



TÉMOIGNAGE

Gestion des risques liés à la rouille orangée du caféier (*Hemileia vastatrix*) en Amérique centrale : apports de simulations interactives en distanciel

Grégoire Leclerc^{1,2,3}, Pierre Bommel^{2,4}, Natacha Motisi^{5,6,7}, Rémi Vezy^{8,9},
Edwin Treminio¹⁰, Jacques Avelino^{5,6,7}

¹ CIRAD, UMR SENS, Lima, Pérou, gregoire.leclerc@cirad.fr

² UMR SENS, Univ Montpellier, CIRAD, France

³ ICRAF, Lima, Pérou

⁴ CIRAD, UMR SENS, F-34398 Montpellier, France

⁵ CIRAD, UMR PHIM, 30501 Turrialba, Costa Rica

⁶ PHIM, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, IRD, Montpellier, France

⁷ CATIE, 30501 Turrialba, Costa Rica

⁸ CIRAD, UMR AMAP, Montpellier, France

⁹ AMAP, Univ Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, France

¹⁰ IICA, Nicaragua

Résumé

Les épidémies de rouille orangée du caféier (ROC) entraînent des crises socio-économiques qui menacent la durabilité des territoires de production de café en Amérique Centrale. Nous présentons le processus de co-construction d'un modèle de prévision de la ROC et sa mise en œuvre lors d'ateliers participatifs de simulation interactive (SI) visant à renforcer les capacités des acteurs de la caféiculture pour faire face à la ROC. Basée sur un modèle de croissance du caféier et de la ROC, ce modèle fait évoluer un système caféier-ROC en fonction de la météorologie. Dans le contexte de l'agriculture familiale, les participants disposent de capacités réduites les obligeant à la parcimonie pour lutter contre la ROC.

La SI a dû être virtualisée en raison de la pandémie de Covid-19, ce qui a nécessité des compromis sur les échanges entre participants mais les objectifs d'apprentissage ont été atteints. La virtualisation a permis une participation étendue, des économies substantielles, une meilleure gestion du temps, une prise en compte des opinions individuelles, le débriefing à chaud et la traçabilité des décisions. Plus contraignante, la virtualisation est aussi une opportunité pour améliorer nos pratiques de SI.

Mots clés : Café, Système multi-agent, Jeux sérieux, Modélisation d'accompagnement, Systèmes d'alerte.

Abstract Coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) risk management in Central America: contribution of remote interactive simulations

Central America has experienced numerous coffee leaf rust (CLR) epidemics that have led to severe crises that threaten the sustainability of coffee growing territories. The project Procagica (2016-2021) established a regional early warning system to prevent CLR-related socio-economic crises.

We present the co-design of a CLR forecast model and its use in interactive simulation (IS) participatory workshops aimed at raising awareness among coffee stakeholders in Central America about the complexity of managing CLR epidemics. Based on a coffee shrub growth model integrating the CLR life cycle, the model makes the coffee-CLR system evolve according to climatic

factors. To reflect the stressed context of family farming, the participants have limited economic capacities, which forces them to make parsimonious decisions when fighting the CLR disease. Territorial aspects are addressed through the dissemination of spores over long distances, and through the debate between the institutions of different countries.

Initially planned as a face-to-face regional workshop, the IS had to be virtualized due to the Covid-19 pandemic. Videoconferencing required compromises on the flexibility of the process and the quality of verbal and non-verbal communication between participants. However, the learning and awareness objectives of the workshop were achieved. Virtualization enables an extended participation (40 participants from 8 countries) and substantial savings, better time management, better consideration of individual opinions, debriefing during the simulation, and traceability of decisions. On the other hand, multi-directional communication between participants was reduced, which could be compensated for by parallel virtual exchanges in small groups. While more constraining, virtualization is also an opportunity to improve our practices of IS.

Keywords: Coffee, Agent-based model, Serious games, Companion modelling, Warning system.

Introduction

Depuis 2003, l'Amérique latine a connu de nombreuses épidémies de rouille orangée du caféier (ROC) sur *Coffea arabica* qui ont entraîné de graves crises socio-économiques, notamment en 2012, et qui menacent toujours la caféiculture mondiale (Rhiney et al., 2021). Le caféier Arabica est à la fois la plus sensible à la ROC des espèces cultivées et la principale source de revenus de nombreux petits exploitants de la région. La ROC est due à *Hemileia vastatrix*, un champignon qui infecte les feuilles du caféier et provoque leur chute prématurée. Les épidémies graves peuvent favoriser la mort des branches, voire la mort de l'arbuste. Les épidémies de ROC entraînent des pertes de rendement primaires dans l'année en cours et des pertes de rendement secondaires les années suivantes (Cerdeira et al., 2017).

Face à ces enjeux, l'Union européenne a initié en 2016 le projet PROCAGICA (PROgrama CentroAmericano de Gestión Integral de la roya del Café) visant à mettre en place un réseau régional d'alerte, basé sur des systèmes nationaux renforcés en Amérique Centrale. La co-construction du réseau a nécessité la cartographie des acteurs impliqués dans la gestion des risques, le développement de modèles de pronostic de la ROC et des risques socio-économiques associés, ainsi que des ateliers de mises en situation pour l'analyse concertée du risque et des stratégies territoriales d'atténuation. Pour cela, nous avons conçu un simulateur informatique interactif pour tester, via des simulacres sous forme de jeux sérieux, les hypothèses de gestion et de gouvernance du réseau et faire les ajustements nécessaires.

Les jeux sérieux offrent une alternative aux approches traditionnelles de gestion en renforçant les compétences non techniques, comme la pensée critique, la résolution créative de problèmes et le travail d'équipe. Ils améliorent aussi le développement cognitif, l'acquisition des savoir-faire et l'apprentissage social (Le Page, 2017). Ils aident à prendre en compte les points de vue des acteurs, leurs priorités et leur contexte décisionnel. Ils contribuent aussi à des apprentissages individuels et des engagements collectifs pour l'action (Bécu et al., 2008). Les jeux sérieux basés sur les simulations informatiques ont montré leur potentiel pour la gestion de socio-agro-écosystèmes complexes (Crookall, 2010). Ces simulations interactives peuvent être classifiées en fonction de la place relative de l'ordinateur et du contrôle exercé par les participants (Crookall et al., 1986). Dans les simulations "Computer-Dependent", les participants ne peuvent qu'observer le déroulement d'une simulation sans agir dessus, alors que dans le cas de la "Computer-Based simulation" un joueur interagit en continu avec la simulation. Entre les deux, les "Computer-Controlled simulations" sont régulièrement interrompues pour proposer des temps de réflexion et de discussion entre les joueurs. Enfin, pour le type "Computer-Assisted", les joueurs n'interagissent pas directement avec la simulation car c'est l'animateur qui enregistre leurs décisions. La modélisation d'accompagnement (ComMod, 2005 ; Etienne, 2011) propose une manière originale

de mettre en œuvre des jeux sérieux en privilégiant la conception participative et l'animation de jeux de rôles, de jeux de plateau ou de simulations informatiques interactives (généralement de type "Computer-Controlled" ou "Computer-Assisted").

Souvent perçue comme trop limitée à des échelles locales, la modélisation d'accompagnement peut néanmoins faciliter la prise en compte des interdépendances entre stratégies nationales et locales, de même que les différences de nature et de reconnaissance des incertitudes entre niveaux de décision. Une manière de faire est de mettre en relation à une échelle territoriale, des jeux sérieux mis en œuvre à des échelles locales ; une autre est de créer un espace où acteurs nationaux et régionaux peuvent interagir en temps réel. Cette dernière approche a été testée en présentiel et en distanciel dans le cadre du projet Procagica pour mettre en relations des acteurs de 8 pays d'Amérique centrale et des Caraïbes, une première pour la modélisation d'accompagnement.

Approche

Notre approche par les jeux s'appuie sur le modèle de simulation MiRoya qui intègre l'état des connaissances sur la dynamique de la ROC et des caféiers. Outre sa dimension purement scientifique, MiRoya a été transformé, par un travail de co-construction interdisciplinaire, en un simulateur interactif multi-joueur destiné aux techniciens et aux responsables des instituts du café.

Étapes de développement du modèle MiRoya

MiRoya est un système multi-agent (SMA) qui permet de comprendre et d'évaluer le fonctionnement de la ROC et les paramètres qui influencent la propagation des épidémies. Basé sur un modèle du cycle de vie de la ROC et des caféiers (Figure 1), MiRoya simule la dynamique de la ROC et ses impacts en termes d'incidence (la proportion de feuilles atteintes) et de production de café. Le modèle intègre la chute des feuilles provoquée par la ROC ce qui en retour diminue le stock d'inoculum du pathogène. Il considère aussi l'apparition de jeunes feuilles saines avec, pour effet immédiat, la réduction de l'incidence de la ROC, mais aussi la mise à disposition de nouveaux sites d'infection pour le pathogène. Par ses effets sur la défoliation, la maladie réduit la production, particulièrement celle de l'année suivant l'épidémie. Elle réduit ainsi la réceptivité du caféier au pathogène, en raison de la relation positive, encore mal comprise, existant entre charge fructifère et incidence. Ce système complexe dépend également de la météorologie et des pratiques des caféiculteurs.

MiRoya permet de tester des hypothèses et d'explorer par simulation l'influence de différents paramètres sur les évolutions possibles du système café-ROC. Il ne s'agit pas d'une boule de cristal qui permettrait de prédire l'évolution exacte d'un système, mais plutôt d'un support analytique pour comprendre comment les relations entre un hôte et un parasite peuvent produire des trajectoires complexes et parfois contre-intuitives. C'est donc avant tout un outil d'aide à la réflexion qui permet aussi de tester l'efficacité des stratégies de gestion.

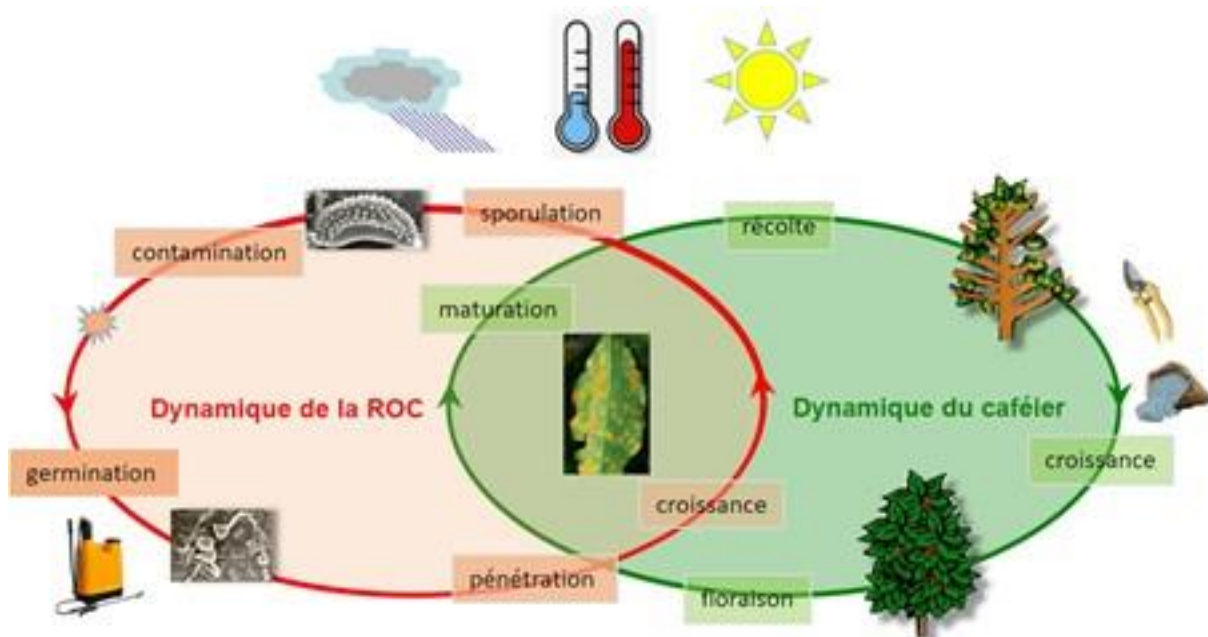


Figure 1 : Dynamiques couplées du caféier et de la rouille orangée du caféier (ROC), soumises toutes deux aux effets du climat et aux actions décidées par l'agriculteur : fertiliser, tailler le caféier, traitement fongicide, etc.

La première version du modèle représentait un territoire fictif offrant un gradient d'altitude divisé en trois zones : basse (entre 400 et 800 m), intermédiaire (800 - 1300 m) et haute (> 1300 m). Des agents caféiculteurs possédaient des petites exploitations (entre 1 à 8 ha) et un agent observateur mesurait l'incidence de ROC sur 10 parcelles choisies aléatoirement, simulant ainsi des activités de surveillance menées par les instituts du café (Figure 2).



Figure 2 : Version 1 de MiRoya. A droite : l'interface du jeu pour l'actions des joueurs. A gauche, haut : les incidences de rouille simulées dans les 3 zones ; en bas : les indices de défoliation. Au centre : la grille spatiale divisée en 3 zones d'altitude ; le gradient vert représente la défoliation des caféiers ; les parcelles en blanc sont celles dont l'incidence est mesurée par les services techniques.

Les mécanismes de la ROC et du caféier y étaient simplifiés et la météorologie était grossièrement simulée, mais la présentation de ce modèle lors d'ateliers nationaux a toutefois suscité des débats constructifs sur des mesures d'incidence et seuils d'alerte. Néanmoins, des experts se sont montrés sceptiques sur la validité du modèle qui ne reproduisait pas bien les observations de l'incidence de

la ROC mesurées sur le terrain. Dans MiRoya 2 le sous-modèle climatique a donc été remplacé par des données journalières météorologiques réelles et le modèle de la ROC complexifié. Pourtant l'incidence restait très sensible à la dynamique des feuilles, ce qui nous a poussé à coupler MiRoya à un modèle mécaniste éprouvé du caféier et ainsi concentrer nos efforts sur un modèle de la ROC plus robuste. Etant donnée la complexité technique et les temps de calcul, il a fallu éliminer la dimension spatiale pour ne représenter qu'un seul caféier par ferme. Le tableau 1 résume les caractéristiques des différentes versions du modèle MiRoya et la version 3 est décrite dans cet article.

Tableau 1 : Synthèse des fonctions intégrées aux versions successives du modèle MiRoya.

Version du modèle	Type	Granularité	Mécanismes	Actions
MiRoya 1	- Générique, - Faible degré de réalisme, - Spatialisé	- 3 zones altitudinales, 90 fermes (caféiers) - Pas de temps : semaine - Décisions : mois	- Météorologie : simulée - ROC : simple - Revenus de la ferme : proxy - Dimension spatiale : contamination de proche en proche	- Fongicides : approximation
MiRoya 2	- Générique / descriptif - Faible degré de réalisme, - Spatialisé	- 3 zones altitudinales, 90 fermes (caféiers) par pays - Une ferme (un caféier / parcelle) - Pas de temps : jour - Décisions : mois	- Météorologie : variables de forçage - ROC : complexe - Revenus de la ferme : proxy - Croissance caféier : simple - Production de café : approximation - Dimension spatiale : contamination par les fermes voisines et propagation des spores aux fermes voisines	- Fongicides : approximation - Fertilisation : approximation
MiRoya 3	Mécanismes descriptifs - Haut degré de réalisme, - Non spatialisé	- Non spatialisé - Une ferme (un caféier) - Pas de temps : jour - Décisions : mois	- Météorologie : variables de forçage - ROC : complexe - Croissance du caféier complexe (DynaCof) - Production de café réaliste (DynaCof) - Dimension spatiale : allo-infection externe, décisions régionales	- Fongicides systémiques ou de contact : réaliste - Taille : élimination de feuilles et ajustement du LAI - Fertilisation : approximation - Formation des producteurs à l'utilisation des fongicides et gestion de la ROC : approximation

Le simulateur interactif MiRoya 3

MiRoya 3 est un modèle SMA dans lequel des entités Producteur, Caféier et Feuilles sont spécifiquement représentées. Un agent producteur gère une parcelle sur laquelle croît un agent Caféier représentant l'ensemble des caféiers de la parcelle. Sa croissance opère par l'ajout de nouveaux agents Feuilles. Le pas de temps journalier active de nombreux mécanismes biophysiques dépendants de données météorologiques. Ces contraintes météorologiques influencent le système caféier-ROC composé des deux sous-modèles couplés : le cycle de vie de la ROC d'un côté et la croissance du caféier de l'autre.

Chaque "mois" simulé fournit aux participants du jeu la possibilité d'interagir avec ce système en proposant à l'agent producteur de tailler le caféier, de fertiliser ou d'appliquer des fongicides, dans les limites de ses capacités économiques. La dimension territoriale est prise en compte dans le modèle par l'arrivée de spores provenant d'autres parcelles, et dans le jeu par le débat entre acteurs de différentes disciplines et échelles d'action.

Cycle de vie de la rouille orangée du caféier

Le diagramme état-transition (formalisme UML) de la Figure 3 représente le cycle de vie de la ROC. Les 4 états consécutifs sont : Spore déposée (sur une feuille), Spore germée (avec son appressorium), Lésion non sporulante (appelée "Colonisation", à l'intérieur de la feuille) et Lésion sporulante (appelée "Pustule", avec des spores qui émergent). Le changement d'état (la transition) est déclenché par un événement météorologique dans la plupart des cas.

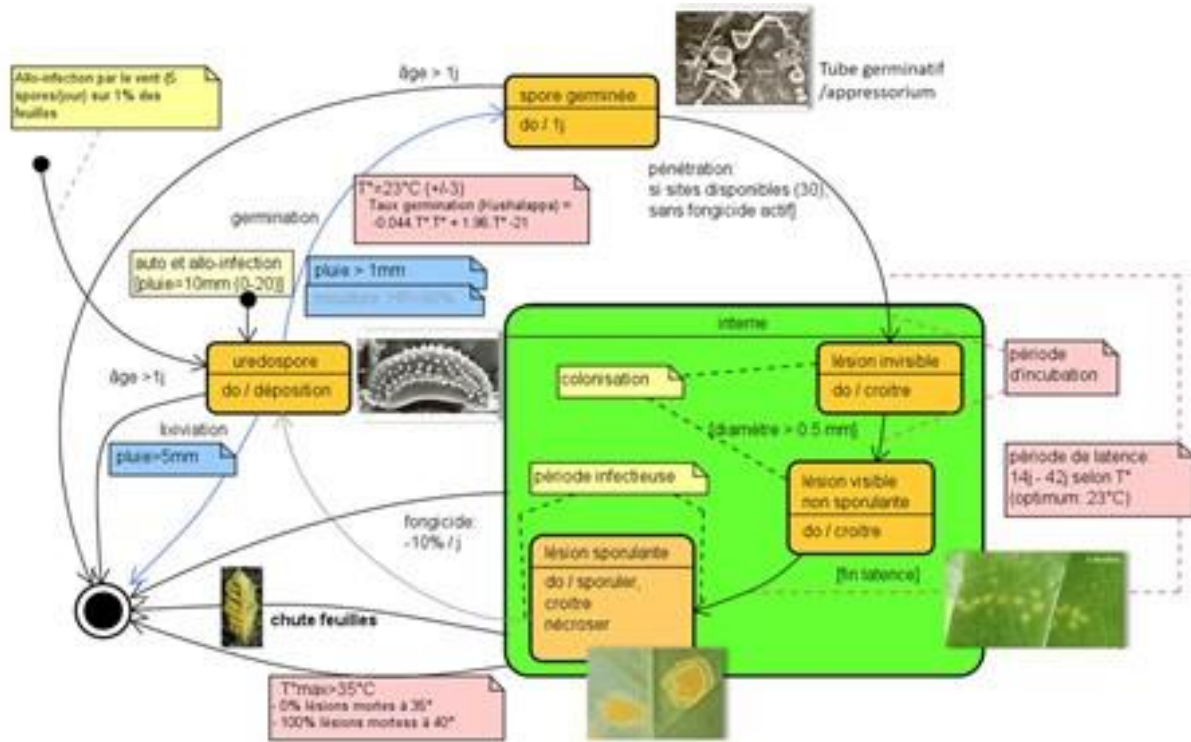


Figure 3 : Diagramme état-transition du cycle de vie de la rouille orangée du caféier.

Les états possibles de la ROC sont représentés par quatre attributs de chaque agent Feuille. Le modèle intègre le lessivage des spores par la pluie, leur propagation à l'échelle de la feuille, du caféier, donc de la parcelle (auto-infection), la contamination par des spores provenant d'autres parcelles (allo-infection, même très éloignées), la germination des spores et leur pénétration dans la feuille, la latence (durée nécessaire pour la production de nouvelles spores à partir d'une spore germée), la sporulation, et la mort des lésions par sénescence des feuilles saines ou malades.

Dynamique du caféier

Pour simuler la dynamique du caféier, MiRoya 3 utilise DynaCof, un modèle mathématique établi de croissance du caféier (Vezy et al., 2020) sous ombrage. Le modèle calcule la productivité primaire nette, l'allocation du carbone, la croissance, le rendement, le bilan énergétique et hydrique du caféier. Il considère des cohortes de fleurs et de fruits pour le développement reproductif afin de mieux représenter la distribution de la demande en carbone tout au long de l'année.

Implémentation du modèle

MiRoya est implémenté sur la plateforme Cormas (Bommel et al., 2015) et Dynacof en R. La surface foliaire constitue la seule information échangée entre ces deux sous-modèles sur un pas de temps d'une semaine.

Validation du modèle

Pour les modèles biophysiques il est important de comparer les sorties de simulation avec des

données observées. Nous avons calibré le modèle sur des données du Honduras (Figure 4a). Les réponses du modèle aux données actuellement disponibles semblent pertinentes. Ainsi, les incidences simulées coïncident avec les fluctuations observées (Figure 4b) et une incidence moyenne qui diminue avec l'altitude pour la plupart des pays d'Amérique centrale, un fait communément reconnu. Par contre au Salvador, en raison d'un régime climatique particulier, l'incidence augmente avec l'altitude, un phénomène que MiRoya 3 a su reproduire (courbe en rouge sur la Figure 4c), ce qui montre sa robustesse.

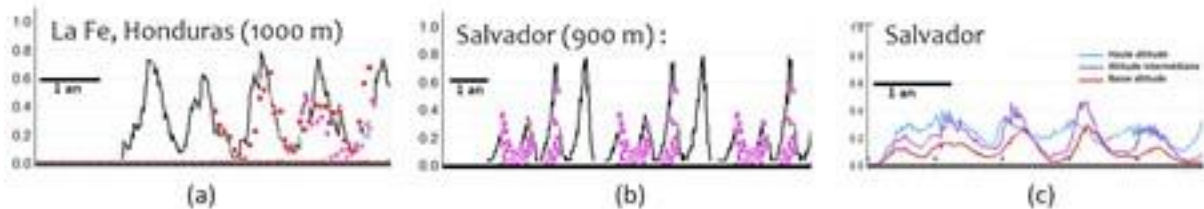


Figure 4 : Incidence de la rouille orangée du caféier (ROC) observée (points) et simulée (lignes). (a) Calibration pour La Fe (Honduras). (b) Résultats du modèle avec les données météorologiques du Salvador. (c) Variation des niveaux de ROC en fonction de l'altitude.

Interaction avec la simulation

Il est possible d'utiliser la simulation de manière interactive en autorisant des actions décidées par les participants. Le principe est de démarrer une simulation à partir de DynaCof (sous R) et de la faire tourner pendant un an sans interaction. On peut alors envoyer diverses instructions pour : simuler 1 semaine, 1 mois ou 1 année, ou pour fertiliser, améliorer la qualité des applications fongicides ou de la gestion de la plantation, appliquer un fongicide systémique ou de contact, ou enfin tailler les caféiers. Comme MiRoya 3 est un SMA, il est possible de suivre l'évolution de la ROC sur chaque feuille. Au total, plus d'une centaine d'indicateurs sont disponibles, mais seuls les plus importants sont visibles pour le jeu. Certaines limitations techniques dues au couplage MiRoya - DynaCof ont freiné le développement d'une interface usager ergonomique. Pour le moment diverses sorties sont assemblées sous forme d'un tableau de bord (Figure 5). Il est prévu de développer une interface similaire à celle des versions 1 et 2 (Figure 2) sous R-Shiny.

Conception du jeu sérieux

Le développement du jeu et du modèle MiRoya étant étroitement liés, il en existe donc plusieurs versions. Les premières séances de jeu en 2018 basées sur MiRoya 1 ont permis d'identifier les éléments à améliorer dans le modèle, les priorités des participants et les actions qu'ils étaient susceptibles de recommander. Le jeu s'est ensuite adapté aux évolutions du modèle.

Alors que le modèle MiRoya traite essentiellement du système biologique, le design du jeu s'appuie sur des leviers qui relèvent surtout de l'économie du comportement et de la socio-psychologie (Tableau 2).

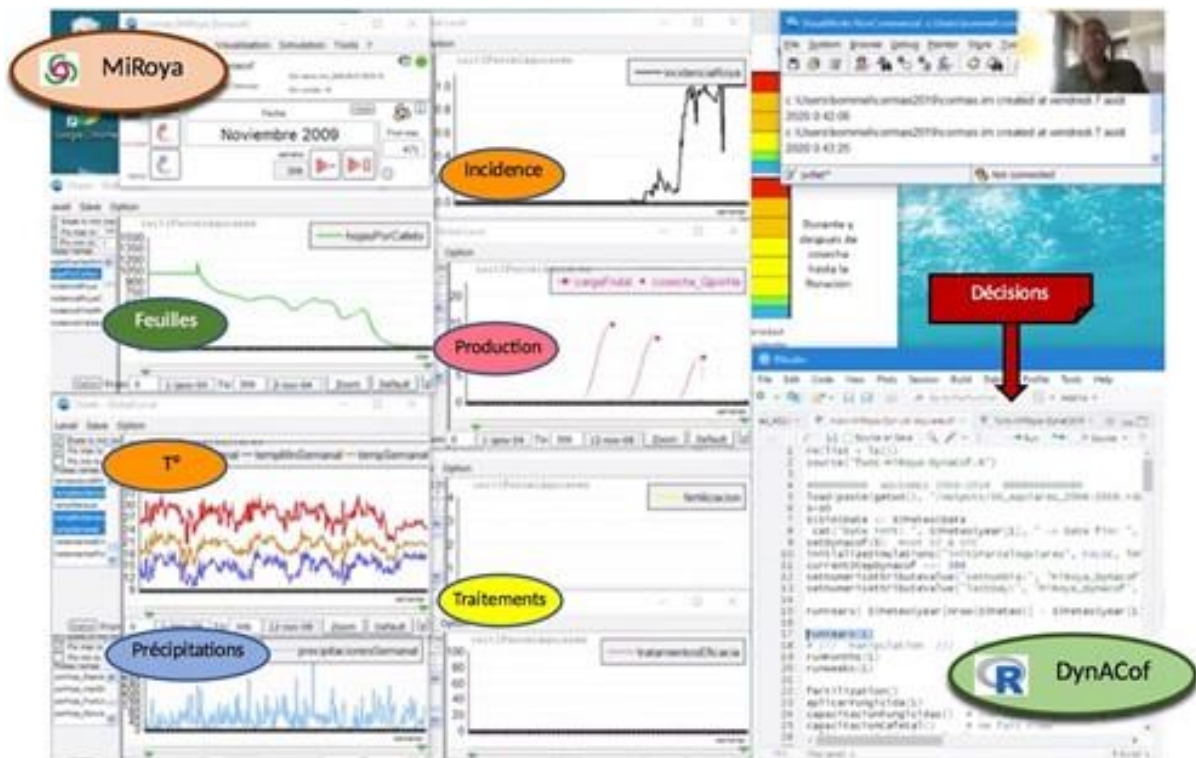


Figure 5 : Tableau de bord de MiRoya 3. On retrouve l'interface de Cormas avec MiRoya (coin supérieur gauche) et celle de DynACof sous R (coin inférieur droit), les indicateurs de suivi, la légende pour interpréter le niveau d'alerte.

Tableau 2 : Principaux leviers sur lesquels s'appuient les jeux sérieux selon leur type

Domaine	Leviers
Economie du comportement	Compétition, collaboration, coordination, incitation (« nudge »), travail d'équipe, communication.
	Contexte décisionnel, priorités, stratégies, impact des décisions, résolution créative de problèmes, complexité, aversion au risque
	Biais cognitif, émotions, jouer un rôle, jouer son rôle
Psycho-sociologie	Curiosité, déclics, valeurs.
	Pensée critique, points de vue, abstraction, lien avec le réel, mythes et réalités
	Apprentissage (individuel et collectif), développement cognitif, débriefings (cours de jeu, fin de jeu)
Autres facteurs	Fatigue, déficit d'attention, temps, qualité de la facilitation
	Ergonomie, courbe d'apprentissage (simplicité des règles)

Toutes les versions du jeu ont visé à mimer le contexte décisionnel de la surveillance de la ROC. Chaque mois les instituts du café émettent des avertissements sur la ROC à l'intention des

producteurs et recommandent généralement l'application de fongicides. Cette stratégie, si elle est la plus efficace pour contenir la maladie, n'est pas à la portée des petits producteurs. Elle a aussi des effets négatifs sur la santé et l'environnement, et nous voulions stimuler la réflexion sur des stratégies alternatives plus adaptatives et accessibles. Les participants devaient jouer collectivement (en séance plénière ou par groupes) le rôle d'un institut du café émettant des recommandations de pratiques à des petits caféiculteurs aux moyens financiers limités. Ces producteurs les plus vulnérables qui peuvent le moins appliquer les recommandations et accéder aux stratégies d'atténuation, risquent de délaisser leur plantation ou d'abandonner la culture du café. Un autre objectif du jeu est d'inciter une réflexion à plusieurs échelles pour stimuler une coopération régionale de lutte contre la ROC.

Le jeu a d'abord été conçu pour être utilisé dans le cadre d'ateliers en présentiel (Figure 6). Dans ces ateliers, nous avons alterné des séances en plénière et en groupes, utilisé des supports vidéo et papier, avec un simulateur installé sur un ou plusieurs ordinateurs. Chemin faisant, le facilitateur pouvait prendre le pouls de la salle et adapter la dynamique en conséquence. Les séances ont été documentées par des photos et des enregistrements audios. Mais la pandémie de Covid-19 nous a obligé à virtualiser les séances, notamment lors de l'atelier régional final sur la mise à l'épreuve du réseau régional d'alerte. Cela a demandé une réingénierie complète de l'approche en raison des contraintes et opportunités offertes par la plateforme de visioconférence Zoom et d'autres applications comme les formulaires en ligne Google.



Figure 6 : Séance de jeu en présentiel en atelier national au Salvador (06/12/2018) où deux équipes mettent à l'épreuve leur capacité à gérer la ROC via une simulation interactive avec MiRoya 2. Les scores sont alors comparés et les stratégies gagnantes et perdantes discutées. Les chercheurs sont animateurs, mais les restitutions effectuées par les participants.

Les caractéristiques des différents jeux développés sont résumées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques des différentes versions du jeu mises en œuvre pendant le processus de consolidation du réseau régional d'alerte.

	Ateliers nationaux présentiel (5)	Atelier régional présentiel	Atelier régional virtuel
Plateau de jeu	Plénière avec 2 équipes (2 simulateurs identiques) : compétition sur la meilleure stratégie pour contrôler la rouille orangée du caféier	6 équipes-pays (chacun avec 1 simulateur et météorologie du pays) ; pas de compétition : échanges d'information sur les niveaux de rouille orangée du caféier à l'échelle régionale	1 équipe multi pays, un simulateur partagé ; compétition : faire mieux que le scénario blanc pour contrôler la rouille orangée du caféier
Nombre de participants et fonctions	10-25 : inspecteurs phytosanitaires, fermiers, météorologues	29 : inspecteurs phytosanitaires, météorologues, inspecteurs sécurité alimentaire, planificateurs	40 : inspecteurs phytosanitaires, météorologues, inspecteurs sécurité alimentaire, planificateurs
Version de MiRoya	Alfa, beta, V1	V2	V3
Actions	Fongicides	Fongicides ; fertilisation ; rédaction de bulletins d'alerte	Fongicides systémiques ou de contact ; fertilisation ; taille des caféiers ; formation aux fongicides et à la gestion ; réunions
Débriefing en cours de jeu	Non	Non	Vote zoom
Communication	- Discussions dans l'équipe - Plénière	- Discussions dans l'équipe - Courrier électronique aux autres équipes - Bulletins d'information - Restitution en plénière	- Chat (global ou privé) - Plénière
Temps	2 heures	2 heures	1h30
Nombre de tours de jeu interactifs (en mois)	12, 24	5	24
Débriefing en fin de séance du jeu	- Débat plénière	- Débat plénière	- Débat plénière - Formulaire Google
Interconnaissance des participants	- Tour de table - Liste de présence	- Tour de table - Liste de présence -tags	- Tour de table (noms dans la fenêtre zoom) - Formulaire Google - Liste de présence
Documentation de la séance de jeu	- Prise de notes - Photos - Enregistrement audio - Rapport	- Prise de notes - Photos - Enregistrement audio - Rapport	- Prise de notes - Enregistrement vidéo - Transcription chat - Formulaire Google - Rapport

Structure d'une séance du jeu sérieux en distanciel

Dans sa version en distanciel sur la plateforme de visioconférence Zoom et avec les formulaires Google, la séance de jeu comprend des volets sur l'interconnaissance des participants, la description du modèle, les règles du jeu, et le débriefing.

a. Profil des participants

Les participants répondent à un questionnaire en ligne avant le déroulement de l'atelier, afin d'établir leur profil et d'adapter la facilitation.

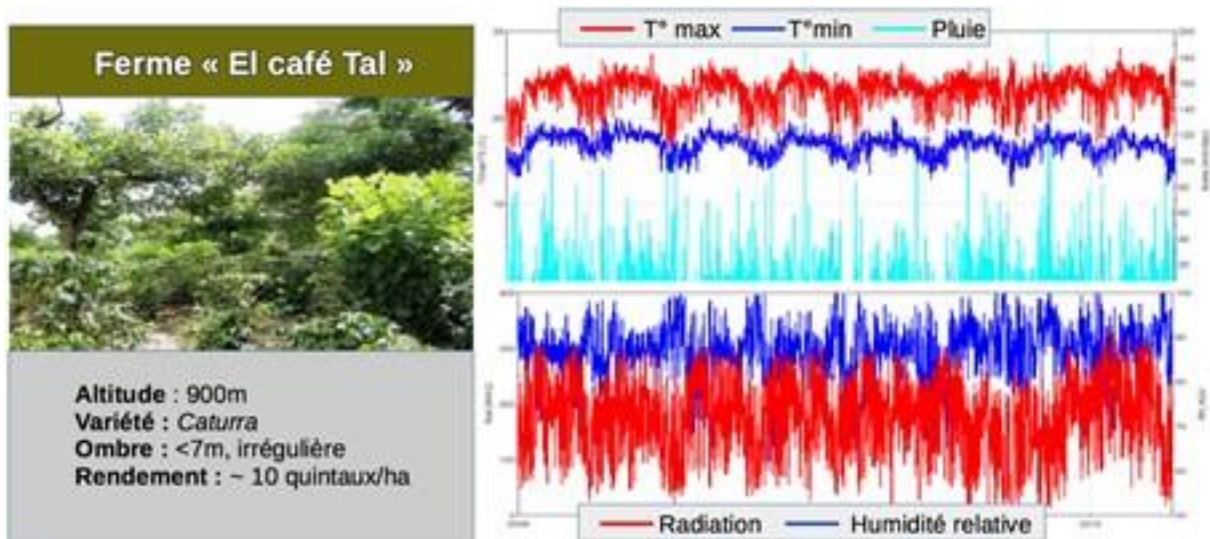
b. Premier temps (15 minutes) : Description détaillée de MiRoya 3

Le modélisateur présente MiRoya 3, en rappelle l'objectif, sa structure, sa validation et l'importance de l'allo-infection, ce qui permet d'affirmer sa légitimité scientifique et d'évacuer les questions techniques qui ralentiraient le déroulement du jeu.

c. Deuxième temps (10 minutes) : les règles du jeu

Le facilitateur explique d'abord la mise en situation, les règles du jeu et son déroulement, puis démarre une simulation à blanc non interactive, suivie d'une simulation interactive. Les animateurs fournissent un appui aux participants via le chat.

Ensuite, le facilitateur (hôte Zoom) présente et distribue via le chat une fiche signalétique simple de la ferme qui sera gérée par le collectif (Fig. 7).



Les participants doivent faire au plus une recommandation chaque mois parmi les actions suivantes (le signe « \$ » indique les actions qui ont un coût pour l'agriculteur et, ses ressources étant limitées, l'agriculteur ne peut réaliser que 3 de ces actions dans l'année) :

- Fertilisation (\$)
- Appliquer un fongicide préventif avec une certaine efficacité (\$)
- Appliquer un fongicide systémique avec une certaine efficacité (\$)
- Taille du caféier à 25%
- Taille du caféier à 50%

- Formation à la gestion des fongicides qui augmente l'efficacité des traitements fongicides
- Former à la gestion optimale des plantations de café
- Ne rien faire

Pour cela le facilitateur ouvre un vote virtuel, chacun sélectionne une recommandation dans la liste, puis le modélisateur applique ce que la majorité recommande.

A la fin de la récolte, le facilitateur donne la parole aux acteurs régionaux qui font une analyse de la situation. Un participant peut aussi demander une réunion au niveau régional à tout moment. Si la ROC augmente de façon exponentielle, le facilitateur ouvre alors un vote pour les acteurs régionaux qui doivent décider d'une action à recommander entre les 4 actions suivantes :

- Coordonner l'émission d'un décret d'urgence dans les pays.
- Organiser une réunion avec les bailleurs de fonds.
- Élaborer un plan régional pour la culture du café.
- Mobiliser de l'aide alimentaire.

d. Troisième temps : le déroulement de la partie (1h)

Pendant toute cette phase, l'écran du modélisateur est partagé afin que tous les participants puissent voir les interfaces du simulateur.

Simulation à blanc : le modélisateur lance une simulation qui permet de suivre l'évolution mensuelle de la plantation depuis la mise en terre jusqu'à ce que les plants aient 4 ans, dans le cas où le producteur ne fait rien sur sa plantation. Initialement, les jeunes plants sont indemnes de ROC, par contre il y a une probabilité de 1% par semaine d'allo-infection par le vent. Les participants se familiarisent avec l'interface, les graphiques sont décrits : incidence de ROC, état du caféier (nombre de feuilles), météorologie, etc. Les résultats sont enregistrés afin de les comparer avec la simulation interactive.

Simulation interactive : le modélisateur fait d'abord tourner 2 ans de simulation avec exactement les mêmes paramètres que la simulation blanche. En année 3, avant chaque mois :

1. Les animateurs rappellent le mois en cours et expliquent les indicateurs
2. Le facilitateur ouvre le vote (1 minute - comme dans la vraie vie, le temps est compté)
3. Le modélisateur choisit l'action au vote majoritaire et l'applique au modèle
4. Le modélisateur fait tourner un mois de simulation, puis retour au point 1.

Après chaque récolte, le facilitateur donne la parole aux acteurs régionaux qui analysent la situation, ou ouvre un vote qui leur est spécifique dans le cas où se profile une crise de ROC dans la région.

Débriefing en cours de séance du jeu : le facilitateur peut lancer un vote à tout moment pour sonder les émotions vécues par les participants. Cela permet une rétro-alimentation en cours de séance et d'analyser, ex-post, les effets provoqués par le jeu.

e. Quatrième temps : débriefing après la séance de jeu

Juste après la séance, le facilitateur invite les participants à remplir un formulaire en ligne pour le débriefing à chaud. Il comprend des questions sur les émotions vécues par les participants et leur niveau d'implication, sur les effets déclic et l'apprentissage, la comparaison entre le jeu et la réalité et l'utilité du jeu pour la gestion des crises.

Déroulement d'une séance de jeu en distanciel

La séance de jeu avec Zoom s'est déroulée le 7/8/2020 (Figure 8) dans le cadre d'un atelier régional, avec 40 participants et 5 animateurs (auteurs de cet article) provenant de 8 pays, acteurs des ministères de l'agriculture et instituts du café, mais aussi d'institutions nationales chargées de la planification, la météorologie, la gestion des risques ou de la sécurité alimentaire, et de réseaux, projets ou organisations régionales en charge du café (PROMECAFE), de la sécurité alimentaire (FEWSNET) et de la surveillance phytosanitaire (OIRSA). Tous les participants savaient utiliser Zoom.

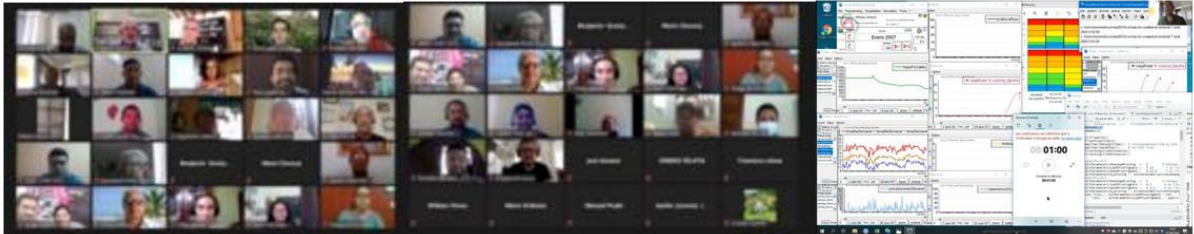


Figure 8 : Captures d'écran de la séance du 7/8/20. Les visages ont été floutés pour cet article.

Simulation à blanc (10 minutes)

Le modélisateur a d'abord fait tourner la première simulation mois par mois à partir d'un caféier jeune et sans ROC, expliquant l'évolution des divers indicateurs. Initialement le caféier perd une partie de ses feuilles, ce qui s'explique par l'allocation de l'énergie aux fruits plutôt qu'aux feuilles. La ROC apparaît en année 2 et augmente brusquement pour atteindre des niveaux critiques (jusqu'à 100% de feuilles atteintes) mais la récolte de l'année en cours est sauvée car l'impact de la maladie est tardif. Les animateurs précisent que la prochaine récolte, celle de l'année 3, risque d'être catastrophique vu le haut niveau de défoliation liée à la ROC en année 2 (pertes secondaires). Cette simulation a aussi permis de démontrer l'importance de l'allo-infection de plantes saines par le vent, un facteur territorial déterminant.

Simulation interactive (1h10)

La simulation a ensuite été reprise dans exactement les mêmes conditions, en année 3, mais avec l'objectif d'éviter la crise en année 4. Le modélisateur déroule la simulation pendant 2 ans, puis mois par mois en appliquant les actions décidées par la majorité des participants sur la base des indicateurs. Une seule minute a été allouée au vote et 70% des participants ont voté.

En année 3, mois par mois entre janvier et mai, tout en échangeant via le chat, les participants choisissent successivement la Formation sur la gestion de la plantation, La taille du caféier à 25%, la Formation aux fongicides, la Fertilisation (\$), l'Application d'un fongicide de contact ou systémique (\$) et une nouvelle Fertilisation (\$). La ROC apparaît en mai avec une incidence négligeable, et le producteur n'a plus les moyens d'appliquer un fongicide ou des engrais. Le groupe décide de poursuivre la simulation (sans actions) pour aller plus vite et passer à l'année 4 tout en commentant l'évolution des indicateurs mois par mois. En octobre, l'incidence de la ROC atteint 3% (niveau d'alerte faible) mais le producteur n'a plus les moyens financiers de la contrôler. En fin d'année la récolte, plus précoce que l'année précédente, est très bonne (13 quintaux/ha), la ROC est de 15% (niveau d'alerte faible). Les participants manifestent leur satisfaction pour ces excellents résultats. Les acteurs régionaux interviennent en séance plénière, soulignant l'importance d'une bonne gestion de la plantation et du renforcement des capacités des producteurs.

En début d'année 4, la majorité de participants choisissent la Formation en gestion de la plantation. L'incidence de la ROC est de 30% fin janvier (alerte rouge). Un animateur mentionne qu'une telle situation a été vécue au Costa Rica en 2018, mais aussi en 2012 lors de la plus grande crise de ROC de la région. Entre février et mai, ils choisissent successivement d'Appliquer un fongicide systémique (\$), de Fertiliser (\$), et de nouveau Appliquer un fongicide systémique (\$). L'incidence

de la ROC passe en six mois de 30% à 45%, avec une baisse à 11% en avril. Fin mai, les fruits commencent juste à se former, la saison des pluies a démarré. La ROC remonte à 45% (malgré les 2 applications de fongicides) et le producteur n'a plus le moyen d'appliquer d'autres fongicides ni d'engrais.

A ce moment clé, le facilitateur décide d'ouvrir un vote de débriefing en cours de séance, puis un vote des acteurs régionaux, qui priorisent alors le plan régional pour la caféiculture et la coordination de décrets d'état d'urgence dans les pays. Il est décidé de poursuivre la simulation jusqu'à la récolte car le temps imparti pour la simulation est presque épuisé.

Fin juin, l'incidence de la ROC atteint 50%. Un animateur souligne qu'il y aura des impacts économiques importants, au moins 25% de pertes primaires en fin d'année et plus de pertes secondaires l'année suivante, et que ce sont des actions d'atténuation de type socio-économiques qui s'imposent. Les participants réagissent fortement via le chat, notamment sur le sentiment de frustration de ne pas avoir pu maîtriser la ROC par manque de moyens. Ensuite, l'incidence de la ROC baisse à 30% puis remonte et se stabilise à 100% à partir d'août. La récolte est encore bonne mais un animateur rappelle que la production de l'année suivante sera nulle car le caféier n'a pratiquement plus de feuilles.

Débriefing collectif à chaud (10 minutes)

Un court débriefing en fin de séance du jeu (plénière en visioconférence et par chat) a permis de recueillir les réactions à chaud des participants sur les résultats des simulations à blanc et interactive. Si la récolte a pu être améliorée légèrement par les pratiques, il n'a pas été possible de maintenir le niveau de ROC à un niveau acceptable, et il existe un risque réel de crise socio-économique l'année suivante que les mesures phytosanitaires seules ne permettent pas d'éviter. Il serait donc nécessaire de mettre en œuvre des mesures socio-économiques d'atténuation. Ce résultat contribue à l'argumentaire en faveur des programmes nationaux de rénovation des caféières avec des variétés résistantes à la ROC.

Débriefing individuel après la séance de jeu

Dans la foulée de la séance du jeu, 15 participants ont rempli le formulaire en ligne permettant de structurer le débriefing.

Les émotions vécues ont été diverses pendant et après la séance. Les sentiments d'avoir appris et de faire partie de quelque chose d'important ont prédominé, mais plusieurs joueurs ont aussi indiqué avoir été stressés ou angoissés. Personne n'a mentionné s'être ennuyé, être insatisfait ou avoir perdu son temps pendant ou après la séance. 67% des participants ont considéré avoir joué un rôle moteur ou proactif et aucun n'a jugé n'être qu'un simple observateur. Ils ont considéré à 82% le jeu comme très utile voire déterminant. Certains participants ont mentionné avoir été frappés par la complexité de la gestion ainsi que la difficulté du choix parcimonieux et irréversible en situation d'incertitude, notamment l'importance pour le producteur de prendre la bonne décision au bon moment.

Un aspect important du débriefing de jeux sérieux est le retour vers le réel. Les participants ont souligné le fait que le jeu intègre bien les variables du système ROC-Caféier, l'évolution de l'incidence de la ROC dans le temps et comment elle affecte le caféier et la production, de même que la difficulté de la contrôler. Il leur a semblé que le jeu fait bien ressortir l'existence de différentes opinions et le décalage entre les recommandations techniques (la théorie) et la réalité du producteur (la pratique). Par contre, certains ont noté que le jeu simplifie trop une réalité faite d'une diversité de paysages, de climats, d'exploitations, de pratiques et de calendriers.

Les participants ont souligné l'importance de la surveillance phytosanitaire, du climat, et des variétés de café résistantes à la ROC, des facteurs qui sont déjà intégrés aux stratégies existantes des instituts du café. La séance de jeu a aussi montré la valeur d'une communication et coordination intersectorielle permanente, tant au niveau national que régional, avec à la clé des propositions de

plans de développement de la caféiculture à l'échelle des territoires intégrant une analyse des causes et effets de la ROC. Le besoin de renforcement des capacités des producteurs est ressorti afin qu'ils puissent mettre en œuvre une gestion adaptative efficace en phase avec les ressources économiques dont ils disposent.

Discussion

Une analyse rétrospective du processus de co-construction du modèle MiRoya permet de mettre en lumière certains moments clés et des bifurcations. L'objectif initial était d'obtenir rapidement un jeu afin de stimuler des débats sur la gestion des crises de ROC aux niveaux national et régional. Mais suite aux critiques de certains experts et malgré l'intérêt clairement affiché de la plupart des participants pour le jeu en l'état, le modèle sous-jacent s'est complexifié considérablement. Nous nous retrouvons donc face à un problème classique de la simulation participative, tiraillés entre le besoin de disposer rapidement d'outils efficaces et des demandes d'acteurs pour plus de réalisme. Ceci a nécessité une révision profonde du modèle MiRoya, notamment en déléguant la dynamique du caféier au modèle DynaCof. Ce couplage a demandé des compétences techniques pour faire communiquer la plateforme Cormas avec R. Il a aussi ralenti considérablement les simulations obligeant à ne considérer qu'un seul caféier par ferme alors que le jeu initial permettait de simuler un territoire. Ainsi, pour le dernier atelier virtuel, le modèle informatique MiRoya 3 a pu répondre aux exigences des experts, par contre il n'a pas été possible de développer une interface ergonomique à temps.

Malgré sa virtualisation, les objectifs fixés pour la séance de jeu ont été atteints. Le fait de ne pas pouvoir éviter une crise de ROC et le déclin économique d'un petit producteur, malgré tous les efforts des participants, a eu un effet déclencheur caractéristique des jeux sérieux. La plupart des principes de design des jeux sérieux ont pu être mobilisés, depuis la compétition et la collaboration, la communication, la prise de décision et ses impacts, l'incertitude et l'appréhension, les émotions et les déclics, ainsi que l'apprentissage.

Les résultats de la séance de jeu en distanciel peuvent être mis en perspective avec ceux des séances antérieures en présentiel, malgré les différences en termes de design du jeu ou de version du simulateur. Comme pour les précédentes, la séance virtuelle a suscité une participation très active et vivante, ainsi que des émotions dans les mêmes registres. Les disparités dans le choix des actions avaient été observées en présentiel comme en distanciel, et ce bien que la plupart des participants soient des experts de la culture du café et du traitement de la ROC, ce qui fait ressortir le caractère incertain de la décision. Si le débriefing a fait ressortir des éléments similaires en virtuel et présentiel, il a été plus riche en distanciel grâce au vote en cours de jeu et à l'utilisation d'un formulaire en ligne après le jeu. Aussi, il a été plus facile de maintenir une traçabilité de la participation pendant la séance de jeu en distanciel. Les contraintes de temps, de facilitation et d'appui technique aux participants ont été plus importantes en distanciel, ce qui a demandé une simplification du jeu, une stricte maîtrise du temps, et une standardisation des outils, au détriment de la créativité ou de l'adaptation. La communication verbale et non-verbale était aussi limitée. Alors qu'une séance de jeu d'une journée est envisageable en présentiel, ce n'est pas le cas en distanciel de par la fatigue occasionnée.

Nous avons anticipé qu'il y aurait des difficultés techniques liées à la virtualisation (certains participants étant connectés par téléphone depuis des zones rurales éloignées) mais ce n'a pas été le cas étant donné la simplicité d'utilisation et la stabilité de la plateforme Zoom, ainsi que l'expérience des participants avec cette même plateforme.

Conclusion

Le jeu présenté ici, bien qu'il s'appuie sur un simulateur complexe, reste simple et abstrait dans le sens où il traite d'une seule exploitation et de pratiques limitées, parmi une myriade d'autres situations. Cette simplicité, qui peut sembler limitante, pourrait bien être sa force (Meadows, 1999). L'acceptation du modèle par les experts, modèle qui se devait donc d'être réaliste pour être validé socialement, a été déterminante pour permettre cette distanciation et la mise en perspective du problème ainsi que la recherche de solutions robustes. En s'affranchissant des spécificités locales, le jeu a initié une réflexion à l'échelle régionale sur l'amélioration de la qualité de vie des producteurs par des pratiques plus adaptatives et parcimonieuses en termes d'intrants.

Plusieurs améliorations du modèle Miroya ont été suggérées lors du débriefing, notamment concernant l'ergonomie, l'introduction d'arbres d'ombrage, l'économie de l'exploitation et la planification des interventions sur la parcelle. Mais le plus important sera qu'il puisse être mobilisé facilement par les organisations de producteurs, les instituts du café, ministères et agences de développement, afin de mettre en débat et produire des stratégies robustes pour les petits producteurs, et ainsi contribuer à un développement territorial durable.

L'approche en distanciel a demandé des compromis sur la flexibilité du processus et la qualité de la communication verbale et non-verbale, sur la flexibilité dans le déroulement du jeu et la maîtrise du temps. Mais elle a permis une participation élargie et des économies substantielles par rapport à l'atelier régional présentiel initialement prévu. Elle a aussi facilité l'expression d'opinions individuelles, et un débriefing plus riche. Les plateformes de visioconférence sont en constante évolution, offrant de plus en plus d'outils pour faciliter le travail collaboratif, ce sont des atouts qui doivent être mis à profit pour les séances de jeu en distanciel.

La virtualisation s'est révélée une opportunité à saisir pour faire évoluer nos pratiques de modélisation d'accompagnement, notamment par une systématisation du débriefing. Le retour vers la "normale" post-covid-19 verra sûrement émerger une hybridation des ateliers participatifs, combinant temps, espaces, et outils réels et virtuels. Ce qui devrait permettre de concevoir des séances de jeu sur plusieurs jours et ainsi contribuer à produire les changements d'attitude à la source du changement social.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Union Européenne pour le financement du projet PROCAGICA (DCI-ALA/2015/365-17). Les remerciements vont aussi à René León-Gomez, secrétaire général de Promecafe ; aux instituts du café pour leur accueil et disposition à collaborer ; aux participants des ateliers pour leur enthousiasme et leurs apports constructifs pendant et après les séances de jeu.

Références bibliographiques

- Bécu N., Neef A., Schreinemachers P. et Sangkapitux C., 2008. Participatory computer simulation to support collective decision-making: Potential and limits of stakeholder involvement. *Land Use Policy*, 25(4) : 498-509.
- Bommel P., Becu, N., Le Page, C., Bousquet, F., 2015. Cormas, an Agent-Based simulation platform for coupling human decisions with computerized dynamics, in: *ISAGA 2015: Hybrid Simulation and Gaming in the Network Society*. Springer, p. 1-25.
- Bonté, B., 2011. Modélisation et simulation de l'interdépendance entre l'objet, l'observateur et le modèle de l'objet dans la Triade de Minsky. Application à la surveillance épidémiologique en santé animale. Modélisation et simulation. Thèse de doctorat, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. 244p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00719426>
- Cerda, R., Avelino, J., Gary, C., Tixier, P., Lechevallier, E., Allinne, C., 2017. Primary and Secondary Yield Losses Caused by Pests and Diseases: Assessment and Modeling in Coffee. *PloS One* 12(1) : e0169133. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169133>
- ComMod (Collectif), 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Nat. Sci. Soc.* 13(2) 165-168. DOI: 10.1051/nss:2005023
- Crookall, D., Allan M., Danny S., Coote A., 1986. Human and computer involvement in simulation. *Simulation & Games* 17 (3): 345-75.
- Crookall D., 2010. Serious games, debriefing, and simulation/gaming as a discipline. *Simulation and gaming*, 41 (6) : 898-920.
- Étienne M. (éd.), 2011. La modélisation d'accompagnement. Une démarche participative en appui au développement durable. Versailles : Editions Quae, Collection : Update Sciences & technologies, 367p.
- Le Page, C., 2017. Simulation multi-agent interactive : engager des populations locales dans la modélisation des socio-écosystèmes pour stimuler l'apprentissage social. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. 126p.
- Meadows, D.L., 1999. Learning to Be Simple: My Odyssey with Games. *Simulation & Gaming*, 30 (3) : 342-351.
- Minsky M.L., 1965. Matter, mind and models. In: *Proceedings of International Federation of Information Processing (IFIP) Congress*, Vol. 1: 45-49.
- Rhiney, K., Guido, Z., Knudson, C., Avelino, J., Bacon, C. M., Leclerc, G., Aime, C., Bebbler, D. P., 2021. Epidemics and the future of coffee production, *PNAS* 118 (27). <https://doi.org/10.1073/pnas.2023212118>
- Vezy R., le Maire G., Christina M., Georgiou S., Imbach P., Hidalgo H, Alfaro E., Blitz-Frayret C., Charbonnier F. Lehner P., Loustau D., Roupsard O., 2020. DynACof: a process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems. *Environmental Modelling & Software*, 124 : 104609. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104609>



Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.