

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

E. Delay^{1,2,6*†}, L. Broutin^{1,2,4†}, A. Fallot^{1,2}, A. Perrotton³, A. Gonin⁴, and D. Masse⁵

¹CIRAD, UMR SENS, F-34398 Montpellier, France.

²SENS, CIRAD, IRD, Université de Paul Valéry Montpellier 3, Montpellier, France.

³Forêts et Sociétés, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

⁴Université Paris Nanterre, Laboratoire LAVUE, FR.

⁵IRD, Eco&Sols, Abidjan, Côte d'Ivoire.

⁶UMI UMMSCO, Université Cheick Anta Diop, Dakar, Sénégal.

*Address correspondence to: 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-

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

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

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

2.2 ODD

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

2.2.1 Overview

Purpose

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

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.

State variables and scales

Process overview and scheduling

2.2.2 Design Concepts

Basic principles Objectives Emergence Sensing Interaction Stochasticity Observation

144 2.2.3 Details

145 Initialization Input data Submodels

146 2.3 Statistical Analysis and Companion Modeling

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

148 2.3.1 Sensitivity analysis : saltelli method

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

156 2.3.2 Pattern Space Exploration (PSE)

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

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

169 3 Results

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

173
174 Suite à cela nous avons pratiqué un PSE (Pattern Space exploration) pour identifier les simulations
175 qui, dans le contexte d'une surveillance communautaire, permettent d'augmenter le nombre d'arbres.

¹<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

On fait face ici à un processus non linéaire avec une augmentation de la fertilité corrélé à une augmentation du nombre d'arbres.

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 le cas où cette surveillance n'est plus faite par la population.

	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

204 Le temps au champ, et la probabilité de discuter d’un sujet en lien avec la préservation des arbres
205 sont deux paramètres qui ont une influence relativement forte dans les mêmes ordre de grandeur que
206 le nombre de surveillant. Dans un contexte ou la surveillance n’est pas assuré par la population, la
207 fréquence des réunion, et le probabilité de dénoncé un coupeur n’ont que peut d’influence.

208 3.2 Patern Space exploration

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

213
214 Sur la figure 1 on a filtré les résultats qui ont été atteint plus de 4 fois par le modèle pour se
215 concentré sur les situatiuon les plus probable. On constate qu’il y a une relation négative entre la
216 production de mil et la production de bois de chauffe.

217 Viabilité du système

218 3.3 Unexpected Yet Attainable: Surprising Results with Minimal Calculations

219
220 Dans le cadre de la co-construction du modèle de simulation, en ayant intégré quelques indicateurs de
221 base, nous avons mis en lumière un problème fondamental qui n’avait jusqu’alors jamais été évoqué
222 par les participants du Living-Lab. En suivant attentivement le suivi du nombre d’arbres coupés,

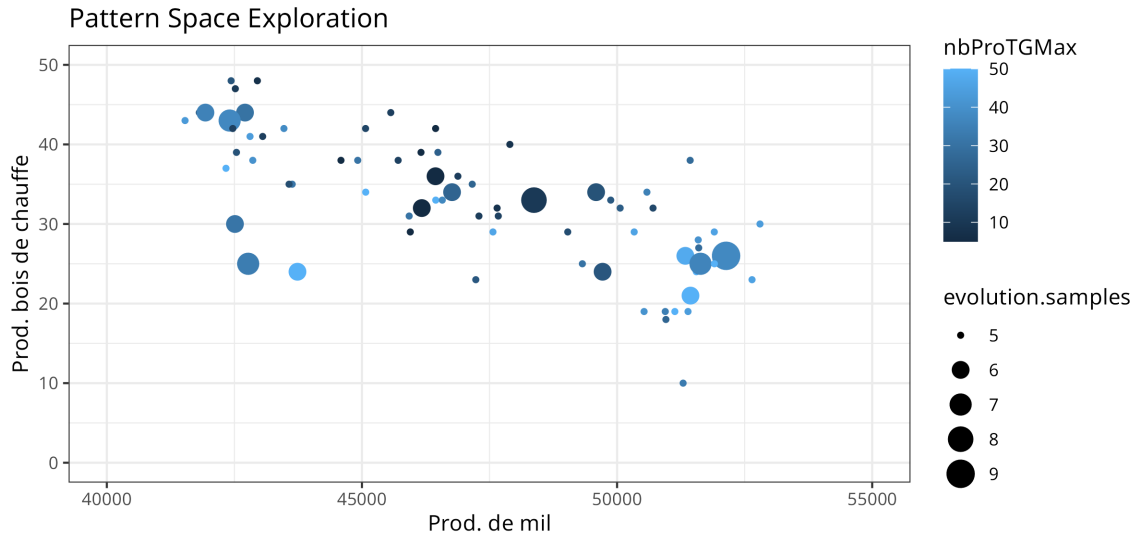


Figure 1: Résultat de 33600 évolutions de l’algorithme PSE. Chaque point est un résultat dans l’espace des sorties. La couleur met en évidence le nombre de jeunes pousses protégé par les agriculteurs, et la taille des points donne une idée de la "facilité" pour le modèle à atteindre cet espace. Plus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

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

4 Discussion

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

Acknowledgments

General

We warmly thank the residents of Diohine for their hospitality, with special thanks to: Aissatou Faye, Robert Diatte, Pierre Faye, Paul Sene, Ameth Paul Thiaw, Assane Diouf, Guedj Diouf, Nicolas

240 Diouf, Ablaye Faye, Idrissa Faye, Maire-Hélène Ndjira Diouf, Seynabou Gakou, Joseph Sene, Ndeye
241 Thiamal.

242 **Author Contributions**

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

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

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

246 “E. Delay conducte the HPC exploration.”

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

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

249 **Funding**

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

255 **Conflicts of Interest**

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

257 **Data Availability**

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

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

264 **Supplementary Materials**

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

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

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

270 Fig. S2. Title of the second supplementary figure.

271 Table S1. Title of the first supplementary table.

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

273 Movie S1. Title of the first supplementary movie.

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

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

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

281 Guidelines for References

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

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

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

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

295 References

- 296 1. Mbow C, Brandt M, Ouedraogo I, De Leeuw J, and Marshall M. What Four Decades of Earth
297 Observation Tell Us about Land Degradation in the Sahel? *Remote Sensing* 2015;7:4048–67.
- 298 2. Cesaro JD, Mbaye T, Ba B, et al. Reforestation and sylvopastoral systems in Sahelian drylands:
299 evaluating return on investment from provisioning ecosystem services, Senegal. *Frontiers in*
300 *Environmental Science* 2023;11.
- 301 3. Tappan GG, Cotillon S, Herrmann S, Cushing WM, and Hutchinson JA. Landscapes of West
302 Africa - A Window on a Changing World. 2016. Medium: pdf Publisher: U.S. Geological Survey.
- 303 4. Kon Kam King J, Granjou C, Fournil J, and Cecillon L. Soil sciences and the French 4 per 1000
304 Initiative—The promises of underground carbon. *Energy Research & Social Science. Special*
305 *Issue on the Problems of Methods in Climate and Energy Research* 2018;45:144–52.

- 306 5. Etienne M, ed. Companion Modelling: A Participatory Approach to Support Sustainable De-
 307 velopment. Springer Netherlands, 2014. DOI: 10.1007/978-94-017-8557-0. URL: <https://www.springer.com/fr/book/9789401785563> (visited on 11/07/2020).
 308
- 309 6. Barreteau O, Antona M, D'Aquino P, et al. Our Companion Modelling Approach. *Journal of*
 310 *Artificial Societies and Social Simulation* 2003;6.
- 311 7. Delay E, Ka A, Niang K, Touré I, and Goffner D. Coming back to a Commons approach to
 312 construct the Great Green Wall in Senegal. *Land Use Policy* 2022;115:106000.
- 313 8. Perrotton A, Ba M, Delay E, and Fallot A. Définition collective d'un futur désirable pour la
 314 zone de Diohine, Sénégal : Implementation de la méthode ACARDI à Diohine au Sénégal. In:
 315 Section: CIRAD-ES-UPR Forêts et sociétés (FRA); Université Gaston Berger (SEN); CIRAD-
 316 ES-UMR SENS (SEN); CIRAD-ES-UMR SENS (FRA) 3. public: ISRA, 2021:1 p. (Visited on
 317 12/07/2021).
- 318 9. Bommel P. Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents
 319 adaptée à la gestion des ressources renouvelables. These de doctorat. Montpellier 2, 2009. URL:
 320 <https://www.theses.fr/2009MON20043> (visited on 10/25/2023).
- 321 10. Reuillon R, Leclaire M, and Rey-Coyrehourcq S. OpenMOLE, a workflow engine specifically
 322 tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer*
 323 *Systems* 2013;29:1981–90.
- 324 11. Grimm V, Berger U, Bastiansen F, et al. A standard protocol for describing individual-based
 325 and agent-based models. *Ecological Modelling* 2006;198:115–26.
- 326 12. Grimm V, Berger U, DeAngelis D, Polhill J, Giske J, and Railsback S. The ODD protocol:A
 327 review and first update. *Ecological Modelling* 2010;221:2760–8.
- 328 13. Grimm V, Railsback SF, Vincenot CE, et al. The ODD Protocol for Describing Agent-Based
 329 and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural
 330 Realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 2020;23:7.
- 331 14. Saltelli A, ed. Global sensitivity analysis: the primer. OCLC: ocn180852094. Chichester, Eng-
 332 land ; Hoboken, NJ: John Wiley, 2008.
- 333 15. Chérel G, Cottineau C, and Reuillon R. Beyond Corroboration: Strengthening Model Valid-
 334 ation by Looking for Unexpected Patterns. *PLOS ONE* 2015;10. Publisher: Public Library of
 335 Science:e0138212.