

# From Local Actors to Leaf Protectors: A Collaborative Modeling Approach for Rethinking Tree Management and Protection Measures in Senegal's Groundnut Basin

E. Delay<sup>1,2,6\*†</sup>, L. Broutin<sup>1,2,4†</sup>, A. Fallot<sup>1,2</sup>, A. Perrotton<sup>3</sup>, A. Gonin<sup>4</sup>, and D. Masse<sup>5</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, UMR SENS, F-34398 Montpellier, France.

<sup>2</sup>SENS, CIRAD, IRD, Université de Paul Valéry Montpellier 3, Montpellier, France.

<sup>3</sup>Forêts et Sociétés, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

<sup>4</sup>Université Paris Nanterre, Laboratoire LAVUE, FR.

<sup>5</sup>IRD, Eco&Sols, Abidjan, Côte d'Ivoire.

<sup>6</sup>UMI UMMSCO, Université Cheick Anta Diop, Dakar, Sénégal.

\*Address correspondence to: [etienne.delay@cirad.fr](mailto:etienne.delay@cirad.fr)

†These authors contributed equally to this work.

## Abstract

How can a participatory simulation model contribute to understanding the socio-ecological dynamics and fostering innovative strategies for sustainable management of trees, crops, and pastoralism in the peanut basin?

In the agro-pastoral zones, the Sahelian ecosystems have undergone significant degradation, characterized by a reduction in tree cover, as a consequence of the droughts in the 1960s and 1990s. The peanut basin stands out for its positive interrelationships between trees, crops, and pastoralism. However, the regeneration of the *Faidherbia* park has declined since the major droughts. Through collaborative efforts with agro-pastoral farmers, we have developed a simulation model – The SAFIRE model : Simulation of Agents for Fertility, Integrated Energy, Food security, and Reforestation– that aims to unravel the complex social and ecological dynamics at play and explore potential strategies in partnership with local communities.

By exploring the results of the model co-designed with local stakeholders, we have identified more effective management strategies, as per the request of the local actors. However, more importantly, we have collectively questioned the conditions for improving tree cover and the viability of the socio-ecosystem, particularly in relation to the demand for firewood and local cereal for sustenance. This has prompted the stakeholders to engage in community-wide discussions and transform agro-pastoralists into leaf protectors.

# 1 Introduction

Il est treize heures, la brousse d'avril est vide et silencieuse. Aucun animal en vue, aucun Homme à l'horizon, presque aucun signe de vie. Difficile d'imaginer que ces espaces sableux verront se précipiter laboureurs et planteurs d'ici peu. Les arbres eux sont là, seules petites touches vertes dans ce paysage séché. Leur ombrage est précieux mais il faut affronter le soleil pendant de longues minutes pour s'y réfugier. Ils demeurent loin les uns des autres, de façon étonnamment régulière. Plus saisissant encore : leur taille. Ce n'est pas qu'ils soient bien grands, mais tous semblables. Ils ont sûrement tous le même âge ! Et si c'est le cas, ils finiront tous par mourir en même temps.

La région sahélienne a été le témoin d'une série de sécheresses dévastatrices s'étalant des années 1960 aux années 1990, ayant provoqué une dégradation substantielle de ses écosystèmes, en particulier par la réduction significative de leur couvert arboré [1]. Cette perte de couvert arboré a eu des conséquences néfastes, se traduisant par une diminution des services écosystémiques essentiels fournis à la population et à la biodiversité. Cependant, l'ampleur de cette perte de SE est d'autant plus préoccupante que la population de la région sahélienne ne cesse de croître rapidement [2]. Dans un contexte de pénurie, l'utilisation intensive des ressources naturelles par l'agriculture et l'élevage aggrave la dégradation des terres et de la fertilité des sols [3].

En 2018, un constat alarmant mettait en lumière le fait que près de 40% de la population mondiale était exposée aux conséquences de la dégradation des sols (Monique Barbut, Secrétaire exécutive de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification). Dans ce contexte, les enjeux liés à la conservation et à la restauration de la fertilité des sols demeurent cruciaux. C'est dans ce contexte qu'a émergé l'initiative "4 pour 1000" (4p1000) en 2015, une proposition visant à accroître la séquestration du carbone dans les sols agricoles, présentée comme une solution pour améliorer la fertilité des sols et contribuer à l'atténuation du changement climatique [4].

Ester Boserup (1965) a avancé l'idée que la baisse de la fertilité des sols pousse les agriculteurs à intensifier leurs pratiques. Les travaux antérieurs cherchant à établir des liens entre phénomènes sociaux et pratiques agricoles se sont souvent centrés sur l'intensification. Toutefois, dans le cadre du projet de recherche et développement DSCATT (Dynamique de la Séquestration du Carbone dans les sols des systèmes agricoles Tropicaux et Tempérés), qui s'inscrit dans l'initiative 4p1000, notre objectif était de comprendre les relations qu'entretiennent les populations locales du bassin arachidier sénégalais avec les arbres. Pour ce faire, nous avons examiné les usages des arbres et les pratiques de gestion des populations locales afin de construire un modèle de simulation co-construit: le modèle SAFIRE (Simulation of Agents for Fertility, Integrated Energy, Food security, and Reforestation). Cette approche s'inscrit dans un cadre de Modélisation d'accompagnement (ComMod) [5, 6] et d'Exploration d'accompagnement (ComExp) [**delay·comexp·2020**] visant à explorer collectivement les futurs possibles pour le territoire.

Dans le contexte de la gestion durable des terres, les options de restauration identifiées par les paysans sont étroitement liées à la surveillance des arbres pour réduire les risques de prédation par les populations avoisinantes. Deux pistes d'exploration ont émergé des échanges avec les communautés locales : l'influence de la surveillance déléguée aux agents des eaux et forêt, ainsi que les conditions de développement du parc arboré lorsque la surveillance reste sous la responsabilité de la population.

71 Cette étude vise à approfondir ces aspects dans le but de contribuer à une meilleure compréhension  
72 des pratiques de gestion durable des ressources naturelles et de la biodiversité dans un contexte  
73 sahélien en mutation.

## 74 2 Materials and Methods

75 Le Sommet de Rio en 1992 a marqué un tournant majeur dans la manière dont la gestion des  
76 ressources naturelles est perçue. Il a contribué à la démocratisation de la notion de gestion basée  
77 sur les communautés, favorisant le passage d’une vision autoritaire de la gestion des ressources à  
78 des approches plus intégrées [7]. Cette évolution a reconnu l’importance d’impliquer activement les  
79 parties prenantes locales dans la prise de décision et la gestion de leurs environnements naturels.  
80 Cependant, cette intégration des communautés dans les processus de gestion des ressources a en-  
81 gendré des défis complexes, notamment en ce qui concerne la co-construction de représentations et  
82 de compréhensions communes de ces environnements.

83 L’intégration des acteurs hétérogènes au sein de collectifs pour co-construire des modèles et des  
84 simulations s’est révélée être une réponse novatrice à ces défis. Complètement compatible avec la  
85 philosophie de la modélisation d’accompagnement, cette approche a donné naissance à des méthodes  
86 novatrices. Dans le cadre de nos travaux, nous avons animé des ateliers visant à élaborer une méthode  
87 d’anticipation que nous avons nommée ACARDI [8]. Cette méthode repose sur la collaboration  
88 étroite entre chercheurs et acteurs locaux, mettant en avant la co-construction de modèles et de  
89 simulations pour anticiper les évolutions des territoires. A l’issue du processus, nous étions face au  
90 premier Living-Lab de l’observatoire de Niakhar.

91 Après avoir mené des ateliers participatifs à Diohine, impliquant activement les acteurs locaux,  
92 nous avons identifié un certain nombre d’aspirations et de préoccupations spécifiques des populations  
93 pour leur territoire. Parmi celles-ci, l’aspiration au ”retour de la faune et de la flore” a retenu notre  
94 attention particulière. Pour explorer cette aspiration de manière plus approfondie, nous avons associé  
95 une démarche anthropologique à la co-construction d’un modèle de simulation. Cette section se  
96 penche sur notre approche et notre méthodologie visant à donner vie à cette aspiration, en combinant  
97 les aspects socio-culturels et les outils de modélisation pour une compréhension holistique.

### 98 2.1 Modelling for Empowerment - An Anthropological Approach to Par- 99 ticipatory Model Co-construction

100 La mise en œuvre des ateliers ACARDI a ouvert la voie à une phase cruciale de notre recherche,  
101 marquée par une immersion de trois mois à Diohine. Cette immersion a été conçue pour aller  
102 au-delà des discussions en atelier et a permis d’entreprendre un travail de collecte d’informations  
103 approfondi en utilisant des entretiens et l’observation participante. Cet investissement sur le terrain  
104 a été essentiel pour comprendre de manière plus nuancée les aspirations et les préoccupations des  
105 populations locales en matière de gestion de leurs territoires.

106 Au fil de ces entretiens et de l’observation participante, un processus de développement de  
107 modèles conceptuels a été enclenché, évoluant progressivement vers la création d’un modèle in-

108 formatique basé sur des agents. La co-construction de ces modèles a été une démarche collaborative  
109 et itérative, impliquant activement le groupe d’acteurs du Living-Lab de Diohine. Les acteurs locaux  
110 ont joué un rôle clé en discutant, en évaluant et en validant chaque aspect de ce modèle, contribuant  
111 ainsi à son ajustement pour refléter au mieux leurs réalités et leurs attentes.

112 Après une validation approfondie du modèle avec les acteurs locaux, dans une démarche qualifiée  
113 de validation à dire d’expert [9], nous avons entamé un travail d’exploration du modèle à l’aide de  
114 la plateforme OpenMole [10]. Cette phase d’exploration nous a permis de simuler divers scénarios  
115 et de recueillir des résultats significatifs, qui nécessitaient ensuite d’être présentés aux participants  
116 du Living-Lab pour recueillir leurs avis et approfondir la discussion. Pour faciliter cette étape  
117 cruciale, nous avons développé une interface interactive, conçue pour simplifier la manipulation et  
118 la validation de grandes quantités de données par les acteurs, tout en assurant une expérience fluide  
119 et collaborative.

120 ”mais en quoi l’expérience du voyage anthropologique propose t-elle de renouveler ou de  
121 reconsidérer l’épistémologie du déplacement (de l’un vers l’autre) ? Par-delà la consti-  
122 tution des objets des sciences sociales, ethnies, cultures, sociétés, en quoi le voyage du  
123 sujet est-il progressivement devenu vecteur de la réflexion théorique ? ”

## 124 2.2 ODD

125 Dans cette section nous allons décrire le modèle The SAFIRe model (Simulation of Agents for  
126 Fertility, Integrated Energy, Food security, and Reforestation) en utilisant le framework de description  
127 ODD [11–13].

### 128 2.2.1 Overview

#### 129 Purpose

130 The peanut basin is facing a loss of soil fertility. Chemical amendments are either unavailable in  
131 the area or economically inaccessible for farmers. Therefore, soil fertility depends on two aspects:  
132 the presence of livestock in the territory to maintain year-round manure, and the *Faidherbia albida*  
133 trees which play a fundamental role in crop cycles. Indeed, these trees have the unique characteristic  
134 of shedding their leaves during the growing season and fixing nitrogen from the air into the soil.

135 The model thus aims to evaluate and explore solutions for managing the *Faidherbia* park to  
136 increase their density. The model focuses on exploring so-called community initiatives.

137 The objective of this study was co-defined with the participants based on their desire to restore  
138 trees and biodiversity. According to their perspective, the decline in tree population is strongly  
139 linked to individual practices associated with pastoralism. Thus, the aim was to reassess the func-  
140 tioning of their system, the role of ”tree cutters,” and the optimization of surveillance by compar-  
141 ing community-based surveillance efforts with centralized surveillance conducted by them and the  
142 forestry department.

143

Throughout the study, we also examined the role of farmers and agro-pastoralists in the disappearance of trees. It was observed that young tree seedlings are no longer marked and destroyed by animal-drawn tools.

### **Entities, state variables and scales**

The entities in the model are relatively numerous: some are static (trees, plots, and village), while others are in motion (shepherds, farmers, woodcutters, and overseers).

patches : nbarbresici: Number of trees present on this patch; arbre-ici: Indicates if there is a tree on this patch (reference to a specific tree); tree-influence: Influence of the tree on this patch (can represent aspects like shade, nutrients affected by the tree, etc.); under-tree: (TRUE/FALSE) Indicates if the patch is under a tree; culture: Type of crop on this patch (can be millet or groundnut); en-culture: Indicates if the patch is currently used for crops; rendement-mil-g: Yield of millet on the patch in terms of grains (to be calibrated later); rendement-mil-p: Yield of millet on the patch in terms of bundles; rendement-groundnuts-g: Yield of groundnuts on the patch in terms of grains; rendement-groundnuts-p: Yield of groundnuts on the patch in terms of bundles; id-parcelle: Identifies the parcel, allowing the structure of the parcels to be maintained during rotation; pas-rotation: Tracks parcels that have not yet rotated (system of +1); rotation: (TRUE/FALSE) Indicates if the parcel has already undergone rotation; champ-brousse: Indicates if the patch is in bushland; zoné: (TRUE/FALSE) Indicates if the patch is used for defining fallow zones; zone: Indicates to which fallow rotation zone the patch belongs (there are 3 zones for fallow rotation).

Trees : proche-village: Likely unnecessary variable (trees in villages are also pruned); nb-coupes: Number of cuts; nb-jour-coupe: Number of cutting days; age-tree: Age of the tree. Trees have also a subclass Saplings composed by age: Age in days ; signalé: Reported; rna-coupe: Cut in RNA.

farmers : id-agri: Links to the farmer's unique parcel; engagé: TRUE/FALSE engagement in the Assisted natural regeneration (RNA in fr); interet-RNA: Interest in the RNA; jour-champ: Days spent in the field; nb-ha-a: Number of hectares allocated; stock-mil: Stock of millet; idMyBerger: Identifier of the associated shepherd; nb-patches: Number of patches; mon-chp-RNA: Field in the RNA.

headerd : troupeau-nourri: does the herd have enough to eat, currently TRUE/FALSE; arbre-choisi: tree chosen to be cut and fed to animals as fodder ; nb-têtes: herd size for the shepherd ; nb-ha-b: Between 3.8 (newly settled, 11%) and 5.5 (89% of the population); stock-fourrage: Forage stock; idAgri: Identifier of my reference farmer.

woodcutters : attrape: Captured (TRUE/FALSE); nb-attrape: Number time he was captured; jours-peur: Days of fear after capuration; en-coupe: Currently cutting.

The simulated space, through which the agents interact, represents 100 hectares. It is composed of 1000 spatial entities (patches) with a size of 10 square meters (resolution). It is exclusively agricultural since the inhabited area of the village is condensed into a single point. (The areas that are not cultivated, such as wetlands and pathways, are rare and have not been represented.)

The irreducible time step is one day (tick). The various elements of the system (interactions, etc.) take into account the seasonality that structures agricultural activities. Every 364 days, a new year begins and the rhythm of the seasons continues. A second time unit can be considered: the year, which consists of seasons. Simulations are generally carried out over 23 years. At the beginning

of the simulation, the first 3 years are considered to initialize the model.

## Process overview and scheduling

This section provides an overview of the processes and their scheduling within the model. The model is composed of several sub-models that simulate various aspects of the ecosystem and human activities. Each process is organized and executed in a specific sequence to reflect the interactions and dependencies within the system. The following describes repeated procedures that occur at each time step:

- Harvest and Crop Management

- Harvest and stockpiling: Farmers harvest crops and store them in their stockpiles.
- Effect of machinery on unprotected saplings: Machinery used in the fields may damage or destroy unprotected saplings.
- Crop rotation: Farmers rotate crops between different fields to maintain soil fertility and reduce pest buildup.

- Tree Growth and Reproduction

- Sprouting: New saplings sprout around mature trees, influenced by tree density and environmental conditions.
- Sapling growth: Saplings grow over time, with growth rates dependent on available resources and environmental factors.
- Aging and death of trees: Trees age and may eventually die due to old age, disease, or other environmental factors.

- Livestock Feeding and Forage Use of Acacias

- Feeding livestock with straw: Shepherds feed their livestock with straw collected from the fields.
- Tree cutting: Trees are cut down for forage or other uses by the shepherds.
- Livestock in fallow land and cutting of saplings: Livestock graze in fallow lands, and shepherds may cut down saplings to manage the land.

- Cutting of Saplings by Woodcutters

- Detection of saplings: Woodcutters search for and identify saplings that can be cut.
- Cutting of saplings: Once identified, saplings are cut by the woodcutters for use as firewood or other purposes.

- Farmer Engagement

- Participation in meetings: Farmers participate in community meetings to discuss agricultural practices and share knowledge.

- 219       – Observing the success of neighbors: Farmers observe the practices and successes of their  
220       neighbors to learn and adapt.
- 221       – Social interaction and motivation: Social interactions among farmers influence their mo-  
222       tivation and engagement in community activities.
- 223       – Protection of saplings: Farmers take actions to protect saplings from damage by livestock  
224       or machinery.
- 225       • Surveillance
- 226       – Surveillance and presence of farmers in the fields (generalized community surveillance):  
227       Farmers patrol their fields and monitor for any issues such as pests or unauthorized  
228       grazing.
- 229       – Delegated community surveillance: Specific individuals or groups are assigned the task  
230       of community surveillance to ensure all fields are monitored effectively.

## 231   2.2.2   Design Concepts

### 232   Basic principles

233

### 234       Objectives

### 235   Adaptation

236

237       Two agents exhibit adaptive/changing behaviors: the woodcutters and the farmers. The response  
238       of the woodcutters to being caught by a sapling protector varies according to the number of times  
239       they have been caught previously. Farmers have a score describing their interest in tree protection.  
240       This score evolves constantly according to several rules: encountering another engaged farmer,  
241       observing the success of a neighbor’s protection system, participating in meetings, etc.

### 242       Emergence

### 243   Sensing

### 244   Interaction

245

246       The interaction between agents is direct. Woodcutters interact directly with the saplings by  
247       cutting them down. Similarly, shepherds interact directly with the trees by utilizing them for  
248       forage. Farmers and supervisors also have direct interactions with woodcutters by stopping them  
249       from cutting the saplings. Additionally, farmers destroy young saplings that are not protected.

- 250       • **Woodcutters and Saplings:** Woodcutters seek out saplings and cut them down for use  
251       as firewood or other purposes. This direct interaction reduces the number of saplings in the  
252       environment.
- 253       • **Shepherds and Trees:** Shepherds interact with trees by feeding their livestock with tree  
254       foliage or cutting down trees for forage. This direct interaction affects the tree population and  
255       influences the availability of forage resources.

256 • **Farmers and Woodcutters:** Farmers interact with woodcutters by attempting to stop them  
257 from cutting saplings. When farmers encounter woodcutters in the field, they may intervene  
258 to protect the saplings.

259 • **Supervisors and Woodcutters:** Supervisors, acting as protectors, also interact directly  
260 with woodcutters. They monitor the fields and stop woodcutters from cutting down saplings  
261 to ensure the protection of young trees.

262 • **Farmers and Unprotected Saplings:** Farmers destroy young saplings that are not pro-  
263 tected. This interaction occurs when farmers are working in their fields and come across  
264 unprotected saplings, which they remove to prevent interference with their crops.

## 265 **Stochasticity**

266  
267 Many events in the model rely on stochasticity since they are probabilistic. Probability is often  
268 used as a frequency measure. This is the case for the movements of farmers in their fields and the  
269 probability that farmers will discuss the RNA (Assisted natural regeneration) with each other.

270 Stochasticity is used to represent uncertainty, particularly concerning whether supervisors catch  
271 woodcutters. Since supervisors do not spend the entire day in a single field, they may visit a field  
272 without encountering the woodcutter.

273 Finally, randomness is used to create variability in initial conditions. This is the case for the  
274 number of heads in different herds, which vary in size, and for the initial age of each tree, resulting  
275 in trees of varying ages.

### 276 • **Partial Randomness as Uncertainty**

277 – **Farmer Movements:** The movements of farmers within their fields are determined ran-  
278 domly. This means that their location at any given time is based on a probability distri-  
279 bution, ensuring variability in their positions.

280 – **Discussions about RNA:** The likelihood that farmers will engage in discussions about the  
281 RNA is also probabilistic. This frequency-based probability allows for random interactions  
282 among farmers, influencing their engagement with the RNA.

283 – **Supervisors and Woodcutters:** The uncertainty in supervisors catching woodcutters is  
284 modeled using partial randomness. Supervisors patrol fields but may not always en-  
285 counter woodcutters due to the random nature of their patrol routes and the woodcutters'  
286 activities.

### 287 • **Randomness for Initial Variability**

288 – **Herd Sizes:** The initial number of heads in each herd is determined randomly, resulting  
289 in herds of varying sizes. This introduces variability into the model, reflecting real-world  
290 differences in herd sizes.



291       – Tree Ages: The initial age of each tree is assigned randomly, creating a population of trees  
292       with a range of ages. This variability in tree ages ensures a more realistic representation  
293       of a forest with trees at different stages of growth.

## 294       **Collective actions**

295  
296       Collective forms emerge with the engagement of farmers in the protection of saplings. The larger  
297       the group of engaged farmers, the more likely it is for others to join, and the more assured the  
298       group’s longevity.

- 299       • Farmer Engagement: As farmers begin to engage in sapling protection, they form groups that  
300       work collectively towards this goal.
- 301       • Group Growth: The probability of additional farmers joining the group increases with the  
302       group’s size. This creates a positive feedback loop where the more farmers are engaged, the  
303       more likely it is for others to join.
- 304       • Group Longevity: The sustainability of the group is enhanced as it grows. A larger group of  
305       engaged farmers is more resilient and capable of maintaining their collective efforts over time.

## 306       **Observation**

307

## 308       **2.2.3 Details**

### 309       **Initialization**

310       At initialization, the environment is generated with the following steps:

- 311       • Generation of Parcels and Crops: The landscape is divided into parcels, each designated for  
312       specific types of crops. This step sets up the agricultural fields and assigns crop types to each  
313       parcel.
- 314       • Generation of Trees and Their Fertilizing Effects: Trees are distributed throughout the en-  
315       vironment, considering their effects on soil fertility. Trees influence the nutrient levels of the  
316       patches they occupy, enhancing soil quality in their vicinity.
- 317       • Generation of Human Agents: Human agents, including shepherds, woodcutters, farmers, and  
318       supervisors, are created and placed in the environment. Each agent type has specific roles and  
319       behaviors that contribute to the model’s dynamics.
- 320       • Generation of the Village: The village is established as a central location where human agents  
321       reside. This step involves setting up the village infrastructure and assigning homes to the  
322       agents.

### 323       **Input data**

324       We dont use input data.

### 325       **Submodels**

## 2.3 Statistical Analysis and Companion Modeling

On va parler de ComMod, de viabilité et de la manière dont on questionne les deux

### 2.3.1 Sensitivity analysis : saltelli method

Sensitivity analysis comprises a range of techniques that assess how a model responds to variations in its input parameters. These statistical methods aim to quantify the extent to which changes in the inputs influence the variability observed in the outputs. In accordance with the definition provided by Saltelli et al. (2008)[14], sensitivity analysis determines the "relative importance of each input in determining [output] variability." Consequently, these methods often yield a ranking or ordering of the inputs based on their respective sensitivity levels.

### 2.3.2 Pattern Space Exploration (PSE)

The PSE [15] method, based on genetic algorithm, is specifically designed to comprehensively cover the output space, resulting in its maximum score in output exploration – e.g. "explore the output's diversity of a model"<sup>1</sup>. By exploring the output space, the PSE method uncovers new patterns, providing insights into the model's sensitivity by examining the corresponding input values. Unlike calibration-based methods, PSE's effectiveness is influenced by the dimensionality of the output space, as it keeps a record of all the covered locations during exploration. This can become costly when dealing with more than three or four dimensions.

In addition, the PSE method usually takes stochasticity into account by estimating selected models using the median of multiple output values obtained from model runs. For our purposes, and as we are in a situation where the results need to be discussed with stakeholders, we have chosen to focus not on the median, but on the last decile. This means that simulations are retained if more than 90% of the results converge towards the identified output.

## 3 Results

L'analyse de saltelli nous permet de comparer deux scénarios de surveillance, ce qui nous permet d'identifier les phénomènes de réarrangement de variables qui s'opère quand on change de régime de surveillance.

Suite à cela nous avons pratiqué un PSE (Pattern Space exploration) pour identifier les simulations qui, dans le contexte d'une surveillance communautaire, permettent d'augmenter le nombre d'arbres. On fait face ici à un processus non linéaire avec une augmentation de la fertilité corrélée à une augmentation du nombre d'arbres.

---

<sup>1</sup><https://openmole.org/PSE.html>, consulté le 5 juin 2023

	om_trees	om_stockMil
probaDiscu	0.59	0.72
fréquenceRéu	0.23	0.30
tpsAuChamp	0.29	0.16
probaDenonce	0.25	0.12
nbProTGMax	0.33	0.10
qPrésenceBrousse	0.11	0.04

Table 1: Saltelli sensitivity analysis when surveillance is delegated to the community

### 3.1 Sensibilité - Saltelli

Nous avons pratiqué deux fois la même analyse sur des scénarios de simulation différents. Nous avons dans un premier temps effectué une analyse sur le système de surveillance communautaire. La seconde analyse transfère la charge du travail sur une surveillance dédiée pour mimer le fonctionnement de la surveillance par les agents des eaux et forêt.

Confronter ces deux analyses nous permet d'évaluer l'influence d'un changement de pratique sur le fonctionnement du système pour bien situer les changements structuraux qu'ils induisent.

#### 3.1.1 Surveillances communautaire

Dans un scénario de surveillance communautaire, l'analyse de sensibilité globale montre que la probabilité de discussion de l'intérêt des arbres joue un rôle extrêmement important aussi bien sur la production en mil (0.72) que sur le nombre total d'arbre (0.59) en fin de simulation (c.f. table 1).

La fréquence des réunions de sensibilisation au bénéfice de l'arbre, joue un rôle – bien que plus limité – sur la quantité d'arbre (0.23), et sur la production de mil (0.30). Dans la même proportion le temps passé au champs a aussi un effet sur le nombre d'arbres (0.29), et sur la production de mil (0.16).

Enfin de la probabilité de dénoncé un coupeur d'arbre quand on le voit à un impacte sur le nombre d'arbre (0.25), mais moins la production de mil (0.12).

La présence en brousse n'a que peu d'importance sur le nombre d'arbre et sur la production de mil.

#### 3.1.2 Surveillances par les eaux et forêts

Dans un scénario dans lequel la surveillance est effectuée par un agent des eaux et forêt la dynamique change un peu (c.f. table 2). Dans la mesure où cette surveillance n'est plus faite par la population.

Le temps au champ, et la probabilité de discuter d'un sujet en lien avec la préservation des arbres sont deux paramètres qui ont une influence relativement forte dans les mêmes ordres de grandeur que

	om_trees	om_stockMil
nbProTGMax	0.5	0.3
ok tpsAuChamp	0.29	0.22
ok nbSurveillants	0.20	0.29
ok probaDiscu	0.15	0.27
ok qPrésenceBrousse	0.15	0.10
fréquenceRéu	0.07	0.14
probaDenonce	0.00	0.02

Table 2: Saltelli sensitivity analysis when surveillance is managed transandially

Variables	Range
tpsAuChamp	(0.0, 100.0)
qPrésenceBrousse	(0.0, 1.0)
fréquenceRéu	(1.0, 10.0)
probaDenonce	(0.0, 100.0)
probaDiscu	(1.0, 100.0)
nbProTGMax	(5.0, 50.0)

Table 3: Variation range for PSE parameters in a community surveillance contexte

le nombre de surveillant. Dans un contexte ou la surveillance n'est pas assuré par la population, la fréquence des réunion, et le probabilité de dénoncé un coupeur n'ont que peut d'influence.

### 3.2 Patern Space exploration

L'algorithme de PSE demande à discretiser l'espace des sorties de modèles. Son objectif est alors de criblé la diversité de cet espace des sorties. Nous avons paramétré l'objectif pour qu'il ne conserve comme pertiant que les résultat qui sont atteinte dans 95% des cas de la simulation. Les paramètre d'entrer – tabe 3 – sont laissé libre pour permettre la recherche.

Sur la figure 1 on a filtré les résultats qui ont été atteint plus de 4 fois par le modèle pour se concentré sur les situatiuon les plus probable. On constate qu'il y a une relation négative entre la production de mil et la production de bois de chauffe.

Viabilité du système

### 3.3 Unexpected Yet Attainable: Surprising Results with Minimal Calculations

Dans le cadre de la co-construction du modèle de simulation, en ayant intégré quelques indicateurs de base, nous avons mis en lumière un problème fondamental qui n'avait jusqu'alors jamais été évoqué par les participants du Living-Lab. En suivant attentivement le suivi du nombre d'arbres coupés, que ce soit par les bergers pour le bétail, par les femmes pour le bois de chauffage, ou encore par les agriculteurs lors de leurs activités agricoles, une tendance surprenante est apparue, comme illustré

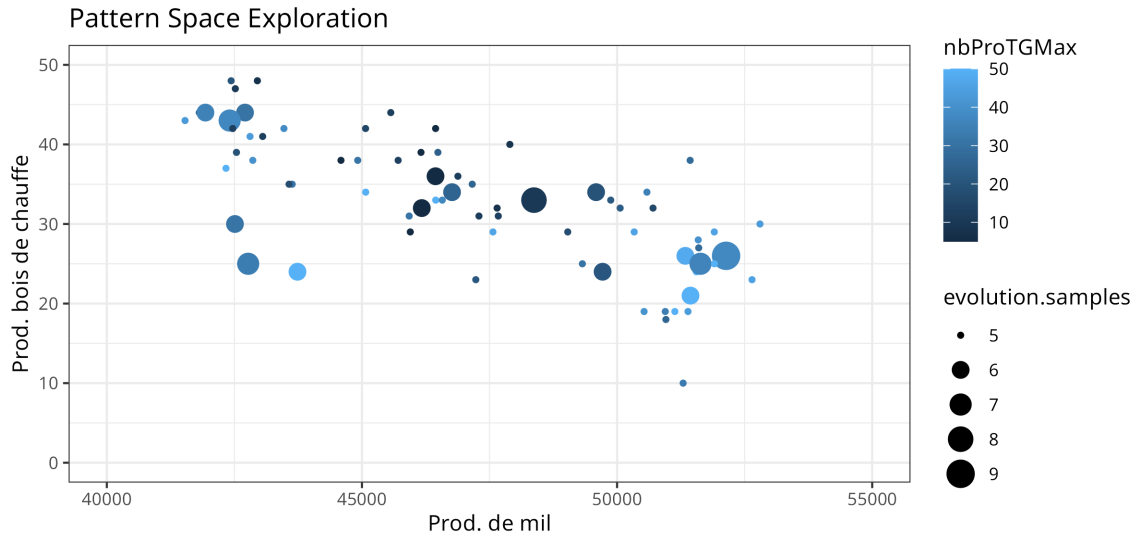


Figure 1: Résultat de 33600 évolutions de l’algorithme PSE. Chaque point est un résultat dans l’espace des sorties. La couleur met en évidence le nombre de jeunes pousses protégé par les agriculteurs, et la taille des points donne une idée de la "facilité" pour le modèle à atteindre cet espace. Plus un point est gros, plus le modèle arrive à l’atteindre.

405 dans la Figure XX. Il ressort de cette analyse que ce sont les agriculteurs eux-mêmes qui contribuent  
 406 de manière significative à la destruction d’arbres, bien que leur action soit, dans une certaine mesure,  
 407 silencieuse. Plus précisément, cette destruction passe souvent inaperçue, car elle se manifeste par  
 408 le désherbage de très jeunes pousses, effectué par les agriculteurs sans qu’ils en aient pleinement  
 409 conscience. Cette observation remet en question certaines perceptions antérieures et soulève des  
 410 questions essentielles quant à la gestion des ressources arborées au sein de la communauté.

## 411 4 Discussion

412 Include a Discussion that summarizes (but does not merely repeat) your conclusions and elaborates  
 413 on their implications. There should be a paragraph outlining the limitations of your results and  
 414 interpretation, as well as a discussion of the steps that need to be taken for the findings to be  
 415 applied. Please avoid claims of priority.

## 416 Acknowledgments

### 417 General

418 We warmly thank the residents of Diohine for their hospitality, with special thanks to: Aissatou  
 419 Faye, Robert Diatte, Pierre Faye, Paul Sene, Ameth Paul Thiaw, Assane Diouf, Guedj Diouf, Nicolas  
 420 Diouf, Ablaye Faye, Idrissa Faye, Maire-Hélène Ndjira Diouf, Seynabou Gakou, Joseph Sene, Ndeye  
 421 Thiamal.

## Author Contributions

Describe contributions of each author to the paper, using the first initial and full last name.

“L. Broutin conceived the model and realize interviews.”

“E. Delay and L. Broutin animate multi-actor focus groups.”

“E. Delay conducte the HPC exploration.”

“E. Delay and L. Broutin realize the first draft of this manuscript.”

“All authors contributed equally to 2nd version of the manuscript.”

## Funding

This work is part of the research and development project DSCATT (Dynamics of Soil Carbon Sequestration in Tropical and Temperate Agricultural Systems, <https://dscatt.net/FR/index.html>) co-funded by Agropolis Fondation [reference ID 1802-001] through the “Investissements d’avenir” program Labex Agro [ANR-10-LABX-0001-01] within the framework of I-SITE MUSE [ANR-16-IDEX-0006] and supported by the TOTAL Energies Foundation.

## Conflicts of Interest

The author(s) declare(s) that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

## Data Availability

A data availability statement is compulsory for all research articles. This statement describes whether and how others can access the data supporting the findings of the paper, including 1) what the nature of the data is, 2) where the data can be accessed, and 3) any restrictions on data access and why.

If data are in an archive, include the accession number or a placeholder for it. Also include any materials that must be obtained through a Material Transfer Agreements (MTA).

## Supplementary Materials

Describe any supplementary materials submitted with the manuscript (e.g., audio files, video clips or datasets).

Please group supplementary materials in the following order: materials and methods, figures, tables, and other files (such as movies, data, interactive images, or database files).

Example: Fig. S1. Title of the first supplementary figure.

Fig. S2. Title of the second supplementary figure.

Table S1. Title of the first supplementary table.

Data file S1. Title of the first supplementary data file.

Movie S1. Title of the first supplementary movie.

Be sure to submit all supplementary materials with the manuscript and remember to reference the supplementary materials at appropriate points within the manuscript. We recommend citing specific items, rather than referring to the supplementary materials in general, for example: “See Figures S1-S10 in the Supplementary Material for comprehensive image analysis.”

A link to access the supplementary materials will be provided in the published article.

Supplementary Materials may include additional author notes—for example, a list of group authors.

## Guidelines for References

There is only one reference list for all sources cited in the main text, figure and table legends, and Supplementary Materials. Do not include a second reference list in the Supplementary Materials section. Include references cited only in the Supplementary Materials at the end of the reference section of the main text; reference numbering should continue as if the Supplementary Materials are a continuation of the main text. References cited only in the Supplementary Materials section are not counted toward length guidelines.

Authors are responsible for ensuring that the information in each reference is complete and accurate.

DOIs, if available, should be included for each reference.

Please do not include any extraneous language such as explanatory notes as part of a reference to a given source. The Journal of Remote Sensing prefers that manuscripts do not include end notes; if information is important enough to include, please put into main text. If you need to include notes, please explain why they are needed in your cover letter to the editor.

## References

1. Mbow C, Brandt M, Ouedraogo I, De Leeuw J, and Marshall M. What Four Decades of Earth Observation Tell Us about Land Degradation in the Sahel? *Remote Sensing* 2015;7:4048–67.
2. Cesaro JD, Mbaye T, Ba B, et al. Reforestation and sylvopastoral systems in Sahelian drylands: evaluating return on investment from provisioning ecosystem services, Senegal. *Frontiers in Environmental Science* 2023;11.
3. Tappan GG, Cotillon S, Herrmann S, Cushing WM, and Hutchinson JA. Landscapes of West Africa - A Window on a Changing World. 2016. Medium: pdf Publisher: U.S. Geological Survey.
4. Kon Kam King J, Granjou C, Fournil J, and Cecillon L. Soil sciences and the French 4 per 1000 Initiative—The promises of underground carbon. *Energy Research & Social Science. Special Issue on the Problems of Methods in Climate and Energy Research* 2018;45:144–52.
5. Etienne M, ed. *Companion Modelling: A Participatory Approach to Support Sustainable Development*. Springer Netherlands, 2014. DOI: 10.1007/978-94-017-8557-0. URL: <https://www.springer.com/fr/book/9789401785563> (visited on 11/07/2020).

- 489 6. Barreteau O, Antona M, D'Aquino P, et al. Our Companion Modelling Approach. *Journal of*  
490 *Artificial Societies and Social Simulation* 2003;6.
- 491 7. Delay E, Ka A, Niang K, Touré I, and Goffner D. Coming back to a Commons approach to  
492 construct the Great Green Wall in Senegal. *Land Use Policy* 2022;115:106000.
- 493 8. Perrotton A, Ba M, Delay E, and Fallot A. Définition collective d'un futur désirable pour la  
494 zone de Diohine, Sénégal : Implementation de la méthode ACARDI à Diohine au Sénégal. In:  
495 Section: CIRAD-ES-UPR Forêts et sociétés (FRA); Université Gaston Berger (SEN); CIRAD-  
496 ES-UMR SENS (SEN); CIRAD-ES-UMR SENS (FRA) 3. public: ISRA, 2021:1 p. (Visited on  
497 12/07/2021).
- 498 9. Bommel P. Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents  
499 adaptée à la gestion des ressources renouvelables. These de doctorat. Montpellier 2, 2009. URL:  
500 <https://www.theses.fr/2009MON20043> (visited on 10/25/2023).
- 501 10. Reuillon R, Leclaire M, and Rey-Coyrehourcq S. OpenMOLE, a workflow engine specifically  
502 tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer*  
503 *Systems* 2013;29:1981–90.
- 504 11. Grimm V, Berger U, Bastiansen F, et al. A standard protocol for describing individual-based  
505 and agent-based models. *Ecological Modelling* 2006;198:115–26.
- 506 12. Grimm V, Berger U, DeAngelis D, Polhill J, Giske J, and Railsback S. The ODD protocol:A  
507 review and first update. *Ecological Modelling* 2010;221:2760–8.
- 508 13. Grimm V, Railsback SF, Vincenot CE, et al. The ODD Protocol for Describing Agent-Based  
509 and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural  
510 Realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 2020;23:7.
- 511 14. Saltelli A, ed. *Global sensitivity analysis: the primer*. OCLC: ocn180852094. Chichester, Eng-  
512 land ; Hoboken, NJ: John Wiley, 2008.
- 513 15. Chérel G, Cottineau C, and Reuillon R. Beyond Corroboration: Strengthening Model Valid-  
514 ation by Looking for Unexpected Patterns. *PLOS ONE* 2015;10. Publisher: Public Library of  
515 Science:e0138212.