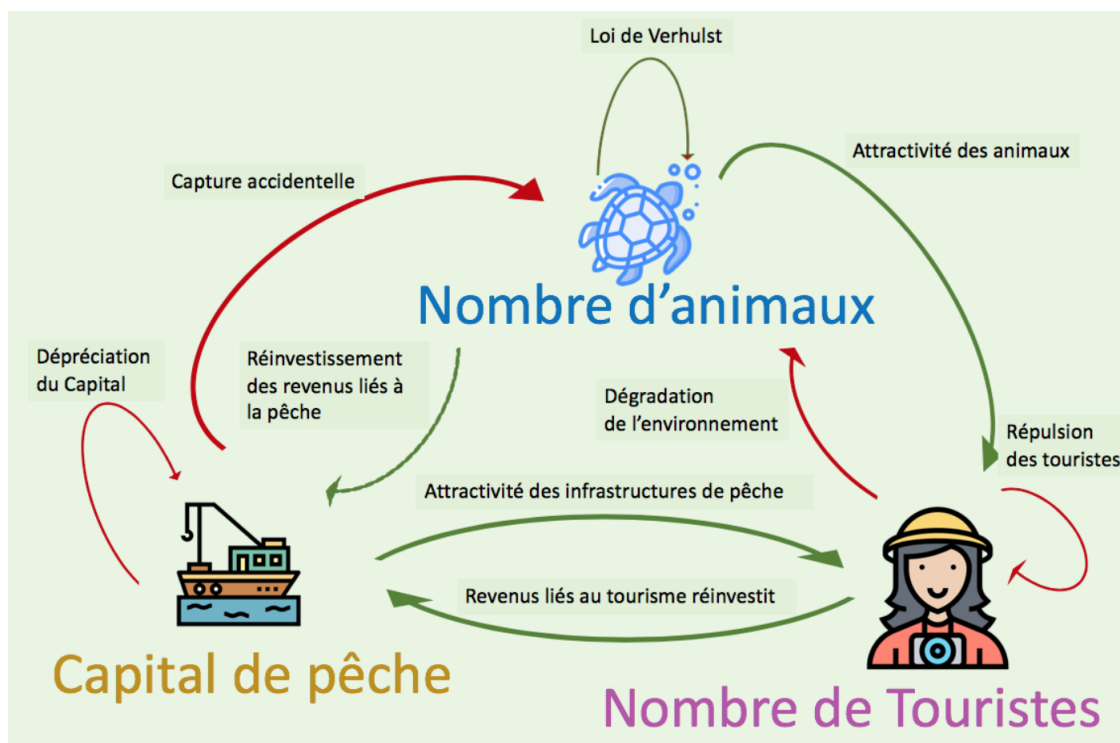


FIGURE 5.2 – Représentation de la dynamique dans le jeu de rôle.

5.1.2 Les différents rôles

À chaque joueur est associé un rôle parmi les trois rôles possibles : Opérateur de tourisme, Pêcheur et Écologiste. Dans le cas où le nombre de joueurs est supérieur à trois, deux joueurs peuvent avoir le même rôle, ils forment alors une équipe et ont des objectifs identiques.

Afin que les joueurs prennent connaissance de leur rôle, ils ont accès à une fiche leur donnant des informations sur celui-ci. Ils pourront la consulter tout au long du jeu. Les fiches sont composées de trois types d'informations :

- Un contexte sur la personne incarnée (son rapport à la nature, au tourisme, à la pêche, la raison de sa présence au conseil de décision).
- Des observations et croyances sur la réserve extractiviste.
- Des préférences sur la valeur des différentes variables et sur les moyens d'action à mettre en place.

De plus, il est précisé pour chacun des joueurs qu'en cas de désaccord, c'est aux pêcheurs que reviendra la décision finale. En effet, les populations traditionnelles ont la majorité des voix dans les conseils des réserves extractivistes, dans ce scénario il s'agit des pêcheurs. Cependant tous les joueurs sont invités à collaborer, et comme nous le verrons dans le chapitre 7 sur l'évaluation du jeu, les cas de décision non consensuelle ont été très rares.

5.1.2.1 L'opérateur de tourisme



FIGURE 5.3 – Icône représentant l'opérateur de tourisme dans le jeu.

Il appartient à l'opérateur de Tourisme de représenter les différentes professions du tourisme au conseil. Son objectif principal est donc un nombre de touristes élevé. Cependant, les autres variables (Animaux et Capital des infrastructures de pêche) ont une influence positive sur le nombre de touristes, il est donc satisfait lorsque ces variables sont élevées elles aussi.

Contexte sur le rôle

Le contexte sur le rôle incarné permet au joueur de mieux s'identifier à son personnage. Il donne aussi les raisons de ses croyances et de ses objectifs. Cela permet au joueur de mieux comprendre les motivations du personnage. Enfin, il est précisé que plusieurs personnes font confiance au personnage que le joueur incarne pour défendre leurs intérêts au cours de la négociation. Cela permet d'ajouter un enjeu.

Voici le contexte sur l'opérateur de tourisme :

Né dans la région de l'aire protégée marine, vous avez toujours apprécié sa beauté et vous voulez la faire découvrir aux autres. C'est dans ce but que vous vous êtes tourné vers le tourisme il y a une dizaine d'années. Vous avez conscience de l'impact du tourisme sur l'écologie, mais êtes convaincu que grâce à l'essor de l'écotourisme (tourisme écologique) la cohabitation des touristes et de la faune locale est possible. Depuis des années, vous avez pu voir comment le tourisme a bénéficié aux habitants de la région et a amélioré leur niveau de vie. Très apprécié par votre communauté, vous avez été choisi pour défendre les intérêts des professionnels du tourisme (hôteliers, restaurateurs...). Ces personnes comptent sur vous pour défendre leurs points de vue.

Observations et croyances sur la réserve extractiviste

Les observations et croyances sur la réserve extractiviste permettent au joueur de construire une image mentale qui lui est propre, et qui est en général différente de celle des autres rôles.

Les observations et croyances de l'opérateur de tourisme sont les suivantes :

- Les touristes sont très attirés par les tortues.
- Lorsqu'une trop grande partie de l'aire protégée est fermée au tourisme, cela a un impact négatif sur le nombre de touristes qui font appel à vos services.

Ainsi le joueur dont le rôle est "Opérateur de tourisme" est incité à modifier le paramètre relatif à l'attraction des tortues sur les touristes pour faire en sorte qu'il soit très élevé.

Préférences sur les différentes variables et moyens d'action

Enfin, les préférences en termes d'objectifs sur les différentes variables et sur les valeurs de moyens d'action sont présentées aux joueurs. Cinq nuances de couleurs sont utilisées, quatre couleurs sont utilisées pour représenter le degré de satisfaction du joueur : de vert (très bien) à rouge (très mauvais). Une cinquième couleur, le gris, est utilisée pour représenter l'absence d'avis ou de connaissance.

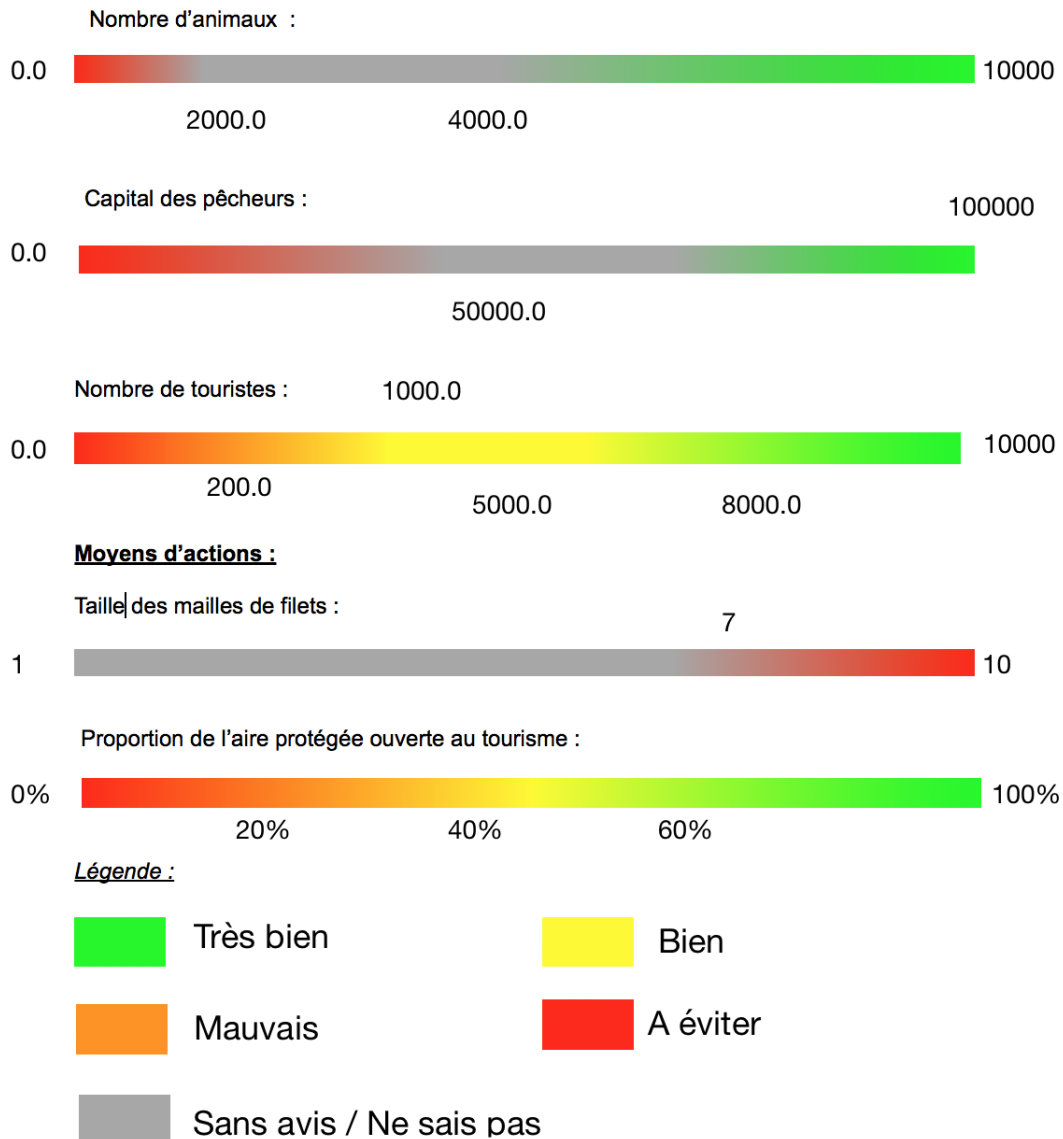


FIGURE 5.4 – Préférences sur les différentes variables et moyens d'action du joueur opérateur de tourisme.

L'opérateur de tourisme connaît bien et s'intéresse particulièrement au tourisme. Il veut un nombre élevé de touristes. Ainsi la jauge représentant le nombre de touristes est complètement colorée avec les valeurs les plus basses dans des nuances de rouges et les valeurs les plus hautes dans des nuances de verts. Cependant ce même personnage connaît assez mal l'influence des mailles de filet et ce paramètre lui importe peu. Il sait cependant que si les mailles sont trop grosses les pêcheurs ont plus de mal à pêcher efficacement et il tient à éviter cela. La jauge représentant la taille des mailles des filets est donc entièrement grise hormis pour les valeurs les plus hautes qui sont rouges.

5.1.2.2 Le pêcheur



FIGURE 5.5 – Icône représentant le pêcheur dans le jeu.

Le pêcheur représente au conseil le syndicat des pêcheurs. Son objectif principal est donc un Capital des infrastructures élevé. Cependant, les autres variables (nombre d'animaux et nombre de touristes) ont une influence positive sur le capital de pêche, il est donc satisfait lorsque ces variables sont élevées également.

Contexte sur le rôle

Voici le contexte sur le rôle du pêcheur :

Né dans la région de l'aire protégée marine, vous avez toujours apprécié la tranquillité de la mer. Adolescent vous aidiez déjà votre père à pêcher et il y a 5 ans vous avez économisé assez pour vous acheter votre propre bateau de pêche.

En plus de votre activité de pêche, vous proposez ponctuellement aux touristes des tours en bateau et leçons de pêche traditionnelle afin de leur faire découvrir votre métier.

La réserve marine abrite de nombreuses tortues et il vous arrive d'en piéger accidentellement. Malheureusement, le temps que vous remontiez votre filet les tortues ont été asphyxiées. Ces incidents restent tout de même assez isolés.

Très apprécié par votre communauté, vous avez été choisi pour défendre les intérêts des pêcheurs lors du conseil de gestion de l'aire protégée. Ces personnes comptent sur vous pour défendre leurs intérêts.

Observations et croyances

Voici les observations et croyances du rôle pêcheur :

- Si vous revendiez votre bateau aujourd'hui, il vaudrait 30% de moins que le prix auquel vous l'avez acheté lorsque vous avez commencé.
- 10 kilos de poissons vous rapportent entre 160 et 200 Réaux
- 1 Réal est égal environ à 0,25 dollar.

Le joueur pêcheur est ainsi incité à modifier certains paramètres du modèle. Il sait que la dépréciation du capital est de 30% sur cinq ans et que les poissons qu'il pêche coûtent entre 40 et 50 dollars pour dix kilos.

Préférences sur les différentes variables et moyens d'action

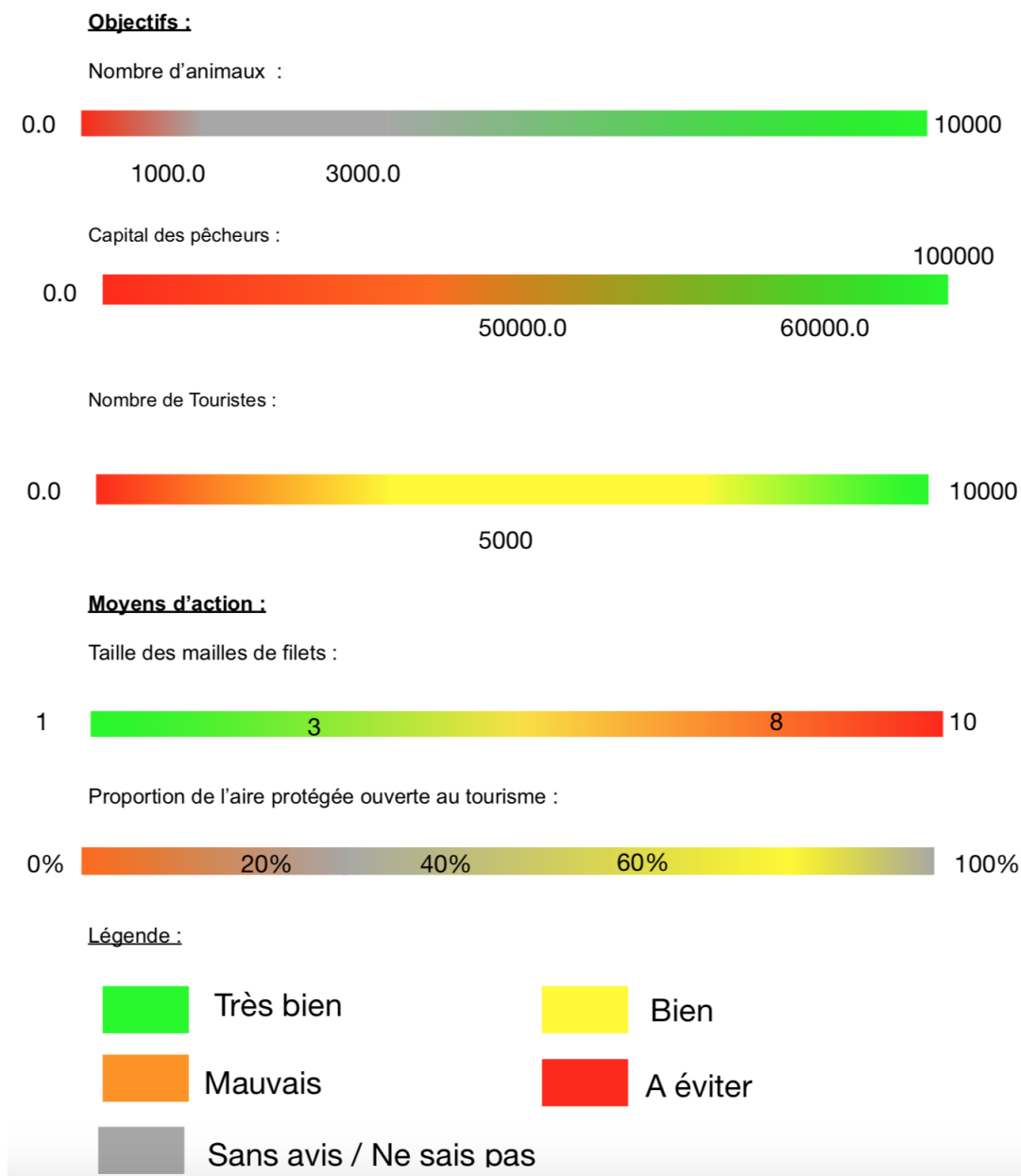


FIGURE 5.6 – Préférences sur les différentes variables et moyens d'action du joueur pêcheur (Capture d'écran de la fiche correspondant au rôle).

Le pêcheur connaît particulièrement bien la variable décrivant le capital des infrastructures, le nombre de touristes et la taille des mailles de filets. Ce rôle a moins de connaissances en ce qui concerne le nombre d'animaux, même s'il sait qu'il est préférable que ce nombre soit élevé, dans un intérêt de préservation de l'environnement.

5.1.2.3 L'écologiste



FIGURE 5.7 – Icône représentant l'écologiste dans le jeu.

L'écologiste représente au conseil les différents acteurs de la protection des tortues. Son objectif principal est donc un nombre de tortues élevé. Les autres variables (nombre de Touristes et Capital des infrastructures de pêche) ont une influence négative sur le nombre de tortues. L'écologiste est donc satisfaite lorsque ces variables ne sont pas trop élevées.

Contexte sur la personne incarnée

Voici le contexte sur le rôle de l'écologiste :

Après une enfance et une adolescence passées à la ville, vous vous êtes installée proche de la nature, dans la région de la réserve marine il y a cela 15 ans.

La protection de la nature et de la biodiversité vous a toujours intéressé et vous avez décidé de vous engager plus concrètement. C'est ainsi que vous vous êtes engagée dans une association de protection de la vie marine dont vous dirigez la branche spécialisée dans la protection des tortues marines.

Votre rôle est très important, car la réserve constitue un espace privilégié pour la reproduction des tortues marines.

Observations et croyances sur la réserve extractiviste

Voici ses observations et croyances sur la réserve extractiviste :

- Le taux de reproduction des tortues est faible et le nombre total de tortues peut mettre très longtemps à se stabiliser.
- Si le nombre de tortues de la réserve descend en dessous de 1000, cela peut remettre en cause la survie de cette espèce dans cette région.
- Un faible taux de prise accidentelle de tortues dans les filets de pêcheurs est primordial pour le bien-être des tortues

Préférences sur les différentes variables et moyens d'action

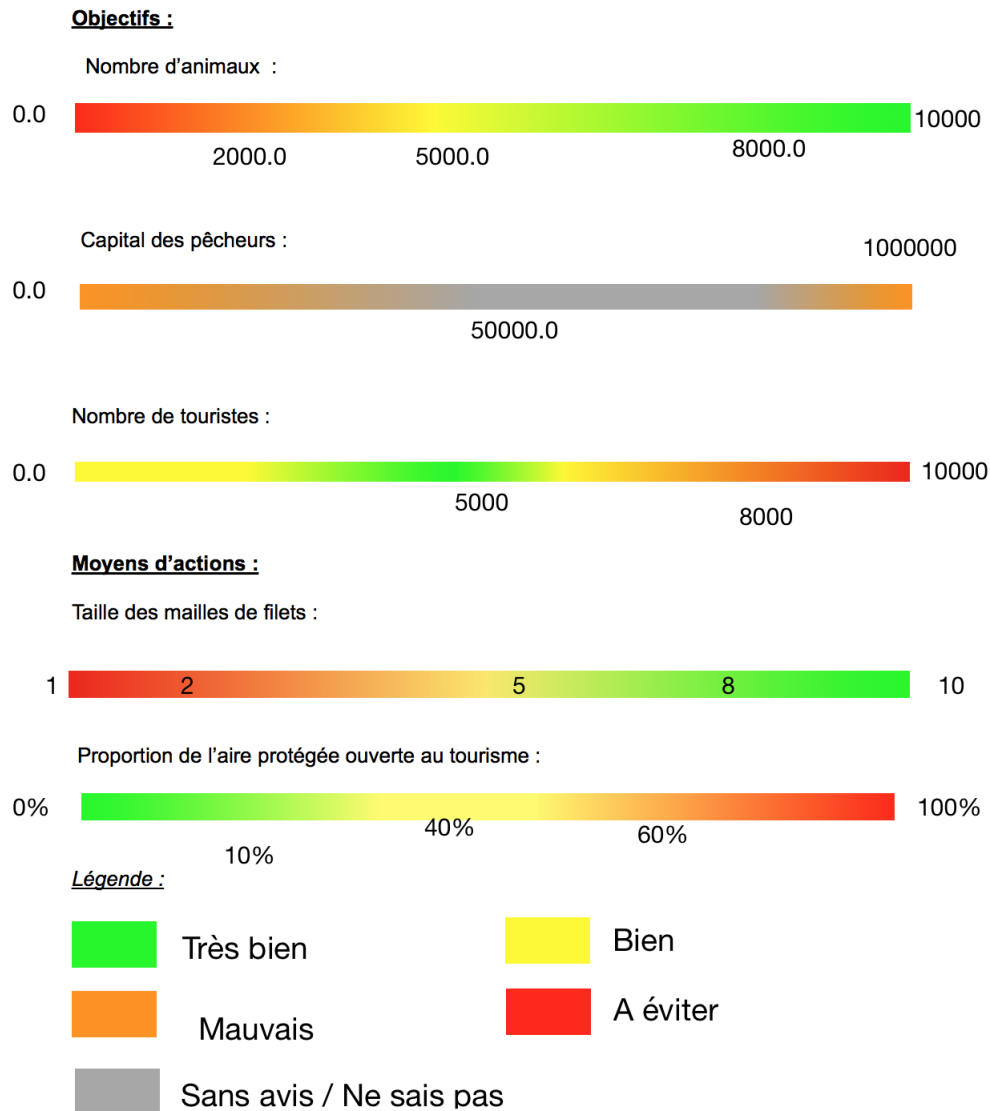


FIGURE 5.8 – Préférences sur les différentes variables et moyens d'action du joueur écologiste.

L'écologiste connaît particulièrement bien la variable décrivant le nombre de tortues, le nombre de touristes, la taille des mailles de filets et la proportion de la réserve extractiviste ouverte au tourisme. Ce rôle a moins de connaissances en ce qui concerne le capital des pêcheurs, même si elle sait que si ce nombre est trop bas les pêcheurs vont en pâtir, et s'il est trop haut cela aura une influence négative sur le nombre de tortues. L'écologiste est le seul rôle à considérer que des valeurs trop élevées de certaines variables sont à proscrire. Cela permet d'engendrer des négociations intéressantes pendant le jeu.

5.2 Conception d'un modèle mathématique pour la gestion d'espace protégé

Afin de proposer aux joueurs une aide technique, nous proposons d'utiliser la théorie de la viabilité. Pour utiliser cette théorie nous avons besoin d'un modèle dynamique composé de variables sur lesquelles s'exercent les contraintes et où les effets des contrôles sont connus (comme le système (4.1)). Nous nous plaçons dans le contexte d'une aire protégée marine, inspirée de la réserve d'Arraial do Cabo décrite

au chapitre 3. Nous utilisons une dynamique simple et prenons en compte trois variables qui sont les composantes symboliques des enjeux présents.

5.2.1 La dynamique continue

Le modèle dynamique prend en compte la population animale (de tortues) $A(t)$, l'activité touristique $T(t)$ et le capital des infrastructures de pêche $C(t)$. Les touristes se rendent au parc marin pour, entre autres, observer ces tortues. La zone marine protégée est ouverte à la pêche traditionnelle. Les pêcheurs traditionnels offrent des services aux touristes comme des excursions en bateau. Leur pêche conduit à la capture accidentelle de tortues marines. Les influences des différents paramètres sont expliquées en détail dans la figure 5.9.

Pour définir le modèle, nous nous sommes inspirés du travail sur le tourisme durable de Casagrandi et Rinaldi (Casagrandi and Rinaldi, 2002). Les touristes (T) et le capital des pêcheurs (C) ont un impact négatif sur le nombre de tortues (A), mais le nombre de tortues et le capital des pêcheurs sont attractifs pour les touristes. Le capital des infrastructures est indirectement influencé par le nombre de tortues, car nous simplifions le modèle en considérant que le nombre de tortues est proportionnel au nombre de poissons. En effet, puisque ces deux espèces vivent dans le même environnement nous considérons que la pollution et la pêche les influencent d'une manière similaire.

5.2.2 Les paramètres

Les données concernant les différentes variables étant absentes (pour le tourisme notamment) ou trop hétérogènes (mélange de tortues terrestres et marines) nous nous sommes donc reposés sur des données issues de la littérature. Ces données sont parfois tirées d'autres espèces de tortues ou bien d'autres espèces marines (notamment en ce qui concerne le tourisme).

Les Animaux

La dynamique représentant le nombre d'animaux est un modèle de Verhulst (Schtickzelle, 1981).

$$\frac{dA}{dt} = gA \left(1 - \frac{A}{K_A}\right) - \zeta l T A - i_p A C \quad (5.1)$$

$$\text{avec } K_A = 1 + M [1 + \eta T / (1 + \epsilon)]^{-1}.$$

- $g = n - m = (4.5 - 1)$ en tortues par an. g correspond au taux de croissance des tortues, il est égal au taux de natalité moins le taux de mortalité. On a environ 98% de mortalité infantile (incluant les oeufs), environ 4.5 nids par tortues et 100 oeufs par nid (soit 9 oeufs par tortues femelles) pour l'espèce *Chelonia Hydais* (linn.) en Malaisie (Hendrickson, 1958). De plus le taux de mortalité est estimé à 1% (Brooks et al., 1991), bien que cette étude concerne une autre espèce de tortue. De plus, on considère que le ratio mâle/femelle est 50/50 et que les uns ou les autres ne sont pas plus touchés par la pollution, les touristes ou la pêche.
- $l = 0.0052$, l correspond au taux de mortalité des tortues liée à l'interaction directe avec les touristes. Les données sur les tortues étant limitées nous nous sommes tournés vers des études réalisées sur les raies (Semeniuk et al., 2010), dans lesquelles les auteurs considèrent six causes possibles de mort par le contact de touristes. Nous n'en considérons que quatre car dans notre modèle les touristes ne nourrissent pas les tortues et ne les touchent pas non plus.
- $p = 0.136/dt$: p correspond à la proportion de tortues tuées par la pêche. On a trois tortues caouanne¹ sur un échantillon de 22 prises par la pêche (soit 13.6%) (Leandro et al., 2001), et bien que les caouannes ne soient pas les seules tortues présentes sur les côtes Brésiliennes elles y sont tout de même représentées (Marcovaldi Mangela, 2007). Les juvéniles sont les plus touchées par la prise accidentelle dans les filets de pêche, il serait donc plus précis de faire un modèle par classe d'âge mais nous avons choisi de simplifier le modèle. Par un autre calcul (en se basant sur les chiffres de M.G. Gallo et al. (2006) on obtient environ 15% de tortues tuées par la pêche artisanale (en additionnant les morts en raison des différentes techniques de pêche (70 + 70 + 50 + 100) et en divisant par l'échantillon (2246)).

1. La caouanne (*Caretta caretta*) est une espèce de tortue de mer que l'on retrouve dans les océans du monde entier.

- $M = 36036$, M correspond à la capacité maximale des animaux, elle est tirée de Godley et al. (2001), qui ont étudié des plages où les tortues n'ont pas de contact avec les humains (direct ou indirect, via la pollution).
- $\eta = 7/(10^5/dt) \approx 6^{-6}$, η correspond au nombre par lequel un touriste divise la capacité de l'environnement. Du fait du manque de données sur ce sujet en ce qui concerne les tortues, nous avons choisi de prendre une étude sur les dauphins. Pour 100 000 visiteurs par an, un déclin d'un dauphin sur sept a été observé par Bejder et al. (2006).
- $\epsilon = 100$ correspond à l'effort de restauration de l'environnement.
- i_p correspond à la proportion de tortues tuées par la pêche, et ζ représente la proportion des zones de vie des tortues accessible aux touristes. i_p et ζ sont les deux contrôles et leur valeur est modifiable.

Le Capital de pêche

Le capital suit l'équation (5.2), où $C(t)$ représente l'argent investi dans les infrastructures de pêche.

$$\frac{dC}{dt} = -\delta C + pm_p i_p AC + m_t i_t T \quad (5.2)$$

- $\delta = 0.12$ par an = 0.01 par mois, δ correspond à la dépréciation des infrastructures de pêche. Le taux de dépréciation des bateaux de pêche de petite taille (5-19 tonnes) correspond à 0,120 en moyenne par an (Lee, 1978). D'après nos observations sur place, à Arraial de Cabo, les bateaux de pêcheurs appartiennent bien à cette catégorie.
- $m_p A i_p = 3.320.119,50$ par an, le produit $m_p A i_p$ correspond à l'argent venant de la pêche, en 2018 il est égal à 3.320.119,50 de Mendonça et al. (2010), mais seulement une partie p de ce revenu est réinvestie dans les infrastructures de pêche.
- $m_p = 14$ est le prix du nombre de poissons pris, pour une tortue prise. On pourrait l'exprimer sous la forme de deux paramètres : m_{p1} le nombre de poissons pris pour une tortue prise, et m_{p2} le prix d'un poisson. On a donc $m_p = m_{p1} \times m_{p2}$. Il n'y a à ma connaissance pas de source disponible pour ce nombre.
- $m_t = [5M/dt]/10000$, m_t correspond à l'argent payé par les touristes aux pêcheurs. En 2018, FIPAC (association des pêcheurs d'Arraial do Cabo : Fundação Instituto de Pesca de Arraial do Cabo) comptabilise 5 millions de Réaux de bénéfices (Anonymous, 2018a). En 2005, on compte 35 établissements hôteliers à Arraial do Cabo (da Vinha et al., 2008) et 20 000 touristes par jour en été d'après nos sources sur place (membre de la FIPAC rencontré à Arraial do Cabo), on peut donc estimer une moyenne de 10 000 touristes. De plus, le montant facturé pour le trajet en bateau varie de 5,00 R\$ pour les trajets courts (trajet entre la marina et la plage de Forno) et jusqu'à 25,00 R\$ (da Vinha et al., 2008) et la valeur d'entrée sur la marina, reversée à l'association des pêcheurs, est de 5 R\$ (Anonymous, 2018b).
- i_t est la proportion du revenu lié au tourisme qui est investie dans les infrastructures.

Le Tourisme

Pour l'évolution du nombre de touristes, nous nous sommes encore une fois inspirés de Casagrandi and Rinaldi (2002). Les touristes sont attirés d'une part par les animaux $\frac{a\zeta A(t)}{A(t)+\phi}$, ils sont plus attirés s'ils ont plus de chance de voir un animal mais ne seront pas deux fois plus attirés s'ils peuvent voir deux fois plus de tortues (cela est signifié par le paramètre ϕ). Les touristes sont aussi attirés par les infrastructures d'un facteur μ_E . De plus les touristes se repoussent entre eux, cela est exprimé par le paramètre α .

$$\frac{dT}{dt} = T(-\alpha T + \frac{a\zeta A}{A+\phi} + \mu_E C) \quad (5.3)$$

- $\alpha = 0.9$ α est le paramètre de congestion, il exprime le fait que les touristes préfèrent un nombre de touristes peu élevé. C'est une hypothèse utilisée par Casagrandi and Rinaldi (2002) et qui se vérifie dans Catlin and Jones (2010). Dans ce dernier article, on passe de 44 personnes qui préfèrent 10 personnes dans l'eau à 5 personnes qui préfèrent 11 personnes dans l'eau soit environ 90% de moins.

- Le paramètre $a = 1500$ est l'attractivité du site liée aux animaux et $\mu_E = 5 \times 10^{-4}$ est l'attractivité du site liée aux infrastructures de pêche. On note que dans Catlin and Jones (2010) lorsque l'on demande aux touristes ce qu'ils ont apprécié, 45% des réponses qui concernent les animaux contre 15% pour la qualité des infrastructures.
- $\phi = 3666$: ϕ est la contrainte de saturation semi-maximum. Elle correspond au nombre de tortues pour lequel la satisfaction des touristes est à la moitié du maximum. Sur le tourisme sauvage, Fredline and Faulkner (2001) ne font pas de différence si la personne a vu un ou plusieurs animaux. On peut donc estimer qu'à partir d'un animal la satisfaction est à la moitié du maximum. D'après nos estimations $\phi = 3666$. En effet soit S_P la superficie de la réserve $S_P = 200km^2 = 2 \times 10^8 m^2$, on considère qu'un touriste peut voir à une distance $H = 3m$, il parcourt $L = 9km = 9000m$ (distance d'un trajet entre le port de Cabo Frio et l'île d'en face), il va donc voir $ST = LH = 9000m^2$. Pour que le touriste aperçoive une tortue, il faut donc une tortue pour $9000 m^2$ soit $2 \times 10^8 / (9 \times 10^3) \times 3$ tortues pour la réserve ce qui donne 3666 tortues.

Le manque de données sur la réserve nous empêche de calibrer le modèle sur les données réelles.

Les contrôles

Des actions de contrôle sont possibles et font partie intégrante de la modélisation. Le paramètre ζ représente la proportion des zones de vie des tortues accessible aux touristes, il peut être modifié en faisant varier la proportion de la réserve ouverte au tourisme. Le paramètre i_p représente le taux de prise accidentelle, il peut être modifié en faisant varier la taille des mailles de filet (Murray, 2009). Dans le modèle présenté, ζ et i_p sont des paramètres de contrôle, ils ne sont pas fixes et peuvent varier dans une certaine plage, fixée par les participants de la négociation.

Il est possible que les utilisateurs ne soient pas d'accord sur la dynamique, c'est pourquoi il leur est possible de modifier les paramètres s'ils le désirent.

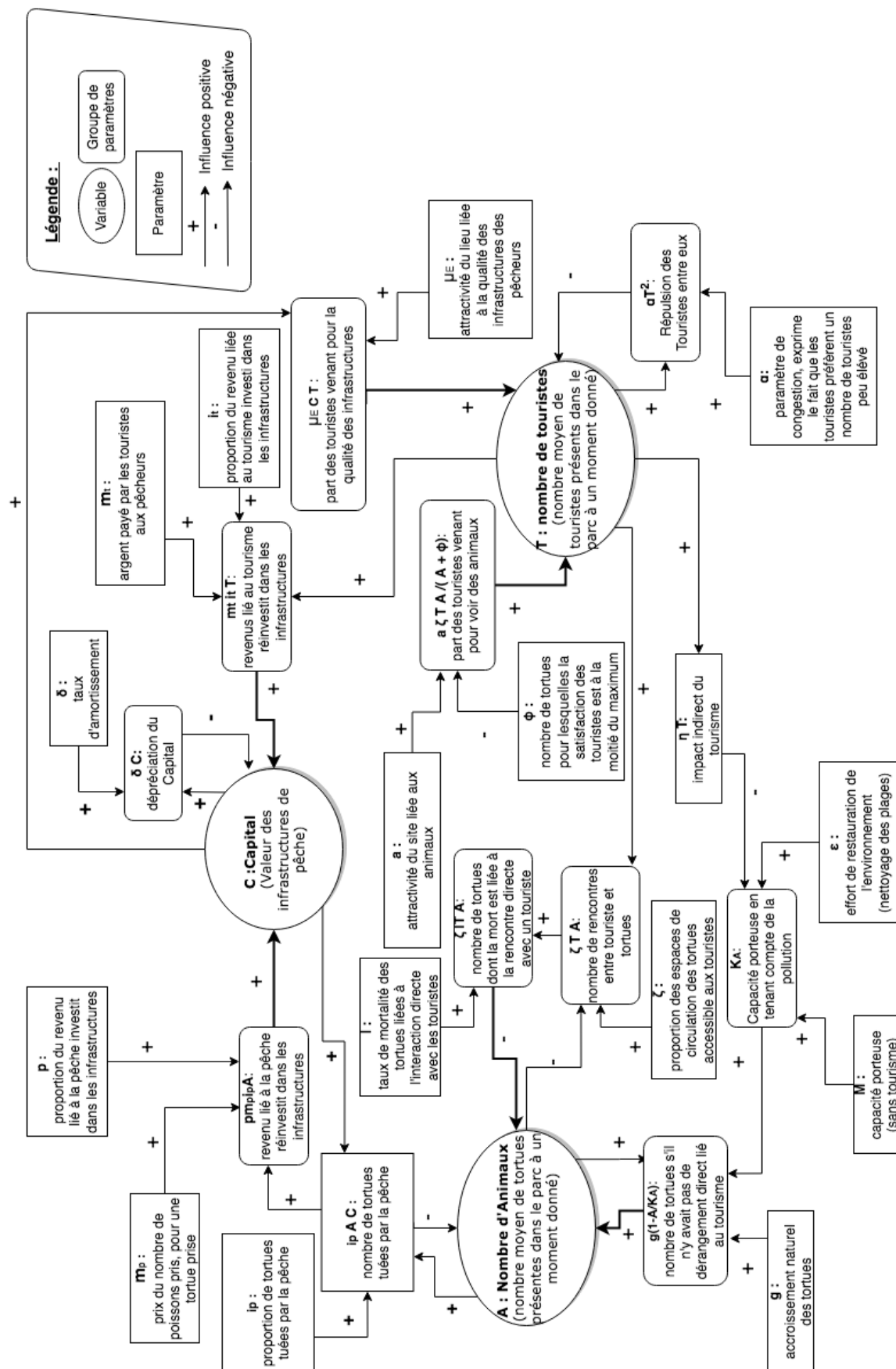


FIGURE 5.9 – Influence des paramètres sur les variables.

5.2.3 Comportement de la dynamique

Le modèle est donc représenté par les trois variables A, C, T et est décrit par cette dynamique :

$$\frac{dA}{dt} = gA \left(1 - \frac{A}{K_A} \right) - \zeta l T A - i_p A C \quad (5.4)$$

$$\frac{dC}{dt} = -\delta C + p m_p i_p A C + m_t i_t T \quad (5.5)$$

$$\frac{dT}{dt} = T \left(-\alpha T + \frac{a \zeta A}{A + \phi} + \mu_E C \right) \quad (5.6)$$

$$\text{avec } K_A = 1 + M [1 + \eta T / (1 + \epsilon)]^{-1}.$$

Tous les paramètres sont fixés comme établi précédemment à l'exception des deux paramètres de contrôle ζ et i_p . Les figures 5.10 et 5.11 représentent les trois variables en fonction du temps pour des paramètres de contrôles différents.

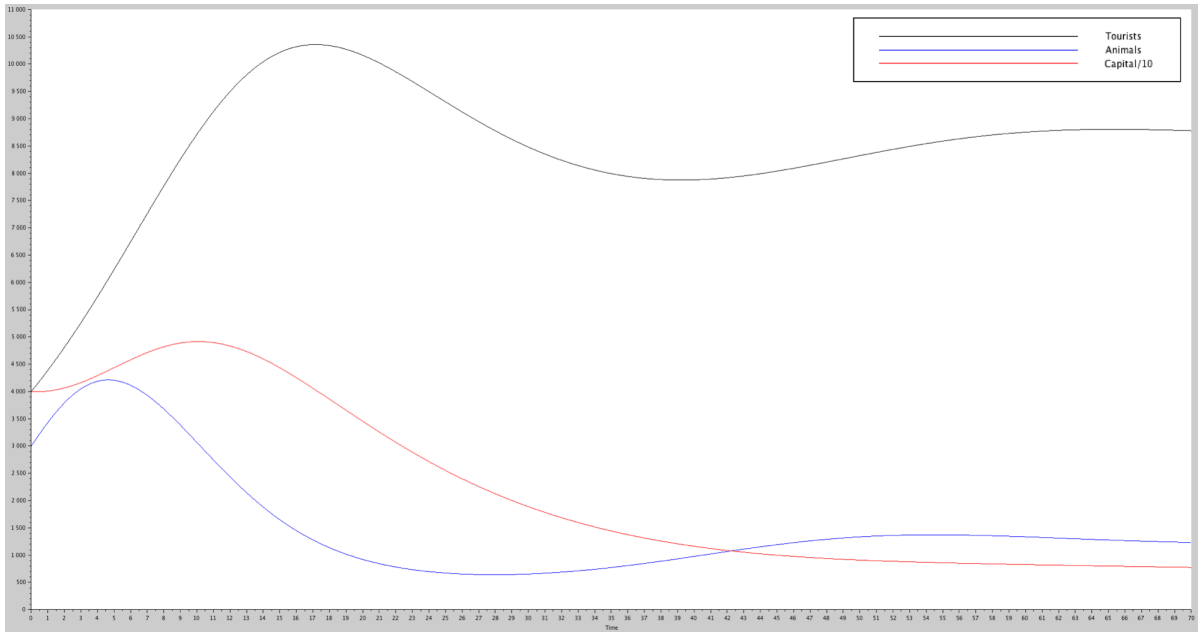
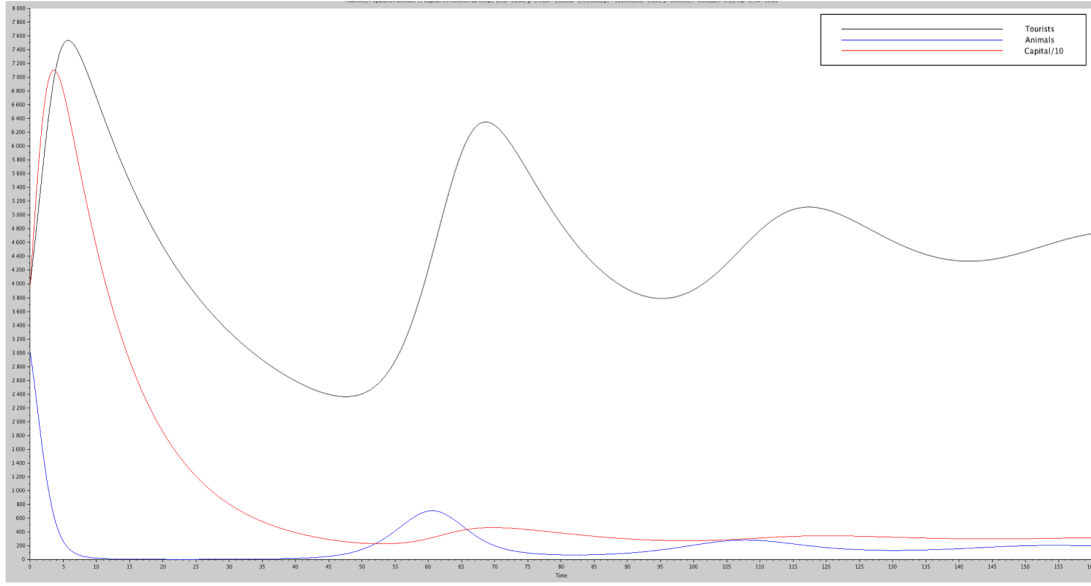
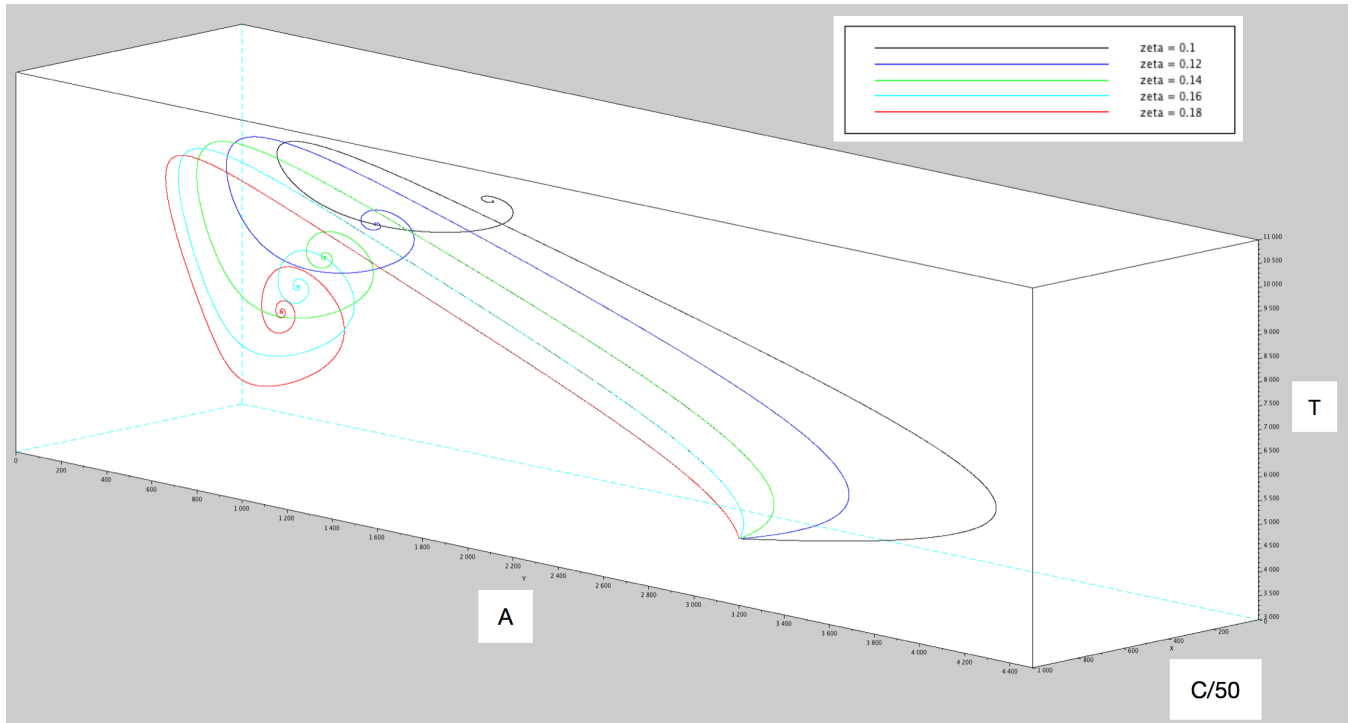


FIGURE 5.10 – A, C/10 et T en fonction du temps pour $i_p = 10^{-6}$ et $\zeta = 0.1$ de $t = 0$ à $t = 50$.


 FIGURE 5.11 – $A, C/10$ et T en fonction du temps pour $i_p = 5 \times 10^{-6}$ et $\zeta = 0.2$ de $t = 0$ à $t = 160$.

Quand K_A est constant (et ne dépend pas de T) nous avons vérifié qu'il existe un équilibre non nul. Cet équilibre varie selon la valeur des paramètres de contrôle. Sur les figures 5.12 et 5.13 on peut observer ces variations en fonction des valeurs des paramètres de contrôle i_p et ζ . Plus $i_p \in [10^{-6}, 5 \times 10^{-6}]$ est proche de sa valeur maximale 5×10^{-6} , plus la vitesse de convergence sera faible et inversement. De même, plus $\zeta \in [0.1, 0.2]$ est proche de sa valeur maximale 0.2, plus la vitesse de convergence sera faible et inversement.


 FIGURE 5.12 – Diagramme de phase de $A, C/50$ et T pour $i_p = 10^{-6}$ et ζ variant de 0.1 à 0.18.

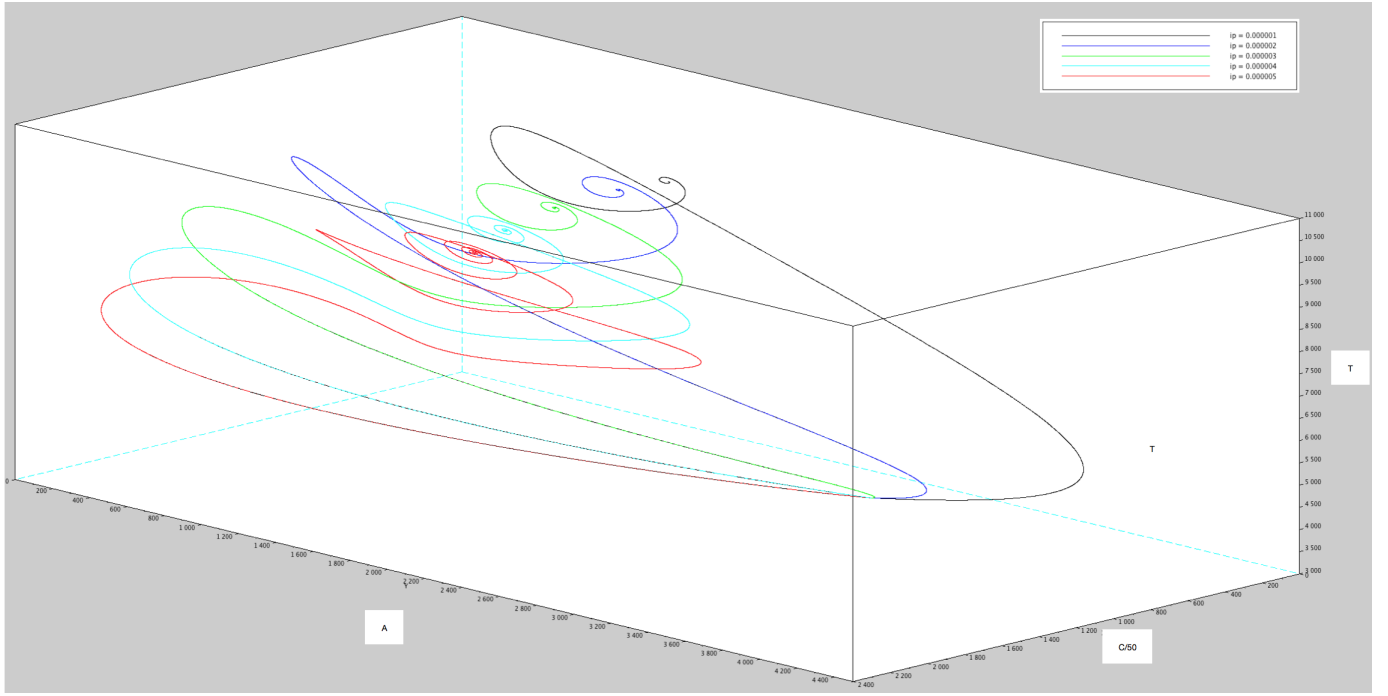


FIGURE 5.13 – Diagramme de phase de A , $C/50$ et T pour $\zeta = 0.1$ et i_p variant de 10^{-6} à 5×10^{-6} .

Comme nous le verrons dans la suite, il est possible que les joueurs déterminent leurs propres valeurs de paramètres pour ce modèle. Il est aussi possible de prendre en compte des incertitudes en déterminant une plage de valeurs pour certains paramètres.

5.2.4 Discrétisation du modèle

Nous proposons également une dynamique discrète, similaire à la dynamique continue.

Cette discrétisation nous permettra de calculer des noyaux garantis (voir définition 19). Effectivement, nous n'avons pas connaissance de bibliothèque permettant de calculer, avec garantie de convergence, des noyaux garantis avec des systèmes continus.

On prend un pas de temps $\tau := \Delta t$. On définit $t_n = n\tau$ et $A_n = A(t_n)$, $C_n = C(t_n)$, $T_n = T(t_n)$. Une approximation des équations continues est alors :

$$\frac{A_{n+1} - A_n}{\tau} = gA_n(1 - A_n/K_A) - \zeta T_n A_n - i_p A_n C_n \quad (5.7)$$

$$\frac{C_{n+1} - C_n}{\tau} = -\delta C_n + pm_p i_p A_n C_n + m_t i_t T_n \quad (5.8)$$

$$\frac{T_{n+1} - T_n}{\tau} = T_n(-\alpha T_n + \frac{a\zeta A_n}{A_n + \phi_n} + \mu_E C_n) \quad (5.9)$$

Après réarrangement on a :

$$A_{n+1} = (1 + \tau g)A_n - \tau g A_n^2/K_A - \tau \zeta T_n A_n - \tau i_p A_n C_n \quad (5.10)$$

$$C_{n+1} = (1 - \tau \delta)C_n + \tau pm_p i_p A_n C_n + \tau m_t i_t T_n \quad (5.11)$$

$$T_{n+1} = T_n - \tau T_n(-\alpha T_n + \frac{a\zeta A_n}{A_n + \phi_n} + \mu_E C_n) \quad (5.12)$$

Avec $K_A = 1 + M [1 + \eta T_n/(1 + \epsilon)]^{-1}$.

La quasi-totalité des valeurs des paramètres du modèle restent les mêmes lorsque l'on passe du modèle continu au modèle discret. Ces paramètres sont décrits dans la section 5.2.2. On note deux exceptions :

- i_p n'est plus un contrôle.
- ϵ devient un contrôle.

Ces changements nous permettront de mieux visualiser les différences entre plusieurs noyaux garantis ayant les mêmes contraintes et contrôles.

Les équations sont stables si τ est assez petit. Les valeurs satisfaisantes de τ sont trouvées par exploration du modèle.

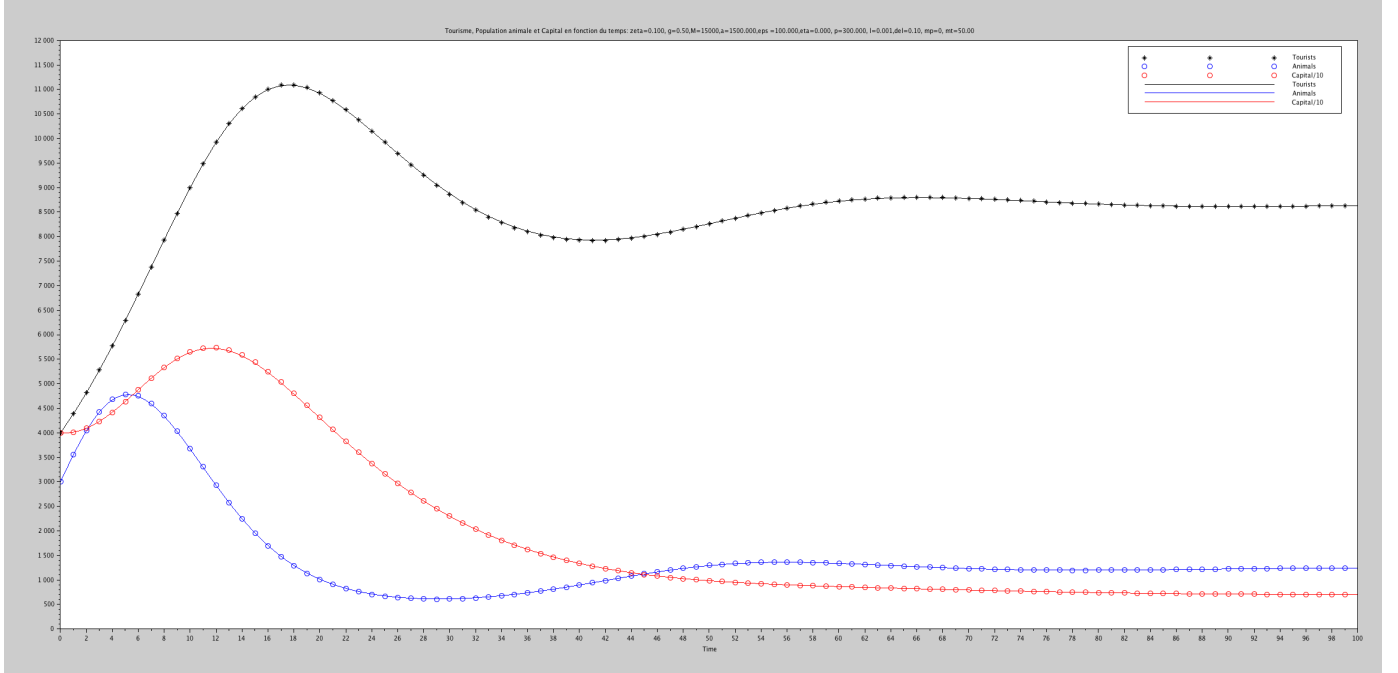


FIGURE 5.14 – Simulation avec $\tau = 0.3$, $i_p = 1 \times 10^{-6}$. En ligne continue on observe la dynamique continue en fonction du temps et en pointillé la dynamique discrète. En noir le nombre de touristes, en rouge le capital des infrastructures du pêches divisé par 10 et en bleu le nombre d'animaux.

On note : $Sd_{RESEX,i}$ le système tychastique contrôlé discret (tel que défini au paragraphe 4.5.2 par l'équation 4.9) :

$$Sd_{RESEX,i} \begin{cases} A_{n+1} &= (1 + \tau g)A_n - \tau g A_n^2 / K_A - \tau \zeta T_n A_n - \tau i_{pi} A_n C_n \\ C_{n+1} &= (1 - \tau \delta)C_n + \tau p m_p i_{pi} A_n C_n + \tau m_t i_t T_n \\ T_{n+1} &= T_n - \tau T_n (-\alpha T_n + \frac{a \zeta A_n}{A_n + \phi_n} + \mu_{Ei} C_n) \\ (A, C, T) &\in K = [A_{\min}, A_{\max}] \times [C_{\min}, C_{\max}] \times [T_{\min}, T_{\max}] \\ (\epsilon, \zeta) &\in U = [\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}] \times [\zeta_{\min}, \zeta_{\max}] \\ (i_{pi}, \mu_{Ei}) &\in V = [i_{pi, \min}, i_{pi, \max}] \times [\mu_{Ei, \min}, \mu_{Ei, \max}] \end{cases} \quad (5.13)$$

avec $K_A = 1 + M [1 + \eta T_n / (1 + \epsilon)]^{-1}$.

5.3 Utilisation de la viabilité

Afin de proposer une solution techniquement fondée, nous choisissons d'utiliser la théorie de la viabilité décrite au chapitre précédent (paragraphe 4.5).

5.3.1 Apports et intérêts de cette approche

La hiérarchisation des critères n'est pas nécessaire

Contrairement à l'optimisation directe, la viabilité fixe uniquement l'ensemble de contrainte à l'intérieur duquel l'état du système doit rester (ou les zones à éviter) et permet de ne pas hiérarchiser les critères. Cette pratique correspond à ce qui peut se faire dans certaines études sur le changement climatique. En effet, Petschel-Held et al. (1999) préconisent l'approche des "fenêtres tolérables"², basée sur la définition d'un ensemble de zones à éviter pour l'évolution du climat, comme les seuils critiques pour la formation des eaux profondes de l'Atlantique Nord ou bien des normes minimales pour la production alimentaire par habitant dans le monde. Ainsi, les différents piliers écologiques, économiques et sociaux de la durabilité sont pris en compte sans que l'un prime sur les autres.

L'équité intergénérationnelle peut être modélisée

Comme nous l'avons vu au chapitre (1.2), la durabilité doit prendre en compte à la fois le long et le court terme, par exemple en imposant l'équité intergénérationnelle. La viabilité permet de formaliser cette équité en imposant, pour un horizon infini, une contrainte sur le niveau minimal de ressources disponibles. Ainsi, chaque génération aura au moins accès à ce seuil de ressource. Les contraintes définies à un instant t sont les mêmes que celles qui devront être satisfaites à l'instant $t + 1$.

Le consensus sur le modèle n'est pas nécessaire

Enfin, la possibilité de calculer un noyau de viabilité garanti permet aux décideurs de ne pas abandonner leur vision de la réalité pour une vision plus consensuelle. En effet, les autres méthodes d'aide à la décision vues précédemment forcent les participants à d'abord obtenir un consensus sur le modèle avant de pouvoir réfléchir à la manière de gérer le territoire décrit par celui-ci. Cependant, comme vu au paragraphe 4.1.2 sur les limites de l'optimisation, les problèmes de négociation multiacteur sont souvent en proie à une "dictature de la majorité". En partant du principe que si les acteurs ne sont pas d'accord avec le modèle, il leur est aisé de contester la solution qui découle de celui-ci, cette nouvelle méthode d'aide à la décision semble être une solution particulièrement prometteuse.

5.3.2 Formuler et résoudre des problèmes de viabilité au niveau individuel

Dans le cadre d'un jeu de rôle simulant un conseil de gestion d'une réserve extractiviste marine, nous utilisons les outils existants de la viabilité, décrite dans la section 4.5 au niveau individuel pour chaque acteur social.

5.3.2.1 Calcul de noyaux de viabilité

Notre objectif est de vérifier la cohérence du projet personnel du joueur qui incarne un acteur social, c'est-à-dire que nous vérifions si son modèle, ses contraintes et ses moyens d'actions (qui correspondent à des contrôles dans la théorie de la viabilité) sont compatibles.

Définition 21 (Objectif de gestion). *Un objectif de gestion est un ensemble $P = (K, U)$ où K est un ensemble d'états souhaitables et U est une correspondance de contrôle définie sur K .*

Définition 22 (Problème de viabilité associé à un objectif de gestion). *Soit un objectif de gestion $P = (K, U)$, on appelle problème de viabilité associé à P pour la dynamique $S_c(f, U)$ la recherche d'ensembles viables pour la dynamique S_c soumise à l'ensemble de contraintes K .*

Définition 23 (Objectif de gestion cohérent). *Un objectif de gestion est cohérent pour une dynamique f fixée si le problème de viabilité associé est viable, c'est-à-dire a une solution viable.*

En d'autres termes, un objectif de gestion est cohérent pour une dynamique f si $\text{Viab}_{c,f,U}(K)$, le noyau de viabilité correspondant (voir la définition 14), est non vide.

2. Traduit de l'anglais : "tolerable windows approach".

Si l'objectif de gestion est cohérent, une solution au projet personnel du joueur est un couple $(L, \tilde{U})$ où $L \subseteq \text{Viab}_{c,f,U}(K)$ est un domaine viable et $\tilde{U}$ est une correspondance de contrôle viable sur L (voir les définitions 12 et 13).

Afin de vérifier la cohérence du projet personnel de l'acteur social nous calculons donc le noyau de viabilité $\text{Viab}_{c,f,U}(K)$,

avec :

$$f((A, C, T), (i_p, \zeta)) = \begin{cases} gA \left(1 - \frac{A}{K_A}\right) - \zeta l T A - i_p A C \\ -\delta C + p m_p i_p A C + m_t i_t T \\ T(-\alpha T + \frac{a \zeta A}{A + \phi} + \mu_E C) \end{cases} \quad (5.14)$$

Ce noyau dépend de l'ensemble de contraintes K et de U .

Dans le cadre du jeu, nous demandons ces informations à chacun des joueurs, qui choisissent individuellement :

- un ensemble K , composé de bornes sur les variables du modèle,
- et un ensemble U , composé de bornes sur les contrôles du modèle.

Grâce à ces informations, l'assistant calcule un noyau de viabilité correspondant au modèle (5.14), avec la bibliothèque ViabLab. Cette bibliothèque de calcul (qui implémente l'algorithme de Saint-Pierre (1994) décrit au paragraphe 4.5.3.2) calcule les points viables qui forment le noyau de viabilité. La bibliothèque de calcul Viablitree (voir paragraphe 4.5.3.1), utilisée au démarrage du projet pour sa flexibilité, n'assurait pas une vitesse de calcul compatible avec le jeu.

Si le noyau de viabilité du joueur est vide, cela signifie que les contraintes et contrôles ne sont pas compatibles avec le modèle. Dans le chapitre suivant, nous décrivons comment les joueurs peuvent formuler leurs problèmes de viabilité et quels outils leur sont proposés pour les aider à formuler un problème viable.

5.3.2.2 Calcul de noyaux garantis

Un acteur social peut avoir des incertitudes quant à la valeur d'un ou de plusieurs des paramètres du modèle. Dans ce cas, il est possible de calculer un noyau garanti (définition 19).

À ce jour, le calcul de noyau garanti est possible uniquement pour des modèles discrets. Nous utilisons donc le modèle introduit au paragraphe 5.2.4.

Notre modèle tychastique contrôlé discret tel que défini par l'équation (4.9) est le suivant :

$$f((A_n, C_n, T_n), (\epsilon, \zeta), (\mu_E, i_p)) = \begin{cases} (1 + \tau g) A_n - \tau g A_n^2 / K_A - \tau \zeta T_n A_n - \tau i_p A_n C_n \\ (1 - \tau \delta) C_n + \tau p m_p i_p A_n C_n + \tau m_t i_t T_n \\ T_n - \tau T_n (-\alpha T_n + \frac{a \zeta A_n}{A_n + \phi_n} + \mu_E C_n) \end{cases} \quad (5.15)$$

Les contrôles sont ϵ et ζ et les tyches sont μ_E et i_p . Afin de calculer un noyau de viabilité garanti, nous définissons :

- un ensemble K , composé de bornes sur les variables du modèle,
- un ensemble U , composé de bornes sur les contrôles du modèle,
- un ensemble V , composé de bornes sur les tyches (perturbations) du modèle.

La figure 5.15 montre l'approximation du noyau garanti pour le système (5.19) et avec K , U et V fixés. Cette approximation est calculée grâce à la bibliothèque ViabLab (Désilles, 2020).

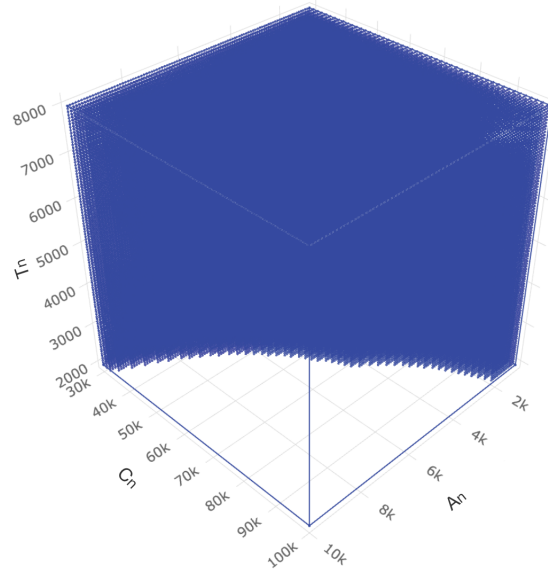


FIGURE 5.15 – Noyau garanti pour $K = \{A_n \in [2000, 10000], C_n \in [30 \times 10^4, 100 \times 10^4], T_n \in [2000, 8000]\}$, $U = \{\epsilon \in [50, 100], \zeta \in [0.04, 0.16]\}$, $V = \{i_p \in [0.8 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-4}], \mu_E \in [3.9 \times 10^{-4}, 4.0 \times 10^{-4}]\}$, et avec $\tau = 3.5 \times 10^{-5}$.

Le calcul de noyaux garantis permet de vérifier qu'un système tychastique contrôlé est compatible avec des contraintes K et des contrôles U .

5.3.3 Formuler et résoudre des problèmes de viabilité au niveau collectif

Encore jamais utilisés dans ce contexte, nous allons voir que le calcul de noyaux garantis est un outil possible pour la prise de décision dans le cas où un modèle est disponible, même lorsque plusieurs acteurs sociaux ne sont pas d'accord sur la valeur des paramètres.

Supposons par exemple que la décision de gestion d'une réserve extractiviste $\mathcal{A}$ soit soumise à un groupe de N acteurs sociaux.

Le groupe doit formuler un projet pour $\mathcal{A}$ comme un ensemble K d'états souhaitables dans lequel l'état de $\mathcal{A}$ doit rester, et d'un ensemble d'actions appropriées en fonction de l'état de $\mathcal{A}$. Chaque acteur $i \in \mathcal{N} := \{1, \dots, N\}$ a une vision et un projet personnel pour $\mathcal{A}$. Pour chaque acteur, l'état de $\mathcal{A}$ est décrit par un vecteur de $\mathbb{R}^n$, et son évolution par un système dynamique.

Le projet de l'acteur social i pour $\mathcal{A}$ consiste à considérer que l'état de $\mathcal{A}$ doit rester dans un ensemble d'états souhaitables, $K_i \subset \mathbb{R}^{n_i}$ avec les contrôles (définis par $U_i : \mathbb{R}^{n_i} \rightarrow \mathbb{R}^{p_i}$ qui associe l'ensemble des contrôles de l'acteur i avec l'état de $\mathcal{A}$ pour l'acteur i). Une solution à ce projet consiste à calculer un noyau de viabilité et trouver les états de K_i à partir desquels il existe toujours une fonction de contrôle afin que l'état de $\mathcal{A}$ reste dans K_i . L'objectif du groupe est de trouver un projet et une solution compatibles avec le projet et la solution de chacun.

On suppose que les acteurs sociaux du groupe sont parvenus à un consensus concernant les variables décrivant $\mathcal{A}$ et les contrôles à prendre en compte : $\forall i \in \mathcal{N}, n_i = n$ et $p_i = p$. En revanche, ils ne sont pas d'accord sur la manière dont évoluent ces variables, il y a par exemple désaccord sur la valeur des paramètres du système dynamique.

Par exemple, les acteurs sociaux (pêcheur, écologiste, opérateur de tourisme et maire) sont d'accord sur le fait que la réserve extractiviste est décrite par une variable représentant le nombre de touristes, une autre représentant un indicateur de la biodiversité présente dans la réserve extractiviste et une troisième représentant le capital des pêcheurs de la réserve. Ils sont aussi d'accord sur les moyens d'action : faire varier l'effort de restauration de l'environnement (ϵ) et faire varier la proportion des zones de vie des tortues accessibles aux touristes (ζ). Cependant, ils ne sont pas d'accord sur le paramètre correspondant à l'attractivité des infrastructures de pêches. Le maire pense que ces infrastructures

sont très attractives pour les touristes, pour lui $\mu_E = 5.5 \times 10^{-4}$. L'écologiste ne partage pas son avis, pour lui $\mu_E = 4.0 \times 10^{-4}$.

Sous ces conditions, il est possible de définir un projet pour le groupe.

Définition 24. *Le projet de groupe pour $\mathcal{A}$ stipule que les états de $\mathcal{A}$ doivent rester dans $K = \bigcap_{i \in \mathcal{N}} K_i$, pour $K \subset \mathbb{R}^n \neq \emptyset$ en utilisant une correspondance de contrôle telle que : $\forall x \in K, U(x) = \bigcap_{i \in \mathcal{N}} U_i(x)$ qui associe l'ensemble des contrôles du groupe à l'état de $\mathcal{A}$.*

S'il y a des points dans K tel que $\bigcap_{i \in \mathcal{N}} U_i(x) = \emptyset$, $K = \text{Dom}(U)$. Lorsque $K = \emptyset$, une négociation devrait avoir lieu pour construire un ensemble d'états souhaitables K non vide. Nous supposons ici qu'une telle négociation a eu lieu.

Dans la suite nous développons les notations pour le cas discret mais le même raisonnement s'applique dans le cas continu.

On note $Sd_i(f, U)$ le système dynamique décrivant $\mathcal{A}$ selon l'acteur social i , défini par :

$$Sd_i(f_i, U) \begin{cases} x^{k+1} &= f_i(x^k, u^k) \\ u^k &\in U(x^k) \subset \mathbb{R}^p. \end{cases} \quad (5.16)$$

Nous notons $\text{Viab}_i(K)$ le noyau de viabilité associé au projet de l'acteur i .

Comme les acteurs du groupe ont chacun leur propre définition de la dynamique, chaque acteur peut considérer les définitions des autres comme des perturbations qui lui sont propres. Il est possible de définir la dynamique de $\mathcal{A}$ en considérant les définitions de tous les acteurs comme des perturbations. La dynamique de $\mathcal{A}$ dépend alors de l'état de x , du contrôle choisi dans $U(x)$ et des perturbations survenant à partir d'un ensemble $V(x) \subset \mathbb{R}^q$ qui dépend de l'état de $\mathcal{A}$. Dans le cas discret, nous avons :

$$Svd(f, U, V) \begin{cases} x^{k+1} &= f(x^k, u^k, v^k) \\ u^k &\in U(x^k) \subset \mathbb{R}^p \\ v^k &\in V(x^k) \subset \mathbb{R}^q. \end{cases} \quad (5.17)$$

où la fonction f associe le nouvel état de $\mathcal{A}$ à son état actuel, un contrôle choisi dans $U(x)$ et une perturbation dans $V(x)$. $Svd(f, U, V)$ est un système dynamique tychastique contrôlé comme (4.9).

Définition 25. *On dit que le système (5.17) encapsule le système (5.16), et on appelle la fonction (f, V) correspondante une capsule si :*

$$\forall x \in K, \forall u \in U(x), \forall i \in \mathcal{N}, \exists v_{i,u,x} \in V(x) \text{ tel que } f_i(x, u) = f(x, u, v_{i,u,x}) \quad (5.18)$$

Nous utilisons la propriété de croissance linéaire des correspondances du paragraphe 4.5.1 pour la propriété suivante :

Propriété 26. *Si pour tout i , f_i est à croissance linéaire et si U est à croissance linéaire, alors il existe une fonction f et un ensemble de perturbations V tels que le système (5.17) encapsule les systèmes (5.16) pour tout i .*

Preuve On note $M_x = \max_{i \in \mathcal{N}, u \in U(x)} (\|f_1(x, u) - f_i(x, u)\|)$. M_x est défini puisque les f_i , f et U sont à croissance linéaire. Nous définissons $f(x, u, v) = f_1(x, u) + v(x)$ avec $v(x) \in V(x) = \mathcal{B}(M_x)$, où $\mathcal{B}(r)$ est la boule fermée de rayon r . Soit $x \in K$ et $u \in U(x)$, nous définissons $v_{i,u,x} = f_i(x, u) - f_1(x, u)$. Nous avons $\|v_{i,u,x}\| \leq M_x$, donc $v_{i,u,x} \in V(x)$. Et on a : $\forall i \in \mathcal{N}, f_i(x, u) = f(x, u, v_{i,u,x})$ et l'équation (5.18) est vérifiée. ■

Nous choisissons d'illustrer le cas discret car nous n'avons, à ce jour, pas connaissance d'une bibliothèque de calcul qui permette de calculer des noyaux garantis dans le cas continu avec garantie de convergence.

Nous reprenons l'exemple de la réserve extractiviste modélisée par les variables d'état A_n , C_n et T_n qui représentent respectivement le nombre de tortues présentes dans la réserve, le capital des pêcheurs

de la réserve et le nombre de touristes dans la réserve. La dynamique pour l'acteur social i est définie par le système $Sd_{RESEX,i}$ de l'équation 5.13.

Les paramètres μ_{Ei} et i_{pi} sont fixés par l'acteur social i et représentent respectivement l'attractivité des infrastructures de pêche et le taux de capture accidentelle.

La dynamique pour chaque acteur du groupe est définie à partir de $Sd_{RESEX,i}$ de l'équation (5.13) par $f_i : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^2 \rightsquigarrow \mathbb{R}^3$, avec :

$$f_i((A_{n+1}, C_{n+1}, T_{n+1}), (\epsilon, \zeta)) = \begin{pmatrix} gA_n(1 - A_n/K_A) - \zeta T_n A_n - i_{pi} A_n C_n \\ -\delta C_n + pm_p i_{pi} A_n C_n + m_t i_t T_n \\ T_n(-\alpha T_n + \frac{a\zeta A_n}{A_n + \phi} + \mu_{Ei} C_n) \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

où les paramètres μ_{Ei} et i_{pi} dépendent du joueur i . Ensuite, en définissant $(\mu_E, i_p) = [\min_{i \in \mathcal{N}}(\mu_{Ei}), \max_{i \in \mathcal{N}}(\mu_{Ei})] \times [\min_{i \in \mathcal{N}}(i_{pi}), \max_{i \in \mathcal{N}}(i_{pi})]$ et f comme :

$$f((A_{n+1}, C_{n+1}, T_{n+1}), (\epsilon, \zeta), (\mu_E, i_p)) = \begin{pmatrix} gA_n(1 - A_n/K_A) - \zeta T_n A_n - i_p A_n C_n \\ -\delta C_n + pm_p i_p A_n C_n + m_t i_t T_n \\ T_n(-\alpha T_n + \frac{a\zeta A_n}{A_n + \phi} + \mu_E C_n) \end{pmatrix} \quad (5.20)$$

l'équation (5.18) est vérifiée, puisque dans ce cas simple nous avons fait :

$$\forall x \in K, \forall (\epsilon, \zeta) \in U(x), \forall i \in \mathcal{N}, v_{i,\epsilon,\zeta,x} = (\mu_{Ei}, i_{pi}).$$

Dans ce qui suit, nous notons $S_v d(f, U, V)$ un système qui encapsule les dynamiques de tous les acteurs du groupe, une correspondance f , une correspondance de perturbation V de sorte que le système (5.17) décrit la dynamique de $\mathcal{A}$, en encapsulant le point de vue de tous les acteurs du groupe.

Définition 27. Une décision de groupe $(L, \tilde{U})$ est admissible pour l'acteur i si $L \neq \emptyset$, $L \subset \text{Viab}_i(K)$ et pour tous les $x \in L$, $\tilde{U}(x) \subset \tilde{U}_i(x)$.

Définition 28. La décision de groupe $(L, \tilde{U})$ est une solution de consensus pour la gestion de $\mathcal{A}$ si pour tout acteur i :

- $L \neq \emptyset$, $L \subset \text{Viab}_i(K)$ et pour tous les $x \in L$, $\tilde{U}(x) \subset \tilde{U}_i(x)$.
- et L est viable pour la dynamique correspondante $Sd_i = Sd(f_i, \tilde{U})$

L est l'ensemble d'états consensuels et $\tilde{U}$ sa correspondance de contrôle associée.

Définition 29. $(L, \tilde{U})$ est un consensus pour le groupe i allant de 1 à $\mathcal{N}$ si : $\forall x \in L, \tilde{U}(x) \subset U(x)$ et si L est viable pour toutes les dynamique $Sd_i = Sd(f_i, \tilde{U})$.

L'objectif du groupe est alors de trouver une solution de consensus pour $\mathcal{A}$ qui garantira la viabilité de chaque acteur.

Soit $Sdv(f, U, V)$ une capsule pour toutes les dynamiques (5.16) de tous les acteurs i du groupe et $L \neq \emptyset$ le noyau de viabilité garanti (définition 19) pour le système (5.17) associée à la contrainte K . Nous avons alors la propriété suivante :

Théorème 30. Soit $L \neq \emptyset$ le noyau de viabilité garanti du système (5.17) associé à la contrainte de viabilité L ; soit $\tilde{U}$ la correspondance de contrôle viable associée à L . Alors le couple $(L, \tilde{U})$ est un consensus pour le groupe i allant de 1 à $\mathcal{N}$ et e noyau de viabilité garanti associé à K , pour $Sdv(f, U, V)$ est une solution de consensus pour la gestion de $\mathcal{A}$.

Preuve. Soit $L \neq \emptyset$ le noyau de viabilité garanti pour le système (5.17) associée à la contrainte K . Soit $\tilde{U}$ la correspondance de contrôle associée. Soit $i \in \mathcal{N}$, nous avons : $L \subset K_i$, et $\forall x \in L$, $\tilde{U}(x) \subset U(x)$. Nous considérons le système $Sd'_i = Sd(f_i, \tilde{U})$. puisque U est défini par l'intersection des U_i , une trajectoire régie par Sd'_i est également une trajectoire régie par $Sd(f_i, U)$. Puisque le système (5.17) encapsule $Sd(f_i, U_i)$, il encapsule également Sd'_i .

Soit $x^0 \in L$, soit (x^k) une trajectoire commençant en x^0 et régie par Sd'_i . En raison de l'encapsulation, il existe une fonction v^k telle que :

$$f_i(x^k, \tilde{u}^k) = f(x^k, \tilde{u}^k, v^k)$$

Comme L est le noyau de viabilité garanti pour le système (5.17) associé à la contrainte K , du fait de la définition 18, toutes les trajectoires à partir de x^0 et régies par (5.17) sont viables en L . Ainsi, (x^k) régie par $S'd_i$ est viable dans L . Donc $x^0 \in L$ est viable pour l'acteur i .

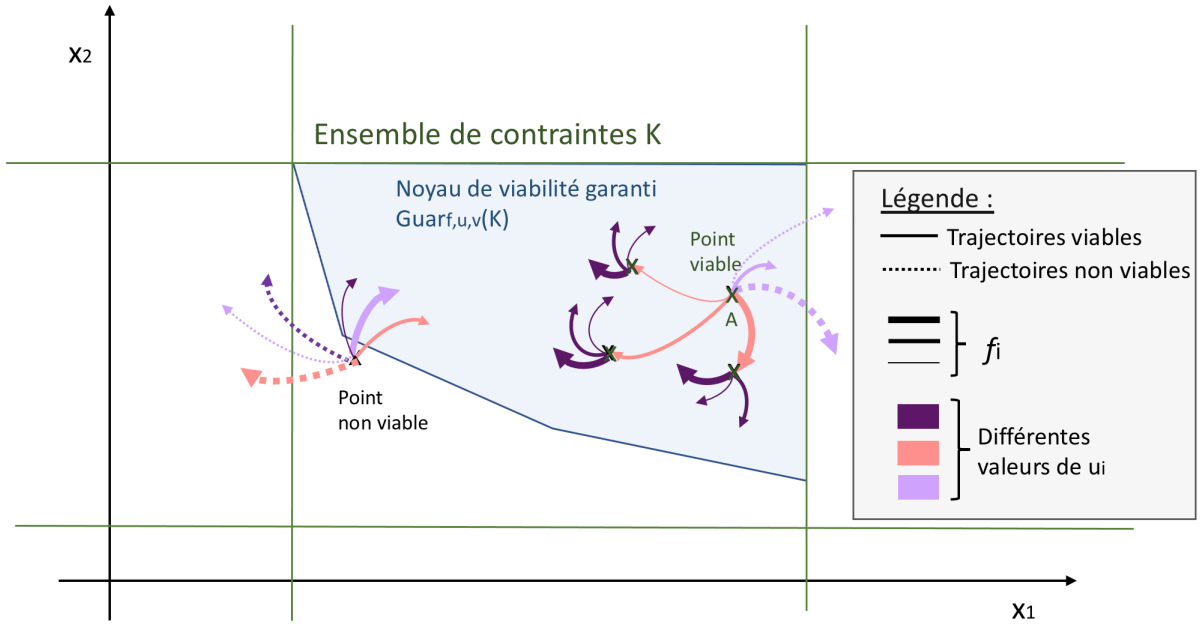


FIGURE 5.16 – Schéma de noyau garanti dans un scénario en deux dimensions avec trois participants ayant chacun une dynamique différente. Les dynamiques différentes sont représentées par des épaisseurs de trait différentes. Trois contrôles sont possibles et sont représentés par les différentes couleurs de trajectoires. Le point A est viable car le contrôle rose permet de trouver des successeurs dans K quel que soit la perturbation.

Le noyau de viabilité garanti permet ainsi aux acteurs sociaux d'obtenir un consensus sur le projet sans pour autant avoir la même représentation de $\mathcal{A}$.

Nous utilisons les noyaux garantis comme une manière pour des acteurs sociaux de s'accorder sur une stratégie de gestion sans avoir à se mettre d'accord sur les valeurs des paramètres.

Ces résultats sont soumis pour publication.

5.4 Cadre du jeu

Comme énoncé précédemment, nous nous plaçons dans le cadre de la gestion d'une réserve protégée marine fictive, mais inspirée de celle d'Arraial do Cabo (voir chapitre 3). Chaque joueur a un rôle et représente les intérêts d'une partie des acteurs de la réserve (pour plus de détails sur les différents rôles, voir la partie 5.1.2). Le joueur pêcheur représente par exemple les populations locales. Dans ce type de réserve, les populations locales ont la majorité au conseil de gestion. Dans ce jeu, nous avons donc choisi de lui donner le dernier mot en cas de désaccord. Ne pas forcer les joueurs à trouver un consensus nous permet aussi d'évaluer le jeu sur cet aspect : notre méthode est-elle efficace pour l'aide au consensus ?

5.4.1 But du jeu

Dans ce jeu, la gestion d'une réserve extractiviste est confiée aux joueurs, qui ont chacun des intérêts personnels. Les joueurs doivent, avant un temps imparti s'accorder sur un ensemble d'états

souhaitables pour la réserve, ainsi que sur des moyens d'action permettant de maintenir cette réserve dans ces états souhaitables. Ces moyens d'action sont représentés par des contrôles dans le modèle.

Plus précisément, les joueurs doivent se mettre d'accord sur un *objectif de gestion*. Dans le cadre du jeu, nous considérons un objectif de gestion composé de bornes sur les variables du modèle (le système doit rester dans un ensemble de contraintes). L'objectif de gestion comprend aussi des bornes sur les moyens d'action. Ces bornes sont des réels $c_{\max,i} \in \mathbb{R}, c_{\min,i} \in \mathbb{R}, 1 \leq i \leq n$

— Les variables doivent être maintenues dans un ensemble $V \in R^{n_v}$, avec :

$$V = \prod_{i=1}^{n_v} [c_{\min,i}, c_{\max,i}] \quad (5.21)$$

— Les moyens d'actions doivent être maintenus dans un ensemble $Q \in R^{n_q}$, avec :

$$Q = \prod_{i=1}^{n_q} [c_{\min,i+n_v}, c_{\max,i+n_v}] \quad (5.22)$$

Cet objectif est représenté de manière formelle par un vecteur $P \in R^n$, avec $n = n_v + n_q$ et $P = (V, Q)$:

$$P = \{V_1 \in [c_{\min,1}, c_{\max,1}], \dots, V_{n_v} \in [c_{\min,n_v}, c_{\max,n_v}], Q_{n_v+1} \in [c_{\min,n_v+1}, c_{\max,n_v+1}], \dots, Q_n \in [c_{\min,n}, c_{\max,n}]\} \quad (5.23)$$

Le choix d'un objectif de gestion sous cette forme, couplé à la dynamique d'un joueur, permet le calcul d'un noyau de viabilité. L'assistant peut alors montrer aux joueurs si leur objectif est réalisable, c'est-à-dire s'il est possible pour les dynamiques des joueurs de rester entre les bornes inférieures et supérieures pour les trois variables grâce aux moyens d'action.

Le but des joueurs est donc double : d'une part ils doivent se mettre d'accord sur un objectif collectif de gestion et d'autre part cet objectif doit être réalisable.

Ce but du jeu nous permet d'évaluer deux aspects qui nous intéressent : l'aide au consensus d'une part et l'aide technique d'autre part.

5.4.2 Protocole du jeu

Après qu'un rôle a été attribué à chacun des joueurs, le jeu se déroule en trois grandes étapes, introduites ici et détaillées au chapitre suivant.

1. Choix de la dynamique : des informations sont présentées aux joueurs sur la réserve (voir partie 5.1.1) et un module spécifique permet aux joueurs de se familiariser avec la dynamique. Pour cela, les variables sont affichées en fonction du temps. Dans cette étape du jeu, chaque joueur peut aussi modifier certains paramètres du modèle. Cela leur permet de modifier la dynamique dans le cas où ils ne seraient pas d'accord avec les paramètres du jeu proposés par défaut (à partir de la littérature).

L'intérêt de cette étape est double. D'une part, les joueurs peuvent mieux comprendre la dynamique de la réserve dont on leur a confié la gestion. D'autre part, ils peuvent exprimer leur vision du modèle en modifiant les paramètres dont les valeurs ne leur conviennent pas.

2. Proposition d'objectif personnel : dans cette étape de jeu, chaque joueur propose son objectif de gestion personnel sous la forme de bornes minimum et maximum pour chaque variable et contrôle. Couplé à la dynamique du joueur, cet objectif de gestion permet de calculer un noyau de viabilité, et le joueur peut donc savoir si son objectif de gestion est viable ou non.
3. Proposition d'objectif collectif : dans cette étape de jeu, les joueurs doivent trouver un objectif collectif de gestion. Plusieurs aides sont proposées pour aider les joueurs à atteindre un consensus. Il est aussi possible pour les joueurs de revenir à l'étape précédente (l'étape 2) afin de modifier leurs objectifs de gestion. Cela permet aux joueurs de négocier sur la relaxation des bornes. Un joueur peut par exemple proposer de diminuer la borne minimum qu'il a fixée sur le nombre de touristes à condition qu'un autre joueur diminue la borne minimum qu'il a fixée sur le nombre de tortues. C'est d'ailleurs une situation rencontrée fréquemment lors des évaluations.

Les deuxième et troisième étapes peuvent ainsi boucler jusqu'à ce que les joueurs atteignent un consensus, que le joueur pêcheur décide d'imposer sa solution, ou que le temps imparti soit écoulé. Le fonctionnement complet du jeu sera détaillé au chapitre suivant.

5.4.3 Modes de partage d'information

Lors du déroulement du jeu, deux modes de partage d'information sont possibles : un mode tiers de confiance (qui correspond à une information incomplète telle qu'introduite au paragraphe 4.4.3) et un mode transparence (qui correspond à une information complète). Dans le mode tiers de confiance, les joueurs ne voient que les informations qu'ils ont eux-mêmes renseignées et pas les informations des autres joueurs. En mode transparence les joueurs visualisent les informations renseignées par les autres joueurs (leurs objectifs de gestion notamment).

Le choix du mode pour chaque étape est un paramètre de l'assistant. Par défaut, le mode est le suivant :

- Les deux premières étapes sont en mode tiers de confiance, puisqu'il s'agit d'un problème de cohérence personnelle.
- La troisième étape est en mode transparence, pour que les joueurs puissent négocier leurs objectifs de gestion en confiance.

Dans le cadre des évaluations nous avons gardé ce mode par défaut. En effet, le mode transparence établit une base de confiance. Nous estimons qu'ainsi les joueurs peuvent comprendre les intentions et le point de vue des autres. Cela permet de sensibiliser les joueurs à la diversité des points de vues entourant la gestion de territoires partagés.

Il serait aussi possible que l'assistant propose d'autres modes, comme un mode où les joueurs choisissent ce qu'ils veulent partager et quand ils veulent le partager. Ces différents modes modifieraient probablement le comportement des joueurs et les techniques de négociation, mais les étapes de l'assistant ainsi que les algorithmes qu'il utilise resteraient inchangés.

Chapitre 6

Implémentation et prototype d'assistant

Les méthodes décrites au chapitre précédent sont utilisées dans un assistant/jeu de rôle baptisé *Viaduc*. Sous la forme d'un serveur web, il permet à plusieurs joueurs de négocier autour des objectifs de gestion d'une réserve extractiviste marine fictive. Une fois que chaque joueur a choisi un rôle, ils peuvent commencer le jeu. Plusieurs étapes de jeu se succèdent pour aboutir à un objectif de gestion de la réserve.

Ce chapitre décrit en détail le mode de fonctionnement de l'assistant. Nous aborderons ici les différentes étapes de jeu telles que présentées au paragraphe 5.4.2 : le choix d'une dynamique¹, la proposition d'objectifs personnels et la proposition d'objectifs collectifs.

Nous nous pencherons également sur les algorithmes d'aide au compromis et de recherche de noyaux non vides, ainsi que sur un exemple d'utilisation de noyaux garantis pour l'aide au compromis.

6.1 Introduction au contexte et modification de la dynamique

Une fois que le joueur s'est familiarisé avec son rôle (écologiste, pêcheur ou opérateur de tourisme), il découvre le scénario du jeu tel que décrit au paragraphe 5.1.1. Cela permet une courte introduction aux réserves extractivistes et aux enjeux qui leur sont associés.

La présentation du contexte et des enjeux passe aussi par la visualisation de la dynamique (présentée au paragraphe 5.2.1) sous la forme de trajectoires. Lors de cette première étape, le joueur est invité à choisir les paramètres qui lui conviennent et le but de l'assistant est d'aider le joueur à préciser la configuration souhaitée de l'espace protégé.

Certains paramètres du modèle sont en effet modifiables par le joueur, dans une certaine plage de valeurs (voir figure 6.1). Cela permet notamment aux joueurs de manifester leur désaccord avec les paramètres par défaut (issus de la littérature). Dans la version de l'assistant que nous présentons ici, il est demandé à chaque joueur de choisir une seule valeur par paramètre, cependant, il serait tout à fait possible de leur demander une plage de valeurs puis de calculer des noyaux garantis au lieu de noyaux de viabilité, sous certaines conditions. Nous reviendrons sur cette question au paragraphe 6.5.1.

Pour des soucis d'ergonomie, les valeurs affichées ne sont pas utilisées telles quelles dans le modèle, mais sont multipliées par un coefficient suivant le tableau 6.1. Ces valeurs sont sauvegardées par le serveur (commun au jeu et aux assistants) dans un fichier json afin de pouvoir les utiliser à l'étape 2 (proposition d'objectif personnel) pour le calcul de noyaux.

Dans la version actuelle, nous ne proposons que quatre paramètres modifiables et ils ne peuvent pas prendre n'importe quelle valeur, puisque les joueurs sont limités par le curseur (et ne peuvent pas entrer une valeur numérique par exemple). Ce choix nous a semblé le plus adapté lorsque Viaduc est utilisé par des néophytes qui ne sont pas nécessairement familiers avec la gestion de réserves protégées ni avec les mathématiques, ce qui est le cas d'une partie des personnes choisies pour les évaluations. Dans cette configuration, Viaduc prend la forme d'un jeu sérieux pour la sensibilisation aux enjeux et la découverte de nouvelles formes de prise de décision et de négociation. Cependant, dans une version

1. C'est-à-dire le choix de valeurs pour les paramètres du modèle.

destinée à des experts, il serait tout à fait possible que toutes les variables soient modifiables et puissent prendre n'importe quelles valeurs (ou n'importe quelle plage de valeurs si nous avons la possibilité de calculer des noyaux garantis), cela ne modifierait pas le fonctionnement de l'assistant.

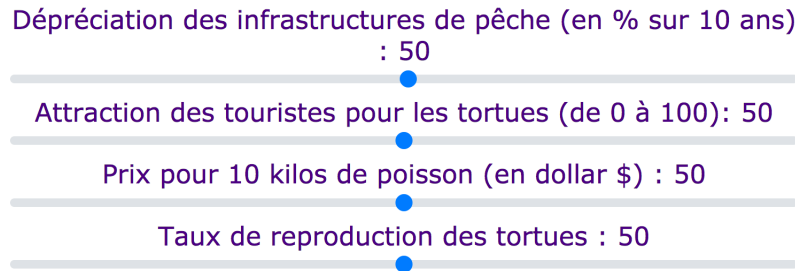


FIGURE 6.1 – Dans la première étape du jeu, le joueur peut modifier ces curseurs s'il n'est pas d'accord avec les valeurs proposées. Pour des raisons d'ergonomie, nous proposons aux joueurs des valeurs entre 1 et 100 qui sont ensuite multipliées par les coefficients de la table 6.1.

Paramètre :	Dépréciation des infrastructures de pêche	Attraction des touristes pour les tortues	Prix pour 10 kilos de poisson	Taux de reproduction des tortues
Coefficient multiplicatif :	0.002	0.01	0.002	0.01

TABLE 6.1 – Coefficients à appliquer pour obtenir les paramètres utilisés par le modèle.

Une zone de l'écran du joueur est dédiée à l'affichage des trajectoires pour un état initial choisi par le joueur (voir figure 6.2). Ces trajectoires sont calculées en Javascript grâce à la bibliothèque de solveur d'équation différentielle *ndsolve*. Elles permettent au joueur de visualiser les trois variables en fonction du temps et l'effet des modifications dans les valeurs de paramètres. Ainsi, si le joueur ne connaît pas les paramètres, mais a une idée du comportement de la dynamique, il peut modifier les valeurs des paramètres jusqu'à trouver un ensemble de paramètres pour lequel la dynamique globale se comporte comme il l'attend.

Il serait intéressant de disposer d'un code de ViabLab dynamique afin que le joueur puisse modifier la dynamique comme il le souhaite et non pas uniquement quelques paramètres, nous reviendrons sur cette idée au chapitre 8.

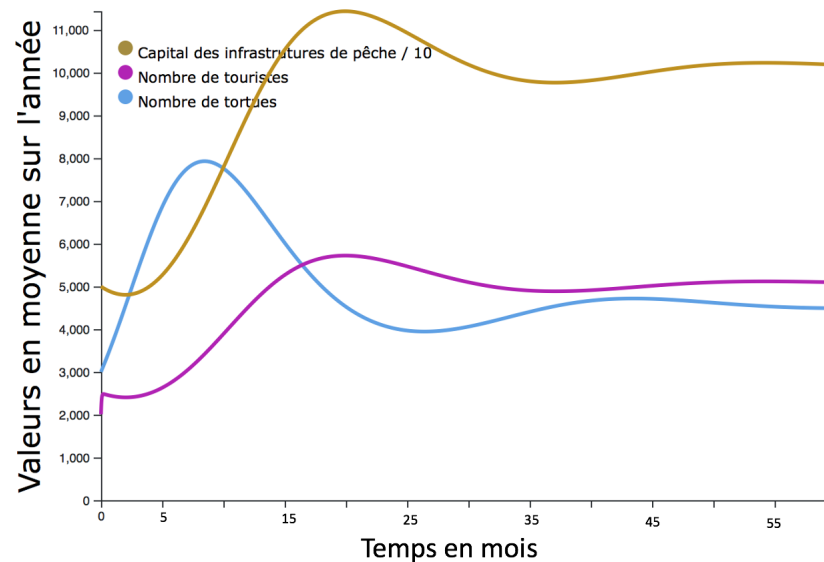


FIGURE 6.2 – Le joueur peut observer les trois variables en fonction du temps. En ordonnée, le nombre de tortues, de touristes et le capital de pêche/10 en Réaux, en abscisse le temps en mois.

Le joueur doit choisir le point initial de ces trajectoires ainsi que les valeurs des contrôles (voir la figure 6.2). On note que dans la version actuelle, les visualisations des trajectoires se font à contrôle constant. C'est-à-dire que si l'on fixe à 50% la proportion de la réserve extractiviste au tourisme, cette valeur est la même pour toute valeur de temps. La gestion étant adaptative, il serait intéressant de pouvoir faire varier les valeurs des contrôles, avec des fonctions linéaires par morceaux. Pour cela, nous avons d'ailleurs travaillé avec la plateforme ViNO², permettant le dépôt et la visualisation de noyaux de viabilité et de trajectoires, mais l'état d'avancement de cette dernière nous a conduit à développer des fonctionnalités simplifiées.

Comme pour les paramètres des évolutions des variables (dans la Table 6.1), des coefficients multiplicatifs sont aussi appliqués sur les contrôles pour les mêmes raisons d'ergonomie : on multiplie la proportion de l'aire ouverte au tourisme par 0.5×10^{-3} pour obtenir la valeur du paramètre ζ (la proportion des zones de vie des tortues accessible aux touristes) et on multiplie la taille des mailles de filet par 10^{-6} pour obtenir la valeur du paramètre i_p (le taux de capture accidentelle).



FIGURE 6.3 – Curseurs permettant de fixer les paramètres de calcul des trajectoires : état initial, et contrôles.

2. <http://motive.cemagref.fr/vino/>

6.2 Propositions d'objectif de gestion personnel et calculs de noyaux individuels

L'assistant est d'abord utilisé afin de déterminer si l'objectif de gestion personnel du joueur est cohérent. Cet objectif est cohérent s'il est possible pour la dynamique choisie de rester dans les contraintes proposées par le joueur sur les variables grâce aux contrôles proposés par celui-ci.

La cohérence de l'objectif personnel de gestion est vérifiée par le calcul du noyau de viabilité associé.

6.2.1 Le recueil de l'objectif de gestion personnel

L'objectif de gestion du joueur est composé de différents *souhaits*, qui correspondent à des bornes minimales et maximales sur les variables et sur les moyens d'actions. (Les moyens d'actions correspondent aux contrôles de la théorie de la viabilité.)

On note $c_{\min,i}$, $c_{\max,i}$ les souhaits correspondant respectivement aux bornes minimum et maximum pour la variable ou le contrôle i avec $1 \leq i \leq n$ où n est la somme du nombre de variables et du nombre de contrôles. Les $c_{\min,i}$ et $c_{\max,i}$ sont des valeurs réelles.

On rappelle le formalisme introduit dans le paragraphe 5.4.1 : soit n_v le nombre de variables, soit n_p le nombre de contrôles. Soient $V_1, \dots, V_{n_v}$ les variables et $Q_{n_v+1}, \dots, Q_n$ (avec $n = n_v + n_p$) les contrôles. Nous considérons ici un objectif de gestion de la forme :

$$P = \{V_1 \in [c_{\min,1}, c_{\max,1}], \dots, V_{n_v} \in [c_{\min,n_v}, c_{\max,n_v}], Q_{n_v+1} \in [c_{\min,n_v+1}, c_{\max,n_v+1}], \dots, Q_n \in [c_{\min,n}, c_{\max,n}]\} \quad (6.1)$$

En plus de ces souhaits, il est aussi demandé au joueur de définir des *marges*, une par souhait, correspondant aux efforts qu'il est prêt à faire au cas où son noyau est vide. Dans la suite, on notera M le vecteur de marges, $M \in \mathbb{R}_+^{*2n}$ et

$$M = (\mu_1, \dots, \mu_{2n}). \quad (6.2)$$

La valeur de marge associée à $c_{\min,i}$ est μ_{2i-1} et la valeur de marge associée à $c_{\max,i}$ est μ_{2i} . On note donc que pour $M = (\mu_1, \dots, \mu_{2n})$ les valeurs d'indices impairs sont associées aux minima et les indices pairs sont associées aux maxima. Ces marges (en orange sur la figure 6.4), inspirées de Sicard et al. (2011), nous permettent d'évaluer les efforts de relaxation relatifs que les joueurs sont prêts à faire en cas de noyau vide. Cela nous sera utile pour l'algorithme de recherche de noyaux non vides, expliqué en détail aux paragraphes 6.2.3 et 6.4.

Dans notre exemple d'aire protégée marine, $n = 5$ pour les trois variables, A , C et T , et les deux contrôles ζ et i_p .

L'assistant demande au joueur de définir deux zones : une zone verte qui définit son problème de viabilité, et une zone orange correspondant aux efforts acceptables (voir figure 6.4).



FIGURE 6.4 – Recueil des souhaits et marges.

L'objectif de gestion correspondant aux souhaits exprimés sur la figure 6.4 est :

$$P = \{A \in [2500, 7700]; C \in [40000, 90000]; T \in [2000, 8500]; i_p \in [3 \times 10^{-6}, 8 \times 10^{-6}]; \zeta \in [40 \times 0.5 \times 10^{-3}, 80 \times 0.5 \times 10^{-3}]\} \quad (6.3)$$

Pour les variables, l'assistant reprend exactement les valeurs affichées et pour les contrôles il applique les coefficients multiplicatifs évoqués au paragraphe 6.1. Les marges M sont calculées en prenant la valeur absolue de la soustraction des valeurs vertes et oranges puis en ajoutant une valeur $\epsilon \in \mathbb{R}_+^*$ afin de s'assurer que $\mu_i > 0$ pour tout i . Par exemple ici $\mu_1 = 2500 - 1350 + \epsilon = 1150 + \epsilon$ correspond à la marge associée au minimum pour le nombre d'animaux et $\mu_2 = 9400 - 7700 + \epsilon = 1700 + \epsilon$ correspond à la marge associée au maximum pour le nombre d'animaux. Le paramètre ϵ est un paramètre de l'assistant.

Une fois l'objectif de gestion recueilli, l'assistant peut définir le problème de viabilité de l'utilisateur à partir de l'objectif de gestion correspondant aux souhaits exprimés par le joueur et de la dynamique du joueur (la dynamique du joueur prend en compte la modification des paramètres de la figure 6.1). L'assistant calcule le noyau grâce à la bibliothèque de calcul ViabLab (Désilles, 2020) qui adapte l'algorithme de Saint-Pierre (Saint-Pierre, 1994). Nous avons ajouté au code de ViabLab la possibilité de modification de paramètres, fonctionnalité qui n'était pas présente, mais qui nous est nécessaire puisque les joueurs peuvent modifier les valeurs des paramètres du modèle. Plus précisément, le serveur de Viaduc appelle l'exécutable ViabLab en lui donnant en paramètre un fichier json contenant les souhaits du joueur ainsi que les valeurs des paramètres modifiables. Le serveur attend ensuite la création du fichier contenant les points viables puis affiche ces points dans une zone de l'écran dédiée. Si le fichier est vide, le noyau est vide et Viaduc prévient le joueur à l'aide d'une fenêtre pop-up.

6.2.2 Le cas du noyau non vide

Dans le cas d'un noyau non vide, le joueur peut continuer de modifier ses souhaits et de calculer des noyaux jusqu'à en obtenir un qui lui corresponde mieux. Il est notamment arrivé lors des évaluations du jeu que certains joueurs continuent de modifier leurs souhaits pour explorer le calcul de noyaux plus en détail. Le joueur peut estimer que le noyau actuel est trop petit, ce qui peut poser problème lors de la négociation. Le joueur peut anticiper que l'intersection avec les noyaux de viabilité des autres sera vide. Le joueur peut aussi vouloir modifier ses souhaits afin de vérifier la sensibilité : en augmentant de 100 le minimum autorisé sur le nombre d'animaux le noyau change-t-il beaucoup ? Devient-il vide ?

Il serait intéressant, dans une version pour des experts, de proposer plus d'outils d'analyse (analyse de sensibilité, calculs d'autres objets liés à la viabilité comme le bassin de capture³).

6.2.3 Le problème du noyau vide

Si le noyau de viabilité est vide, l'objectif de gestion personnel du joueur n'est pas cohérent avec la dynamique. C'est-à-dire qu'il est impossible de satisfaire les contraintes qu'il propose en faisant varier les contrôles à l'intérieur des bornes qu'il a fixées.

Pour notre cas de réserve marine protégée, on peut prendre l'exemple d'un joueur qui voudrait que le nombre de tortues soit supérieur à 5000. Pour y arriver, il propose comme moyen d'action d'ouvrir 100% de la réserve, 90% de la réserve ou bien 80% de la réserve. Si le joueur n'a pas changé les paramètres de la dynamique, et s'il considère que la taille des mailles de filet est toujours égale à 5, alors son noyau est vide. Les moyens qu'il se donne pour arriver à son but (avoir plus de 5000 tortues dans la réserve) ne sont pas suffisants. Cette situation est illustrée sur la figure 6.5 avec les trajectoires correspondant aux moyens d'action respectivement en noir (100% de la réserve ouverte au tourisme), bleu (90%) et vert (80%). La zone verte représente les contraintes du joueur. On constate qu'à partir des points testés, avec les moyens proposés et à contrôle constant il est impossible de respecter les contraintes du joueur.

3. Le bassin de capture correspond aux états à partir desquels il existe au moins une trajectoire qui atteint le noyau, cette notion est détaillée dans le chapitre abordant les perspectives illustré par la figure 8.3.

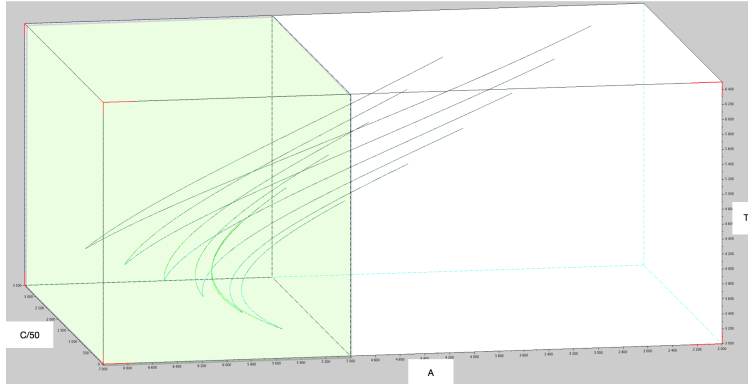


FIGURE 6.5 – Exemple de trajectoires partant de l'ensemble de contraintes du joueur (la zone verte) et utilisant les contrôles du joueur. Toutes les trajectoires calculées sortent de l'ensemble de contraintes du joueur.

Il existe de nombreux exemples où il est impossible de satisfaire certaines contraintes avec les moyens d'action proposés. Sur le sujet des pêcheries, Khalilian et al. (2010) écrivent :

La politique commune de la pêche (PCP) est l'instrument de l'Union européenne (UE) pour la gestion de la pêche. Elle vise à renforcer la durabilité des stocks de poissons et la compétitivité économique du secteur de la pêche. Cependant, ni les ressources aquatiques vivantes ni les profits de l'industrie de la pêche n'en ont bénéficié, 88% des stocks étant surexploités et les marges bénéficiaires des pêcheurs étant en baisse constante.

La politique commune de la pêche ne suffit donc pas à maintenir ni les stocks de poisson ni les bénéfices des pêcheurs.

Pour notre cas de réserve marine protégée, dans le cas d'un noyau vide, l'assistant Viaduc propose aux joueurs de l'aide afin de rendre cohérent leur objectif de gestion personnel, c'est-à-dire une aide à la recherche de noyaux non vides.

Pour un joueur particulier, la dynamique est fixée à l'étape précédente, et le problème est de trouver un objectif de gestion compatible avec cette dynamique. Un objectif de gestion peut être représenté par un vecteur dans un sous-ensemble E de $\mathbb{R}^{2n}$. Il s'agit d'explorer l'ensemble E pour rechercher des noyaux non vides.

On considère les souhaits du joueur pour chaque variable et contrôle, notés $c_{\min,i}$ et $c_{\max,i}$. Le vecteur correspondant aux souhaits du joueur est :

$$S = (c_{\min,i}, c_{\max,i})_{1 \leq i \leq n} \quad (6.4)$$

Afin de trouver un noyau non vide, il faut élargir l'espace de contraintes et/ou des contrôles. Cela correspond à relaxer les souhaits du joueur. Le vecteur correspondant aux souhaits relaxés est : $S' = (c_{\min,i} - r_{\min,i}, c_{\max,i} + r_{\max,i})_{0 \leq i \leq n-1}$, avec $r_{\min,i}$ et $r_{\max,i}$ des nombres réels positifs correspondant aux relaxations.

Soit un ensemble E_{NV} de vecteurs de souhaits relaxés $S' = (c_{\min,i} - r_{\min,i}, c_{\max,i} + r_{\max,i})_{0 \leq i \leq n-1}$ qui, avec la dynamique du joueur, correspondent à un noyau non vide. On appelle $S' \in E_{NV}$ un problème viable.

Soit E_R l'ensemble des vecteurs de relaxation

$$S_R = (r_{\min,i}, r_{\max,i})_{1 \leq i \leq n} \quad (6.5)$$

tel que $S + S_R \in E_{NV}$ (c'est-à-dire que le vecteur de souhait relaxé $S' = S + S_R$ est viable). Nous voulons relaxer le moins possible l'objectif de gestion du joueur afin que la solution proposée par l'assistant corresponde le plus possible aux souhaits du joueur. Nous sommes donc face à un problème de minimisation multicritère et recherchons une relaxation S_R , telle que S_R ne soit dominée au sens

de Pareto par aucun vecteur de E_R , c'est à dire un problème de recherche de front de Pareto (voir le paragraphe 4.1.1.1).

Il serait techniquement possible d'explorer l'espace E_R des problèmes relaxés afin de trouver des objectifs de gestion P_R associés aux vecteurs $S' = S + S_R$ viables. Une fois cette étape réalisée, nous pourrions alors choisir des solutions à présenter au joueur parmi les P_R trouvés. L'exploration peut se faire par un plan d'expérience (pour des explications détaillées des principaux plans d'expériences, voir Sanchez et al. (2018)). Une fois l'exploration faite, le choix des solutions peut se faire via un agrégateur comme ceux présentés en section 4.1.1.2. Ou bien, il est possible de présenter au joueur tous les P_R tels que S_R appartiennent au front de Pareto afin qu'il choisisse par lui-même.

Cependant, il nous a semblé préférable de ne pas explorer tout l'espace, afin de réduire le temps d'attente du joueur pendant la recherche de noyaux. De plus, il ne semble pas avisé de donner le choix au joueur entre tous les P_R appartenant au front de Pareto, pour éviter au joueur une surabondance de choix, qui peut être accablante pour celui-ci, particulièrement s'il n'est pas expert (Scheibehenne et al., 2010).

Pour éviter une recherche exhaustive de tout l'espace E_R , il est donc nécessaire de diriger la recherche. Afin de diriger l'algorithme de recherche de noyaux non vides, nous demandons donc au joueur quels souhaits sont importants pour lui (voir figure 6.6).

- ☒ Le nombre minimum d'animaux (5700.00)
- ☐ Le nombre maximum d'animaux (10000.00)
- ☒ Le Capital minimum des pêcheurs (80140.00)
- ☐ Le Capital maximum des pêcheurs (100000.00)
- ☒ Le nombre minimum de touristes (5600.00)
- ☐ Le nombre maximum de touristes (10000.00)
- ☐ La taille minimale des mailles des filets (6.00)
- ☐ La taille maximale des mailles des filets (10.00)
- ☐ La proportion minimum du parc ouverte aux touristes (0.00)
- ☐ La proportion maximum du parc ouverte aux touristes (40.00)

Pour rappel, voici les valeurs que vous avez choisies à la page précédente (pour les modifier, revenir en arrière):

Nombre d'animaux : 3400.00 - 5700.00 - 10000.00 - 10000.00

Capital des pêcheurs : 64580.00 - 80140.00 - 100000.00 - 100000.00

Nombre de Touristes : 2860.00 - 5600.00 - 10000.00 - 10000.00

Taille des mailles de filets : 4.00 - 6.00 - 10.00 - 10.00

Proportion du parc ouverte au tourisme : 0.00 - 0.00 - 40.00 - 60.00

FIGURE 6.6 – Recueil des importances lors de l'aide pour trouver un noyau non vide. Les composants cochés sont ceux qui sont importants pour le joueur.

Recueillir cette information permet de connaître les souhaits à privilégier et ainsi d'éviter une recherche dans tout l'espace. Par exemple, dans le cas illustré par la figure 6.6, nous privilégierons les solutions pour lesquelles le nombre d'animaux, le capital minimum des pêcheurs et le nombre minimum de touristes sont proches des souhaits du joueur.

Nous représentons les importances par un vecteur de valeurs booléennes :

$$I = (b_1, \dots, b_{2n}) \quad (6.6)$$

avec $b_{2i-1} = 1$ (resp. $b_{2i} = 1$) si $c_{\min,i}$ (resp. $c_{\max,i}$) est important pour le joueur et $b_{2i-1} = 0$ (resp. $b_{2i} = 0$) sinon.

On note donc que, de même que pour le vecteur de marge $M = (\mu_1, \dots, \mu_{2n})$ (voir l'équation (6.2.1)), les indices impairs sont associées aux minima et les indices pairs sont associées aux maxima.

Par exemple, pour la situation illustrée par la figure 6.6, $b_i = 1$ pour $i \in \{1, 3, 5\}$ et $b_j = 0$ pour $j \in \{2, 4, 6, 7, 8, 9, 10\}$.

L'algorithme de recherche de noyaux non vides prend en entrée l'objectif de gestion du joueur P , le vecteur de marges orange M (défini par l'équation 6.2.1), ainsi que le vecteur d'importances correspondant I et il renvoie une approximation d'une partie du front de Pareto. L'algorithme utilise la dichotomie afin d'explorer E_R . Cette recherche sera aussi utilisée lors de la proposition d'objectifs de gestion collectifs et est décrite en détail dans le paragraphe 6.4.

Le nombre de solutions proposées ainsi que le temps de calcul dépend du nombre de souhaits considérés comme important. L'aide à la recherche de noyaux non vides peut prendre quelques minutes (entre une et cinq). Plusieurs solutions sont proposées au joueur qui doit en choisir une. Une fois son choix effectué, il est possible d'enregistrer cette solution pour continuer à la raffiner, en modifiant les souhaits et en effectuant de nouveaux calculs de noyaux. Quand le joueur est satisfait de sa solution, il peut alors accéder à l'étape de négociation.

6.3 Propositions d'objectifs collectifs de gestion

Dans cette troisième étape, en mode transparence (décrit au paragraphe 5.4.3), l'assistant montre aux joueurs les souhaits des autres joueurs (voir figure 6.7) ainsi que leurs noyaux (voir figure 6.8).

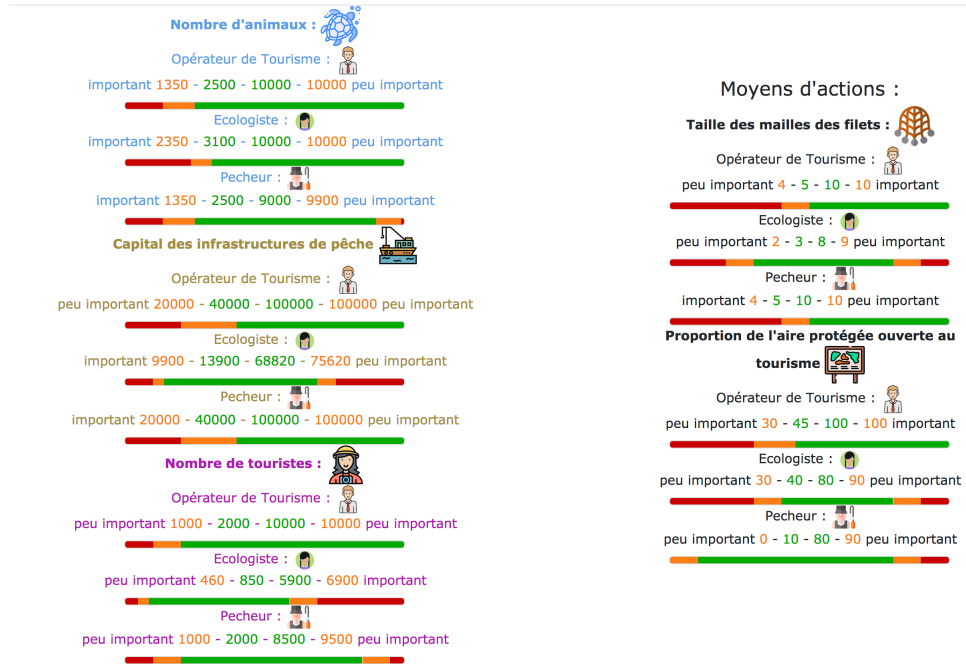


FIGURE 6.7 – Dans le mode transparence, l'assistant montre aux joueurs les préférences de chacun, ainsi que ce qu'ils considèrent comme important ou non.

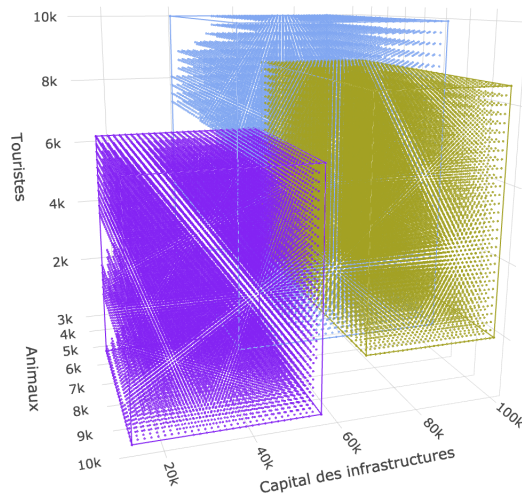


FIGURE 6.8 – Dans le mode transparence, l'assistant montre aux joueurs les noyaux de chacun.

Définition 31 (Objectif collectif de gestion). *Un objectif collectif de gestion est un objectif de gestion (tel que défini par la définition 21) qui est commun à tous les joueurs.*

A partir d'un objectif collectif de gestion, il y a autant de problèmes de viabilité associés (définition 22) que de dynamiques.

Cette troisième étape consiste à construire un objectif collectif de gestion qui soit consensuel et réalisable.

Nous introduisons plusieurs définitions :

Définition 32 (Cohérence pour tous et pour chacun). *Un objectif collectif de gestion est :*

- *cohérent pour tous* s'il existe un même ensemble viable L associé à la même correspondance de contrôle viable $\tilde{U}$ ⁴ pour toutes les dynamiques qui permet de satisfaire les contraintes. Le couple $(L, \tilde{U})$, avec $L = \text{Dom}(\tilde{U})$, est une solution aux problèmes de viabilité des joueurs.
- *cohérent pour chacun* si les problèmes de viabilités associés à chacune des dynamiques ont une solution.

Définition 33 (Cohérence des objectifs personnels de gestion entre eux). *L'ensemble des objectifs de gestion (K_i, U_i) des joueurs sont cohérents entre eux si :*

- *l'intersection K des K_i n'est pas vide*
- *la correspondance de contrôle définie sur l'intersection par $U(x) = \cap U_i(x)$ a pour domaine K .*
- *L'objectif (K, U) est cohérent pour chaque joueur.*

À l'inverse, les objectifs de gestion sont incohérents si l'intersection des objectifs de gestion des joueurs est vide ou bien s'il y a au moins un noyau vide dans l'intersection.

Afin de savoir s'il est possible de trouver un objectif de gestion sur lequel tous les participants sont d'accord, il est d'abord nécessaire de vérifier si les objectifs de gestion sont cohérents.

Pour trouver un objectif collectif de gestion cohérent pour tous, plusieurs étapes sont nécessaires et sont décrites dans la procédure suivante :

Début de la procédure : Calcul de l'intersection des contraintes et contrôles, cela donne un nouvel objectif de gestion P . Deux cas sont possibles :

1. P n'est pas cohérent pour un joueur :
 - (a) Les joueurs peuvent négocier entre eux pour désigner un ou plusieurs joueurs devant modifier leurs objectifs de gestion. Dans ce cas il faut retourner au début de la procédure avec les nouveaux objectifs de gestion.
 - (b) Ou bien il est possible de proposer aux joueurs un nouvel objectif de gestion P' qui soit cohérent pour chacune des dynamiques. Dans ce cas il faut aller au cas 2 avec P' .
2. P est cohérent pour chacun des joueurs, ce qui nous donne autant de noyaux de viabilité que de dynamiques différentes. Deux cas sont possibles :
 - (a) Si les noyaux sont les mêmes, nous vérifions si l'intersection des contrôles viables est vide :
 - i. Si l'intersection des contrôles viables est vide, il faut retourner au cas 1.a).
 - ii. Si l'intersection des contrôles viables est non vide, nous avons trouvé un objectif de gestion qui convient à tous et qui est cohérent pour tous.
 - (b) Si les noyaux sont différents, ces noyaux deviennent les nouvelles contraintes et il faut recommencer la procédure au début (avec un nouveau calcul de l'intersection des contraintes et des contrôles).

Cette procédure est illustrée dans la figure 6.9.

4. Voir la définition 13

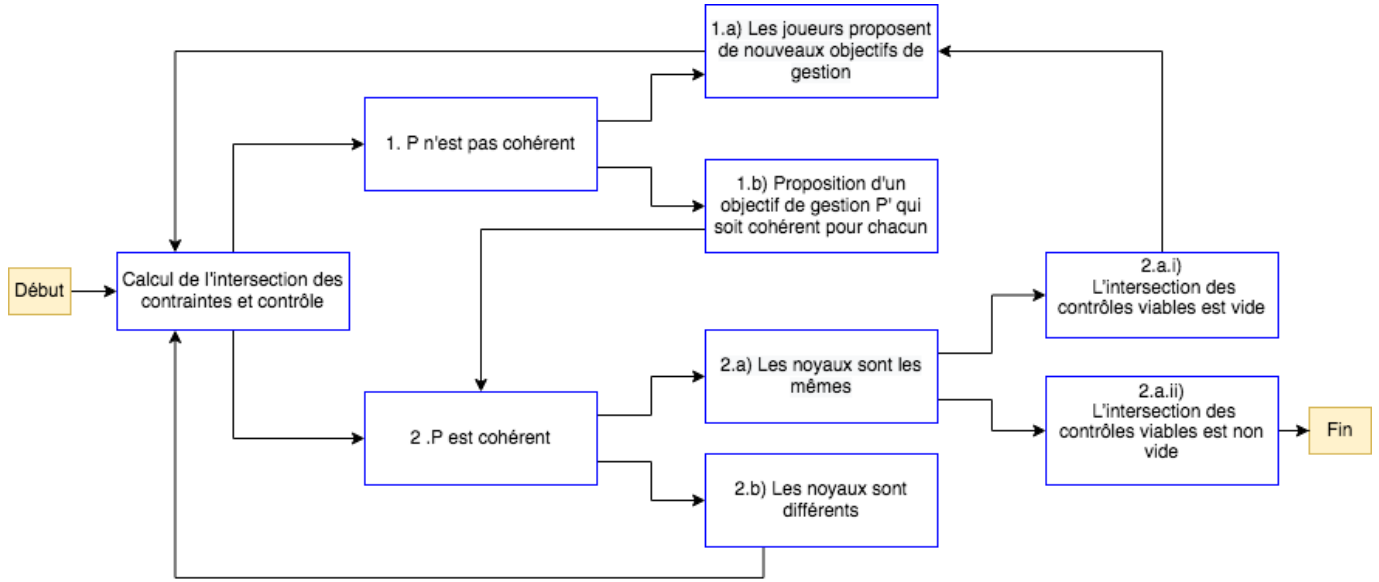


FIGURE 6.9 – Étapes permettant de trouver un objectif collectif de gestion cohérent pour tous.

6.3.1 Intersection de contraintes et de contrôles

Pour calculer l'intersection des contraintes et des contrôles des différents utilisateurs, on étend les notations $c_{\min,i}$ et $c_{\max,i}$ du paragraphe 5.4.1 : les souhaits sont des nombres réels $c_{\min,j,i}$, $c_{\max,j,i}$, $1 \leq j \leq m$, $0 \leq i \leq n-1$, où j est l'index du joueur et i est l'index de la variable ou du contrôle, avec n la somme du nombre de variables et du nombre de contrôles et m le nombre de joueurs. Ces souhaits représentent les bornes, c'est-à-dire les minima et les maxima acceptés par les joueurs sur les contrôles et les contraintes.

Dans notre exemple de réserve protégée marine, les joueurs doivent exprimer leurs souhaits sur le nombre d'animaux (A), le capital des infrastructures de pêche (C), le nombre de touristes (T), la taille des mailles de filets (lié à i_p : le taux de capture accidentelle), la proportion de la réserve protégée ouverte au tourisme (lié à ζ : la proportion des zones de vie des tortues accessible aux touristes). On a donc $n = 5$ et $m = 3$ s'il y a un joueur par rôle.

On note $S_{\text{collectif}}$ le souhait collectif qui agrège les souhaits de tous les joueurs :

$$S_{\text{collectif}} = (c_{\min,i}, c_{\max,i})_{1 \leq i \leq n} \quad (6.7)$$

Avec : $c_{\min,i} = \max_j(c_{\min,j,i})$ et $c_{\max,i} = \min_j(c_{\max,j,i})$. Pour chaque coordonnée i , la borne minimum est égale au maximum des valeurs proposées par les joueurs et la borne maximum est égale au minimum des valeurs proposées par les joueurs.

Définition 34 (Valide). *Un vecteur de souhait $S_{\text{collectif}}$ est valide si : $\forall 1 \leq i \leq n$, $c_{\min,i} \leq c_{\max,i}$.*

Et $S_{\text{collectif}}$ n'est pas valide si :

$$\exists i, j, k \text{ avec } j \neq k \text{ tel que : } c_{\min,j,i} > c_{\max,k,i} \quad (6.8)$$

Par exemple, $S_{\text{collectif}}$ n'est pas valide si un joueur propose $C \in [10000, 50000]$ et qu'un autre joueur propose $C \in [70060, 100000]$. C'est le cas illustré par la figure 6.10.

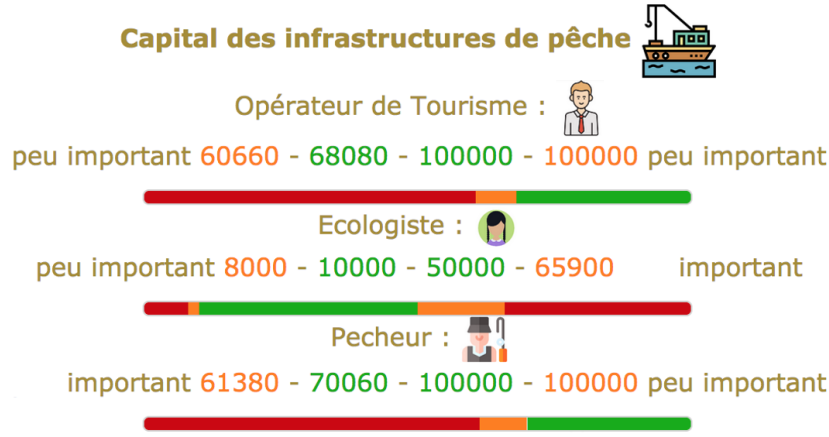


FIGURE 6.10 – Souhaits des joueurs - Dans cet exemple, les souhaits du joueur écologiste ne sont pas compatibles avec ceux du joueur opérateur de tourisme et du joueur pêcheur.

Si $S_{\text{collectif}}$ n'est pas valide, nous utiliserons deux définitions :

Définition 35 (Conflit). *On dit que la contrainte ou le contrôle i est en conflit si : $\exists i, j$ avec $j \neq k$ tel que : $c_{\min, j, i} > c_{\max, k, i}$.*

Définition 36 (Groupe). *En situation de conflit il y a deux groupes de joueurs :*

- *Le groupe des minima est composé des joueurs j pour qui la borne $c_{\min, j, i}$ est importante et il existe k tel que $c_{\min, j, i} > c_{\max, k, i}$.*
- *Le groupe des maxima est composé des joueurs k pour qui la borne $c_{\max, k, i}$ est importante et il existe j tel que $c_{\min, j, i} > c_{\max, k, i}$.*

Dans l'exemple illustré par le figure 6.10, la contrainte C (le capital des infrastructures de pêche) est en conflit. Le groupe des minima est formé par le joueur pêcheur. Le groupe des maxima est formé par le joueur écologiste. Le joueur opérateur de tourisme n'appartient à aucun groupe car il ne considère par le minimum sur le capital des infrastructures comme important.

6.3.2 Calcul de noyaux dans l'intersection

Lorsque $S_{\text{collectif}}$ (défini par l'équation 6.7) est valide, alors l'intersection des contraintes des joueurs et l'intersection des contrôles des joueurs sont non vides et l'assistant définit le nouvel objectif de gestion par l'intersection des contraintes et l'intersection des contrôles, définit les problèmes de viabilité associés pour chaque joueur, et calcule les noyaux de viabilité correspondant. Notre but est d'aider les participants à définir un objectif collectif de gestion qui soit cohérent pour tous tel que défini par la définition 32. Si les joueurs ont renseigné la même dynamique au début du jeu, ils obtiendront tous le même nouveau noyau. Si ce noyau n'est pas vide, cela signifie qu'un objectif collectif de gestion cohérent pour tous a été trouvé et la négociation peut s'arrêter ici.

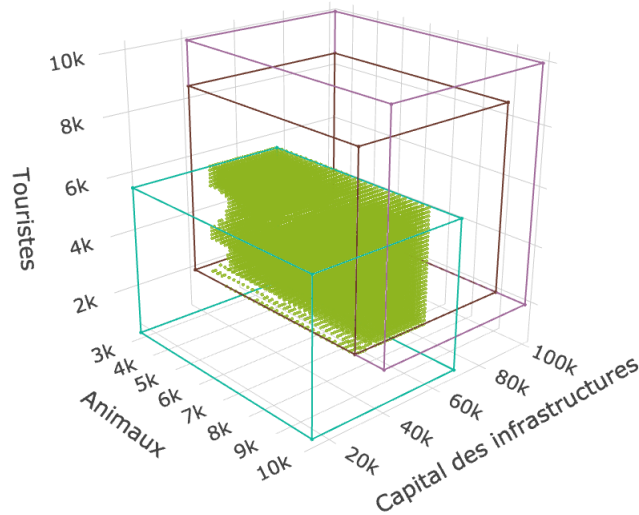


FIGURE 6.11 – Les intersections des contraintes et des contrôles des joueurs ne sont pas vides, un noyau de viabilité (en vert) a été calculé dans cette intersection. Les hyperrectangles représentent les contraintes des joueurs. Ici nous sommes dans le cas particulier où les joueurs ont la même dynamique.

Dans le cas où les participants ont des dynamiques différentes, on considère comme nouvel ensemble de contraintes l'intersection des noyaux de viabilité des joueurs. Si l'intersection est vide, les joueurs doivent entrer dans une nouvelle étape de négociation sur les objectifs. Sinon, on considère comme nouvel ensemble de contrôle l'intersection des ensembles de contrôles viables des joueurs. Si l'intersection est vide pour au moins un état, les joueurs doivent entrer dans une nouvelle étape de négociation sur les moyens d'action. Avec le nouvel ensemble de contraintes et le nouvel ensemble de contrôles, on définit pour chaque joueur son nouveau problème de viabilité et on calcule le noyau de viabilité correspondant. Si l'un des noyaux est vide, le jeu doit entrer dans une nouvelle étape de négociation. De même si l'intersection des noyaux est vide. Si les intersections successives sont non vides, ce processus se termine quand les noyaux de viabilité sont égaux entre eux et l'intersection des ensembles de contrôle est non vide en tout point. Les intersections sont des fermés (en tant qu'intersection d'ensembles fermés), la suite des intersections forme une suite décroissante qui converge vers un fermé non vide. Ce processus récursif est schématisé sur la figure 6.9.

Seule la première étape de ce processus a été implémentée. En effet, les bibliothèques de calcul de noyaux actuelles ne manipulent pas des noyaux comme ensemble de contraintes. La bibliothèque Viabilitree (Alvarez et al., 2016) permet cette manipulation mais le temps de calcul des noyaux n'est pas compatible avec le jeu. Dans la partie 4.5.2 nous avons décrit une procédure alternative basée sur le noyau garanti.

Ainsi, le fonctionnement de l'assistant peut être résumé par la figure 6.12.

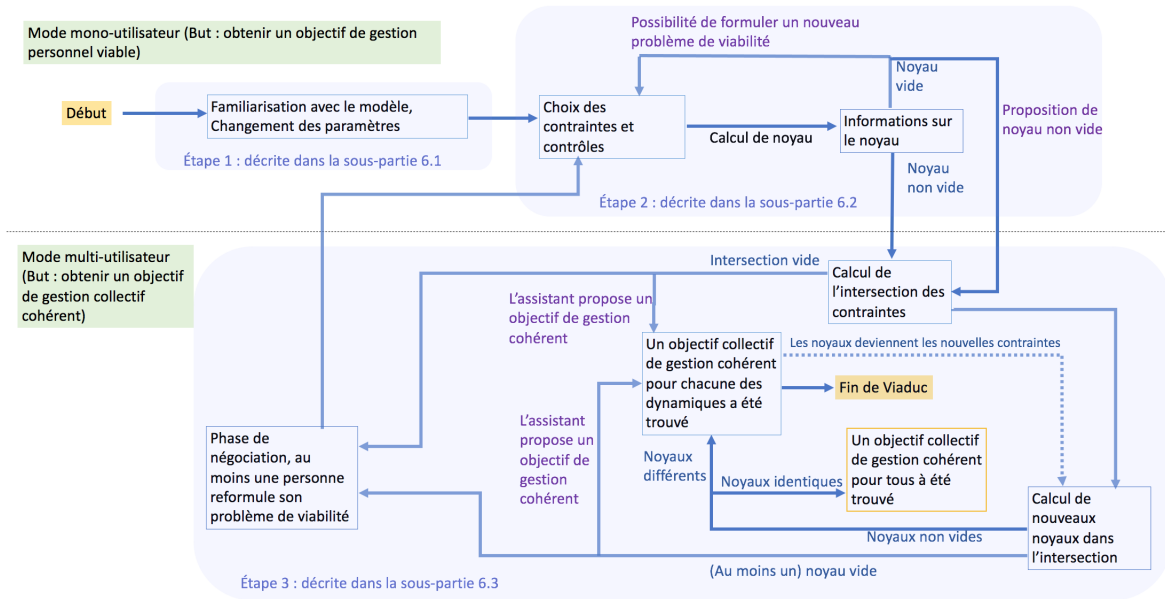


FIGURE 6.12 – Résumé des 3 étapes de l'assistant telles qu'introduites au paragraphe 5.4.2. La flèche en pointillé représente la procédure à suivre pour s'assurer qu'un objectif collectif de gestion cohérent pour tous a été trouvé, mais n'a pas été implémenté dans Viaduc pour les raisons citées précédemment.

6.3.3 Le cas des objectifs de gestion incohérents

En cas d'intersection vide ou de noyau(x) dans l'intersection vide, il n'est pas possible de satisfaire les souhaits de tous les joueurs. Les joueurs peuvent alors se mettre d'accord entre eux pour savoir lequel ou lesquels d'entre eux doivent reformuler leurs problèmes de viabilité. L'assistant peut aussi proposer aux joueurs des objectifs de gestion qui correspondent à des noyaux non vides pour chacun d'entre eux, tout en tenant compte des souhaits de chacun.

Un participant modifie son problème de viabilité

Dans le cas d'un désaccord entre les participants (pas d'intersection entre les contraintes des joueurs, ou bien il y a au moins un noyau vide à l'intérieur de l'intersection), les participants peuvent reformuler leurs problèmes de viabilité en modifiant leurs contrôles ou bien leurs contraintes. Pour cela ils ont la possibilité de revenir à l'étape précédente de propositions d'objectif de gestion personnel. S'ils font ce choix, les joueurs ont, en mode transparence, la possibilité de visualiser les contraintes et contrôles des autres participants via une fenêtre d'information qui apparaît lorsque le joueur s'attarde avec la souris sur la contrainte ou le contrôle (figure 6.13).



FIGURE 6.13 – En mode transparence, lorsque le joueur passe la souris sur une contrainte ou un contrôle, il peut alors visualiser les valeurs choisies par les autres joueurs.

Comme vu précédemment, l'assistant peut aider le joueur pour la relaxation de contraintes. Pour cela le joueur indique quels souhaits sont importants pour lui.

L'assistant propose des objectifs de gestion cohérents pour chacun

L'assistant peut aussi proposer un objectif de gestion cohérent pour chaque joueur, tout en prenant en compte les souhaits et les importances des différents joueurs.

Si $S_{collectif}$ (tel que défini par l'équation 6.7) n'est pas valide, il faut chercher un nouveau vecteur de souhait S_0 valide, c'est-à-dire trouver pour chaque contrainte et chaque contrôle un ensemble non vide de valeurs possibles. Puisque $S_{collectif}$ n'est pas valide, nous savons que :

$$\exists i, j, k \text{ avec } j \neq k \text{ tel que : } c_{\min, j, i} > c_{\max, k, i} \quad (6.9)$$

Afin de trouver un objectif de gestion P_0 non vide, associé à un S_0 valide, deux algorithmes de recherche ont été implémentés.

Pour tout contrôle ou contrainte i en conflit (voir définition 35), chaque algorithme va renvoyer deux valeurs $c_{\min, i}$ et $c_{\max, i}$ telles que $c_{\min, i} < c_{\max, i}$.

À l'aide de ces algorithmes on trouve donc un objectif de gestion valide :

$$\begin{aligned} P_0 = \{ & V_1 \in [c_{\min, 0, 1}, c_{\max, 0, 1}], \dots, V_{n_v} \in [c_{\min, 0, n_v}, c_{\max, 0, n_v}], \\ & Q_{n_v+1} \in [c_{\min, 0, n_v+1}, c_{\max, 0, n_v+1}], \dots, Q_n \in [c_{\min, 0, n}, c_{\max, 0, n}] \} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Avec :

$$c_{\min, 0, i} = \max_j(c_{\min, j, i})$$

et

$$c_{\max, 0, i} = \min_j(c_{\max, j, i})$$

si

$$\max_j(c_{\min, j, i}) < \min_j(c_{\max, j, i})$$

et

$$c_{\min, 0, i} = c_{\min, i} \text{ et } c_{\max, 0, i} = c_{\max, i} \text{ sinon.}$$

P_0 est non vide par construction et nous permettra de lancer l'algorithme de recherche de noyaux non vides.

6.3.4 Recherche d'un objectif de gestion alternatif pour tous

Comme nous l'avons vu au paragraphe 6.2.3, pour lancer l'algorithme de recherche de noyaux non vides (décrit au paragraphe 6.4) nous avons besoin de valeurs initiales correspondant à : un objectif de gestion valide P_0 , un vecteur de marges M_0 et un vecteur d'importances I_0 . Dans le paragraphe 6.2.3, l'assistant recherche des noyaux non vides pour un seul joueur et il utilise donc les valeurs renseignées par ce joueur.

Nous nous plaçons désormais dans un cadre de recherche de noyaux non vides pour plusieurs joueurs et nous détaillons dans cette partie comment trouver les valeurs permettant de lancer la recherche de noyaux non vides, décrite en section 6.4.

Recherche des valeurs initiales I_0 et M_0 :

Dans un cadre de recherche de noyaux non vides pour plusieurs joueurs, soient $M_j = (\mu_{j, k})_{1 \leq k \leq 2n}$ le vecteur de marges du joueur j (défini par l'équation 6.2.1) et $I_j = (b_{j, k})_{1 \leq k \leq 2n}$ le vecteur d'importances du joueur j (défini par l'équation 6.2.3).

Les M_j sont obtenus lors du recueil de l'objectif personnel de gestion (voir le paragraphe 6.2.1 et la figure 6.4). Pour obtenir les I_j l'assistant demande à chaque joueur de choisir quels souhaits sont importants pour lui.

$I_0 = (b_{0,k})_{1 \leq k \leq 2n}$ avec $b_{0,k} = 1$ si un joueur considère le souhait k comme important et $b_{0,k} = 0$ sinon :

$$b_{0,k} = 1 \text{ si } \exists k \in [1, 2n], j \in [1, m] \text{ tel que } b_{j,k} = 1, b_{0,k} = 0 \text{ sinon.} \quad (6.11)$$

Le temps de recherche de noyaux non vides étant proportionnel aux nombres de souhaits considérés comme importants, l'assistant limite le nombre de souhaits considérés comme importants à trois par joueurs.

On définit le vecteur de marge $M_0 = (\mu_{0,k})_{1 \leq k \leq 2n}$ avec $\mu_{0,k}$ la valeur maximale pour le souhait k renseignée par les joueurs qui considèrent le souhait k comme important. Si aucun joueur ne considère k comme important alors $\mu_{0,k}$ est la valeur maximale renseignée par les joueurs pour le souhait k .

Le vecteur de marges $M_0 = (\mu_{0,k})_{1 \leq k \leq 2n}$ est donc tel que : $\mu_{0,k} = \max_j (\mu_{j,k}) \times b_{j,k}$ si $\exists k, j$ tel que $b_{j,k} = 1$ et $\mu_{0,k} = \max_j (\mu_{j,k})$ sinon.

Recherche de la valeur initiale P_0 :

Commençons par le cas le plus simple où l'intersection des objectifs de gestion des différents joueurs n'est pas vide et au moins un noyau dans cette intersection est vide. Dans ce cas, P_0 est l'intersection des objectifs de gestion des différents joueurs et il est possible de lancer l'algorithme de recherche de noyaux non vide avec en arguments P_0 , M_0 et I_0 .

Dans le cas où l'intersection des l'intersection des objectifs de gestion des différents joueurs est vide, il est nécessaire de trouver un P_0 valide pour lancer la recherche de noyaux non vides.

Deux algorithmes sont décrits ici, et se basent sur des *vecteurs de pas*. Un vecteur de pas pour le joueur j est un vecteur $A_j = (a_{j,k})_{1 \leq k \leq 2n}$ avec :

$$a_{j,k} = \frac{\mu_{j,k}}{\rho} \quad (6.12)$$

avec $\mu_{j,k}$ la marge autorisée par le joueur j pour le souhait k et $\rho \in \mathbb{R}_+^*$ un paramètre correspondant à la précision souhaitée. On a $A_j \in \mathbb{R}_+^{*2n}$, puisque $\mu_{j,i} > 0$

On note que, de même que pour le vecteur de marge M , les valeurs d'indices impairs sont associées aux minima et les indices pairs sont associés aux maxima.

L'idée générale des algorithmes est, pour chaque variable ou contrôle i en conflit, de diminuer les valeurs $c_{\min,j,i}$ d'une valeur de pas $a_{j,2i-1}$ et/ou d'augmenter les valeurs $c_{\max,j,i}$ d'une valeur de pas $a_{j,2i}$ jusqu'à ce que $\max_j (c_{\min,j,i}) < \min_k (c_{\max,k,i})$.

Définition 37 (Effort). *On définit l'effort sur les minima (resp. sur les maxima) $e_{\min,j,i}$ (resp. $e_{\max,j,i}$) fourni par un joueur j sur la variable ou le contrôle i comme le nombre de fois où l'algorithme a ajouté (resp. soustrait) la valeur de pas $a_{j,2i-1}$ (resp. $a_{j,2i}$) à la valeur $c_{\min,j,i}$ (resp. $c_{\max,j,i}$).*

On définit l'effort global $e_{j,i}$ fourni par un joueur j sur la variable ou le contrôle i comme le maximum de ces deux valeurs : $e_{j,i} = \max_j (e_{\max,j,i}, e_{\min,j,i})$.

Le premier algorithme propose une *équité individuelle*, c'est-à-dire que l'on privilégie l'équité sur les efforts $e_{j,i}$ fournis par chaque joueur individuellement pour cette variable ou ce contrôle i . Cet algorithme garantit que chaque joueur fournit les mêmes efforts : $e_{1,i} = \dots = e_{j,i} = \dots = e_{n,i}$.

Le second algorithme privilégie une *équité de groupe*, c'est-à-dire que l'on privilégie l'équité sur la somme des efforts des joueurs appartenant à un même groupe, selon la définition 36.

Il y a pour toute variable ou contrôle en conflit exactement deux groupes au début de l'algorithme (voir figure 6.10). Les groupes peuvent changer selon la valeur de i . Un joueur peut n'appartenir à aucun groupe. Au cours de l'algorithme, un joueur peut quitter un groupe.

Le second algorithme minimise la différence entre les efforts de chaque groupe.

Soit m_1 le nombre de joueurs appartenant au premier groupe, $1 \leq m_1 < m$ et soit m_2 le nombre de joueurs appartenant au second groupe, $1 \leq m_2 < m$ avec $m_1 + m_2 \leq m$. En réindexant les joueurs si besoin, on considère que les joueurs de 1 à m_1 appartiennent au groupe des minima et que les joueurs

de $m_1 + 1$ à $m_1 + m_2$ appartiennent au groupe des maxima. Ce second algorithme minimise, pour i fixé, la valeur :

$$\left| \sum_{j=1}^{m_1} e_{j,i} - \sum_{k=m_1+1}^{m_2} e_{k,i} \right| \quad (6.13)$$

Les algorithmes sont appelé pour chaque contrainte ou contrôle i en conflit. Ces algorithmes prennent quatre paramètres en entrée :

- Le tableau Mins : Mins contient les bornes minimum $c_{\min,j,i}$ des joueurs ayant noté le minimum sur i comme important. Si aucun joueur n'a noté le sur i comme important, Mins contient tous les $c_{\min,j,i}$.
- Le tableau pasMins : pasMins contient les pas $a_{j,2i-1}$ (tel que défini par l'équation 6.12) associés aux éléments du tableau Mins.
- Le tableau Maxs : Maxs contient les bornes maximum $c_{\max,j,i}$ des joueurs ayant noté le maximum sur i comme important. Si aucun joueur n'a noté le maximum sur i comme important, Maxs contient tous les $c_{\max,j,i}$.
- Le tableau pasMaxs : pasMaxs contient les pas $a_{j,2i}$ associés aux éléments du tableau Maxs.

Nous allons construire les deux tableaux Mins et Maxs à donner en paramètre des algorithmes, ainsi que les deux tableaux de pas pasMins et pasMaxs qui leur sont associés.

À i fixé, soit $m_{\min} = \sum_{j=1}^m b_{j,2i-1}$, et soit $m_{\max} = \sum_{j=1}^m b_{j,2i}$, avec $I = (b_{j,k})_{1 \leq k \leq 2n}$ le vecteur d'importances tel que défini par l'équation 6.4.3. La valeur $m_{\min}$ (resp. $m_{\max}$) correspond au nombre de personnes ayant renseigné le minimum (resp. maximum) sur la variable ou sur le contrôle i comme important pour eux.

Si $m_{\min} = 0$ (resp. $m_{\max} = 0$), $Mins = (c_{\min,j,i})_{1 \leq j \leq m}$ (resp. $Max = (c_{\max,j,i})_{1 \leq j \leq m}$), et $pasMins = (a_{j,2i-1})_{1 \leq j \leq m}$ (resp. $pasMaxs = (a_{j,2i})_{1 \leq j \leq m}$). C'est à dire que l'on prend toutes les valeurs.

Si $m_{\min} > 0$ (resp. $m_{\max} > 0$), on réordonne les index des joueurs de telle sorte à ce que $b_{j,2i-1} = 1$ (resp. $b_{k,2i} = 1$) pour $1 \leq j \leq m_{\min}$ (resp. $1 \leq k \leq m_{\max}$). Puis on pose $Mins = (c_{\min,j,i})_{1 \leq j \leq m_{\min}}$ (resp. $Max = (c_{\max,k,i})_{1 \leq k \leq m_{\max}}$), et $pasMins = (a_{j,2i-1})_{1 \leq j \leq m_{\min}}$ (resp. $pasMaxs = (a_{k,2i})_{1 \leq k \leq m_{\max}}$). C'est à dire que l'on prend uniquement les valeurs considérées comme importantes.

Ces deux algorithmes renvoient un couple $(c_{\min,i}, c_{\max,i})$ tels que $c_{\min,i} < c_{\max,i}$.

Recherche d'un problème valide initial par équité individuelle

L'algorithme consiste à additionner (resp. soustraire) successivement aux valeurs de Mins (resp. Maxs) la valeur pasMins (resp. pasMaxs) qui leur est associée, et ce jusqu'à ce que le plus petit minimum soit inférieur au plus grand maximum (les figures 6.14 jusqu'à 6.17 illustrent les étapes successives du *while*).

Algorithm 1 Recherche d'un problème valide initial par équité individuelle.

```

procedure EQUITE(Mins,pasMins,Maxs,pasMaxs)
  do
    Cmin = max(Mins)
    Cmax = min(Maxs)
    for 0 <= k < Mins.lenght do
      Mins[k] = Mins[k] - pasMins[k]
    for 0 <= k < Maxs.lenght do
      Maxs[k] = Maxs[k] + pasMaxs[k]
  while Cmin > Cmax
  return (Cmin,Cmax)

```

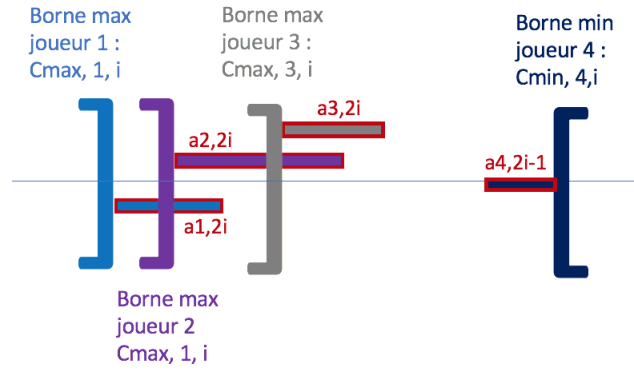


FIGURE 6.14 – Les Mins = $[c_{\min,4,i}]$ et Maxs = $[c_{\min,1,i}, c_{\min,2,i}, c_{\min,3,i}]$ et leurs pas associés pasMin = $[a_{4,2i-1}]$ et pasMax = $[a_{1,2i}, a_{2,2i}, a_{3,2i}]$ sont les valeurs transmises en paramètres à l'algorithme. Les crochets représentent les valeurs initiales des joueurs. Chaque petit rectangle illustre le pas associé à un souhait d'un des joueurs. La notation des pas à été définie par l'équation 6.12.

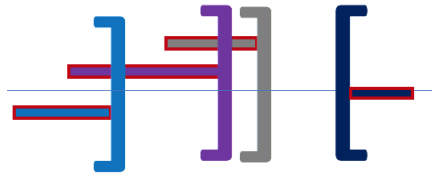


FIGURE 6.15 – Première étape : on diminue les Mins[k] d'une valeur pasMin[k] et on augmente les Maxs[k] d'une valeur pasMax[k].

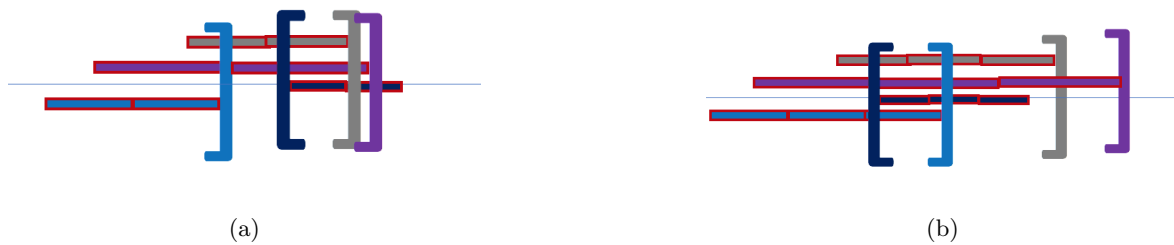


FIGURE 6.16 – On recommence jusqu'à ce que le maximum des Mins[k] soit inférieur au minimum des Maxs[k].

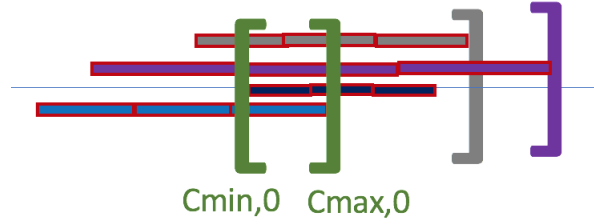


FIGURE 6.17 – Fin de l'algorithme, en vert les valeurs retournées par l'algorithme qui serviront à lancer la recherche de noyaux non vides.

Recherche d'un problème valide initial par équité de groupe

Le second algorithme privilégie une *équité de groupe*, c'est-à-dire que l'on privilégie l'équité sur la somme des efforts des joueurs appartenant à un même groupe, tel que défini par l'équation 6.13 (les figures 6.18 jusqu'à 6.22 illustrent les étapes successives du *while*).

Algorithm 2 équité de groupe

```

procédure EQUITE(Mins,pasMins,Maxs,pasMaxs)
  nbMax = 0 // nombre de déplacements vers la droite (augmentation des maxima)
  nbMin = 0 // nombre de déplacements vers la gauche (diminution des minima)
  do
    Cmin = max(Mins)
    Cmax = min(Maxs)
    if nbMin >= nbMax then // On augmente des maxima
      for 0 <= k < Maxs.lenght do
        tmpNbMax = 0
        if Maxs[k] < Cmin then // On augmente uniquement les maxima des joueurs appartenant au groupe des maxima
          Maxs[k] = Maxs[k] + pasMaxs[k]
          tmpNbMax ++
    if nbMin <= nbMax then // On diminue des minima
      for 0 <= k < Mins.lenght do
        tmpNbMin = 0
        if Mins[k] > Cmax then // On diminue uniquement les minima des joueurs appartenant au groupe des minima
          Mins[k] = Mins[k] - pasMins[k]
          tmpNbMin ++
    nbMin = nbMin + tmpNbMin
    nbMax = nbMax + tmpNbMax
  while Cmin < Cmax
  return (Cmin,Cmax)

```

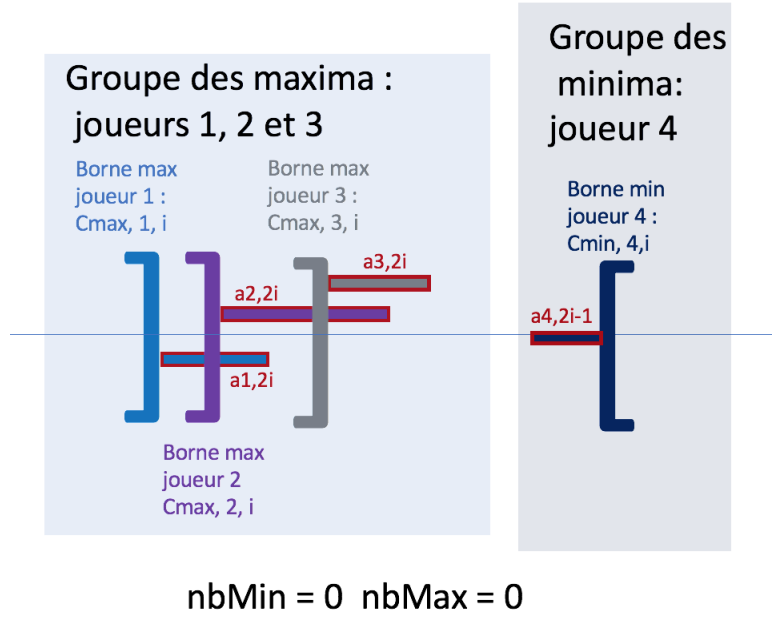


FIGURE 6.18 – Les Mins = $[c_{\min,4,i}]$ et Maxs = $[c_{\min,1,i}, c_{\min,2,i}, c_{\min,3,i}]$ et leurs pas associés pasMin = $[a_{4,2i-1}]$ et pasMax = $[a_{1,2i}, a_{2,2i}, a_{3,2i}]$ sont les valeurs transmises en paramètres à l'algorithme. Les crochets représentent les valeurs initiales des joueurs. Chaque petit rectangle illustre le pas associé à un souhait d'un des joueurs. La notation des pas a été définie par l'équation (6.12). Les joueurs 1, 2 et 3 forment le groupe des maxima et le joueur 4 forme le groupe des minima.

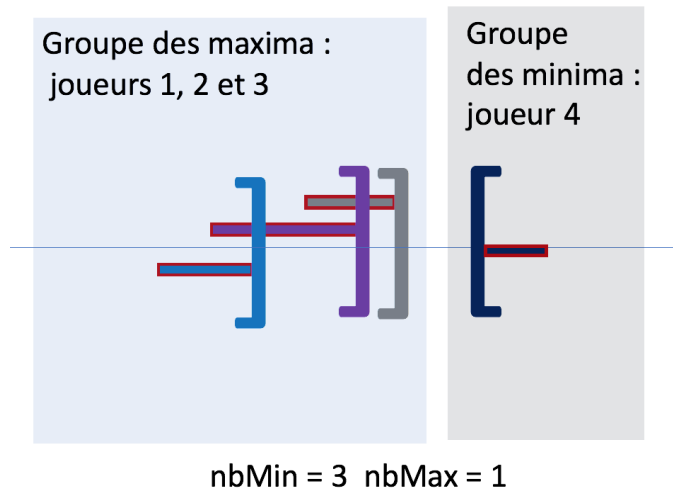


FIGURE 6.19 – Première étape : on augmente les Maxs[k] de leur valeur pasMax[k] et on diminue les Mins[k] de leur valeur pasMin[k]. Ici nbMin = 3 et nbMax = 1, $nbMin \geq nbMax$ donc il faut diminuer les minima jusqu'à ce que $nbMin \leq nbMax$.

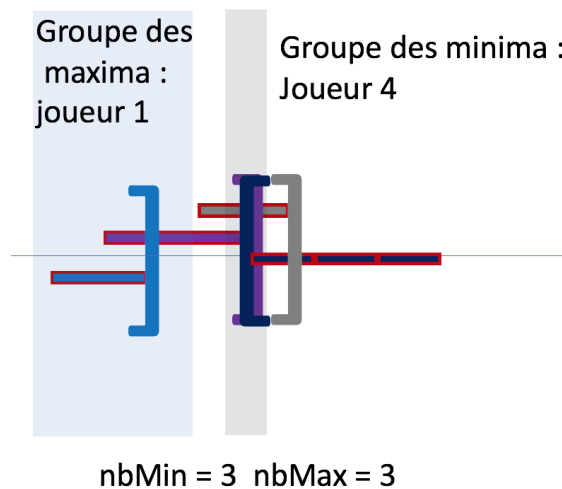
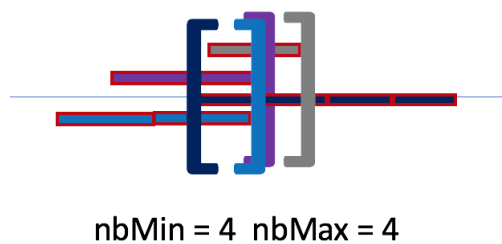
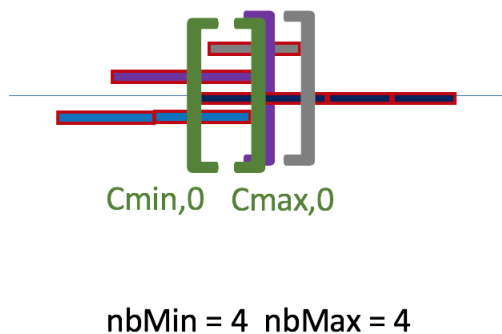
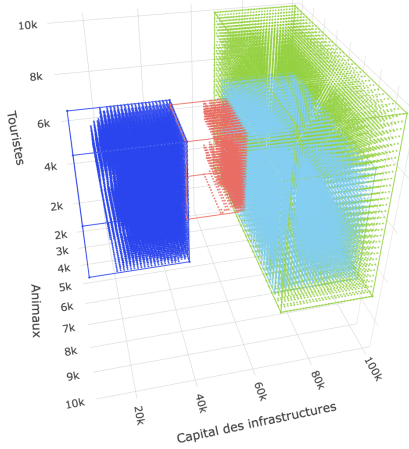
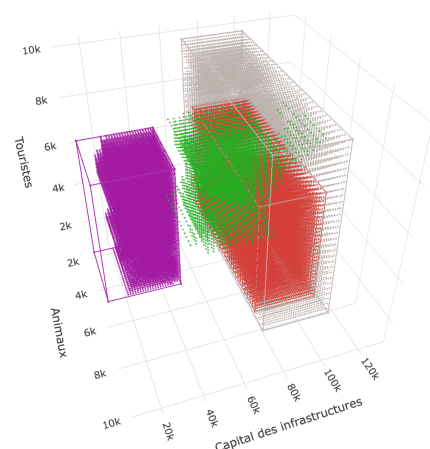
FIGURE 6.20 – Le même nombre d'efforts dans chaque groupe : $nbMin = nbMax$.FIGURE 6.21 – L'algorithme augmente les $Maxs[k]$ du groupe des maxima de leur valeur $pasMax[k]$ et on diminue les $Mins[k]$ du groupe des minima de leur valeur $pasMin[k]$.

FIGURE 6.22 – Fin de l'algorithme, en vert les valeurs qui serviront à lancer la recherche de noyaux non vides.

L'algorithme (d'équité individuelle ou de groupe) est un paramètre de l'assistant. Pour les évaluations nous avons choisi l'équité individuelle.



(a) Équité individuelle.



(b) Équité de groupe.

FIGURE 6.23 – Présentation de deux noyaux (en rouge pour l'équité individuelle et en vert pour l'équité collective) obtenus grâce à chacun des deux algorithmes, combiné à l'algorithme de recherche de noyaux non vide présenté au paragraphe 6.4.2.

Ces algorithmes permettent de trouver un objectif de gestion P_0 valide, composé de bornes minimales et maximales sur chacune des variables et chacun des contrôles. P_0 permet de lancer la recherche de noyaux non vides à partir de ce vecteur initial. L'algorithme de recherche de noyaux non vides (décrit dans la section 6.4) prend en paramètres P_0 , M_0 et I_0 et renvoie un objectif de gestion qui est cohérent pour chacune des dynamiques des joueurs. La figure 6.23 compare les noyaux calculés grâce aux sorties des deux algorithmes et à l'algorithme de recherche de noyaux non vides. Les objectifs de gestion dont ils sont issus sont des compromis entre les objectifs de gestion de chacun des joueurs et sont cohérents pour chacun selon la définition 32.

Si les joueurs sont satisfaits de l'objectif de gestion proposé par l'assistant, le jeu peut s'arrêter ici : l'objectif collectif de gestion est cohérent. (Comme mentionné au paragraphe 6.3.2, pour s'assurer que l'objectif collectif de gestion est cohérent pour tous, il serait nécessaire de faire l'intersection des noyaux et de refaire un calcul de noyaux dans cette intersection, et ce jusqu'à convergence.)

6.3.5 Choix d'une solution et résumé des efforts fournis

Enfin, lorsqu'ils ont trouvé un objectif de gestion qui est cohérent pour chacun (selon la définition 32), les joueurs peuvent voir l'évolution de leurs souhaits (ainsi que celle des autres joueurs en mode transparence). La figure 6.24 est une capture d'écran de l'assistant en mode transparence lors de cette dernière étape. Pour chacun des rôles, on y voit les objectifs de gestion ayant servi à calculer :

- les premiers noyaux calculés par chacun.
- les noyaux individuels finaux (c'est-à-dire ceux issus de l'objectif de gestion avec lequel les joueurs sont passés à l'étape 3 de l'assistant : définition d'un objectif collectif cohérent).
- les noyaux finaux, viables pour chacun.

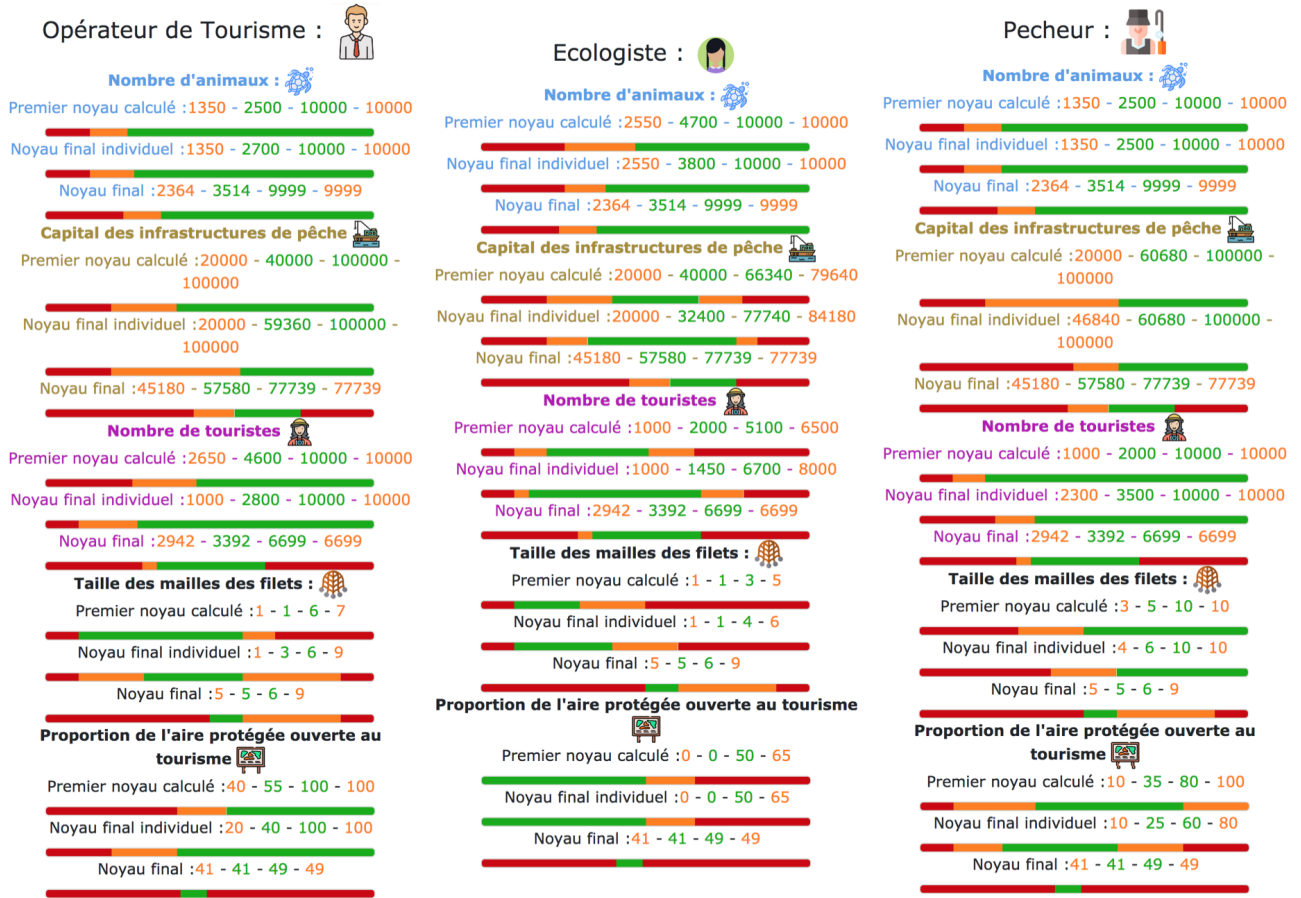


FIGURE 6.24 – Dans le mode transparence, le dernier écran du jeu résume les noyaux calculés par chacun des joueurs. Dans le mode tiers de confiance le joueur ne visualise que la colonne correspondant à son rôle.

Comme nous l'avons vu, l'assistant Viaduc se décompose en plusieurs étapes décrites au paragraphe 5.4.2, et sur la figure 6.12. Ces étapes peuvent boucler jusqu'à ce que les joueurs trouvent un objectif collectif de gestion qui les satisfasse, ou bien que le joueur pêcheur décide de mettre fin au jeu en imposant sa solution aux autres.

L'assistant offre également une aide pour que les joueurs puissent trouver un compromis viable, ainsi qu'une aide à la recherche de noyaux non vides que nous allons détailler.

6.4 Recherche de noyaux non vides

Dans cette section nous aborderons les différents algorithmes de recherche de noyaux non vides. Nous reprenons le formalisme du paragraphe 6.2.3 :

Le vecteur correspondant aux souhaits du joueur est : $S = (c_{\min,i}, c_{\max,i})_{1 \leq i \leq n}$. Le noyau associé à S et à la dynamique de l'utilisateur est vide. Afin de trouver un noyau non vide, il faut relaxer l'espace des contraintes et/ou des contrôles. Cela correspond à relaxer les souhaits du joueur.

Le vecteur correspondant aux souhaits relaxés est : $(c_{\min,i} - r_{\min,i}, c_{\max,i} + r_{\max,i})_{1 \leq i \leq n}$, avec $r_{\min,i}$ et $r_{\max,i}$ des nombres réels positifs correspondant aux relaxations.

Soit un ensemble E_{PNV} des objectifs de gestion de P qui, avec la dynamique du joueur, correspondent à un noyau non vide.

Soit $S_R = (r_{\min,i}, r_{\max,i})_{1 \leq i \leq n}$ avec $r_{\min,i} \in \mathbb{R}_+$ et $r_{\max,i} \in \mathbb{R}_+$ un vecteur de relaxation. À chaque vecteur S_R on associe un objectif de gestion P_R :

$$P_R = \{V_1 \in [c_{\min,1} - r_{\min,1}, c_{\max,1} + r_{\max,1}], \dots, V_{n_v} \in [c_{\min,n_v} - r_{\min,n_v}, c_{\max,n_v} + r_{\max,n_v}], \\ Q_{n_v+1} \in [c_{\min,n_v+1} - r_{\min,n_v+1}, c_{\max,n_v+1} + r_{\max,n_v+1}], \dots, Q_n \in [c_{\min,n} - r_{\min,n}, c_{\max,n} + r_{\max,n}]\} \quad (6.14)$$

Soit E_R l'ensemble des vecteurs de relaxation S_R tel que l'objectif de gestion associé P_R soit non vide. Nous voulons relaxer le moins possible l'objectif de gestion du joueur afin que la solution proposée par l'assistant corresponde le plus possible aux souhaits du joueur.

Nous sommes donc face à un problème de minimisation multicritère et recherchons une relaxation S_R , telle S_R ne soit dominée au sens de Pareto par aucun vecteur de E_R .

Nous aurons besoin du *vecteur de pas* $A = (a_k)_{1 \leq k \leq 2n}$ introduit par l'équation 6.12 :

$$a_k = \frac{\mu_k}{\rho} \quad (6.15)$$

avec μ_k la marge autorisée pour le souhait k et $\rho \in \mathbb{R}_+^*$ un paramètre correspondant à la précision souhaitée. On a $A \in \mathbb{R}_+^{*2n}$, puisque $\mu_k > 0$.

Sauf indication contraire, on considère que la dynamique est fixée.

6.4.1 Étapes préliminaires

Afin d'utiliser la dichotomie pour approcher le front de Pareto correspondant à une minimisation de S_R , nous utilisons la propriété suivante :

Propriété 38. *Soit*

$$P = \{V_1 \in [c_{\min,1}, c_{\max,1}], \dots, V_{n_v} \in [c_{\min,n_v}, c_{\max,n_v}], \\ Q_{n_v+1} \in [c_{\min,n_v+1}, c_{\max,n_v+1}], \dots, Q_n \in [c_{\min,n}, c_{\max,n}]\} \quad (6.16)$$

un objectif de gestion et S_d un système dynamique contrôlé, tel que le noyau de viabilité associé à P et S_d est vide. Soit un vecteur $\Lambda = (\lambda_{\min,i}, \lambda_{\max,i})$ tel que $\lambda_{\min,i} \leq 0$ et $\lambda_{\max,i} \leq 0$, le noyau associé à l'objectif de gestion

$$P_\Lambda = \{V_1 \in [c_{\min,1} - \lambda_{\min,1}, c_{\max,1} + \lambda_{\max,1}], \dots, V_{n_v} \in [c_{\min,n_v} - \lambda_{\min,n_v}, c_{\max,n_v} + \lambda_{\max,n_v}], \\ Q_{n_v+1} \in [c_{\min,n_v+1} - \lambda_{\min,n_v+1}, c_{\max,n_v+1} + \lambda_{\max,n_v+1}], \dots, Q_n \in [c_{\min,n} - \lambda_{\min,n}, c_{\max,n} + \lambda_{\max,n}]\} \quad (6.17)$$

et S_d est vide aussi.

Inversement, si un noyau de viabilité associé à l'objectif de gestion P est non vide alors tous les noyaux associés aux problèmes :

$$P_R = \{V_1 \in [c_{\min,1} - r_{\min,1}, c_{\max,1} + r_{\max,1}], \dots, V_{n_v} \in [c_{\min,n_v} - r_{\min,n_v}, c_{\max,n_v} + r_{\max,n_v}], \\ Q_{n_v+1} \in [c_{\min,n_v+1} - r_{\min,n_v+1}, c_{\max,n_v+1} + r_{\max,n_v+1}], \dots, Q_n \in [c_{\min,n} - r_{\min,n}, c_{\max,n} + r_{\max,n}]\} \quad (6.18)$$

sont non vides (car $r_{\min,i} \geq 0$ et $r_{\max,i} \geq 0 \forall i \in [1, n]$). L'illustration de cette proposition correspond aux figures 6.25 et 6.26.

On dit que le noyau associé à S_R est vide (resp. non vide) si le noyau associé à P_R est vide (resp. non vide).

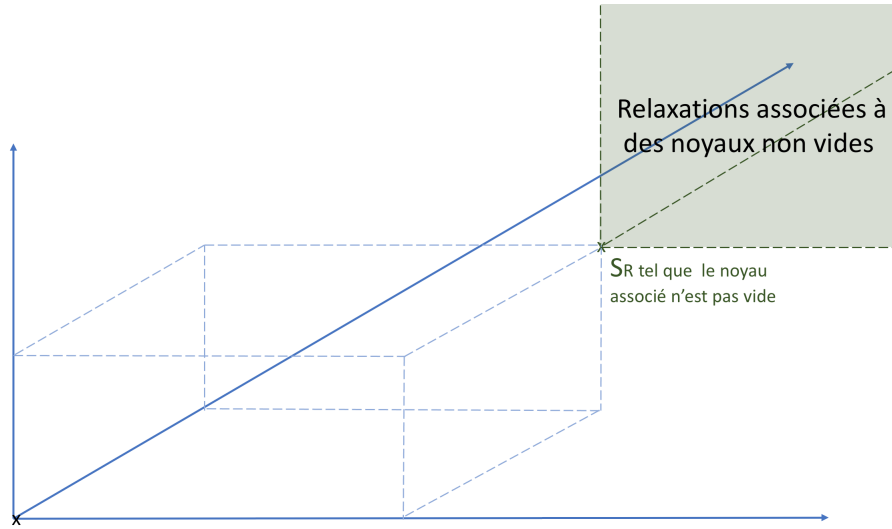


FIGURE 6.25 – On se place dans l'espace des vecteurs de relaxation. Dans le cas où le noyau associé à S_R est vide, le quadrant inférieur gauche contient uniquement des relaxations associées à des noyaux vides.

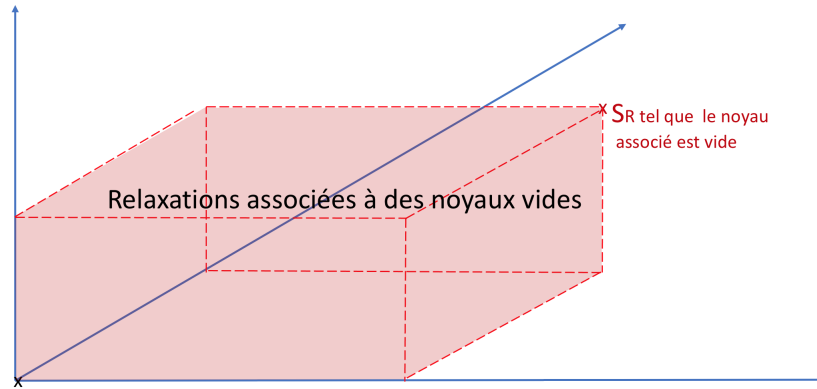


FIGURE 6.26 – Dans le cas où le noyau associé à S_R est non vide, le quadrant supérieur droit contient uniquement des relaxations associées à des noyaux non vides.

Ainsi, si l'on a trouvé une relaxation S_R telle que P_R est associé à un noyau non vide, alors on sait que toutes les relaxations $S_{R,\text{dom}}$ dominées par S_R au sens de Pareto sont associées à des noyaux non vides. Dans ce cas, les algorithmes vont rechercher dans l'espace des relaxations privé de $S_{R,\text{dom}}$.

Cette propriété est vérifiée car les ensembles de contraintes sur les variables d'état sont des hyperrectangles.

Nous nous plaçons dans l'espace des vecteurs de relaxation S_R . Nous allons construire deux vecteurs de relaxation $S_{R,\text{initial}}$ et $S_{R,\text{total}}$ tel que $S_{R,\text{initial}}$ corresponde à un noyau vide et que $S_{R,\text{total}}$ corresponde à un noyau non vide.

On pose $S_{R,\text{initial}} = (0)^{2n}$, l'objectif de gestion correspondant à $S_{R,\text{initial}}$ est noté P_{initial} . Il s'agit de l'objectif de gestion du joueur. Le noyau correspondant à P_{initial} est vide, c'est l'objectif de gestion qu'il est nécessaire de relaxer.

Pour construire $S_{R,\text{total}}$, nous choisissons des valeurs $c_{\min,\text{total},i}$ et $c_{\max,\text{total},i}$ telles que le noyau associé à :

$$P_{\text{total}} = \{V_1 \in [c_{\min, \text{total}, 1}, c_{\max, \text{total}, 1}], \dots, V_{n_v} \in [c_{\min, \text{total}, n_v}, c_{\max, \text{total}, n_v}], \\ Q_{n_v+1} \in [c_{\min, \text{total}, n_v+1}, c_{\max, \text{total}, n_v+1}], \dots, Q_n \in [c_{\min, \text{total}, n}, c_{\max, \text{total}, n}]\} \quad (6.19)$$

soit non vide. Dans notre cas de réserve marine protégée, nous avons choisi :

$$P_{\text{total}} = \{A \in [0, 10000]; C \in [0, 100000]; T \in [0, 1000]; \\ i_p \in [0 \times 10^{-6}, 10 \times 10^{-6}]; \zeta \in [0 \times 0.5 \times 10^{-3}, 100 \times 0.5 \times 10^{-3}]\} \quad (6.20)$$

L'assistant garantit que si les souhaits $c_{\min, i}$ et $c_{\max, i}$ correspondent respectivement au minimum autorisé par le curseur et au maximum autorisé par le curseur pour tout i , alors le noyau de viabilité associé à ces souhaits est non vide. Donc le noyau associé à P_{total} est non vide par construction. C'est un pré-requis du jeu pour le fonctionnement actuel de l'assistant.

De plus, on note $S_{R, \text{total}} = (r_{\min, \text{total}, i}, r_{\max, \text{total}, i})_{1 \leq i \leq n}$ le vecteur de relaxation associé à P_{total} . On a

$$r_{\min, \text{total}, i} = c_{\min, \text{initial}, i} - c_{\min, \text{total}, i} \\ \text{et } r_{\max, \text{total}, i} = c_{\max, \text{total}, i} - c_{\max, \text{initial}, i} \quad (6.21)$$

La figure 6.27 récapitule les notations avec un exemple issu de l'assistant Viaduc.

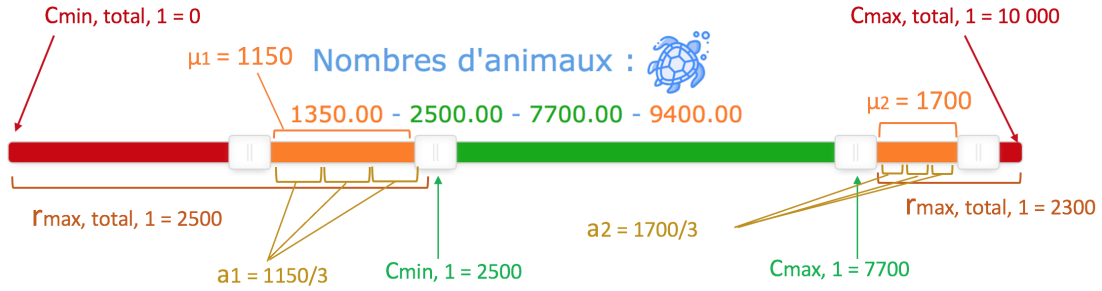


FIGURE 6.27 – Récapitulatif des notations avec un exemple issu de l'assistant Viaduc. Ici on a choisi $\rho = 3$.

Enfin, à chaque vecteur S_R on associe un vecteur S'_R :

$$S'_R = \left(\frac{r_{\min, i}}{a_{2i-1}}, \frac{r_{\max, i}}{a_{2i}} \right)_{1 \leq i \leq n}$$

Dans la suite, nous nous plaçons dans l'espace des S'_R .

Les trois algorithmes utilisent un algorithme de recherche dichotomique sur une droite $(S_{\text{debut}}, S_{\text{fin}})$

Cet algorithme de recherche dichotomique prend trois paramètres en entrée :

- S_{debut} un vecteur de relaxation correspondant à un noyau vide.
- S_{fin} un vecteur de relaxation correspondant à un noyau non vide.
- et A qui est le vecteur de pas tel que défini par l'équation 6.15.

Et effectue une recherche dichotomique sur l'axe $(S_{\text{debut}}, S_{\text{fin}})$ en effectuant des pas a_k ($1 \leq k \leq 2n$) à chaque itération.

Cet algorithme renvoie un objectif de gestion P_R correspondant au vecteur de relaxation S_R et tel que le noyau associé à P_R est non vide.

L'algorithme construit un tableau nbPas correspondant au nombre de pas a_i que l'on peut faire entre $(S_{\text{debut}}, S_{\text{fin}})$ sur chacun des axes i .

Algorithm 3 Recherche Dichotomique

```

procedure RECHERCHEDICHOTOMIQUE( $S_{\text{debut}}, S_{\text{fin}}, A$ )
   $S_R = S_{\text{fin}}$ 
   $P_{\text{Return}} = P_{\text{fin}}$  //  $P_{\text{Return}}$  est le dernier objectif de gestion pour lequel le noyau est non vide
   $\text{coef} = 1$  //  $P_{\text{total}}$  n'est pas vide, on commence donc par diminuer les valeurs de relaxation
  for  $0 \leq i < n$  do // définition des tableaux nbPas qui nous serviront pour la dichotomie
     $\text{nbPas}[2i-1] = \lfloor \frac{r_{\text{fin}, \text{min}, i} - r_{\text{debut}, \text{min}, i}}{a_{2i-1}} \rfloor$ 
     $\text{nbPas}[2i] = \lfloor \frac{r_{\text{fin}, \text{max}, i} - r_{\text{debut}, \text{max}, i}}{a_{2i}} \rfloor$ 
  while il existe  $a_i$  tel que  $a_i > 0$  do
    for  $a_i$  tel que  $a_i > 0$  do
      if  $i$  est pair then // Il s'agit des minima
         $r_{\text{min}, i} = r_{\text{min}, i} - \text{coef} \times a_i$ 
        // Si le dernier noyau calculé est non vide, on veut moins relaxer et  $\text{coef} = 1$ , sinon
         $\text{coef} = -1$ 
      if  $i$  est impair then // Il s'agit des maxima
         $r_{\text{max}, i} = r_{\text{max}, i} - \text{coef} \times a_i$ 
         $\text{nbPas}[i] = \lfloor \frac{\text{nbPas}[i]}{2} \rfloor$ 
      if Le noyau associé à  $P_R$  est vide then
         $\text{coef} = -1$ 
      else
         $\text{coef} = 1$ 
         $P_{\text{Return}} = P_R$ 
      (fin du while)
    return  $P_{\text{Return}}$ 

```

Si cet algorithme de recherche dichotomique est utilisé en mode multi-utilisateur (dans l'étape 3 de l'assistant qui consiste à trouver un objectif collectif de gestion cohérent), l'instruction :

If Le noyau associé à P_R est vide

devient :

If Le noyau associé à P_R est vide pour au moins une dynamique.

6.4.2 Recherche dichotomique classique

Le premier algorithme implémenté effectue une recherche dichotomique sur la droite $(S'_{R, \text{initial}}, S'_{R, \text{total}})$.

Il prend deux paramètres :

- S_{total} est le vecteur de relaxation associé à P_{total} .
- A est le vecteur de pas tel que défini par l'équation 6.15.

Cet algorithme renvoie l'objectif de gestion P_{return} associé au vecteur de relaxation S_{return} tel que S_{return} est le plus proche de S_{initial} sur la droite $(S_{\text{initial}}, S_{\text{total}})$.

Algorithm 4 Recherche de noyaux non vides : Recherche classique

```

procedure RECHERCHECLASSIQUE( $S_{\text{total}}, A$ )
   $S_{\text{initial}} = (0)^{2n}$ 
  return RechercheDichotomique( $S_{\text{initial}}, S_{\text{total}}, A$ )

```

L'algorithme de recherche classique est illustré par la figure 6.28.

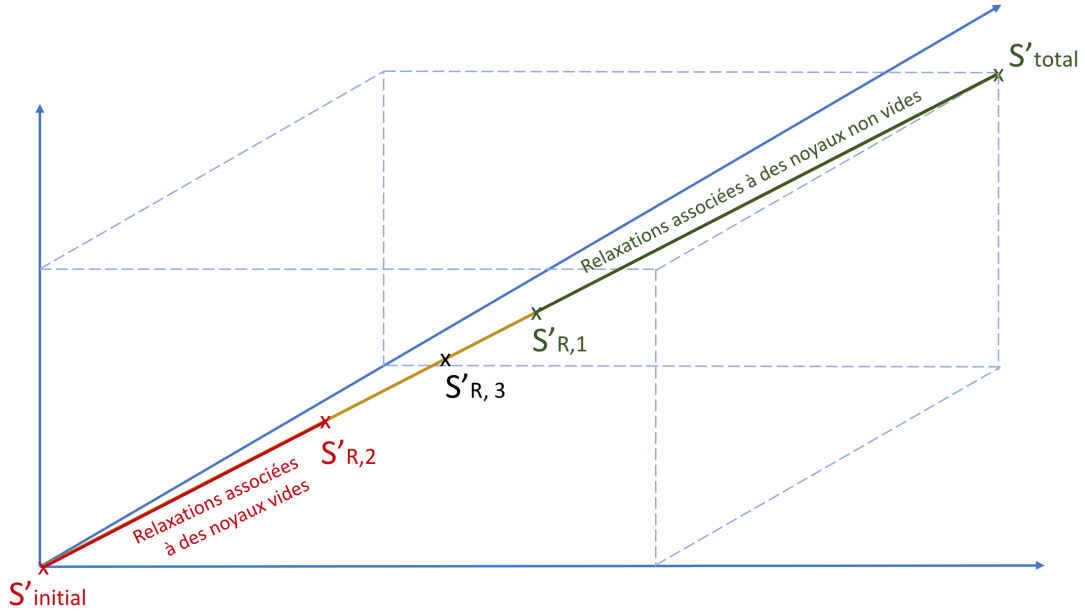


FIGURE 6.28 – Exemple de recherche dichotomique dans le cas où $n = 3$ et où le noyau associé à $S'_{R,1}$ est non vide et le noyau associé à $S'_{R,2}$ est vide.

6.4.3 Recherches dichotomiques alternatives

A partir de cette recherche dichotomique classique, nous avons implémenté deux algorithmes qui prennent en compte les importances des joueurs.

Recherche dichotomique avec directions privilégiées

Un second algorithme permet de proposer au joueur un autre objectif P_R dont le noyau est non vide et tel que S_R ne soit dominé par aucun autre vecteur de E_R (espace des relaxations correspondant à des noyaux non vides). Dans cet algorithme, nous prenons en compte l'importance que le joueur a associée à certains souhaits.

L'algorithme commence par relaxer au maximum les souhaits non importants. Pour cela, nous construisons un vecteur de relaxations $S'_{R,\text{partiel}}$ dont les valeurs sont égales à la relaxation maximale $r_{\min,\text{total},i}$ ou $r_{\max,\text{total},i}$ si le souhait associé est n'est pas important, et égales à 0 si le souhait est important.

Pour construire $S'_{R,\text{partiel}}$, on reprend le vecteur d'importance

$$I = (b_i)_{1 \leq i \leq 2n} \quad (6.22)$$

avec :

- $b_{2i-1} = 1$ si le souhait $c_{\min,i}$ est important et $b_{2i-1} = 0$ sinon
- $b_{2i} = 1$ si le souhait $c_{\max,i}$ est important et $b_{2i} = 0$ sinon.

On a donc :

$$S'_{R,\text{partiel}} = (r_{\min,\text{partiel},i}, r_{\max,\text{partiel},i})$$

avec : $r_{\min,\text{partiel},i} = r_{\min,\text{total},i} \times b_{2i-1}$ et $r_{\max,\text{partiel},i} = r_{\max,\text{total},i} \times b_{2i}$

Soit $P_{R,\text{partiel}}$ l'objectif de gestion associé au vecteur de relaxation $S'_{R,\text{partiel}}$.

Nous distinguons alors deux cas :

- Si le noyau associé à $P_{R,\text{partiel}}$ est non vide, l'algorithme se rapproche du problème P_{initial} en effectuant une recherche dichotomique sur la droite $(S'_{R,\text{initial}}, S'_{R,\text{partiel}})$. Ce cas est illustré par la figure 6.29.
- Si le noyau associé à $P_{R,\text{partiel}}$ est vide, il est nécessaire de relaxer davantage, et nous effectuons une recherche dichotomique sur la droite $(S'_{R,\text{partiel}}, S'_{R,\text{total}})$. Ce cas est illustré par la figure 6.30.

Cet algorithme de recherche dichotomique avec directions privilégiées prend trois paramètres :

- $S'_{R,\text{total}}$: le vecteur de relaxation associé à un noyau non vide.
- A : le vecteur de pas tel que décrit par l'équation 6.15.
- I : le vecteur d'importances tel que décrit par l'équation 6.4.3.

Algorithm 5 Recherche de noyaux non vides : Dichotomie avec directions privilégiées

```

procédure RECHERCHEPRIVILEGIEE( $S'_{R,\text{total}}, A, I$ )
   $S'_{R,\text{partiel}} = S'_{R,\text{total}} \times I$ 
  if Le noyau associé à  $P_{\text{partiel}}$  est vide then
    return RechercheClassique( $S'_{R,\text{partiel}}, S_{\text{total}}, A$ )
  if Le noyau associé à  $P_{\text{partiel}}$  est non vide then
     $S'_{R,\text{debut}} = (0)^{2n}$ 
    return RechercheClassique( $S'_{R,\text{debut}}, S'_{R,\text{partiel}}, A$ )

```

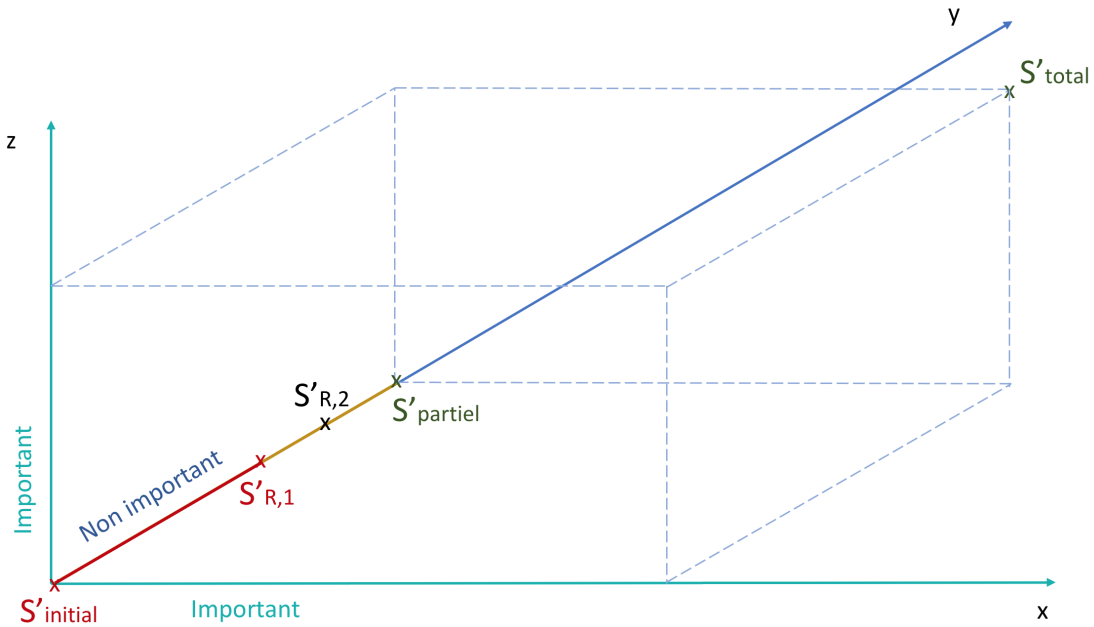


FIGURE 6.29 – Dans le cas illustré par cette figure, l'axe x et l'axe z correspondent à des souhaits importants et l'axe y correspond à un souhait non important. $S'_{R,\text{partiel}}$ correspond à un noyau non vide et l'algorithme effectue la recherche sur l'axe $(S'_{R,\text{initial}}, S'_{R,\text{partiel}})$. $S'_{R,1}$ correspond à un noyau vide.

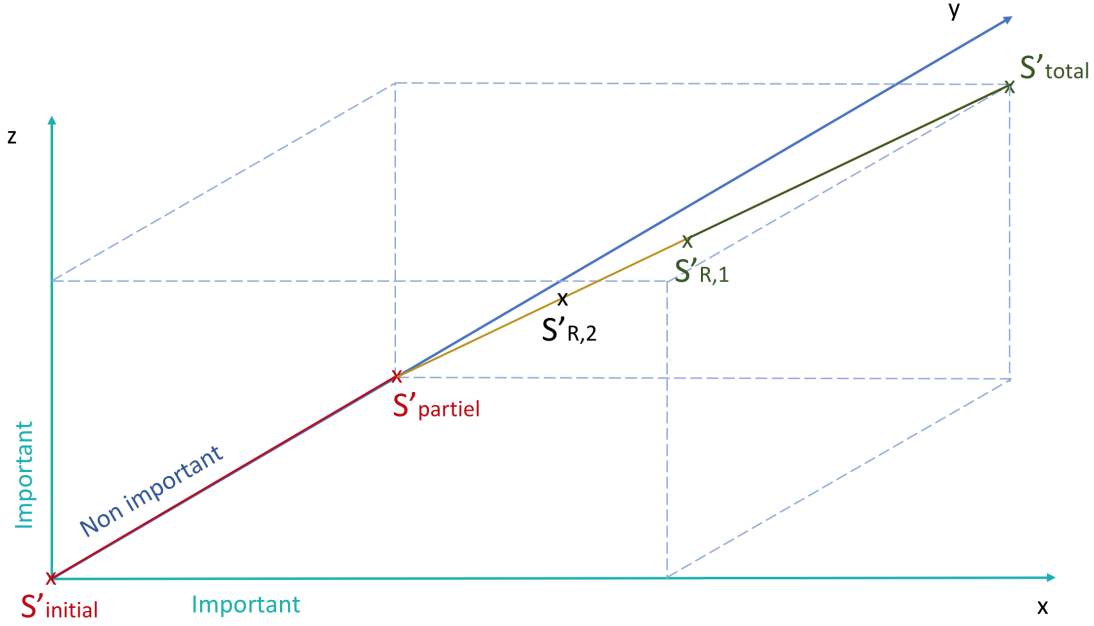


FIGURE 6.30 – Dans le cas illustré par cette figure, l'axe x et l'axe z correspondent à des souhaits importants et l'axe y correspond à un souhait non important. $S'_{R,\text{partiel}}$ correspond à un noyau vide et l'algorithme effectue la recherche sur l'axe $(S'_{R,\text{partiel}}, S'_{R,\text{total}})$. $S'_{R,1}$ correspond à un noyau non vide.

La recherche avec direction privilégiée nous permet d'implémenter facilement une troisième recherche, que nous appelons *recherche spécialisée*.

Recherche spécialisée

La recherche spécialisée renvoie cette fois une liste d'objectifs de gestion LP_{return} .

Chacun des éléments de cette liste correspond à la minimisation d'un $r_{\min,i}$ ou $r_{\max,i}$ pour un $c_{\min,i}$ ou $c_{\max,i}$ considéré comme importants.

LP_{return} contient donc autant d'éléments que de souhaits considérés comme importants.

Ainsi, pour chaque souhait $c_{\min,i}$ (resp. $c_{\max,i}$) considéré comme important, l'algorithme de recherche spécialisée appelle l'algorithme RecherchePrivilegiee avec comme paramètres :

- $S'_{R,\text{total}}$ tel que décrit par les équations 6.21.
- A tel que décrit par l'équation 6.15
- $I_{\text{spécialisé}} = (b_{\text{spécialisé},k})_{1 \leq k \leq n}$ avec : $b_{\text{spécialisé},k} = 1$ si $k = 2i - 1$ (resp. $k = 2i$) et $b_{\text{spécialisé},k} = 0$ sinon. À l'étape k , $I_{\text{spécialisé}}$ est le vecteur uniquement composé de 0 sauf en position k si le souhait k est important.

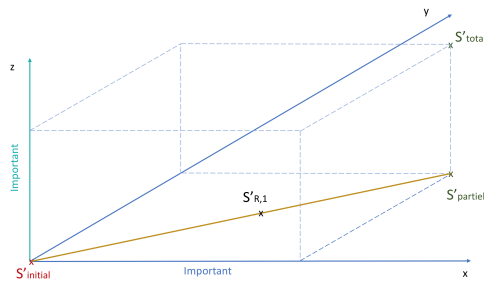
Algorithm 6 Recherche Spécialisée

```

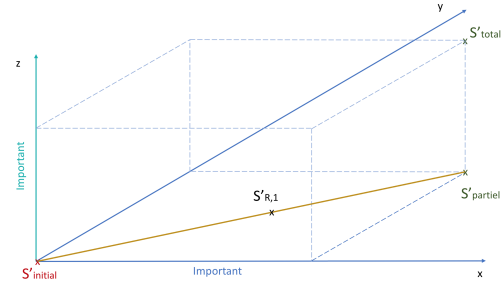
procedure RECHERCHESPÉCIALISÉE( $S'_{R,\text{total}}, A, I$ )
  for  $0 \leq k \leq 2n$  do
     $I_{\text{spécialisé}} = (0)^{2n}$ 
    if  $I[k]$  then // Si le souhait  $i$  est important :
       $I_{\text{spécialisé}}[k] = 1$ 
       $LP_{\text{return}}.\text{append}(\text{RecherchePrivilegiee}(S'_{R,\text{total}}, A, I_{\text{spécialisé}}))$ 
  return  $LP_{\text{return}}$ 

```

La figure 6.31 illustre cet algorithme.



(a) Cette figure illustre un cas de recherche dichotomique avec direction privilégiée dans le cas où l'axe y est le seul axe considéré comme important.



(b) Cette figure illustre un cas de recherche dichotomique avec direction privilégiée dans le cas où l'axe z est le seul axe considéré comme important.

FIGURE 6.31 – Dans le cas illustré par ces figures, les axes x et z correspondent à des souhaits importants et l'axe y correspond à un souhait non important. L'algorithme de recherche spécialisées effectue deux recherches dichotomiques avec direction privilégiée.

Ces trois algorithmes nous permettent de proposer différents objectifs de gestion aux joueurs, qui peuvent ensuite choisir par eux-mêmes lequel leur semble le plus adapté.

Résultats

Ces recherches sont implémentées dans l'assistant et permettent au joueur de choisir la solution non vide qu'il préfère. La figure 6.32 correspond à deux solutions proposées lorsque l'utilisateur considère le minimum sur le nombre d'animaux comme important. La solution 1 est issue de la recherche dichotomique classique et la solution 2 est issue de la recherche dichotomique avec direction privilégiée (qui donne le même résultat que la recherche dichotomique spécialisée).



FIGURE 6.32 – Exemple de deux solutions, la première ne privilégiant aucune direction et la seconde privilégiant le minimum sur le nombre d'animaux. Les couleurs correspondent aux zones choisies initialement par le joueur (voir paragraphe 6.2.1 pour la manière dont ces zones sont définies).

6.5 Viabilité garantie des objectifs de gestion

6.5.1 Noyaux garantis personnels

Dans le cas où des acteurs sociaux ont des incertitudes quant aux valeurs de certains paramètres, il est possible de ramener le problème de viabilité des objectifs personnels de gestion à un problème de noyau garanti. Le noyau garanti rassemble les états pour lesquels il existe une politique de contrôle viable en présence de perturbations appartenant à un ensemble (voir définition 19).

La fonctionnalité de calcul de noyau garanti a été développée, mais pas intégrée à l'interface de l'assistant.

Nous nous plaçons dans un scénario où quatre acteurs sociaux participent à la gestion d'une réserve extractiviste marine.

Les acteurs sociaux sont :

- Un écologiste
- Un maire
- Un opérateur de tourisme
- Un représentant des pêcheurs

Ici nous choisissons d'illustrer nos calculs avec quatre acteurs sociaux, mais on note que le raisonnement serait le même avec m acteurs sociaux.

Les acteurs sociaux se sont mis d'accord sur les variables du modèle :

- A_n représente le nombre de tortues de la réserve.
- C_n représente le capital des infrastructures de pêches de la réserve.
- T_n représente le nombre de touristes de la réserve.

Les acteurs sociaux se sont mis d'accord sur les contrôles :

- ϵ l'effort de restauration de la réserve.
- ζ représente la proportion des zones de vie des tortues accessible aux touristes.

Les acteurs sociaux se sont aussi mis d'accord sur :

- Un ensemble de contraintes $K = \{A_n \in [A_{\min}, A_{\max}], C_n \in [C_{\min}, C_{\max}], T_n \in [T_{\min}, T_{\max}]\}$
- Un ensemble de contrôles $U = \{\epsilon \in [\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}], \zeta \in [\zeta_{\min}, \zeta_{\max}]\}$

La dynamique est modélisée par le modèle discret introduit au paragraphe 5.2.4.

Chaque acteur social i a des incertitudes quant à la valeur des deux paramètres suivants :

- μ_{Ei} qui représente l'attractivité des infrastructures de pêche.
- i_{pi} qui représente le taux de capture accidentelle.

Le modèle tychastique contrôlé de l'acteur social i , tel que défini par l'équation 4.9, est le suivant :

$$Sd_{RESEX,i} \left\{ \begin{array}{ll} A_{n+1} &= (1 + \tau g)A_n - \tau g A_n^2 / K_A - \tau \zeta T_n A_n - \tau i_{pi} A_n C_n \\ C_{n+1} &= (1 - \tau \delta)C_n + \tau p m_p i_{pi} A_n C_n + \tau m_t i_t T_n \\ T_{n+1} &= T_n - \tau T_n (-\alpha T_n + \frac{a \zeta A_n}{A_n + \phi_n} + \mu_{Ei} C_n) \\ (A, C, T) &\in K \\ (\epsilon, \zeta) &\in U \\ (\mu_{Ei}, i_{pi}) &\in V_i \end{array} \right. \quad (6.23)$$

avec $K_A = 1 + M [1 + \eta T_n / (1 + \epsilon)]^{-1}$.

Les contrôles sont ϵ et ζ et les tyches (perturbations) sont μ_{Ei} et i_{pi} . Les plages de valeurs possibles pour ces perturbations et pour chacun des acteurs sont données dans le tableau suivant :

Membre :	Écologiste	Pêcheur	Opérateur de tourisme	Maire
Tous				
$\mu_{Ei} \in$	$[3.9 \times 10^{-4}, 4.0 \times 10^{-4}]$	$[4.9 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}]$	$[4.7 \times 10^{-4}, 4.8 \times 10^{-4}]$	$[5.4 \times 10^{-4}, 5.5 \times 10^{-4}]$
$i_{pi} \in$	$[1 \times 10^{-4}, 0.8 \times 10^{-4}]$	$[1 \times 10^{-6}, 1.2 \times 10^{-6}]$	$[1 \times 10^{-5}, 1.3 \times 10^{-5}]$	$[4 \times 10^{-6}, 5 \times 10^{-6}]$

TABLE 6.2 – Plages de valeurs retenues par les acteurs sociaux concernant les valeurs du taux de prises accidentelles (i_{pi}) ainsi que de l'attractivité des infrastructures des pêcheurs (μ_{Ei}).

Nous calculons un noyau garanti pour chacun de ces acteurs (figure 6.33). Chaque point représente un point viable dans K . Pour chaque noyau, nous avons calculé une approximation du volume en divisant le nombre de points viables par le nombre total de points.

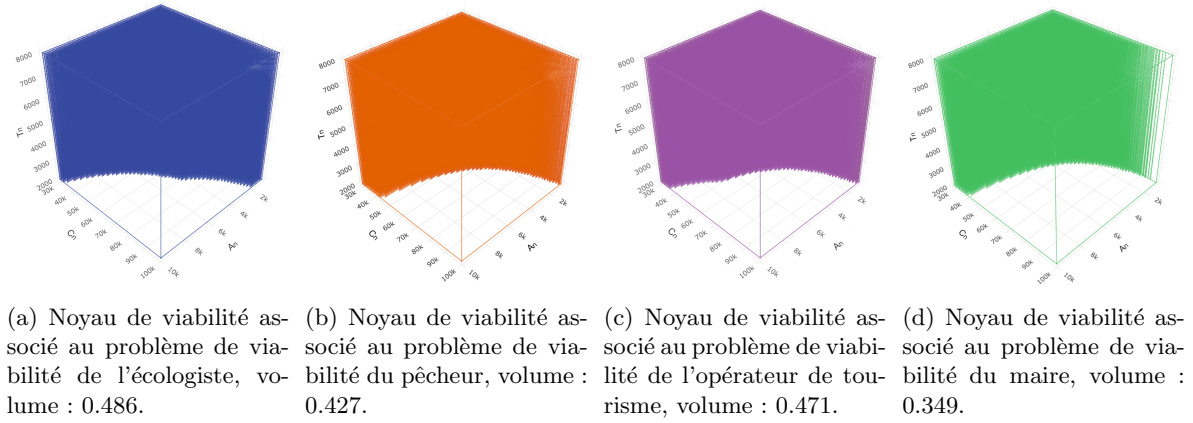


FIGURE 6.33 – Noyaux de viabilité associés aux problèmes de viabilité des différents membres, avec $K = \{A_n \in [2000, 10000], C_n \in [30 \times 10^4, 100 \times 10^4], T_n \in [2000, 8000]\}$ et $U = \{\epsilon \in [50, 100], \zeta \in [0.04, 0.16]\}$. Pour ces calculs, nous avons utilisé $\tau = 3.5 \times 10^{-5}$.

Ces noyaux ont été calculés avec la bibliothèque ViabLab (Désilles, 2020), développée par A. Désilles et utilisée dans (Durand et al., 2017) et (Lavallée, 2020). Cette bibliothèque utilise les conditions de convergence de l'algorithme établi par Saint-Pierre (1994).

Pour le calcul de noyaux garantis avec ViabLab, les variables d'états, les contrôles, et les perturbations sont représentés par des entiers correspondant à leur position sur la grille (cette grille est utilisée dans l'algorithme établi par Saint-Pierre (1994), décrit au paragraphe 4.5.3.2). Pour conserver des valeurs réelles, Lavallée (2020) introduit des variables supplémentaires qui permettent de connaître la valeur des variables d'état, des contrôles et perturbations et d'effectuer les calculs liés à la dynamique, puis de les projeter sur la grille.

Nous avons ici des exemples d'utilisation classique de noyaux garantis pour la prise en compte des incertitudes de chacun des acteurs. Dans le paragraphe suivant, nous construisons un objectif collectif de gestion cohérent pour tous (définition 32) grâce aux noyaux garantis.

6.5.2 Noyau garanti pour l'objectif de gestion collectif

Nous allons désormais calculer un noyau garanti pour le groupe, qui sera cohérent pour chacun des acteurs sociaux. Nous utilisons les définitions et théorèmes du paragraphe 5.3.3.

Pour chacun des acteurs, les différentes valeurs de paramètres de la dynamique peuvent être vues comme des perturbations du modèle initial.

Nous définissons :

$$Sd_{RESEX} \begin{cases} A_{n+1} &= (1 + \tau g)A_n - \tau g A_n^2 / K_A - \tau \zeta T_n A_n - \tau i_{pi} A_n C_n \\ C_{n+1} &= (1 - \tau \delta)C_n + \tau p m_p i_{pi} A_n C_n + \tau m_t i_t T_n \\ T_{n+1} &= T_n - \tau T_n (-\alpha T_n + \frac{\alpha \zeta A_n}{A_n + \phi_n} + \mu_{Ei} C_n) \\ (A, C, T) &\in K \\ (\epsilon, \zeta) &\in U \\ (\mu_E, i_p) &= [\min_i(\mu_{Ei}), \max_i(\mu_{Ei})] \times [\min_i(i_{pi}), \max_i(i_{pi})] \end{cases} \quad (6.24)$$

avec $K_A = 1 + M [1 + \eta T_n / (1 + \epsilon)]^{-1}$.

Le système Sd_{RESEX} (6.24) encapsule les systèmes $Sd_{RESEX,i}$ selon la définition 5.18 et la proposition 26. Nous calculons un noyau garanti $\text{Guar}_{RESEX}(K)$ pour le système (6.24).

La figure 6.34 représente ce noyau garanti.

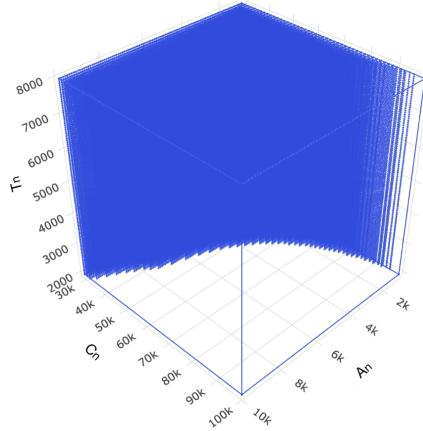


FIGURE 6.34 – Noyau de viabilité garanti $\text{Guar}_{RESEX}(K)$ associé à Sd_{RESEX} et par conséquent aux objectifs de gestion des acteurs, pour $\tau = 3.5 \times 10^{-5}$, volume : 0.339.

Ce noyau n'est pas vide, l'objectif collectif de gestion $P = (K, U)$ est cohérent pour tous, et $(\text{Guar}_{RESEX}(K), \tilde{U})$ est une solution de gestion viable pour tous, où $\tilde{U}$ est une correspondance de contrôle viable associée au noyau garanti $\text{Guar}_{RESEX}(K)$.

La bibliothèque ViabLab (Désilles, 2020) nous a permis de calculer ce noyau relativement rapidement puisqu'il a fallu dix-huit secondes sur un ordinateur ordinaire avec une précision de cent points pour chaque variable d'état. Nous remarquons que le noyau garanti est plus petit que tous les noyaux calculés précédemment et qu'il est inclus dans chacun de ces derniers.

Ainsi, la viabilité telle que nous l'utilisons propose une réponse adaptée au problème d'une décision consensuelle et techniquement fondée. Dans Viaduc, le mode mono-utilisateur permet aux joueurs de s'assurer de la viabilité de leurs objectifs personnels de gestion avant de le confronter à celui des autres joueurs. Ce mode permet aussi aux joueurs d'obtenir de l'aide afin de trouver une solution viable tout en tenant compte de leurs souhaits. Dans le mode multi-utilisateur, et en mode transparence, les joueurs peuvent visualiser les objectifs personnels de gestion des autres joueurs et sont aidés dans la recherche d'une solution équitable. Enfin, nous avons vu que malgré la différence de point de vue des acteurs sociaux, l'utilisation de la viabilité, en particulier des noyaux garantis, peut permettre d'aboutir à un objectif de gestion collectif cohérent pour tous. L'utilisation des noyaux garantis peut supporter un groupe composé d'un grand nombre de personnes. Le nombre d'acteurs n'a pas d'impact direct sur la complexité de l'algorithme de calcul du noyau garanti. Les limites de la viabilité portent sur la dimension de l'espace d'état.

Dans le chapitre suivant nous évaluons l'intérêt de la viabilité dans la prise de décision collective, et l'intérêt d'un jeu sérieux comme outil de sensibilisation à la diversité des enjeux qui entourent les espaces protégés.

Chapitre 7

Évaluations du prototype

Dans ce chapitre nous évaluons l’assistant Viaduc sur deux points :

1. L’intérêt de la viabilité dans la prise de décision collective :
 - (a) Pour la formulation d’un objectif collectif de gestion cohérent.
 - (b) Pour la formulation d’un objectif collectif de gestion consensuel.
2. L’intérêt d’un jeu sérieux comme outil de sensibilisation à la diversité des enjeux qui entourent les espaces protégés.

Afin d’évaluer le premier point, nous effectuons une comparaison de Viaduc avec un second assistant et jeu sérieux que nous appellerons *Bridge*, qui ne dispose pas des fonctionnalités liées à la viabilité. Durant chaque session, un même groupe de joueurs teste les deux jeux. Nous avons effectué huit sessions avec trois personnes par session. Durant quatre de ces sessions, les joueurs ont commencé par jouer à Bridge et durant les quatre autres, les joueurs ont commencé par jouer à Viaduc.

Les deux jeux sont évalués dans leur mode par défaut (c’est-à-dire tiers de confiance pour la partie mono-utilisateur et partage d’information pour la partie multi-utilisateur, pour un rappel des modes voir le paragraphe 5.4.3).

Afin d’éviter les biais (une fois que les joueurs ont trouvé une solution grâce à Viaduc, il suffit de refaire la même chose dans Bridge), on propose deux scénarios différents dans chaque assistant : un scénario de réserve marine et un scénario d’agrotourisme. Il y a donc en tout quatre versions d’assistant : Viaduc marin (originel et décrit dans le chapitre précédent), Bridge marin, Viaduc agricole et Bridge agricole.

7.1 Un nouveau scénario et un nouvel assistant

7.1.1 Le scénario agricole

Dans ce nouveau scénario agricole les joueurs participent à la gestion d’une commune agricole qui accueille des touristes.

Dans le scénario agricole, l’étape d’introduction est donc modifiée telle que le montre la figure 7.1.



Bienvenue dans Bridge !

Vous avez été choisi pour participer à la gestion participative d'une commune agricole.

L'agritourisme est une forme de tourisme dont l'objet est la découverte des savoir-faire agricole d'un territoire, et par extension des paysages, des pratiques sociales et des spécialités culinaires découlant de l'agriculture. Il peut représenter pour la profession agricole une source de diversification des revenus, alors qu'il représente pour le touriste une occasion de rencontrer directement le producteur dans son milieu. Pour répondre à la demande apparemment croissante d'un tourisme rural actif, l'offre d'hébergement s'enrichit assez fréquemment de séjours à thème qui proposent aux hôtes de découvrir la nature (balade à cheval, randonnée, cueillette de baies et recherche de champignons), découverte du terroir (cours de cuisine, dégustation de foie gras), de vin ou activité artistique (aquarelle, atelier d'écriture). La répartition des activités et l'organisation spatiale se superposent et font de l'espace rural un territoire complexe et émergeant aux multiples fonctions. Cette multifonctionnalité repose sur une dynamique particulière en lien avec les acteurs.

FIGURE 7.1 – Texte et image d'introduction de l'assistant Bridge ou Viaduc scénario agricole.

Nous avons construit un nouveau modèle pour ce scénario. Le modèle est un système dynamique constitué de trois variables :

- La qualité de l'environnement, qui correspond à une utilité est calculée en kilo euros ¹.
- Le Capital des agriculteurs.
- Le nombre de touristes.

Les contrôles de ce nouveaux modèle sont les suivants :

- L'efficacité des pesticides. Nous considérons que plus les pesticides sont efficaces, plus ils sont nocifs pour l'environnement. Ce contrôle influence positivement le capital des agriculteurs et négativement la qualité de l'environnement.
- La variété des circuits proposés aux touristes qui influe positivement sur le nombre de touristes et négativement sur la qualité de l'environnement.

L'influence des paramètres sur les variables est représentée sur la figure 7.4.

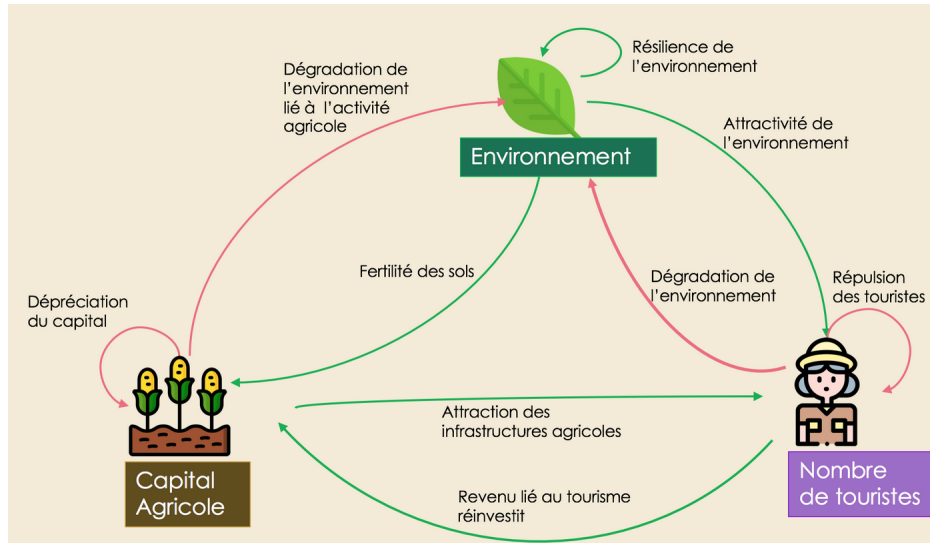


FIGURE 7.2 – Représentation de la dynamique dans le scénario agricole. Pour une comparaison avec le scénario marin, voir la figure 5.2.

Les paramètres du modèle ont été choisis arbitrairement. De même que dans le scénario marin, certaines valeurs de paramètres sont modifiables (voir figure 7.3) et il est possible d'observer l'influence de ces modifications sur les trajectoires (voir figure 7.4).

1. C'est une manière de quantifier la la valeur totale des biens et services fournis par une zone naturelle spécifique, voir par exemple De Groot (2006).

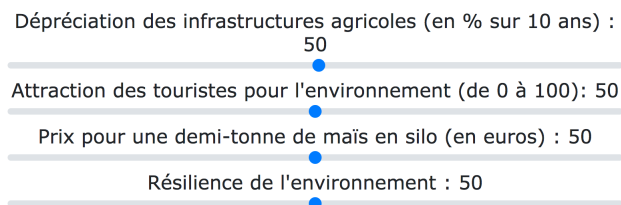


FIGURE 7.3 – Paramètres modifiables dans le scénario agricole de Bridge ou Viaduc

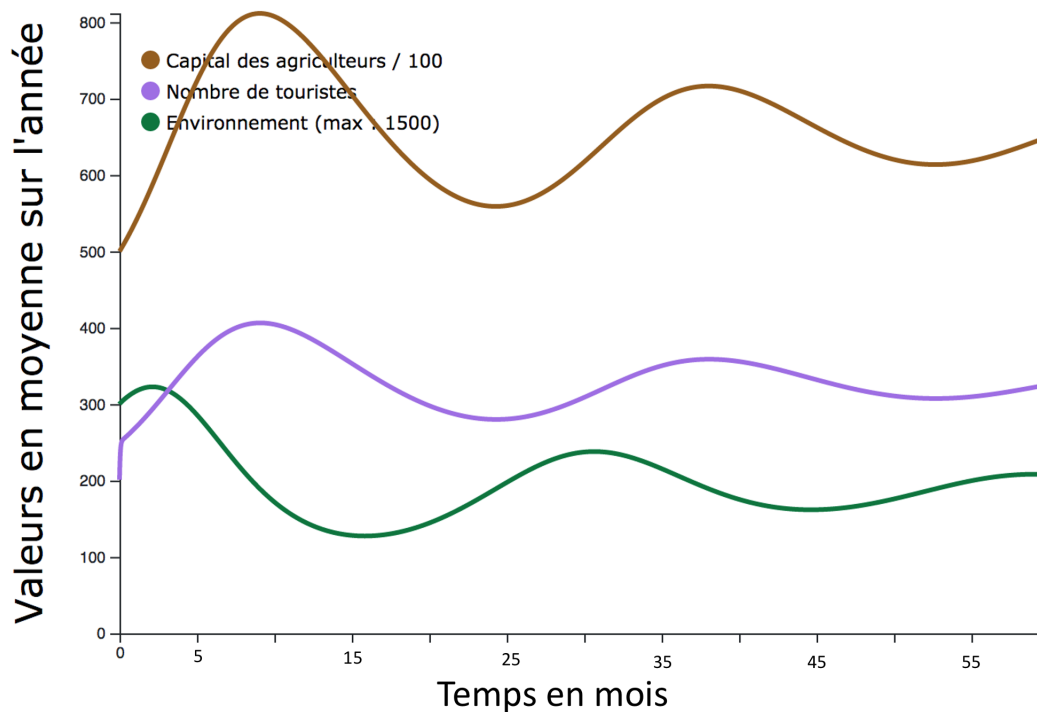


FIGURE 7.4 – Trajectoires de la dynamique de l'assistant Bridge ou Viaduc dans leur scénario agricole.

Dans ce nouveau scénario, les rôles disponibles sont :

- L'écologiste, dont le principal intérêt est une qualité de l'environnement élevée.
- L'agriculteur, dont le principal intérêt est un capital des agriculteurs élevé. Ce rôle dispose du même privilège que le joueur pêcheur et peut imposer son objectif de gestion aux autres et arrêter la partie s'il le désire.
- L'opérateur de tourisme, dont le principal intérêt est un nombre de touristes élevé.

Les fiches de rôles du scénario agricole sont disponibles en annexe.

7.1.2 Comparaison entre Bridge et Viaduc

Pour l'évaluation, nous définissons une version allégée de l'assistant qui n'utilise pas les fonctionnalités liées à la viabilité. Les fonctionnalités disponibles sont listées dans le tableau suivant :

Bridge
Explications sur le scénario, le contexte et la dynamique
Possibilité de modifier certains paramètres de la dynamique
Formulation d'objectifs personnels de gestion
Formulation d'un objectif collectif de gestion
Explications sur la viabilité
Visualisation de l'influence des contrôles sur la dynamique

Pour rappel, les fonctionnalités de Viaduc sont énumérées dans le tableau ci-dessous.

Viaduc
Explications sur le scénario, le contexte et la dynamique Possibilité de modifier certains paramètres de la dynamique Définition des objectifs personnels de gestion Définition des objectifs collectif de gestion Explications sur la viabilité Calcul de noyaux de viabilité Aide pour la recherche de noyaux non vides Calcul de l'intersection des contraintes et contrôles des joueurs Calcul de noyaux dans l'intersection des contraintes et contrôles des joueurs en cas d'intersection non vide Aide pour la relaxation en cas d'intersection vide et recherche de noyaux non vides dans l'espace relaxé

Ce nouvel assistant a le même fonctionnement global que Viaduc, mais certaines fonctionnalités diffèrent.

La saisie des préférences est modifiée de deux manières. D'une part, le recueil des efforts de relaxation relatif (les marges orange de la figure 6.4) disparaissent puisqu'elles étaient recueillies pour la recherche de noyaux non vides.

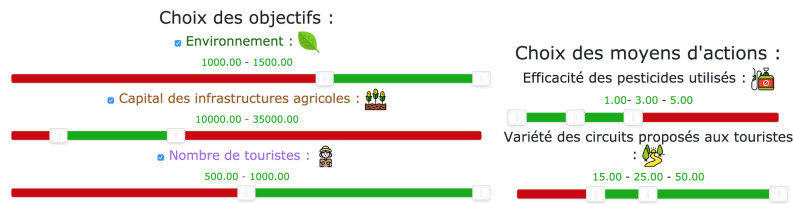


FIGURE 7.5 – Saisie des préférences dans Bridge (scénario agricole). Les variables cochées sont celles dont les contraintes apparaîtront sur le graphe de la figure 7.7. Pour une comparaison avec la saisie des préférences dans Viaduc, voir la figure 6.4.

Le choix des moyens d'action dans Bridge se fait avec trois curseurs (figure 7.6) : deux pour les bornes minimales et maximales et un pour le calcul des trajectoires présentées à l'utilisateur 7.7.

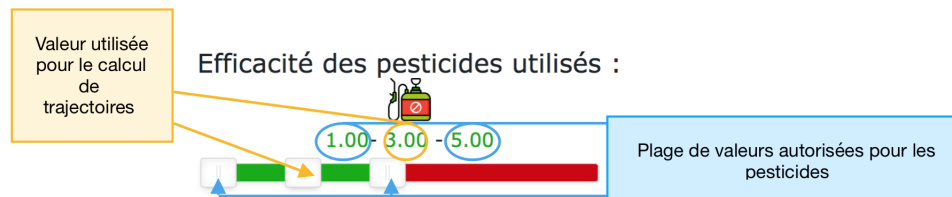


FIGURE 7.6 – Saisie des contrôles (moyens d'action) dans Bridge (scénario agricole).

La zone de l'écran qui présente le noyau de viabilité dans Viaduc est remplacée par une visualisation des contraintes superposées à la dynamique dans Bridge (figure 7.7).

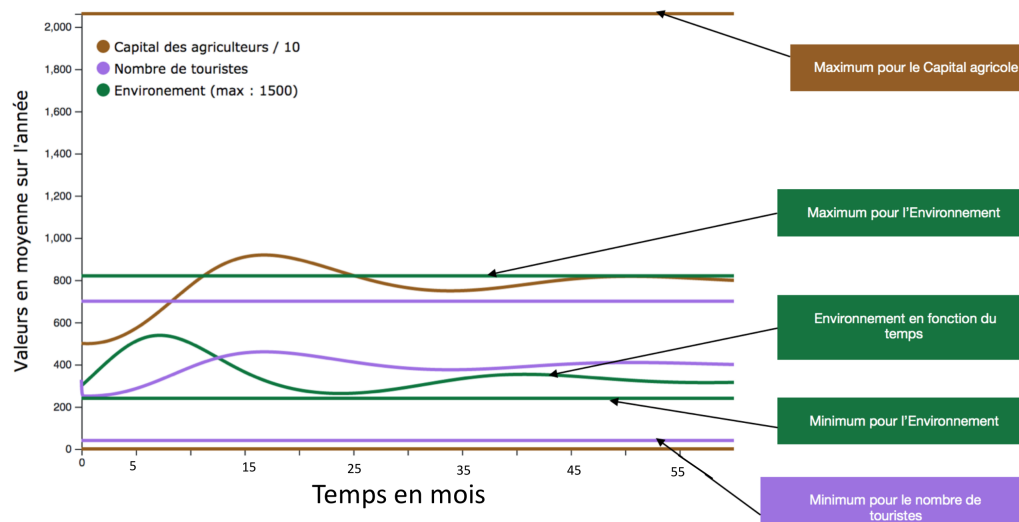


FIGURE 7.7 – Visualisation de la dynamique superposée aux contraintes dans Bridge (scénario agricole).

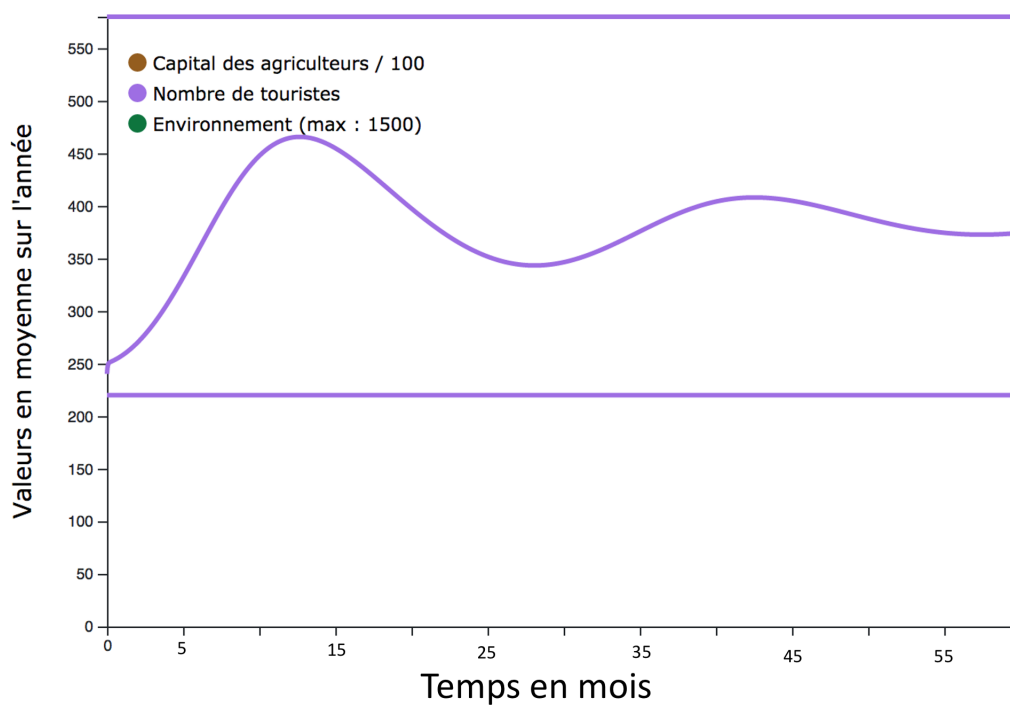


FIGURE 7.8 – Il possible de sélectionner la ou les variables que l'on veut voir apparaître afin de gagner en lisibilité. Dans cet exemple, seule la variable "Nombre de touristes" a été cochée.

Les joueurs peuvent aussi choisir l'origine des trajectoires les variables qu'ils veulent voir apparaître sur ce graphe.



FIGURE 7.9 – Le joueur peut choisir l'origine des trajectoires

En mode multi-utilisateur, et en mode transparence (pour un rappel sur les modes, voir le paragraphe 5.4.3), il est aussi possible de visualiser les objectifs et moyens d'action des autres (figure 7.10).

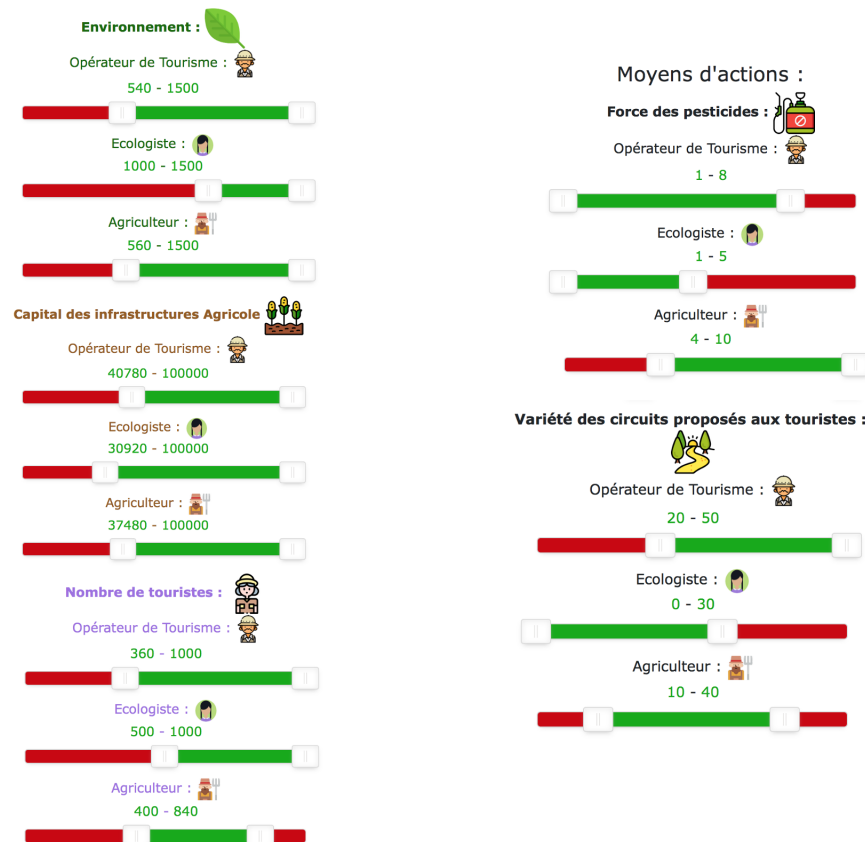


FIGURE 7.10 – L'assistant Bridge en mode transparence, scénario agricole, permet aux joueurs de visualiser les préférences des autres lors de la négociation.

Si l'intersection des moyens d'action des participants n'est pas vide, et que l'intersection des contraintes n'est pas vide, Bridge affiche ces intersections (figure 7.11).

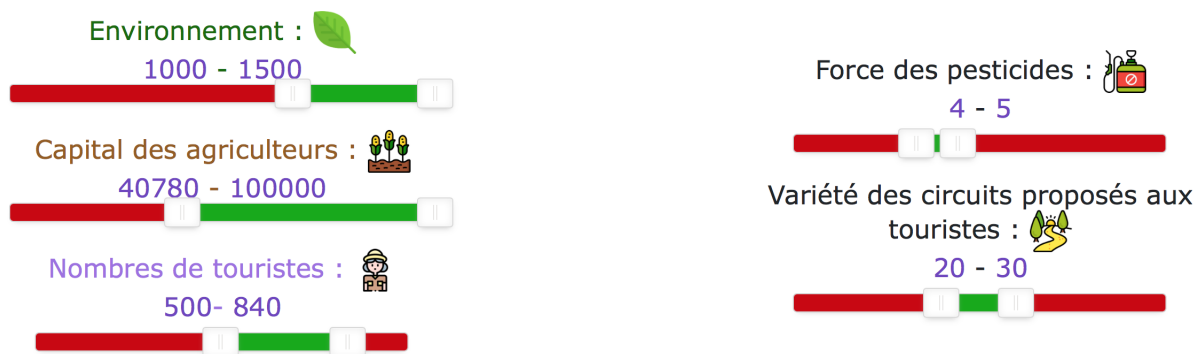


FIGURE 7.11 – Intersections des contraintes et des moyens d'action des joueurs, correspondant aux souhaits de la figure 7.10.

7.2 Indicateurs et Mesure

Afin de comparer les deux assistants Bridge et Viaduc, nous dressons une liste d'indicateurs qui nous permettent de les évaluer.

Notre objectif étant d'aider les joueurs à atteindre une solution consensuelle et techniquement fondée (cf. Chapitre 2), nous avons choisi de mesurer la présence ou l'absence de consensus ainsi que la cohérence de l'objectif collectif de gestion (voir la définition 33).

Nous désirons aussi que les joueurs soient satisfaits de l'objectif collectif final et qu'ils le trouvent équitable. Nous mesurons donc également ces deux aspects.

Enfin, nous désirons que les joueurs soient satisfaits du jeu en général.

Dans le tableau ci-dessous, les différents indicateurs qui nous permettront de comparer les deux assistants/jeux sont décrits. Pour chacun de ces indicateurs, nous proposons une manière de le mesurer.

Indicateurs	Mesures
La présence ou l'absence d'un consensus	Nous considérons qu'il y a absence de consensus si le joueur pêcheur ou agriculteur arrête la partie en imposant sa solution aux autres joueurs, ou bien si les joueurs ne sont pas arrivés à un consensus durant le temps qui leur est imparti.
La cohérence de l'objectif collectif de gestion (voir la définition 33)	Lorsque l'assistant Viaduc est utilisé nous savons si l'objectif collectif de gestion est cohérent ou non puisque le calcul de viabilité est fait directement par l'assistant. Lorsque l'assistant Bridge est utilisé, nous vérifions la viabilité pour chaque dynamique de l'objectif collectif de gestion après la session grâce à ViabLab (Désilles, 2020).
Le degré de satisfaction des joueurs par rapport à l'objectif collectif de gestion	Chaque joueur indique un degré de satisfaction par rapport à l'objectif collectif de gestion, de "pas du tout satisfait" (1 point) à "très satisfait" (6 points), pour obtenir une mesure sur ce critère on fait la somme des points attribués par les joueurs.
L'équité perçue de l'objectif collectif de gestion	On demande à chaque joueur s'il estime que l'objectif collectif de gestion est équitable, si oui on attribue 1 point, sinon on attribue 0 point, ce qui donne un score sur 3 pour chaque partie.
La satisfaction par rapport au jeu en général	Chaque joueur indique un degré de satisfaction par rapport au jeu en général, de "pas du tout satisfait" (1 point) à "très satisfait" (6 points), pour obtenir une mesure sur ce critère on fait la somme des points attribués par les joueurs.

Grâce à ces indicateurs, nous définissons une relation d'ordre grâce à laquelle nous comparerons les parties de viaduc et de Bridge.

Certains aspects nous semblent plus importants que d'autres. Notre objectif étant d'aider les joueurs à atteindre une solution consensuelle et techniquement fondée, ces deux aspects vont primer. Cependant, il nous semble plus intéressant d'obtenir un objectif de gestion cohérent et non consensuel plutôt qu'un objectif de gestion consensuel, mais non cohérent.

Vient ensuite, dans cet ordre, la satisfaction par rapport à l'objectif collectif de gestion et l'équité perçue satisfaction par rapport l'objectif collectif de gestion. Nous estimons qu'un objectif de gestion satisfaisant, mais non équitable est préférable à un objectif de gestion équitable, mais non satisfaisant.

Enfin, le dernier aspect que nous utilisons est la satisfaction par rapport au jeu en général, qui peut être utile pour départager des parties, mais qui n'est pas un aspect primordial pour ce que nous cherchons à évaluer.

Voici, dans l'ordre d'importance, les critères servant à classer les parties :

1. Cohérence de l'objectif collectif de gestion.
2. Consensus autour de l'objectif collectif de gestion.
3. Satisfaction par rapport à l'objectif collectif de gestion.
4. Équité perçue de l'objectif collectif de gestion.
5. Satisfaction par rapport au jeu.

7.3 Déroulement des sessions

Les sessions sont réalisées avec trois personnes incarnant chacune un des profils du jeu. À chaque personne est distribuée une fiche résumant son rôle et les objectifs liés à ce rôle (voir par exemple la fiche 5.8 pour une fiche du scénario marin, et l'annexe pour les fiches du scénario agricole). Chaque personne joue deux fois : une fois à Viaduc et une fois à Bridge. Les groupes de trois joueurs restent les mêmes, mais les rôles se diversifient (un joueur ne peut pas être pêcheur puis agriculteur, deux fois écologiste ou bien deux fois opérateur de tourisme).

La dynamique et les fiches de rôles restent les mêmes selon les parties d'un même scénario.

Les sessions se déroulent de la manière suivante :

1. Accueil des trois participants.
2. Première partie de jeu (avec Bridge ou Viaduc selon les groupes) :
 - (a) Présentation de l'assistant et explications des différentes fonctionnalités, à l'aide d'une rapide démonstration du jeu. Afin de s'assurer que les joueurs comprennent les différentes fonctionnalités, une page d'explication précède chaque étape ;
 - (b) Distribution et lecture des fiches de rôles, dans cette fiche plusieurs informations sur les croyances et les objectifs des rôles sont détaillées ;
 - (c) Première partie : La partie dure maximum 1h15, au bout d'une heure, on prévient les joueurs que la fin de la partie approche et qu'il est bientôt temps de s'arrêter. Si un consensus n'a pas été atteint au bout du temps imparti, c'est la solution proposée par le pêcheur (ou l'agriculteur selon le scénario) qui est imposée au groupe. Le joueur pêcheur (ou agriculteur) peut aussi arrêter la partie et imposer sa solution à tout moment (voir paragraphe 5.4).
3. Réponse au premier questionnaire, spécifique à l'assistant testé ;
4. Seconde partie de jeu avec le second assistant :
 - (a) Présentation du second assistant ;
 - (b) Distribution et lecture des fiches de rôles ;
 - (c) Seconde partie avec les mêmes conditions d'arrêt que précédemment.
5. Réponse au second questionnaire : comparatif des deux sessions ;
6. Discussion avec les participants, écoute de leurs questions et remarques.

7.4 Questionnaires

Deux questionnaires ont été réalisés : un spécifique à l'assistant, qui collecte l'avis du joueur sur le jeu, sur ce qu'il a appris par ce jeu et son niveau de satisfaction, et un second questionnaire visant à comparer les deux assistants. Les questionnaires sont disponibles en annexe, et leur contenu est résumé ci-dessous :

7.4.1 Questionnaire sur le premier assistant

Le questionnaire prévu à la suite du premier assistant comprend plusieurs types de questions, dans l'ordre :

1. Recueil d'informations générales sur les joueurs et leurs profils (genre, profession et âge afin d'estimer notre population de joueurs). Il leur est aussi demandé s'ils ont déjà eu une expérience dans les jeux de gestion environnementale afin de vérifier que cela n'est pas un facteur confondant.
2. Rôle pendant la partie afin de déterminer si le rôle est un facteur important.
3. Le degré de satisfaction par rapport au jeu. Le joueur doit répondre en donnant une note sur 6.
4. Des informations sur l'équité perçue de la solution trouvée.
5. Des questions sur les objectifs des joueurs et sur différentes stratégies de gestion afin de savoir si l'objectif pédagogique est bien compris. Nous posons aux joueurs :
 - une question sur les objectifs des autres joueurs, afin de voir s'ils ont été compris,
 - une question libre sur ce qu'ils ont retenu de ce jeu en matière de gestion environnementale.
6. Des propositions d'amélioration et remarques.

Ce questionnaire est utilisé pour effectuer une comparaison des réponses données pour Viaduc et Bridge, ainsi qu'une analyse des réponses des participants.

7.4.2 Questionnaire comparatif

Dans ce second questionnaire, nous demandons aux participants de comparer les assistants sur plusieurs points.

1. L'efficacité pour la prise de décision individuelle.
2. La prise de décision collective.
3. L'intérêt pédagogique.
4. Quel assistant les joueurs ont le plus apprécié dans sa globalité.
5. La pertinence des solutions de gestion trouvées.

Les réponses sont proposées selon l'échelle de Likert² à 5 points qui permet une nuance par rapport à un choix binaire. Cette échelle à 5 points possède des avantages par rapport à l'échelle à 7 points qui souffre de biais de réponse³ (Dolnicar et al., 2011). Après chacune de ces questions, il est demandé au joueur de donner une brève explication sur son choix.

Chaque question est conçue pour mesurer un aspect spécifique de l'assistant. Ainsi les données recueillies à l'aide des questions peuvent être reliées à cet aspect avec une plus grande confiance (Nemoto and Beglar, 2014).

Plusieurs questions à réponses ouverte sont posées aux joueurs, concernant les avantages et inconvénients de chacun des assistants et une fonctionnalité qu'ils ont particulièrement appréciée. Enfin, il leur est demandé de faire abstraction du scénario et de penser à d'autres situations de gestion collectives où une aide technique serait utile.

2. Développée par Rensis Likert en 1932, une échelle de Likert est un outil permettant de mesurer une attitude chez des individus. Elle consiste en une ou plusieurs affirmations pour lesquelles la personne interrogée exprime son degré d'accord ou de désaccord. L'échelle propose une graduation comprenant plusieurs choix de réponse qui permettent de nuancer le degré d'accord. Le texte des étiquettes est variable, par exemple : "Tout à fait d'accord" - "D'accord" - "Ni d'accord ni pas d'accord" - "Pas d'accord" - "Pas du tout d'accord" est une échelle de Likert à 5 points.

3. Les biais de réponse sont définis comme "une tendance systématique à répondre à une série d'éléments du questionnaire sur une base autre que le contenu spécifique de l'élément" (Paulhus, 1991) c'est-à-dire ce que les éléments ont été conçus pour mesurer.

7.5 Analyse des Résultats

Le jeu a été testé avec 24 participants, 3 personnes jouant 3 rôles différents sur 8 sessions différentes (lors d'une session les joueurs jouent une fois à chacun des jeux, pour le déroulement des sessions voir le paragraphe 7.3). Parmi les participants on compte 16 femmes et 8 hommes, âgés de 21 à 65 ans. La totalité des participants avait au moins le niveau Bac+3, pour la majorité dans un domaine lié au secteur des sciences de l'ingénieur ou du vivant. Tous les participants ont répondu au premier questionnaire, ce qui nous donne 12 réponses à chacun des deux questionnaires propres à un assistant. Nous avons obtenu 22 réponses au questionnaire comparatif, deux participants n'ayant pas répondu.

Il y a eu deux sessions de chacun des quatre formats (Viaduc marin puis Bridge agricole, Viaduc agricole puis Bridge marin, Bridge marin puis Viaduc agricole et Bridge agricole puis Viaduc marin).

Les sessions étant assez longues (près de 3h30 en moyenne pour les explications, les deux parties de jeu et le remplissage des questionnaires), les joueurs étaient souvent fatigués à la fin et moins dynamiques durant le second jeu.

Nous avons moins de 30 observations et pas d'information sur la distribution, en conséquence nous utilisons des tests non paramétriques, c'est-à-dire des tests qui ne reposent pas sur une hypothèse de distribution normale des données.

Dans un premier temps, nous souhaitons comparer les deux assistants Bridge et Viaduc.

7.5.1 Comparaison des assistants avec le test de Wilcoxon-Mann-Whitney

Principe du test :

Le test U de Wilcoxon-Mann-Whitney sert à tester l'hypothèse selon laquelle la distribution des données est la même pour deux groupes.

Il est souvent utilisé dans le cas où les données sont peu nombreuses. Il s'agit en effet d'un test non paramétrique, c'est-à-dire un test qui ne repose pas sur une hypothèse de distribution des données.

Ce test s'applique dans le cas où l'on dispose de deux populations ordonnées X et Y . La taille respective de ces observations est n_x et n_y . On suppose les observations indépendantes. On souhaite tester l'hypothèse suivante :

H_0 : les deux distributions sont égales.

La première étape de ce test est d'ordonner tous les individus afin que chaque individu soit associé à un rang (il peut y avoir des ex-aequo). La p-value⁴ associée à ce test va ainsi répondre à la question suivante :

Si les données pour les deux groupes étaient issues d'une même population, quelle serait la probabilité que l'on observe par hasard une différence de rangs entre les deux groupes au moins aussi extrême que celle observée sur les données ?

La statistique U de ce test correspond au nombre de fois, sur l'ensemble des paires d'observations, où un individu d'une population est meilleur qu'un individu de l'autre population.

Pour calculer U, on peut utiliser une méthode directe. Pour chaque observation de X , on compte le nombre de fois où elle est meilleure qu'une observation de Y . (En cas d'égalité on compte 0,5.) La somme des victoires et des égalités est U_X . Pour chaque observation de Y , on compte le nombre de fois où elle est meilleure qu'une observation de X . La somme des victoires et des égalités est U_Y .

$$U = \min(U_X, U_Y) \quad (7.1)$$

Lorsque $n_x \leq 10$ et $n_y \leq 10$ la distribution de U fait l'objet d'une table spécifique, la table du test de Mann-Whitney-Wilcoxon. On va alors comparer U à la valeur U_{crit} que l'on lit dans une table (*in* Lenoir (2013)).

U_{crit} dépend de la taille des échantillons. Si $U \leq U_{crit}$ alors on rejette H_0 avec un intervalle de confiance à 95%.

4. En statistique, la p-value est la probabilité d'obtenir des résultats de test au moins aussi extrêmes que les résultats réellement observés, en supposant que l'hypothèse nulle est correcte.

Application à notre problème :

Nous disposons de deux populations :

- X : ensemble des parties de Viaduc jouées en premier
- Y : ensemble des parties de Bridge jouées en premier

Nous utilisons uniquement les premières parties jouées afin que les populations soient indépendantes. Parmi les huit sessions, quatre ont commencé avec Viaduc et quatre avec Bridge. Nous avons donc $n_x = n_y = 4$. Nos deux populations disposent d'une relation d'ordre grâce à aux critères décrits en 7.2.

H_0 est : Selon nos critères, nous obtenons d'aussi bons résultats avec Viaduc qu'avec Bridge.

Type d'assistant:	Viaduc Marin	Viaduc Marin	Viaduc Agricole	Bridge Agricole	Viaduc Agricole	Bridge Marin	Bridge Agricole	Bridge Marin
Cohérence de l'objectif collectif de gestion	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non
Consensus	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Satisfaction par rapport à l'objectif collectif de gestion	17	16	16	16	12	11	11	10
Équité perçue de la solution	3	2	2	2	2	0	1	1
Satisfaction par rapport au jeu	15	17	15	14	16	13	14	11
Rang	1	2	3	4	5	6	7	8

FIGURE 7.12 – Classement des parties de Viaduc et Bridge jouées en premier, en fonction des critères du paragraphe 7.2. Les parties de Viaduc sont entourées en vert.

Par exemple, la partie de rang 1 est la meilleure, car l'objectif de gestion est cohérent et consensuel et cette partie a obtenu la meilleure note (sans égalité) quant à la satisfaction par rapport à l'objectif collectif de gestion. Les parties de rang 2, 3 et 4 sont identiques excepté en ce qui concerne la satisfaction par rapport au jeu et nous utilisons donc ce critère pour les départager.

Pour trouver U nous comparons deux à deux les parties de Bridge et Viaduc. Nous comptons le nombre de fois qu'une partie de Bridge est meilleure qu'une partie de Viaduc : le couple de parties de rangs 4 et 5 est la seule occurrence d'une partie de Bridge meilleure qu'une partie de Viaduc. On a donc $U_Y = 1$ et $U_X = 3 + 3 \times 4 = 15$. Donc $U = U_Y = 1$

Pour $n_x = n_y = 4$, avec n_x le nombre de parties de Bridge et n_y le nombre de parties de Viaduc on a $U_{crit} = 1$ (on peut lire cette valeur dans une table *in* Lenoir (2013)), pour un test unilatéral au seuil $\alpha = 0.05$. À partir de $U = 1$, il est possible de rejeter H_0 avec un risque d'erreur $\alpha = 5\%$. On peut donc en conclure que Viaduc est meilleur que Bridge selon les critères que nous avons établis.

On remarque que si l'on échange l'importance de l'équité perçue de la solution et de la satisfaction par rapport à la solution, le rang des parties ne change pas. Il en va de même pour l'échange de l'importance de la viabilité et du consensus. Nous en déduisons que les résultats de ce test sont robustes à ces modifications sur l'importance des critères.

7.5.2 Comparaison des assistants sur le critère cohérent et consensuel : Test exact de Fisher

Principe du test :

Afin de comparer les assistants sur le critère cohérent et consensuel, nous utilisons le test exact de Fisher pour l'analyse des tables de contingence⁵. Ce test a été utilisé, car il permet de comparer de

5. En statistique, une table de contingence est un type de tableau sous forme de matrice qui affiche la distribution de fréquence des variables. Le tableau 7.1 est un exemple de table de contingence

faibles effectifs (bien qu'il soit valide pour toutes les tailles d'échantillons).

Soit un tableau de contingence entre deux variables qualitatives A et B. La première étape consiste à formuler l'hypothèse nulle :

H_0 : Les variables A et B sont indépendantes

On peut alors calculer la probabilité de chaque valeur A_1, A_2 , etc. La probabilité de présenter A_1 et B_1 est alors égale à $P(A_1) \times P(B_1)$. On peut calculer la probabilité, si l'hypothèse nulle est vraie, d'observer un tableau de contingence donné. Puis, pour tous les tableaux de contingence possibles, dont celui étudié, on peut calculer la possibilité d'observer ce tableau de contingence si l'hypothèse nulle est vraie. On range alors les tableaux de contingence en deux catégories : ceux qui sont plus compatibles avec l'hypothèse nulle que le tableau étudié (leur probabilité est plus élevée sous l'hypothèse nulle), et ceux qui sont autant ou moins compatibles.

La p-value est obtenue en sommant les probabilités associées à chaque tableau de contingence au moins aussi improbable que le tableau étudié.

Application à notre problème

— H_0 : La cohérence et la consensualité de l'objectif de gestion est indépendante de l'assistant utilisé.

Numéro de la partie	1	2	3	4	5	6	7	8
Joué en :	2e	1er	2e	1er	2e	1er	2e	1er
Objectif de gestion cohérent	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
Consensus	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui

FIGURE 7.13 – Données sur les consensus et la viabilité des objectifs collectifs de gestion des parties de Bridge. Sont entourées en rouge les données de la classe non cohérente ou non consensuelle.

On ne présente pas les données pour Viaduc, car tous les objectifs collectifs de gestion des parties jouées lors des évaluations ont été cohérents et consensuels.

Les données récoltées nous permettent d'établir le tableau de contingence suivant :

	Nombre de solutions viables et consensuelles	Nombre de solutions non viables ou non consensuelles	Total
Viaduc	8	0	8
Bridge	3	5	8
Total	11	5	16

TABLE 7.1 – Table de contingence.

Avec ces valeurs, et avec la commande R :

```
fisher.test(mytable) #mytable = tableau de contingence
```

on obtient une p-value de $p \approx 0.026$ et on peut donc rejeter H_0 avec un intervalle de confiance à 95%.

Ainsi, il est possible de conclure que Viaduc permet de trouver une solution viable et consensuelle plus fréquemment que Bridge.

7.5.3 Analyse qualitative

Dans cette partie, nous nous penchons plus en détail sur les réponses des joueurs aux différents questionnaires.

7.5.3.1 Données concernant l'équité dans Bridge et Viaduc

Il est intéressant de noter que, pour les deux questionnaires, il y a une divergence quant à la disproportion des concessions et l'équité perçue (voir figures 7.14 et 7.18). Cela peut paraître paradoxal, cependant l'équité ne concerne que le résultat final, est-il équilibré? Une solution équitable peut être trouvée en demandant plus de concessions à un joueur ayant des positions égoïstes.

Une question ouverte telle que "Selon quels critères jugez vous une solution comme équitable?" aurait pu apporter des précisions sur ce point.

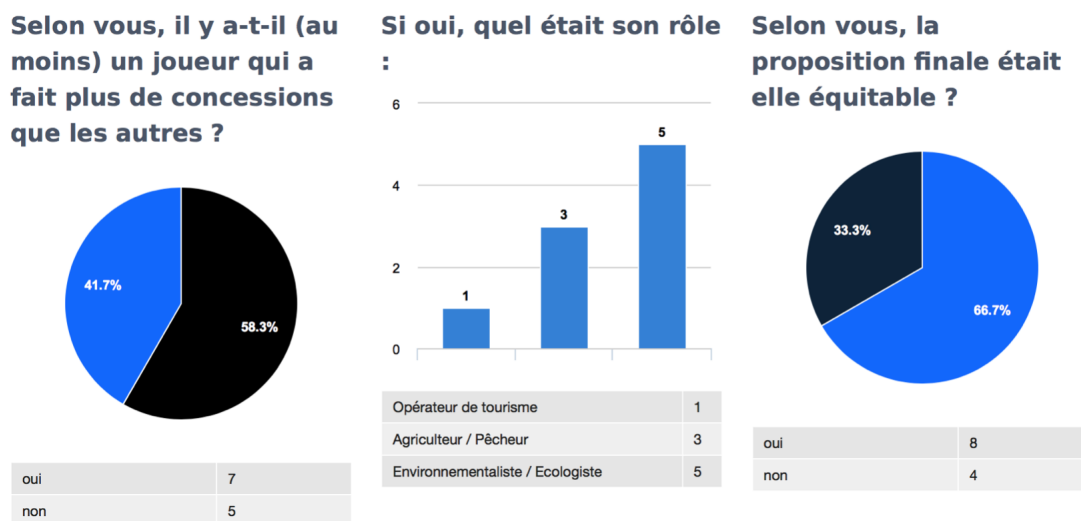


FIGURE 7.14 – Données concernant l'équité dans Bridge.

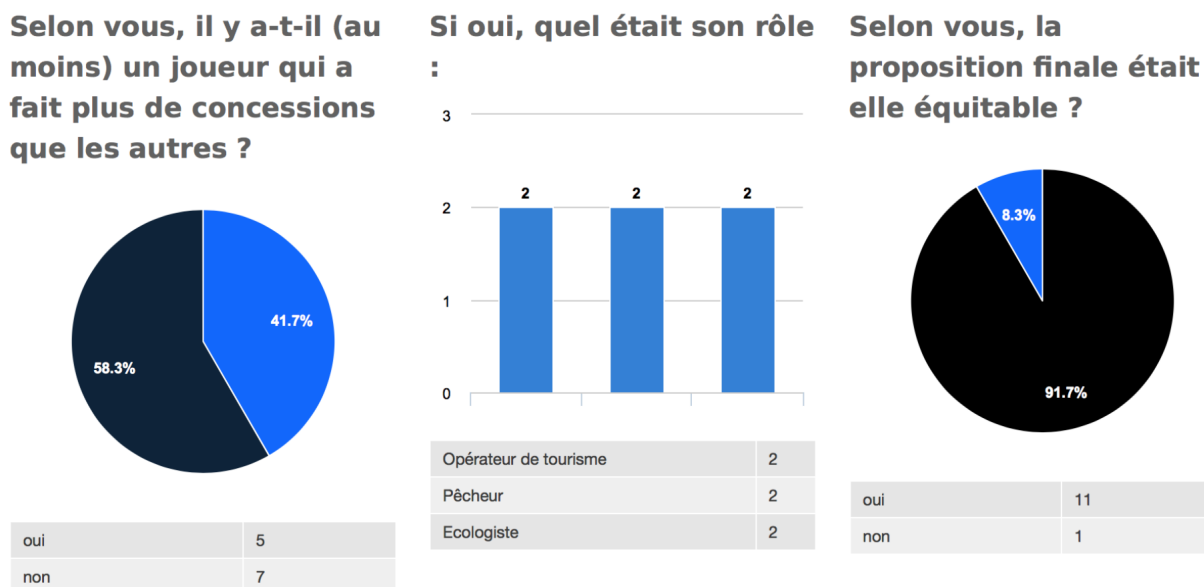


FIGURE 7.15 – Données concernant l'équité dans Viaduc.

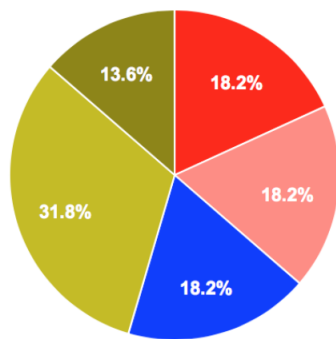
On remarque également qu'avec Bridge, c'est l'écologiste qui, le plus souvent, est considéré comme ayant fait le plus de concessions. Alors qu'avec Viaduc les résultats sont parfaitement répartis.

De plus, parmi 12 personnes, 11 considèrent la proposition finale de Viaduc comme équitable contre 8 qui considèrent la proposition finale de Bridge comme équitable. Bien que ces résultats ne soient pas significatifs, ils sont plutôt encourageants quant à l'intérêt de la viabilité en particulier, et d'une aide technique en général pour la prise de décision de manière équitable.

7.5.3.2 Pertinence des assistants pour la prise de décision individuelle et collective

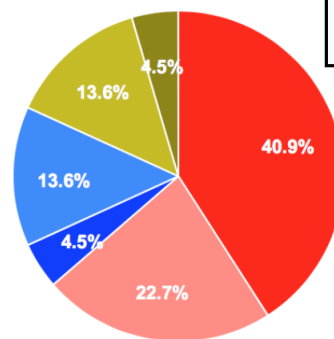
À la question : "Lequel des logiciels testés vous semble le plus pertinent pour la prise de décision individuelle ?", les résultats sont assez partagés, avec beaucoup d'indécis. Cependant, pour la décision collective, les joueurs ont tendance à avoir préféré Viaduc.

Lequel des logiciels testé vous semble le plus pertinent pour la prise de décision individuelle ?



Viaduc	4
Plutôt Viaduc	4
Bridge	4
Les deux se valent sur ce point	7
Je ne sais pas	3
Plutôt Bridge	0

Lequel des logiciels testé vous semble le plus pertinent pour la prise de décision collective ?



Viaduc	9
Plutôt Viaduc	5
Bridge	1
Plutôt Bridge	3
Les deux se valent sur ce point	3
Je ne sais pas	1

FIGURE 7.16 – Réponses concernant la prise de décision individuelle et collective dans Bridge et Viaduc.

Lorsque l'on interroge les joueurs sur la raison de leur choix, on remarque plusieurs types de réponses. Voici par exemple le commentaire de Martin, ayant répondu "Je ne sais pas" à la question sur la prise de décision individuelle :

Il m'a semblé que sur la partie de la prise de décision individuelle les deux logiciels sont très semblables. Cependant je trouve que de manière empirique les courbes d'évolution sont plus claires à comprendre intuitivement (au moins en partie) que les représentations de noyau en 3D qui manque de clarté et sont un peu abscones. Cependant je pense que la rigueur

supplémentaire des noyaux apporte un plus en termes de pertinence et de confiance dans la prise de décision.

Isabelle rejoint Martin sur ce point :

Viaduc est plus complet et sophistiqué et doit permettre de mieux représenter la réalité et aider les négociations. Bridge est plus simple et visuel et les simulations sont plus simples.

Les personnes ayant choisi Viaduc lors de l'une de ces questions donnent en effet souvent l'argument des noyaux de viabilité, par exemple Lola explique :

La modélisation du noyau et des intersections possibles invitent les joueurs à vouloir prendre une décision ensemble. Le fait de trouver une intersection pour le noyau devient un but pour les joueurs, but qu'ils veulent atteindre ensemble.

En revanche, les personnes ayant choisi Bridge avancent comme argument sa simplicité d'utilisation.

7.5.3.3 Réflexion sur les noyaux de viabilité

L'intérêt et les difficultés liées aux noyaux de viabilité ont été soulevés par de nombreux joueurs. Pour beaucoup, c'est un outil pratique, qui aide à visualiser ce sur quoi il est possible de négocier. Ils donnent plus d'informations que les trajectoires de Bridge (qui sont à contrôle constant) et permettent plus facilement de se mettre d'accord sur une solution dans laquelle ils ont plus confiance.

Cependant les participants ont aussi noté que la lecture et la compréhension du noyau ne sont pas évidentes. Pour certain, cette incompréhension les a menés à préférer Bridge. Pour Camille par exemple "Le fait de ne pas avoir le tableau avec les noyaux rend l'expérience plus légère."

7.5.3.4 Objectif pédagogique des jeux

Nous pensons que l'utilisation de jeu où il est possible d'arriver à un compromis sans léser une personne en particulier peut faire comprendre aux joueurs l'intérêt de travailler ensemble

Dans l'ensemble, on note que l'objectif pédagogique est globalement bien compris, les participants ont pu deviner les intentions des autres joueurs.

Les joueurs ont aussi généralement trouvé des stratégies intéressantes lorsqu'on leur proposait d'imaginer de nouveaux moyens d'action, Estelle élabore :

Accompagner [les agriculteurs] dans la mise en place d'une permaculture pour diminuer leur utilisation de pesticide ; inciter les touristes à acheter les produits agricoles pour garantir un revenu minimum à l'agriculteur ; voire leur proposer de ramasser eux-mêmes les légumes. Proposer des ateliers valorisant le métier d'agriculteur.

Sur cette même question, la pédagogie et la sensibilisation des touristes aux enjeux environnementaux est le sujet qui a le plus été évoqué, notamment par Yoann :

Alterner l'utilisation de pesticides forts et faibles pour réduire leur impact à long terme sur la nature. Fermer de temps en temps les sentiers pour permettre aux touristes d'en découvrir d'autres et ne pas les surcharger. Mise en place avant "visite" d'une session de prévention concernant les règles à respecter par rapport à la nature, sous peine de sanctions tarifées .

De plus, il est important de noter que, comme certains joueurs en ont fait part, c'est aussi en répondant aux questionnaires et en réfléchissant aux questions posées qu'ils sont arrivés à ces conclusions. Ainsi, le jeu sans le questionnaire n'aurait peut-être pas le même impact pédagogique.

Concernant le jeu qui a été préféré pour la pédagogie, les réponses se répartissent ainsi :

**Lequel des logiciels
testés vous semble le
plus intéressant
pédagogiquement ?**

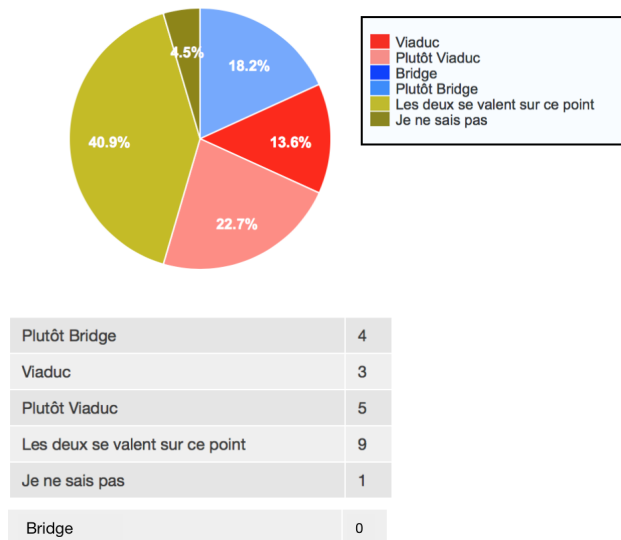


FIGURE 7.17 – Données concernant la session que les joueurs ont le plus appréciée.

Camille argumente en faveur de Bridge :

Pour travailler justement sur la vraisemblance scientifique (la manière dont les différentes variables sont interconnectées) lors de débats autour de la gestion de territoire partagé.

Stéphane a préféré Viaduc :

Viaduc introduit la notion de noyau qui est plus avancée et on apprend donc plus de choses.

Pour beaucoup de joueurs, il était intéressant de voir comment les différentes variables s'influencent les unes les autres, Éva résume :

Par ce jeu, j'ai compris que la gestion des territoires partagés est très complexe, car il faut trouver un équilibre entre tous les différents secteurs économiques et environnementaux. Le déséquilibre d'un secteur peut affecter tous les autres, d'où l'importance de trouver des solutions ensemble.

Il est intéressant de voir qu'une partie des répondants ont mentionné qu'ils préféreraient le scénario marin pédagogiquement (notamment grâce à la présence des tortues).

Cependant, les joueurs ont su se détacher du scénario lorsqu'il leur est demandé de réfléchir à d'autres scénarios d'utilisation. La réponse revenue la plus souvent est l'urbanisme et l'aménagement de villes, certains joueurs ont pensé à des utilisations correspondant à leur domaine d'activité : Isabelle pense au système de santé pour des compromis entre les professionnels, le contribuable, les patients, et l'assurance maladie. Pour Corentin, cet outil pourrait être transposable au tri des déchets : notamment concernant "le nombre de tris différents, le coût du recyclage en fonction du matériau, l'impact environnemental, l'attractivité de matériaux non recyclables".

Appréciation des assistants

Lorsque l'on demande aux joueurs quels jeux ont-ils le plus apprécié dans l'ensemble, les réponses sont partagées :

**Laquelle des sessions
avez vous le plus
appréciée ?**

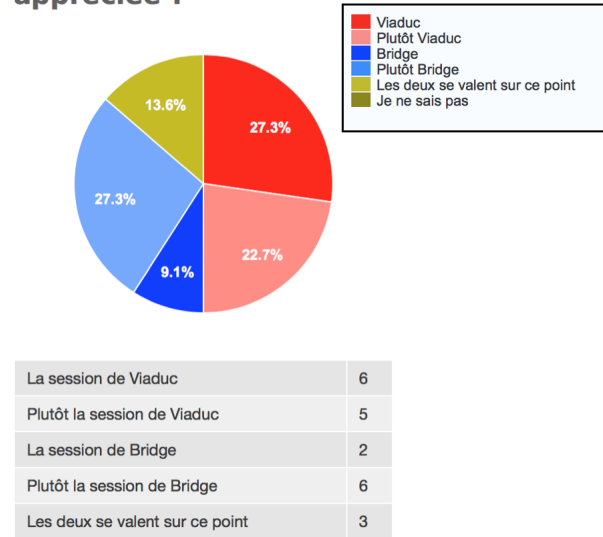


FIGURE 7.18 – Données concernant la session que les joueurs ont le plus appréciée.

Estelle ayant plus apprécié Bridge avoue s'être sentie "dépassée par les calculs" de Viaduc. Valentine, pour qui les deux assistants se valent sur ce point, écrit :

Les thèmes sont différents, mais j'ai apprécié les deux, j'ai apprécié aussi me mettre "dans la peau" de personnages différents dans les deux sessions et donc de réfléchir à différents points de vues.

Les personnes ayant choisi Viaduc ont réagi en faveur de son "aspect ludique", peut-être lié aux noyaux colorés et la possibilité de les faire bouger dans un espace 3D.

Viaduc, en forçant les joueurs à trouver une solution viable, pouvant aller à l'encontre de leurs objectifs, avant de continuer la partie, génère parfois plus de frustration que Bridge. Cependant, dans Bridge, les joueurs qui tenaient absolument à ce que leurs objectifs et moyens d'action soient cohérents étaient parfois beaucoup plus souples sur leurs contraintes qu'ils auraient pu l'être. En effet, ces joueurs vérifiaient pour chaque variable qu'elle restait dans l'ensemble de contraintes, comme c'est le cas pour le calcul de trajectoire de la figure 7.7. Ces calculs de trajectoires sont cependant à contrôle constant et il est donc plus difficile de maintenir les variables dans l'ensemble de contraintes.

À la question "Quelle est, selon vous, la fonctionnalité la plus utile des deux logiciels (qu'elle apparaisse dans l'un, l'autre ou dans les deux en même temps) ?" Les réponses revenues le plus souvent ont été le calcul de noyaux de viabilité et calcul de trajectoires, qui est interactif grâce à la modification des paramètres. Virginie écrit :

Pour moi c'est la première étape dans laquelle on met nos curseurs où l'on veut pour voir les courbes d'évolution. Cela permet de se projeter sur l'évolution dans le temps. Et ce qui est très intéressant c'est que l'on peut faire varier les différents paramètres et voir leur impact sur les courbes.

Dans l'ensemble, les deux jeux ont été appréciés et les joueurs décrivent leurs expériences comme "ludiques", "intéressantes" et "adaptées pour les non-initiés".

À la la question "Seriez-vous intéressé pour rejouer?" du premier questionnaire, les réponses se répartissent ainsi :

	Oui	Non	Total
Viaduc	11	1	12
Bridge	6	6	12
Total	17	7	24

TABLE 7.2 – Réponses obtenues à la question "Seriez-vous intéressé pour rejouer ?" selon le jeu.

Les joueurs sont donc plus intéressés pour rejouer à Viaduc plutôt qu'à Bridge. On note qu'au total une majorité de joueurs s'est dite intéressée pour rejouer, ce qui tend à confirmer l'hypothèse selon laquelle ces assistants sont intéressants pour les joueurs (particulièrement Viaduc).

7.5.3.5 Intérêt pour le recueil des relaxations relatives de contraintes

Bien qu'il n'y ait pas eu de question spécifiquement sur ce sujet, certains joueurs ont fait part de leurs réflexions quant au recueil des relaxations relatives proposées dans Viaduc (marges orange de la figure 6.4, qui servent au calcul de noyaux non vides).

Pour Solène, ces marges ont permis d'être plus précise sur ses attentes individuelles. Lola confirme :

Je dirais plutôt Viaduc, car il permet de définir des deuxièmes zones acceptables. Si le maximum idéal ou le minimum idéal ne sont pas possibles, alors le joueur réfléchit à ce qu'il pourrait accepter d'autre, ce qui me semble pertinent pour la prise de décision individuelle.

Dans le monde réel, l'information est parfois ambiguë ou imprécise. Le raisonnement humain interprète l'information afin d'arriver à des conclusions ou décisions.

Par exemple, pour un acteur social, il n'y a probablement pas de différence entre 5000 touristes et 4999 touristes. Ni entre 4999 et 4998 touristes. Et l'on peut continuer ce raisonnement avec des pas de 1. Cependant, pour ce même acteur social il y aura une différence entre 5000 touristes et 2000 touristes. Cela est représenté dans les fiches personnages par les dégradés de couleurs (voir par exemple 5.8). La logique floue (Zadeh, 1984), dont s'inspire le recueil des relaxations relatives permet d'approcher de cette nuance.

Sur ce même sujet, mais pour la décision collective, Séverine écrit :

Le fait d'avoir des zones vertes et orange, psychologiquement on est prêt à faire plus de concessions, car on se doit de faire une zone orange et on sait que les autres vont faire de même.

Estelle note à ce sujet :

Dans Viaduc, les participants sont obligés de dévoiler la zone de négociation possible. L'avantage c'est que la négociation peut aller plus vite qu'avec Bridge. L'inconvénient c'est que les coups de bluff en négociation sont plus difficiles.

Romain note aussi que les marges ont été un bon point pour la pédagogie, et Lina indique qu'elle a préféré Viaduc, car la multiplication des curseurs permet de négocier plus facilement. Ces commentaires sont liés au mode "transparence" de la troisième étape qui a été utilisé pour les sessions de jeu (pour un rappel des étapes et des modes de jeux voir les paragraphes 5.4.2 et 5.4.3).

7.5.3.6 Améliorations possibles et difficultés rencontrées pendant le jeu

Deux points principaux ont été soulevés concernant les difficultés rencontrées et les améliorations possibles.

La première est le manque d'interaction du joueur par rapport à la quantité d'information qu'il reçoit, Camille argumente :

Les rôles endossés par les participant-e-s proposent assez peu de choix avec de l'impact (peu de conséquences réelles sur la simulation à part, finalement assez rarement, lorsque les variables choisies par les un-e-s et les autres ne s'articulent pas bien entre elles et qu'il faut donc en débattre) - et sont très dirigés (beaucoup d'exemples auxquels il est possible de se conformer, peu de prise de risque ou de liberté possible spontanément). Ce sont donc plutôt les temps d'échanges entre participant-e-s qui rythment la simulation et dont il faudrait consolider le cadre.

La seconde est la complexité mathématique du jeu, certains joueurs ont du mal à appréhender les liens de cause à effet et trouvent le modèle difficile à comprendre. Pour certains, cette difficulté vient du surplus d'informations des premières étapes du jeu (présentation du modèle, influence des paramètres, explication de la viabilité).

De plus, certains joueurs sont restés sur leur faim et ont déploré l'arrêt relativement soudain du jeu, sans vraiment savoir s'ils avaient bien fait, si l'espace protégé allait prospérer grâce à leurs actions.

Enfin, même s'il n'y a eu qu'un seul cas de décision non consensuelle sur les 16 parties jouées, les joueurs ont tout de même été surpris d'apprendre qu'un joueur aurait le dernier mot en cas de désaccord, pour certains cela enlève du sens aux rôles des autres joueurs.

7.5.4 Bilan des évaluations

Nous considérons ces résultats, bien que préliminaires, et à petite échelle, positifs et prometteurs. Ils valident (comme une "preuve de concept") l'approche que nous proposons d'utiliser : la viabilité pour aider à la décision collective, consensuelle et cohérente.

En effet, nous avons montré que Viaduc, et par conséquent l'analyse de viabilité est bien efficace pour la formulation d'un objectif collectif de gestion consensuel et cohérent. (Cependant, avec si peu de partie, il n'a pas été possible de vérifier que Viaduc est plus efficace que Bridge pour la formulation d'un objectif collectif de gestion uniquement cohérent.) Il aurait aussi été intéressant de vérifier si la viabilité est aussi significativement plus efficace pour la formulation d'un objectif personnel de gestion viable.

Dans l'ensemble, on note que les joueurs ont été globalement satisfaits de leur expérience et ont le sentiment d'avoir compris les enjeux entourant la gestion des espaces partagés. La majorité des joueurs s'est dite intéressée pour rejouer avec un autre rôle (tableau 7.2).

Au vu des réponses des joueurs (notamment au paragraphe 7.5.3.4), nous estimons que le principe des assistants est intéressant pour la sensibilisation. Cependant, les remarques sur les difficultés des joueurs sont pertinentes et posent des questions sur la manière dont formuler des problèmes complexes plus simplement afin d'intéresser les néophytes. Nous notons que l'ergonomie pénalise Viaduc (et par conséquent la viabilité) pour ce qui est de la sensibilisation. Au paragraphe 8.1, nous proposons une méthode qui pourrait-être plus intuitive afin de visualiser des noyaux de viabilité.

Chapitre 8

Perspectives

Notre travail permet d’explorer l’usage de la viabilité dans un cadre de décision participative, les perspectives qu’il ouvre nous paraissent importantes.

8.1 Perspectives techniques et scientifiques

Multimodèle avec dynamiques

Comme nous l’avons vu, la viabilité garantie permet à plusieurs acteurs sociaux d’atteindre un consensus sur une solution de gestion d’une réserve, même s’ils ne sont pas d’accord sur le modèle la décrivant. Cependant, avec les bibliothèques de calcul disponible, il n’est pour l’instant possible que de prendre en compte différentes valeurs de paramètres.

Il serait intéressant de disposer d’un code de ViabLab dynamique afin que les joueurs puissent modifier la dynamique comme ils le souhaitent et non pas uniquement quelques paramètres.

En effet les noyaux garantis tels que nous les avons décrits au paragraphe 5.3.3 et utilisés au paragraphe 6.5 devraient permettre de prendre en compte non seulement différentes valeurs de paramètres, mais aussi des dynamiques différentes.

Analyse du bassin de capture

Dans les cas où les joueurs savent quel est l’état du système¹ au début des négociations, et si cet état n’est pas dans le noyau de viabilité, il est intéressant de savoir s’il existe des trajectoires permettant au système d’évoluer jusqu’au noyau de viabilité. Pour répondre à cette question, il serait possible de calculer le bassin de capture, c’est-à-dire l’ensemble des états à partir desquels il existe au moins une trajectoire qui atteint le noyau (voir figure 8.3).

1. Pour notre cas, un état du système serait par exemple : il y a à ce jour 3000 tortues et 5000 touristes dans la réserve et le capital des pêcheurs s’élève à 50 000 Réaux.

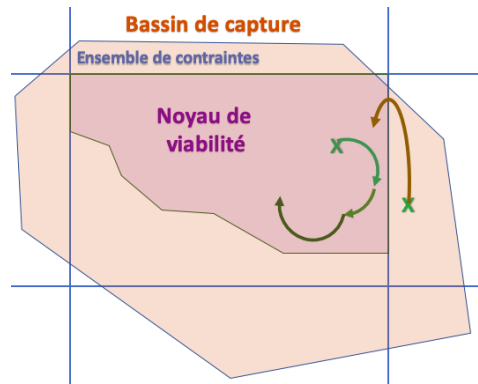


FIGURE 8.1 – Schéma du bassin de capture : les points vert appartiennent au bassin de capture et les flèches représentent les trajectoires associées à la dynamique.

Dans une prochaine version de l'assistant, il serait intéressant de proposer cette fonctionnalité aux joueurs, avec une négociation particulière sur les moyens à mettre en oeuvre pour rejoindre l'ensemble d'états souhaitables (qui peuvent être plus importants que les moyens d'action pour s'y maintenir). De même, en s'inspirant de Gajardo et al. (2018), il serait intéressant d'examiner quels ensembles d'états souhaitables sont accessibles depuis la situation actuelle et de proposer aux joueurs de modifier les moyens d'action en conséquence.

Prise en compte des noyaux lors de l'argumentation

Dans le cas d'une intersection vide des contraintes des participants, l'assistant actuel propose une recherche de noyaux équitables. De plus, il est aussi possible pour un ou plusieurs joueurs de retourner en arrière et de modifier leurs problèmes de viabilité. Les joueurs peuvent ainsi négocier sur lequel d'entre eux devra modifier son problème de viabilité. Il serait intéressant que l'assistant donne des arguments lors de cette négociation (les méthodes de négociations par l'argumentation sont explorées dans le paragraphe 4.4.1). Quelques informations pouvant servir d'argument aux joueurs sont :

- La personne ayant le noyau le plus petit. Il est possible de calculer le volume de chaque noyau pour déterminer le plus petit. Les joueurs peuvent ensuite demander au joueur ayant le plus petit noyau de relâcher ses contraintes jusqu'à trouver une intersection non vide.
- La personne ayant le noyau qui entraîne une intersection vide, dans le cas de trois joueurs ou plus. Il est possible grâce à la bibliothèque Viabilitree (Alvarez et al., 2016) de calculer l'intersection de noyaux deux à deux afin de déterminer quels noyaux bloquent l'intersection. Les joueurs dont les noyaux ont le plus d'intersections vides peuvent être poussés par les autres joueurs à relâcher leurs contraintes.
- La personne ayant le noyau le plus éloigné de la moyenne. Bien qu'il n'y ait à ce jour pas d'algorithme pour le faire, il serait possible de déterminer le barycentre de chaque noyau et d'en faire la moyenne. Les joueurs dont les noyaux seraient les plus éloignés de ce point représentant la moyenne devront relâcher leurs contraintes.

Donner ces informations aux décideurs afin qu'ils puissent les utiliser en tant qu'arguments leur permettrait d'avoir plus de choix dans la marche à suivre en cas d'intersection vide.

Possibilité de renseigner de nouveaux modèles

Viaduc constitue un prototype d'outil pour l'aide à la décision dans le cas particulier d'une réserve marine. Cependant, la méthode utilisée est généralisable à beaucoup de différents problèmes, comme nous l'avons vu au travers des réponses des utilisateurs dans la partie 7.5.2.4. Il serait donc intéressant de généraliser ce protocole de décision participative avec un modèle quelconque (non prédéfini comme dans nos scénarios)

Mise en place d'un système de vote

À l’heure actuelle, en cas d’absence de consensus, c’est le joueur pêcheur (ou agriculteur, dans le scénario agricole) qui impose sa solution aux autres joueurs. Cette solution a été choisie, car elle mime ce qui se passe dans les réserves extractivistes où les populations traditionnelles ont la majorité². Cependant, il peut être intéressant, spécialement dans le cas de l’implémentation de nouveaux modèles, de proposer un vote aux joueurs pour qu’ils choisissent la solution qui leur convient le mieux. Il serait par exemple possible de proposer aux joueurs de donner leurs avis sur chaque solution afin de procéder à un vote par jugement majoritaire³ (Balinski and Laraki, 2011). Une procédure de vote par jugement majoritaire est un système de vote par valeurs qui se distingue par la détermination du gagnant par la médiane. En effet, les méthodes de meilleure médiane satisfont à l’indépendance des alternatives non pertinentes et ne tombent pas dans le champ d’application du théorème d’Arrow (Fabre, 2020). Il reste cependant le problème de *la dictature de la majorité* qui ne favorise pas nécessairement l’émergence d’un compromis.

Visualisation de noyaux : propositions d’une nouvelle solution

Comme nous l’avons vu au chapitre précédent, certains joueurs ont été troublés par la présentation des noyaux, ne comprenant pas bien leur lecture. En effet, la lecture d’objets mathématiques en trois dimensions peut parfois poser problème aux néophytes et il serait intéressant, dans une version ultérieure du jeu, d’implémenter une nouvelle manière de visualiser les noyaux. Nous proposons ici une méthode de visualisation des noyaux en reprenant des formalismes avec lesquels les joueurs sont déjà familiers, à savoir les curseurs. Dans cette visualisation, le joueur est face à trois axes représentant les animaux, le capital des infrastructures de pêche et le nombre de touristes. Les sections verte, orange et rouge ont les mêmes significations que précédemment (voir figure 6.4). On ne va s’intéresser qu’à la zone verte, car c’est grâce à cette zone que le noyau est calculé. Le joueur peut choisir de regarder en détail une des variables (nombre d’animaux, capital ou nombre de touristes). En choisissant par exemple nombre d’animaux, il obtiendrait un affichage similaire à la figure 8.2.



FIGURE 8.2 – Représentation d’une méthode de visualisation de noyaux où le joueur peut voir les effets de la modulation du nombre d’animaux.

Le curseur entouré de bleu est le seul que le joueur peut bouger. Ce curseur ne peut bouger que dans la partie verte (car le noyau a été calculé uniquement dans cette partie). Les parties en bleu sur les axes "Capital" et "Animaux" représentent les plages de valeurs viables pour le nombre d’animaux choisis. Ici, on voit qu’avec 4000 animaux, on peut avoir entre 40000 et 60000 de capital et entre 2000 et 7000 touristes. Lorsque le joueur bouge ce curseur, les parties bleues bougent aussi. Le joueur peut ensuite changer de variable à observer. Voici un exemple où le joueur s’intéresse à la variable Capital :

2. On note tout de même que ces populations sont plus vulnérables et fragiles, souvent, que les fazendeiros ou entreprises minières par exemple.

3. Cette méthode ne requiert d’ailleurs pas d’implémentation supplémentaire puisqu’un site web dédié permet d’effectuer des votes en utilisant cette méthode : jugementmajoritaire.net.



FIGURE 8.3 – Représentation d’une méthode de visualisation de noyaux où le joueur peut voir les effets de la modulation du capital des pêcheurs.

Et on aurait la même chose pour la variable nombre de touristes.

Cette méthode correspond en fait à une coupe en deux dimensions d’un noyau en trois dimensions (la valeur d’une des variables est fixée par le curseur bleu), la particularité de cette visualisation est qu’elle propose de visualiser la coupe en deux fois une dimension (les barres bleues), plutôt qu’en deux dimensions.

Définir la viabilité pour d’autres types de modèles

À ce jour, la viabilité n’est utilisable qu’à l’aide de modèles dynamiques agrégés (équationnels). Il serait intéressant de se pencher sur la possibilité de son exploration à partir d’autres types de modèles, comme des simulations multi-agents par exemple.

8.2 Perspectives d’applications en matière de gouvernance

Comme nous l’avons vu au paragraphe 7.5, l’idée des jeux sérieux s’appuyant sur un assistant en analyse de viabilité est prometteuse en termes de prise de décision collective et de sensibilisation.

Cet outil pédagogique permet de faire comprendre les enjeux majeurs de la gestion côtière. Les acteurs sociaux sont parfois face à un faux dilemme et grâce à la viabilité il est possible de montrer aux acteurs sociaux qu’un terrain d’entente est atteignable et réalisable.

Conciliation des différents buts de la Convention sur la diversité biologique

La Convention sur la diversité biologique est un traité international adopté lors du sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, dont les trois buts principaux sont :

- la conservation de la biodiversité ;
- l’utilisation durable de ses éléments ;
- le partage juste et équitable des avantages découlant de l’exploitation des ressources génétiques.

L’outil pédagogique que nous proposons dans cette thèse se penche sur ces trois buts grâce aux différents rôles et à l’analyse de la viabilité qui permet d’explorer la question de l’utilisation durable.

Un outil tel que celui-ci permettrait alors de faire comprendre qu’il y a un faux dilemme entre conservation de la biodiversité et exploitation des ressources car il y a toujours une possibilité de négociation basée sur des informations techniquement fondées.

Tourisme durable

Le tourisme durable, promu par l’organisation mondiale du tourisme des Nations Unies (UNWTO), illustre une application complémentaire et future de cette thèse. Sur le site de l’UNWTO⁴, on peut lire :

Le tourisme durable doit :

4. <https://www.unwto.org/fr/sustainable-development>

- Faire un usage optimal des ressources environnementales qui sont un élément clé du développement du tourisme, en préservant les processus écologiques essentiels et en contribuant à la conservation des ressources naturelles et de la biodiversité ;
- Respecter l'authenticité socioculturelle des communautés d'accueil, conserver leur patrimoine culturel bâti et vivant, ainsi que leurs valeurs traditionnelles, et contribuer à la tolérance et à la compréhension interculturelles ;
- Garantir des activités économiques viables à long terme en apportant à tous les acteurs des retombées socioéconomiques équitablement réparties, notamment des possibilités d'emploi et de revenus stables, des services sociaux aux communautés d'accueil, et en contribuant à la lutte contre la pauvreté.

Les trois rôles du jeu Viaduc correspondent à ces différents enjeux. Un outil de ce type peut donc être parfaitement adapté à la formation des professionnels de tourisme, voire à la sensibilisation des touristes eux-mêmes.

Ces points sont d'autant plus d'actualité avec la relance du secteur touristique qui va suivre la pandémie de COVID-19. Dans les mesures de relance et d'accélération du redressement préconisée par l'organisation mondiale du tourisme, on peut lire :

C'est aussi l'occasion de ménager une place centrale au tourisme dans les politiques nationales de développement et de faire de la durabilité une composante intrinsèque du secteur, à mesure qu'il se relève et retrouve le chemin de la croissance.⁵

Viaduc permettant une première approche pour comprendre les enjeux écologiques, sociaux et économiques et ainsi d'établir une base de négociation, il serait particulièrement intéressant de poursuivre cette approche afin de répondre directement aux enjeux actuels.

Pêche et droits des peuples traditionnels

Une autre application complémentaire et future de cette thèse est le droit des populations traditionnelles, tels que défendus par le *Protocole de Nagoya sur l'accès aux ressources génétiques et le partage juste et équitable des avantages découlant de leur utilisation relatif à la convention sur la diversité biologique* (Buck and Hamilton, 2011). On peut y lire :

Les dispositions du Protocole sur l'accès aux connaissances traditionnelles associées aux ressources génétiques détenues par les communautés autochtones et locales amélioreront la capacité de ces communautés à profiter de l'utilisation de leurs connaissances, de leurs innovations et de leurs pratiques.

Le Brésil a été l'un des articulateurs de l'accord de 2010 à Nagoya, au Japon, mais il ne l'a pas encore ratifié, alors qu'une centaine de pays l'ont déjà fait. La gestion des ressources génétiques de la biodiversité est pourtant une question très importante pour le Brésil, détenteur de l'une des plus grandes variétés biologiques de la planète.

Il serait particulièrement intéressant d'explorer l'impact d'un jeu et assistant tel que Viaduc pour la formation des populations traditionnelles. Cela serait en outre dans la lignée du mouvement décolonial Brésilien qui propose la construction des connaissances à partir de nouvelles bases. Un outil pouvant promouvoir le dialogue autour des connaissances partagées sur les trois variables symboliques serait donc particulièrement bienvenu.

Nos travaux sont aussi liés à l'objectif 14 de l'agenda 2030⁶ concernant les écosystèmes marins et côtiers :

Le quatorzième objectif promeut la conservation et l'exploitation durable des écosystèmes marins et côtiers, selon trois ambitions fondatrices : une gestion plus durable des ressources via la préservation de 10% des zones marines et côtières, la lutte contre la surpêche et la pêche illicite ; l'accélération des recherches scientifiques et du transfert de techniques pour renforcer la résilience des écosystèmes et réduire au maximum l'acidification des océans ; la conception de la gestion durable des ressources marines comme une opportunité de développement économique et touristique pour les petits États insulaires et les pays les moins avancés.

5. Soutenir l'emploi et l'économie grâce aux voyages et au tourisme, Appel à l'action pour atténuer l'impact socioéconomique de la COVID-19 et accélérer le redressement : <https://www.unwto.org/fr/covid-19-ressources>

6. <https://www.agenda-2030.fr>

Pour notre exemple de réserve extractiviste marine, nous avons choisi la tortue comme animal symbolique, cependant, il serait possible de choisir une autre espèce animale. Même si la dynamique côtière change il est tout à fait possible d'adapter notre démarche à d'autres systèmes marins.

Une application plus large

Pour chaque aspect social, écologique et économique, de la réserve nous avons choisi une variable et un personnage clef. Cependant, nous pourrions, en gardant le même protocole, ajouter d'autres rôles ou d'autres variables. (Nous avons d'ailleurs pensé à ajouter une variable représentant les bénéfices liés à l'exploitation du pétrole en mer, cependant, avec les outils dont nous disposions, le calcul de viabilité avec quatre variables était parfois trop long pour un jeu.)

Il serait alors possible de faire différentes versions afin de former les étudiants et gestionnaires, des réserves concernées. D'autres réserves dans le monde fonctionnent de la même manière que les réserves extractivistes Brésiliennes, notamment en Asie et en Afrique. De plus, le contexte des autres pays latino-américains est similaire sur de nombreux points au contexte Brésilien. Un outil permettant de sensibiliser aux enjeux et d'aider au compromis serait ainsi déclinable dans plusieurs réserves. Nous pourrions montrer aux acteurs sociaux que, bien que leurs intérêts semblent diverger, il est possible d'obtenir un consensus.

Notre outil semble donc être une "preuve de concept" très prometteuse et qui peut d'être utilisé dans des situations de conflits autour de ressources partagées.

Chapitre 9

Conclusion

Durant cette thèse, nous nous sommes penchés sur la conception, le développement et l'impact d'un jeu de rôle complémenté par un assistant d'analyse de viabilité pour aider la décision et la négociation entre acteurs. Cette étude a été réalisée sous l'angle de la prise de décision et de la négociation dans le cadre des espaces protégés partagés, et a été illustrée par le cas des réserves extractivistes marines Brésiliennes.

Ce jeu a permis aux différents joueurs d'étudier un système en évolution sous l'angle de la viabilité. Cette méthode leur permet d'étudier la compatibilité entre la dynamique du système, leurs objectifs pour la réserve et les moyens qu'ils se donnent pour arriver à ces objectifs. La viabilité consiste à étudier un système dynamique contrôlé soumis à un certain nombre de contraintes. La définition d'un ensemble de contraintes permet d'éviter de privilégier un critère plutôt qu'un autre. D'autre part, grâce à des variables de contrôle, il est possible de prendre en compte les actions possibles pour un gestionnaire, de tester différents scénarios et de sélectionner les actions ou mesures politiques conduisant à un développement durable. Le noyau de viabilité constitue l'outil principal de la théorie de la viabilité. Il permet de distinguer une situation viable d'une situation non viable. Ainsi, il nous fournit un outil efficace pour distinguer une gestion durable d'une gestion non durable.

En plus de proposer aux acteurs sociaux le calcul de viabilité correspondant à leurs projets pour la réserve, l'assistant Viaduc aide également les joueurs dans leurs recherches de solutions communes. Plus précisément, une aide est apportée pour que chacun des acteurs sociaux trouve un noyau non vide qui lui corresponde.

Ceci est réalisé par le calcul d'une approximation d'une partie d'un front de Pareto pour la minimisation des relâchements appliquées au problème du joueur.

La viabilité est utilisée dans un cadre multi-utilisateur afin de trouver une solution qui convienne à tous. Pour réaliser des objectifs, plusieurs moyens sont utilisés, comme le calcul de noyaux dans l'intersection des contraintes. Dans le cas où cette intersection serait vide, une aide est disponible pour le calcul de noyaux non vides prenant en compte les préférences de chaque participant. Cette aide est possible grâce à l'implémentation de plusieurs algorithmes de recherche préservant l'équité. Concernant la viabilité multiutilisateur, nous proposons une utilisation innovante des noyaux garantis, permettant aux joueurs de trouver une solution de gestion qui convient à tous même lorsque les joueurs ont des modèles différents.

Le prototype de l'assistant et jeu de rôle a été testé avec 24 personnes et les résultats sont concluants par rapport à nos objectifs : aider au consensus d'une part et à une décision techniquement fondée d'autre part. En effet, en comparant deux assistants (notre assistant fondés sur la viabilité et un autre assistant témoin), nous avons montré que l'utilisation de notre outil permet aux joueurs de se mettre d'accord sur une solution viable et consensuelle plus fréquemment que sans les aides que nous proposons. De plus, une analyse qualitative des questionnaires nous a permis de noter que les joueurs ont été globalement satisfaits de leur expérience et ont le sentiment d'avoir retiré un apprentissage de

cet outil, notamment sur la complexité de la gestion environnementale, et la nécessité de tenir compte des différents points de vue.

Enfin, nous avons vu que ce projet ouvre de nombreuses perspectives d'applications, parfaitement ancrées dans les enjeux actuels.

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication à la RJCIA (Zaleski et al., 2019) et d'un article en cours de publication.

Bibliographie

- Mary Helena Allegretti et al. Extractive reserves : an alternative for reconciling development and environmental conservation in Amazonia. *Alternatives to deforestation : steps towards sustainable use of the Amazon rain forest*, pages 252–264, 1990.
- Isabelle Alvarez, Romain Reuillon, and Ricardo De Aldama. Viabilitree : A kd-tree framework for viability-based decision. *Rapport de recherche, LIP6, Paris*, 2016.
- Servicio de evaluación Ambiental. Ministerio del medio ambiente. *Santiago*, 2016.
- Leila Amgoud, Nicolas Maudet, and Simon Parsons. Modelling dialogues using argumentation. In *Proceedings Fourth International Conference on MultiAgent Systems*, pages 31–38. IEEE, 2000.
- Anonymous. FIPAC presta contas em audiência publica e ouve reivindicações de pescadores., august 2018a. <https://www.fiquebeminformado.com.br/2018/08/fipac-presta-contas-em-audiencia.html>.
- Anonymous. Audiencia publica vai debater cobrança do acesso a marina em Arraial do Cabo, august 2018b. <http://www.rc24h.com.br/noticia/ver/31779/Audiencia-publica-vai-debater-cobranca-do-acesso-a-Marina-em-Arraial-do-Cabo>.
- Audrey Armour. The citizens’ jury model of puerilic participation : a critical evaluation. In *Fairness and competence in citizen participation*, pages 175–187. Springer, 1995.
- Jean-Pierre Aubin. Viability theory birkhäuser. *Boston, Basel, Berlin*, 1991.
- Jean-Pierre Aubin. Dynamic economic theory : a viability approach. 5, 1997.
- Jean-Pierre Aubin and Patrick Saint-Pierre. An introduction to viability theory and management of renewable resources. *Advanced Methods for Decision Making and Risk Management in Sustainability Science*, pages 43–80, 2007.
- Jean-Pierre Aubin, Noël Bonneuil, Franck Maurin, and Patrick Saint-Pierre. Viability of pay-as-you-go systems. *Journal of Evolutionary Economics*, 11(5) :555–571, 2001.
- Jean-Pierre Aubin, Alexandre M Bayen, and Patrick Saint-Pierre. *Viability theory : new directions*. Springer Science & Business Media, 2011.
- Michel Balinski and Rida Laraki. *Majority judgment : measuring, ranking, and electing*. MIT press, 2011.
- Paulo CR Barata and Fabio FC Fabiano. Evidence for leatherback sea turtle (*dermochelys coriacea*) nesting in Arraial do Cabo, state of Rio de Janeiro, and a review of occasional leatherback nests in Brazil. *Marine Turtle Newsletter*, 96(1) :13–16, 2002.
- Carrie Beam and Arie Segev. Automated negotiations : A survey of the state of the art. *Wirtschaftsinformatik*, 39(3) :263–268, 1997.
- Bertha K Becker, Mariana Miranda, and Lia Osório Machado. *Fronteira Amazônica : questões sobre a gestão do território*. Editora UnB, 1990.
- Thomas C Beierle and David M Konisky. Public participation in environmental planning in the great lakes region. Technical report, 1999.

- Lars Bejder, Amy Samuels, Hal Whitehead, Nick Gales, Janet Mann, Richard Connor, Mike Heithaus, Jana Watson-Capps, Cindy Flaherty, and Michael Krutzen. Decline in relative abundance of bottlenose dolphins exposed to long-term disturbance. *Conservation Biology*, 20(6) :1791–1798, 2006.
- Claire Bernard and Sophie Martin. Building strategies to ensure language coexistence in presence of bilingualism. *Applied Mathematics and Computation*, 218(17) :8825–8841, 2012.
- Noël Bonneuil. Computing the viability kernel in large state dimension. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 323(2) :1444–1454, 2006.
- Swen PM Bos, Tina Cornioley, Anne Dray, Patrick O Waeber, and Claude A Garcia. Exploring livelihood strategies of shifting cultivation farmers in Assam through games. *Sustainability*, 12(6) : 2438, 2020.
- François Bousquet. Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents : le cas de la pêche dans le delta central du Niger. *ORSTOM*, 1994.
- François Bousquet and Christophe Le Page. Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological modelling*, 176(3-4) :313–332, 2004.
- François Bousquet, Olivier Barreteau, Christophe Le Page, Christian Mullon, and Jacques Weber. An environmental modelling approach : the use of multi-agent simulations. *Advances in environmental and ecological modelling*, 113(122), 1999.
- Denis Bouyssou and Patrice Perny. Aide multicritère à la décision et théorie du choix social. *Nouvelles de la Science et de la Technologie*, 15 :61–72, 1997.
- Antoine Brias. *Conjurer la malédiction de la dimension dans le calcul du noyau de viabilité à l'aide de parallélisation sur carte graphique et de la théorie de la fiabilité : application à des dynamiques environnementales*. PhD thesis, 2016.
- Jean-Pierre Briot, Paul Guyot, and Marta de Azevedo Irving. Participatory simulation for collective management of protected areas for biodiversity conservation and social inclusion. *AIS-CMS*, 7 : 183–188, 2007.
- Jean-Pierre Briot, Eurico Vasconcelos, Diana Adamatti, Vinicius Sebba, Marta de Azevedo Irving, Simone Barbosa, Vasco Furtado, and Carlos Lucena. A computer-based support for participatory management of protected areas : The simparc project. In *Anais do XXVIII Congresso da SBC (SBC'08)-Seminário Integrado de Software e Hardware "Grandes Desafios"*, pages 1–15, 2008.
- Jean-Pierre Briot, Marta de Azevedo Irving, José Eurico Vasconcelos Filho, Gustavo Mendes de Melo, Isabelle Alvarez, Alessandro Sordoni, and Carlos José Pereira de Lucena. Participatory management of protected areas for biodiversity conservation and social inclusion – Experience of the SimParc multi-agent based serious game. In Diana F. Adamatti, editor, *Multi-Agent Based Simulations Applied to Biological and Environmental Systems*, Advances in Computational Intelligence and Robotics (ACIR) Book Series, pages 295–332. IGI Global, 2017.
- Ronald J Brooks, Gregory P Brown, and David A Galbraith. Effects of a sudden increase in natural mortality of adults on a population of the common snapping turtle (*chelydra serpentina*). *Canadian Journal of zoology*, 69(5) :1314–1320, 1991.
- Matthias Buck and Clare Hamilton. The Nagoya Protocol on access to genetic resources and the fair and equitable sharing of benefits arising from their utilization to the convention on biological diversity. *Review of European Community & International Environmental Law*, 20(1) :47–61, 2011.
- Cédric Buron. *Un système multi-agents pour une place de marché de facture*. PhD thesis, Sorbonne Université, 2018.
- Roger Caillois. Les jeux et les hommes. *Gallimard*, 1958.
- Paolo C. Campo, François Bousquet, and Teodoro R. Villanueva. Modelling with stakeholders within a development project. *Environmental Modelling & Software*, 25(11) :1302–1321, 2010.

- Ellen Carpenter. Assessment of the concerns related to the detroit river binational public advisory committee. *Chicago, IL : Clean Sites*, 1997.
- Stephen R Carpenter, Nina F Caraco, David L Correll, Robert W Howarth, Andrew N Sharpley, and Val H Smith. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological applications*, 8(3) :559–568, 1998.
- Renato Casagrandi and Sergio Rinaldi. A theoretical approach to tourism sustainability. *Conservation ecology*, 6(1), 2002.
- James Catlin and Roy Jones. Whale shark tourism at Ningaloo marine park : a longitudinal study of wildlife tourism. *Tourism Management*, 31(3) :386–394, 2010.
- Marian Chertow. *Thinking ecologically : The next generation of environmental policy*. Yale University Press, 1997.
- ComMod, Collectif. La modélisation comme outil d’accompagnement. *Nat. Sci. Soc.*, 13(2) :165–168, 2005. doi : 10.1051/nss:2005023. URL <https://doi.org/10.1051/nss:2005023>.
- Manuela Carneiro da Cunha. Populações tradicionais e conservação ambiental. *Biodiversidade na Amazonia Brasileira, avaiacao e acoes prioritarias para a conservação, uso sustentavel e repartição de benefícios*, pages 184–193, 2001.
- Brian Czech. Economic growth as the limiting factor for wildlife conservation. 2000.
- Patricia Pinto Da Silva. From common property to co-management : lessons from Brazil’s first maritime extractive reserve. *Marine Policy*, 28(5) :419–428, 2004.
- Valéria G. da Vinha, Peter May, and Liandra Peres Caldasso. Sustentabilidade da reserva extrativista marinha de Arraial do Cabo, RJ : Técnicas de pesquisa e resultados. 2008.
- William’s Daré, Jean-Philippe Venot, Christophe Le Page, and Aaron Aduna. Problemshed or watershed? participatory modeling towards IWRM in North Ghana. *Water*, 10(6) :721, 2018.
- Rajdeep K Dash, Nicholas R Jennings, and David C Parkes. Computational-mechanism design : A call to arms. *IEEE intelligent systems*, 18(6) :40–47, 2003.
- Robson Henrique de Carvalho, Pedro Dutra Lacerda, Sarah da Silva Mendes, Bruno Corrêa Barbosa, Mariana Paschoalini, Fabio Prezoto, and Bernadete Maria de Sousa. Marine debris ingestion by sea turtles (testudines) on the Brazilian coast : an underestimated threat? *Marine pollution bulletin*, 101(2) :746–749, 2015.
- Amandine De Doninck, José-Frédéric Deroubaix, Catherine Carré, Nicolas Becu, Jean Paul Haghe, and Gilles Hubert. Confronter et recomposer les représentations pour concilier des politiques environnementales antagonistes. l’implication de la communauté scientifique dans la mise en débat de la continuité écologique sur grand morin, 2015.
- Rudolf De Groot. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and urban planning*, 75(3-4) :175–186, 2006.
- Michel De Lara, Luc Doyen, Thérèse Guilbaud, and Marie-Joëlle Rochet. Is a management framework based on spawning-stock biomass indicators sustainable? a viability approach. *ICES Journal of Marine Science*, 64(4) :761–767, 2007.
- Fabício Molica de Mendonça, Rogerio Valle, and Ricardo Coutinho. A cadeia produtiva da pesca artesanal em Arraial do Cabo, RJ : análise e propostas de melhoria. *Liandra Peres Caldasso Rogério Valle*, page 45, 2010.
- Teresa Cristina de Miranda Mendonça, Edilaine Albertino de Moraes, and Maria Angélica Maciel. Turismo e pesca nas reservas extrativistas marinhas de Arraial do Cabo (RJ) e da Prainha do Canto Verde (CE) : possibilidades e limites de complementaridade. *Caderno Virtual de Turismo*, 13(3) : 372–390, 2013.

- Gerard Debreu. Continuity properties of paretian utility. *International Economic Review*, 5(3) :285–293, 1964.
- Edward L Deci, Richard Koestner, and Richard M Ryan. A meta-analytic review of experiments examining the effects of extrinsic rewards on intrinsic motivation. *Psychological bulletin*, 125(6) : 627, 1999.
- Guillaume Deffuant, Laetitia Chapel, and Sophie Martin. Approximating viability kernels with support vector machines. *IEEE Transactions on automatic control*, 52(5) :933–937, 2007.
- Sylvestre Delmotte, Jean-Marc Barbier, Jean-Claude Mouret, Christophe Le Page, Jacques Wery, Phillipe Chauvelon, Alain Sandoz, and Santiago Lopez Ridaura. Participatory integrated assessment of scenarios for organic farming at different scales in Camargue, France. *Agricultural Systems*, 143 : 147–158, 2016.
- Jose GB Derraik. The pollution of the marine environment by plastic debris : a review. *Marine pollution bulletin*, 44(9) :842–852, 2002.
- Anya Désilles. Viablab. *Personnal communication*, 2020.
- ACS Diegues. O mito moderno da natureza intocada. São Paulo : Hucitec, 1998. 169p.
- Yannis Dimopoulos, Jean-Guy Mailly, and Pavlos Moraitis. Argumentation-based negotiation with incomplete opponent profiles. 2019.
- Estado Do Rio Do Tribunal de Contas e de Janeiro. Arrail do Cabo. 2004.
- Sara Dolnicar, Bettina Grun, Friedrich Leisch, and John Rossiter. Three good reasons not to use five and seven point likert items. 2011.
- Luc Doyen and Michel De Lara. Stochastic viability and dynamic programming. *Systems & Control Letters*, 59(10) :629–634, 2010.
- Nigel Dudley. *Guidelines for applying protected area management categories*. IUCN, 2008.
- Marie-Hélène Durand, Anna Désilles, Patrick Saint-Pierre, Valérie Angeon, and Harry Ozier-Lafontaine. Agroecological transition : A viability model to assess soil restoration. *Natural resource modeling*, 30(3) :e12134, 2017.
- John D Echeverria. No success like failure : The platte river collaborative watershed planning process. *Wm. & Mary Envtl. L. & Pol’y Rev.*, 25 :559, 2000.
- Corinne Eychenne. Les questionnaires collectifs d’espaces pastoraux entre reconnaissance et fragilisation : un angle mort de la politique agricole commune? *LISST - Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires*, 2020.
- Adrien Fabre. Tie-breaking the highest median : alternatives to the majority judgment. *Social Choice and Welfare*, pages 1–24, 2020.
- Peyman Faratin. *Automated service negotiation between autonomous computational agents*. PhD thesis, Queen Mary University of London, 2000.
- Governo Federal. Plano de manejo da reserva extrativista do Cazumbá-Iracema, Brésil. 2007.
- Viviane Stern da Fonseca-Kruel and Ariane Luna Peixoto. Etnobotânica na reserva extrativista marinha de Arraial do Cabo, RJ, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 18(1) :177–190, 2004.
- E. Fredline and B. Faulkner. International market analysis of wildlife tourism. *WILDLIFE TOURISM RESEARCH REPORT SERIES*, 22, 2001. URL http://sustain.pata.org/wp-content/uploads/2014/12/WT22_Fredline-IntlMkts.pdf.
- Silvio O Funtowicz and Jerome R Ravetz. The emergence of post-normal science. In *Science, politics and morality*, pages 85–123. Springer, 1993.

- Pedro Gajardo, Maximiliano Olivares, and Héctor Ramírez. Methods for the sustainable rebuilding of overexploited natural resources. *Environmental Modeling & Assessment*, 23(6) :713–727, 2018.
- Claude A Garcia, Jérémy Vendé, Nanaya Konerira, Jenu Kalla, Michelle Nay, Anne Dray, Maëlle Delay, Patrick O Waeber, Natasha Stoudmann, Arshiya Bose, et al. Coffee, farmers, and trees—shifting rights accelerates changing landscapes. *Forests*, 11(4) :480, 2020.
- Serge M Garcia and Richard JR Grainger. Gloom and doom? the future of marine capture fisheries. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 360(1453) :21–46, 2005.
- Brendan J Godley, Annette C Broderick, and Graeme C Hays. Nesting of green turtles (*Chelonia mydas*) at Ascension Island, South Atlantic. *Biological Conservation*, 97(2) :151–158, 2001.
- Eric Gordon and Steven Schirra. Playing with empathy : digital role-playing games in public meetings. In *Proceedings of the 5th International Conference on Communities and Technologies*, pages 179–185, 2011.
- H Scott Gordon. The economic theory of a common-property resource : the fishery. In *Classic papers in natural resource economics*, pages 178–203. Springer, 1954.
- Garrett Hardin. The tragedy of the commons. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1(3) : 243–253, 1968.
- Graham Houghton. Environmental justice and the sustainable city. *Journal of planning education and research*, 18(3) :233–243, 1999.
- John R Hendrickson. The green sea turtle, *Chelonia mydas* (Linn.) in Malaya and Sarawak. In *Proceedings of the Zoological Society of London*, volume 130, pages 455–535. Wiley Online Library, 1958.
- James W Hikins. Through the rhetorical looking-glass : Consensus theory and fairy tales in the epistemology of communication—a reply to Bineham. 1989.
- Frances R Homans and James E Wilen. A model of regulated open access resource use. *Journal of Environmental Economics and Management*, 32(1) :1–21, 1997.
- Alfredo Kingo Oyama Homma. *A extração de recursos naturais renováveis : o caso do extrativismo vegetal na Amazônia*. UFV, 1989.
- Laure Hossard, Marie Hélène Jeuffroy, Elise Pelzer, Xavier Pinochet, and Veronique Souchere. A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Environmental modelling & software*, 48 :17–26, 2013.
- Johan Huizinga. *Homo ludens*. Random House, 1938.
- Ségolène Humann-Guillemot, Lukasz J Binkowski, Lukas Jenni, Gabriele Hilke, Gaétan Glauser, and Fabrice Helfenstein. A nation-wide survey of neonicotinoid insecticides in agricultural land with implications for agri-environment schemes. *Journal of Applied Ecology*, 56(7) :1502–1514, 2019.
- Renee A Irvin and John Stansbury. Citizen participation in decision making : is it worth the effort? *Public administration review*, 64(1) :55–65, 2004.
- Marta de Azevedo Irving. Áreas protegidas e inclusão social : uma equação possível em políticas públicas de proteção da natureza no Brasil. *Sinais Sociais*, 4(12) :122–147, 2010.
- Marta de Azevedo Irving. Parcs nationaux au Brésil. une interprétation du contexte de la gestion et des défis en politiques publiques. *Revue d'ethnoécologie*, (1), 2012.
- Marta de Azevedo Irving. Sustentabilidade e o futuro que não queremos : polissemias, controvérsias e a construção de sociedades sustentáveis. *Sinais Sociais, Rio de Janeiro*, 9(26) :13–38, 2014.

- Marta de Azevedo Irving, Felipe Cozzolino, Claudia Fragelli, and Altair Sancho. Governança e políticas públicas : desafios para gestão de parques nacionais no Brasil. *Políticas ambientales y gobernabilidad en America Latina*, pages 79–103, 2007.
- Simona Isabella. Ethnography of online role-playing games : The role of virtual and real contest in the construction of the field. In *Forum Qualitative Sozialforschung/Forum : Qualitative Social Research*, volume 8, 2007.
- Silvio Jablonski and Martinus Filet. Coastal management in Brazil—a political riddle. *Ocean & Coastal Management*, 51(7) :536–543, 2008.
- Nicholas R Jennings, Peyman Faratin, Alessio R Lomuscio, Simon Parsons, Carles Sierra, and Michael Wooldridge. Automated negotiation : prospects, methods and challenges. *International Journal of Group Decision and Negotiation*, 10(2) :199–215, 2001.
- Diego Juffe-Bignoli, Neil D Burgess, H Bingham, EMS Belle, MG De Lima, M Deguignet, Bastian Bertzky, AN Milam, J Martinez-Lopez, E Lewis, et al. Protected planet report 2014. *UNEP-WCMC : Cambridge, UK*, 11, 2014.
- Antonis Kakas and Pavlos Moraitis. Adaptive agent negotiation via argumentation. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 384–391, 2006.
- Martin Kenney. *Understanding Silicon Valley : The anatomy of an entrepreneurial region*. Stanford University Press, 2000.
- Robert F Kenny and Glenda A Gunter. Endogenous fantasy-based serious games : Intrinsic motivation and learning. *International Journal of Social Sciences*, 2(1) :8–13, 2007.
- Gregory E Kersten. Nego—group decision support system. *Information & Management*, 8(5) :237–246, 1985.
- Setareh Khalilian, Rainer Froese, Alexander Proelss, and Till Requate. Designed for failure : a critique of the common fisheries policy of the european union. *Marine Policy*, 34(6) :1178–1182, 2010.
- Tom Kompas, Tuong Nhu Che, and R Quentin Grafton. Technical efficiency effects of input controls : evidence from Australia’s banana prawn fishery. *Applied economics*, 36(15) :1631–1641, 2004.
- JB Krawczyk and A Pharo. Viability kernel approximation, analysis and simulation application—vikaasa code. *URL : <http://socsol.github.io/vikaasa>*, 2014.
- J Stephen Lansing and James N Kremer. Emergent properties of balinese water temple networks : coadaptation on a rugged fitness landscape. In *SANTA FE INSTITUTE STUDIES IN THE SCIENCES OF COMPLEXITY-PROCEEDINGS VOLUME-*, volume 17, pages 201–201. ADDISON-WESLEY PUBLISHING CO, 1994.
- François Lavallée. Model, exploration, viability theory for management support of invasive species, 2020.
- Christophe Le Page, Patrick D’Aquino, Michel Etienne, and François Bousquet. Processus participatifs de conception et d’usage de simulations multi-agents : application à la gestion des ressources renouvelables. Lavoisier, 2004.
- Bugonia Leandro, do Valle (UFRJ) Rogerio, de Aragão Bastos, and Maria Virginia Petryb. Marine debris and human impacts on sea turtles in southern Brazil. *Marine Pollution Bulletin, Volume 42, Issue 12*, pages 1330–1334, December 2001.
- Bun Song Lee. Measurement of capital depreciation within the Japanese fishing fleet. *the Review of Economics and Statistics*, pages 225–237, 1978.
- Jonathan Lenoir. Table de mann-whitney, 2013. <https://jonathanlenoir.files.wordpress.com/2013/12/tables-mann-whitney-wilcoxon-kruskal-wallis.pdf>.

- Paul E Little. Os conflitos socioambientais : um campo de estudo e de ação política. *A difícil sustentabilidade : política energética e conflitos ambientais*. Rio de Janeiro : Garamond, pages 107–122, 2001.
- William Forster Lloyd. *Two lectures on the checks to population*. 1833.
- Carlos Frederico Bernardo Loureiro. Sustentabilidade e educação ambiental : controvérsias e caminhos do caso brasileiro. *Sinais Sociais*, 9(26) :13–38, 2014.
- Reinhard Madlener and Yasin Sunak. Impacts of urbanization on urban structures and energy demand : What can we learn for urban energy planning and urbanization management ? *Sustainable Cities and Society*, 1(1) :45–53, 2011.
- John N Maidens, Shahab Kaynama, Ian M Mitchell, Meeko MK Oishi, and Guy A Dumont. Lagrangian methods for approximating the viability kernel in high-dimensional systems. *Automatica*, 49(7) : 2017–2029, 2013.
- N Gregory Mankiw. *Principles of economics*. Cengage Learning, 2014.
- Gianluca Manzo. Potentialités et limites de la simulation multi-agents : une introduction. *Revue française de sociologie*, 55(4) :653–688, 2014.
- Chaloupka M Marcovaldi Mangela. Conservation status of the loggerhead sea turtle in Brazil : an encouraging outlook. *Endangers Species Research*, 3, 2007. URL <https://www.int-res.com/articles/esr2007/3/n003p133.pdf>.
- Sophie Martin. The cost of restoration as a way of defining resilience : a viability approach applied to a model of lake eutrophication. *Ecology and Society*, 9(2), 2004.
- Vincent Martinet and Luc Doyen. Sustainability of an economy with an exhaustible resource : A viable control approach. *Resource and energy economics*, 29(1) :17–39, 2007.
- Joan Martinez-Alier. *The Environmentalism of the poor : a study of ecological conflicts and valuation*. Edward Elgar Publishing, 2003.
- Desta Mebratu. Sustainability and sustainable development : historical and conceptual review. *Environmental impact assessment review*, 18(6) :493–520, 1998.
- Berenice M.G. Gallo, Suami Macedo, Henrique De B. Giffoni, Bruno JoseAND Becker, and Paulo C.R. Barate. Sea turtle conservation in Ubatuba, southeastern Brazil, a feeding area with incidental capture in coastal fisheries. *Chelonian Conservation and Biology*, 5 :93–101, 2006.
- Clémence Moreau, Cécile Barnaud, and Raphaël Mathevet. Conciliate agriculture with landscape and biodiversity conservation : a role-playing game to explore trade-offs among ecosystem services through social learning. *Sustainability*, 11(2) :310, 2019.
- Kimberly T Murray. Characteristics and magnitude of sea turtle bycatch in us mid-Atlantic gillnet gear. *Endangered Species Research*, 8(3) :211–224, 2009.
- Roger B Myerson. Incentive compatibility and the bargaining problem. *Econometrica : journal of the Econometric Society*, pages 61–73, 1979.
- Tomoko Nemoto and David Beglar. Likert-scale questionnaires. In *JALT 2013 Conference Proceedings*, pages 1–8, 2014.
- Elinor Ostrom. *Governing the commons : The evolution of institutions for collective action*. Cambridge university press, 1990.
- Elinor Ostrom. Beyond markets and states : polycentric governance of complex economic systems. *American economic review*, 100(3) :641–72, 2010.
- Wassila Ouerdane, Nicolas Maudet, and Alexis Tsoukias. Argument schemes and critical questions for decision aiding process. *FRONTIERS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND APPLICATIONS*, 172 :285, 2008.

- Claudia Pahl-Wostl and Jan Sendzimir. The relationship between IWRM and adaptive water management. 2005.
- Delroy L Paulhus. Measurement and control of response bias. 1991.
- M Nils Peterson, Markus J Peterson, and Tarla Rai Peterson. Conservation and the myth of consensus. *Conservation biology*, 19(3) :762–767, 2005.
- Gerhard Petschel-Held, Hans-Joachim Schellnhuber, Thomas Bruckner, Ferenc L Toth, and Klaus Hasselmann. The tolerable windows approach : theoretical and methodological foundations. *Climatic Change*, 41(3-4) :303–331, 1999.
- Alina Pommeranz, Willem-Paul Brinkman, Pascal Wiggers, Joost Broekens, and Catholijn M Jonker. Design guidelines for negotiation support systems : An expert perspective using scenarios. In *VTT symposium*, volume 258, pages 323–330, 2009.
- Marcelo Firpo Porto. Saúde do trabalhador e o desafio ambiental : contribuições do enfoque ecossocial, da ecologia política e do movimento pela justiça ambiental. *Ciência & Saúde Coletiva*, 10 :829–839, 2005.
- Arvind Rangaswamy and G Richard Shell. Using computers to realize joint gains in negotiations : toward an “electronic bargaining table”. *Management science*, 43(8) :1147–1163, 1997.
- Yolanda A Rankin, McKenzie McNeal, Marcus W Shute, and Bruce Gooch. User centered game design : evaluating massive multiplayer online role playing games for second language acquisition. In *Proceedings of the 2008 ACM SIGGRAPH symposium on Video games*, pages 43–49, 2008.
- Michael Redclift. Sustainable development (1987–2005) : an oxymoron comes of age. *Sustainable development*, 13(4) :212–227, 2005.
- Jean-Pierre Regourd. *Apprentissage autonome et intelligence artificielle*. PhD thesis, 1987.
- Rodolphe Sabatier, Lawrence G Oates, and RD Jackson. Management flexibility of a grassland agroecosystem : A modeling approach based on viability theory. *Agricultural Systems*, 139 :76–81, 2015.
- Patrick Saint-Pierre. Approximation of the viability kernel. *Applied Mathematics and Optimization*, 29(2) :187–209, 1994.
- Maryane Vieira Saisse. Sustentabilidade e justiça social. *Sinais Sociais, Rio de Janeiro*, 9(26) :97–121, 2014.
- Susan M Sanchez, Paul J Sánchez, and Hong Wan. Work smarter, not harder : a tutorial on designing and conducting simulation experiments. In *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*, pages 237–251. IEEE, 2018.
- Ludimila Lima Santana. Biologia reprodutiva da Ostra-do-mangue *Crassostrea Rhizophorae* (guilding, 1828)(bivalvia : ostreidae) em manguezais da comunidade de Capanema, Maragogipe–BA. 2018.
- Claudio Santos. Crítica ao esvaziamento da educação escolar. *Salvador : EDUNEB*, 2013.
- Benjamin Scheibehenne, Rainer Greifeneder, and Peter M Todd. Can there ever be too many options ? a meta-analytic review of choice overload. *Journal of consumer research*, 37(3) :409–425, 2010.
- Martial Schtickzelle. Pierre-François Verhulst (1804-1849). La première découverte de la fonction logistique. *Population (French Edition)*, 36(3) :541–556, 1981. ISSN 00324663, 19577966. URL <http://www.jstor.org/stable/1532620>.
- Christina AD Semeniuk, Wolfgang Haider, Andrew Cooper, and Kristina D Rothley. A linked model of animal ecology and human behavior for the management of wildlife tourism. *Ecological Modelling*, 221(22) :2699–2713, 2010.
- N Seube, R Moitie, and G Leitmann. Aircraft take-off in windshear : a viability approach. *Set-Valued Analysis*, 8(1-2) :163–180, 2000.

- Wei Shang, Yijun Li, and Wenjun Sun. A practical web-based nss framework for e-business negotiation. In *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 36b–36b. IEEE, 2005.
- Mariette Sicard, Cédric Baudrit, Marie-Noëlle Leclerc-Perlat, Pierre-Henri Wullemmin, and Nathalie Perrot. Expert knowledge integration to model complex food processes. application on the camembert cheese ripening process. *Expert Systems with Applications*, 38(9) :11804–11812, 2011.
- Mariette Sicard, Nathalie Perrot, Romain Reuillon, Salma Mesmoudi, Isabelle Alvarez, and Sophie Martin. A viability approach to control food processes : Application to a camembert cheese ripening process. *Food Control*, 23(2) :312–319, 2012.
- Georg Simmel. L’individu et la société dans certaines conceptions de l’existence du XVIII et XIX siècle. 1917.
- DG Soares. Conflito, ação coletiva e luta por direitos na baía de Guanabara, 2012.
- Véronique Souchère, Laurent Millair, Javier Echeverria, François Bousquet, Christophe Le Page, and Michel Etienne. Co-constructing with stakeholders a role-playing game to initiate collective management of erosive runoff risks at the watershed scale. *Environmental Modelling & Software*, 25(11) : 1359–1370, 2010.
- Raymond J Spiteri, Dinesh K Pai, and Uri M Ascher. Programming and control of robots by means of differential algebraic inequalities. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(2) :135–145, 2000.
- Caroline Tardivo. *La modélisation collaborative pour stimuler l’émergence d’un système agricole plus durable. Conception et mise en oeuvre d’une démarche sur le plateau de Valensole*. PhD thesis, AgroParisTech, 2016.
- Ernest M Thiessen and Andrea Soberg. Smartsettle described with the montreal taxonomy. *Group Decision and Negotiation*, 12(2) :165, 2003.
- Amos Tversky. Intransitivity of preferences. *Psychological review*, 76(1) :31, 1969.
- Sybille Van den Hove. Approches participatives pour la gouvernance en matière de développement durable : une analyse en termes d’effets. *Gouvernance et développement durable, Bâle/Genève/Munich, Helbing & Lichtenhahn*, pages 53–89, 2001.
- Srdjan Vesic. *Preference-based argumentation frameworks : application in decision making and negotiation*. PhD thesis, 2011.
- Alexey Voinov, Nagesh Kolagani, Michael K McCall, Pierre D Glynn, Marit E Kragt, Frank O Ostermann, Suzanne A Pierce, and Palaniappan Ramu. Modelling with stakeholders–next generation. *Environmental Modelling & Software*, 77 :196–220, 2016.
- Alexey Voinov, Karen Jenni, Steven Gray, Nagesh Kolagani, Pierre D Glynn, Pierre Bommel, Christina Prell, Moira Zellner, Michael Paolisso, Rebecca Jordan, et al. Tools and methods in participatory modeling : Selecting the right tool for the job. *Environmental Modelling & Software*, 109 :232–255, 2018.
- Ronald R Yager. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, 18(1) :183–190, 1988.
- Lotfi A Zadeh. Making computers think like people [fuzzy set theory]. *IEEE spectrum*, 21(8) :26–32, 1984.
- Laetitia Zaleski, Isabelle Alvarez, Jean-Pierre Briot, and Marta de Azevedo Irving. Viaduc : Un assistant de viabilité pour la négociation dans un éco-socio-système. In *17èmes Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle (RJCIA 2019)*, pages 43–53, 2019.
- Andréa Zhouri and Klemens Laschefski. *Desenvolvimento e conflitos ambientais*. Editora Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2010.

Andréa Zhouri, Klemens Laschefski, and D Pereira. Conflitos sociais e meio ambiente urbano. *Série Documenta*, 1 :1-8, 2007.

Annexe A

Fiches de rôles du scénario agricole

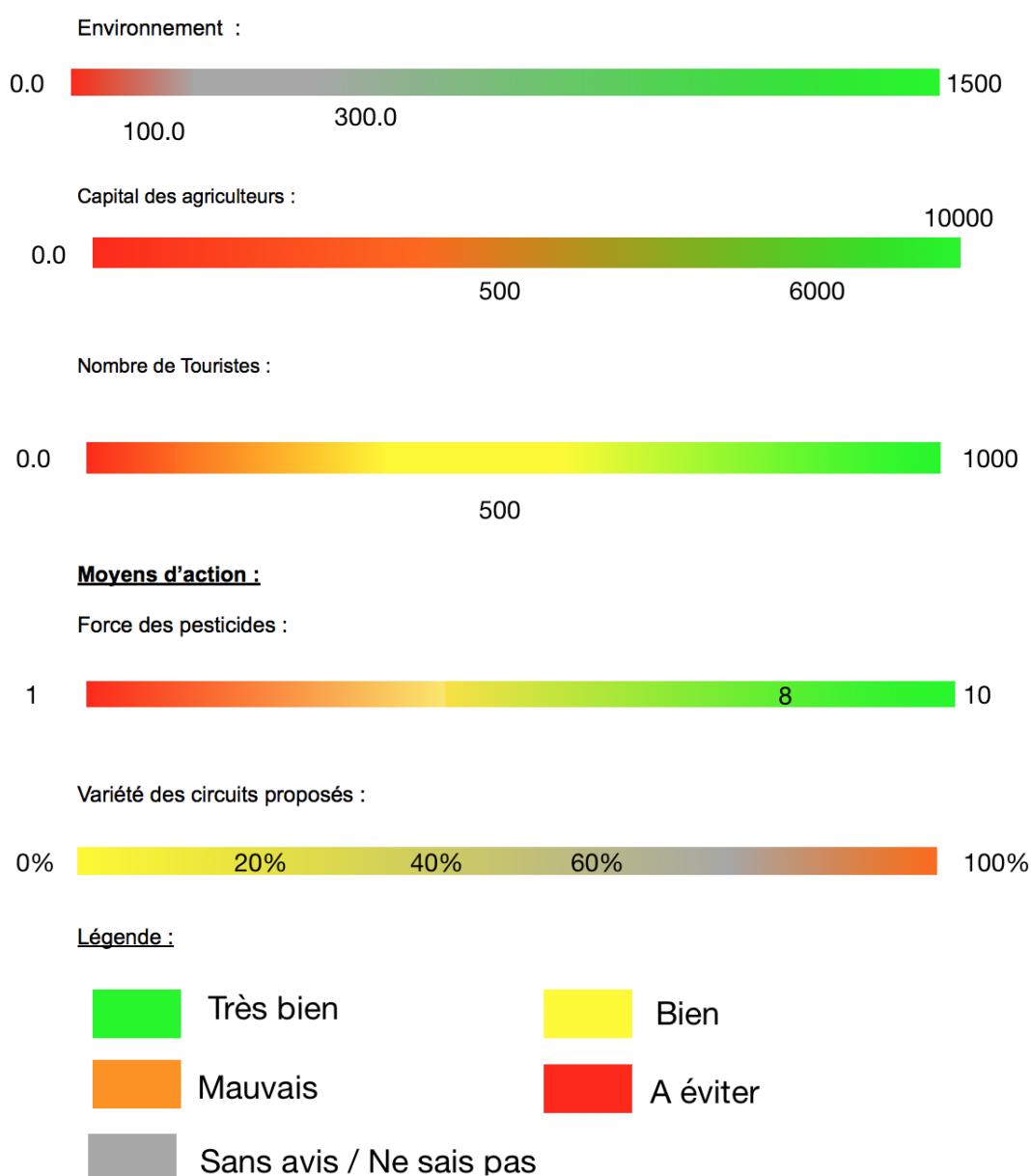


FIGURE A.1 – Fiche du rôle agriculteur dans le scénario agricole.

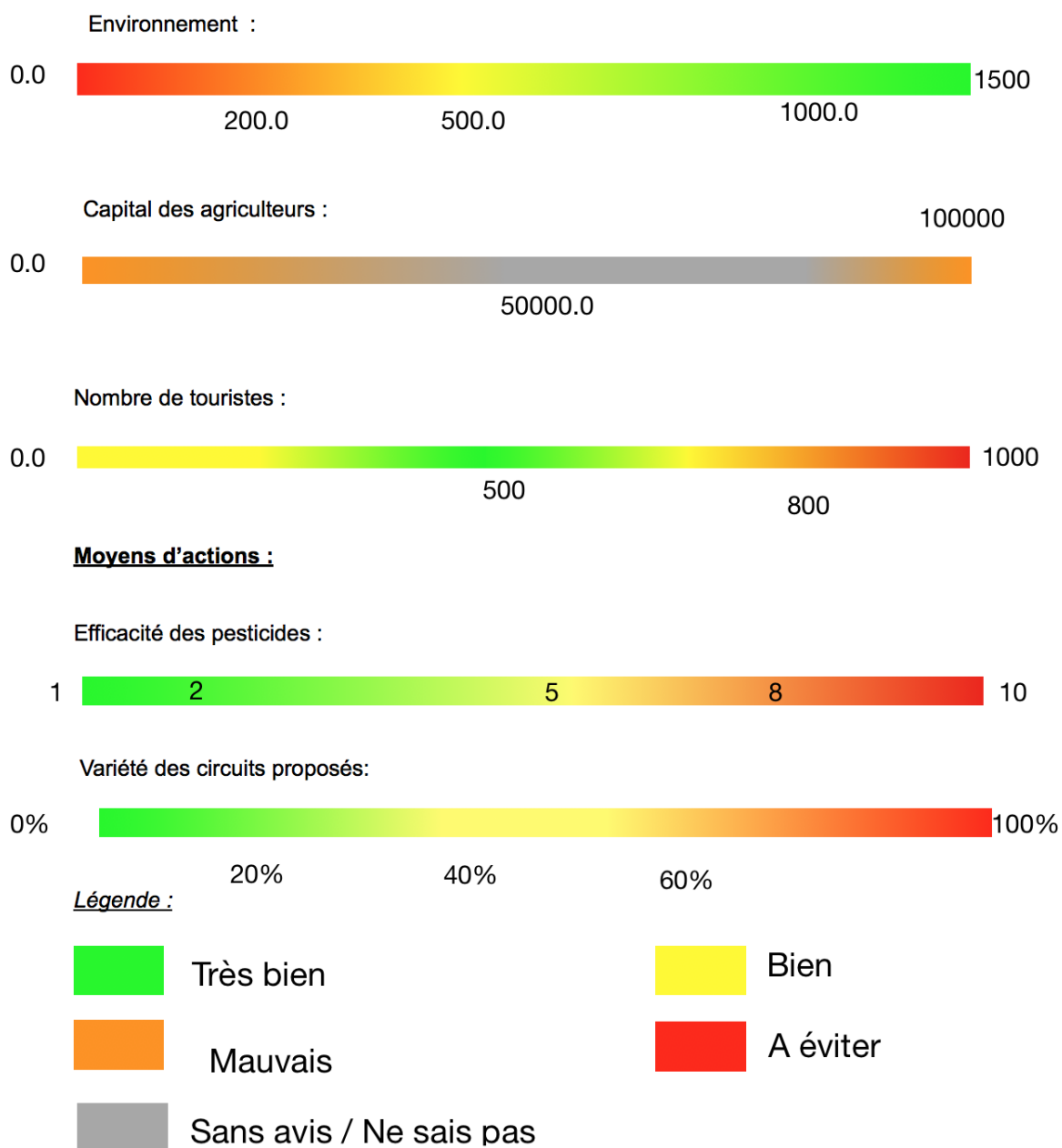


FIGURE A.2 – Fiche du rôle écologiste dans le scénario agricole.



FIGURE A.3 – Fiche du rôle opérateur de tourisme dans le scénario agricole.

Annexe B

Questionnaires

B.1 Premier questionnaire

Adresse mail*

Nom

Prénom

Genre*

Âge*

Secteur d'activité*

Avez-vous une expérience antérieure dans les jeux de ce type ? (gestion environnementale)*

Oui

Non

Si oui précisez :

Rôle pendant la partie :*

Opérateur de tourisme

Écologiste

Agriculteur / Pêcheur

Quel est votre degré de satisfaction par rapport au jeu ?*

1 : Pas du tout satisfait 6 : très satisfait

Selon vous, quels sont les points positifs et négatifs du jeu :*

Quelles ont été les principales difficultés pendant cette session de jeu ?*

Selon vous, y a-t-il (au moins) un joueur qui a fait plus de concessions que les autres ?*

oui

non

Si oui, quel était son rôle :
 Opérateur de tourisme
 Agriculteur / Pêcheur
 Écologiste

Selon vous, quels étaient les objectifs des autres joueurs (pêcheur/agriculteur, écologiste et opérateur de tourisme) ?*

Quel est votre degré de satisfaction par rapport à la proposition finale ?*
 1 : La proposition ne me convient pas du tout 6 : La proposition finale me convient tout à fait

Selon vous, la proposition finale était elle équitable ?*
 oui
 non

Qu'avez vous retenu de ce jeu en ce qui concerne la gestion de l'environnement ?*

Quelle stratégie proposez-vous concernant le tourisme ?*
 Par exemple : autoriser uniquement les petits groupes de touristes avec un guide, développer un système de navettes depuis l'aéroport jusqu'à la réserve,...

Quelle stratégie proposez vous concernant la gestion des populations vivant de l'exploitation de l'environnement (agriculteurs / pêcheurs) ?*
 Par exemple, proposer une taxe à payer par les touristes et reversée aux pêcheurs, imposer des quotas de pêche...

Seriez vous intéressé pour rejouer avec un autre rôle ?*
 oui
 non

Selon vous, quelle sont les pistes d'améliorations de ce jeu ?

Avez vous des remarques ?

B.2 Questionnaire comparatif

Adresse mail*

Lequel des logiciels testé vous semble le plus pertinent pour la prise de décision individuelle ?*
 Viaduc
 Plutôt Viaduc
 Bridge
 Plutôt Bridge
 Les deux se valent sur ce point
 Je ne sais pas

Pourquoi ?*

Lequel des logiciels testé vous semble le plus pertinent pour la prise de décision collective ?*

Viaduc

Plutôt Viaduc

Bridge

Plutôt Bridge

Les deux se valent sur ce point

Je ne sais pas

Pourquoi ?*

Lequel des logiciels testés vous semble le plus intéressant pédagogiquement ?*

Bridge

Plutôt Bridge

Viaduc

Plutôt Viaduc

Les deux se valent sur ce point

Je ne sais pas

Pourquoi ?*

Laquelle des sessions avez vous le plus appréciée ?*

La session de Viaduc

Plutôt la session de Viaduc

La session de Bridge

Plutôt la session de Bridge

Je ne sais pas

Les deux se valent sur ce point

Pourquoi ?*

Parmi les solutions trouvées à la fin de Viaduc et Bridge, laquelle est selon vous la plus pertinente ?*

La solution de Bridge

Plutôt la solution de Bridge

La solution de Viaduc

Plutôt la solution de Viaduc

Les deux solutions se valent

Je ne sais pas

Pourquoi ?*

Parmi les solutions trouvées à la fin de Viaduc et Bridge, laquelle est selon vous la plus satisfaisante par rapport à votre rôle ?*

La solution de Bridge

Plutôt la solution de Bridge

La solution de Viaduc

Plutôt la solution de Viaduc

Je ne sais pas

Les deux solutions se valent

Pourquoi ?*

Quels sont, selon vous, les avantages et inconvénients de chaque logiciel par rapport à l'autre ?*

Pouvez-vous penser à d'autres scénarios (autre que tourisme agricole et réserve marine) dans lesquels des logiciels de ce type pourraient être utiles ?*

Quelle est, selon vous, la fonctionnalité la plus utile des deux logiciels (qu'elle apparaisse dans l'un, l'autre ou dans les deux en même temps) ?*

Annexe C

Appel de l'exécutable ViabLab dans Viaduc

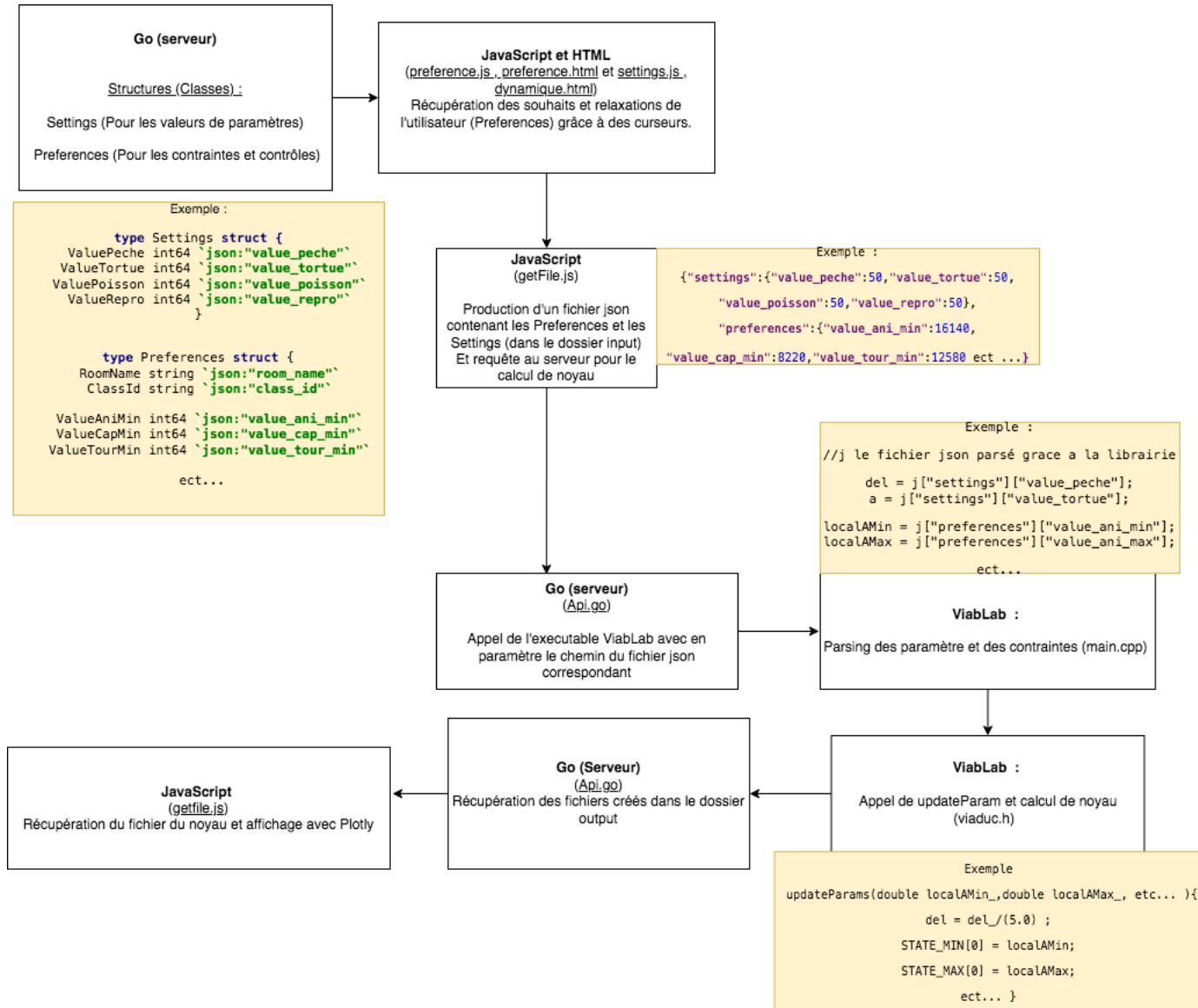


FIGURE C.1 – Fonctionnement de l'appel de ViabLab pour le calcul de noyaux dans Viaduc.