



Le plausible et le possible

Évaluer et explorer un modèle de simulation avec les acteurs

Paul CHAPRON, Mathieu LECLAIRE, Etienne DELAY

5 et 6 février 2024

*"Je me souviens d'un paysan que je vis, une fois,
qui travaillait au fond d'une vallée. Il ne leva
pas la tête à mon passage. Voilà un homme,
pensai-je, qui n'a pas de questions à poser. Il n'a
pas le goût inutile de l'inutile. Il ne s'étonne pas
de la distance qui sépare ses souliers de la voûte
étoilée, pas plus qu'il ne s'étonne de la distance
qui sépare la charrue de la main qui la guide.
Pour lui, ce n'est pas une distance."*

— "Terre des Hommes" d'Antoine de
Saint-Exupéry

Introduction

Le projet DSCATT¹ vise à identifier les stratégies efficaces pour intensifier la séquestration du carbone dans les sols agricoles, à travers trois études de cas au Sénégal, au Zimbabwe, et en France. Il aborde cette question à trois échelles distinctes : la parcelle agricole, l'exploitation agricole, et le territoire (village ou petite région).

À l'échelle de la parcelle, le WP1 se concentre sur l'analyse des relations entre la production de biomasse et la séquestration du carbone, en étudiant les pratiques agricoles qui influencent les processus d'interaction sol-plante. Le WP2 examine les exploitations agricoles pour identifier les pratiques optimisant la synergie entre les activités des ménages ruraux en vue de renforcer la séquestration du carbone. Cette échelle prend en compte les contraintes économiques et évalue les compromis entre les différentes activités agricoles. À l'échelle territoriale, le WP3 analyse les flux de matières organiques au sein des agro-socio-écosystèmes, en tenant compte du contexte biophysique, environnemental, socio-économique, et politique. On comprendra que dans ce WP3, les mesures et la modélisation quantitative jouent un rôle prépondérant. Enfin, le WP4 rassemble les connaissances acquises pour évaluer les stratégies de séquestration du carbone, intégrant les incertitudes futures à travers des approches d'évaluations multi-critères.

Notre travail s'inscrit au sein du processus délibératif mis en place dans le WP4 à la suite du ACARDI². Le groupe multiacteur qui deviendra au fil du temps le *living-lab* de Diohine

1. Site du projet DSCATT : <https://dscatt.net/>, consulté le 3 février 2024.

2. Arthur PERROTTON et al. « ACARDI : gestion des sols agricoles et définition collective d'un futur désirable pour la zone de Diohine, Sénégal ». fre. In : sous la dir. d'Orange Didier (ed.) KANE NDJIDO (ed.) Brun-Diallo Lauren (ed.) Section : CIRAD-ES-UPR Forêts et sociétés (FRA) ; Université Gaston Berger (SEN) ; CIRAD-ES-UMR SENS (SEN) ;

s'est donc saisi de différentes questions. Notre approche a été résolument *model-driven*. Cette recherche guidée par le modèle³ facilite l'identification des relations causales et la validation des hypothèses⁴, améliorant ainsi la qualité et l'efficacité du processus de recherche lui-même.

La recherche guidée par les modèles permet de reconsidérer continuellement les objectifs de modélisation avec les parties prenantes. En s'appuyant sur une structure théorique, elle permet d'ajuster les hypothèses et les paramètres en fonction des résultats intermédiaires et des nouvelles données. Cette approche itérative favorise une réflexion critique sur les objectifs initiaux, encourageant les chercheurs et les participants à affiner leur compréhension des phénomènes étudiés et à explorer de nouvelles questions qui émergent au cours du processus. En outre, la recherche guidée par les modèles souligne l'importance de la méthodologie et du parcours de découverte autant que les résultats finaux⁵. Ce processus enrichit la recherche en offrant des *insights* et des connaissances qui dépassent souvent les objectifs initiaux, réaffirmant que le chemin parcouru dans la quête de réponses est tout aussi crucial que les réponses elles-mêmes.

CIRAD-ES-UMR SENS (FRA) 3 Adaptation and resilience of agriculture in West Africa : agroecological innovations and integration of territories. Abstracts. public : ISRA, nov. 2021, 128, 1 poster. (Visité le 07/12/2021).

3. On explicitera ce qu'on entend par modèle dans le section 2.2

4. Dans la ligné de la recherche inductive c.f. Arnaud BANOS. « Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et SHS ». fr. thesis. Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, déc. 2013. URL : <https://shs.hal.science/tel-01112668> (visité le 23/10/2023), ou encore Charles Sanders Peirce. Peirce dans son exploration de la logique des sciences, a introduit le concept d'abduction comme une forme d'inférence distincte de la déduction et de l'induction. L'abduction est présentée par Peirce comme la méthode permettant de former des hypothèses explicatives, une démarche qui se distingue par sa capacité à introduire de nouvelles idées. Peirce considère l'abduction comme le fondement même de la génération de théories et de conceptions nouvelles, soulignant ainsi son rôle crucial dans le processus créatif et dans la formation de nouvelles connaissances.

5. Michel ETIENNE et COLLECTIF. *La modélisation d'accompagnement : une démarche participative en appui au développement durable*. Français. Versailles : Quae éditions, juin 2010. ISBN : 978-2-7592-0620-9.

Nous avons structuré ce rapport en deux parties. La première, intitulée "Le Probable", examine les principales phases du processus de co-construction de modèles. Elle couvre tant les étapes où les chercheurs travaillent de manière isolée sur la modélisation, la calibration et la simulation, que les moments où les résultats sont examinés et filtrés en collaboration avec les participants du *living-lab*. La seconde partie, nommée quant à elle "Le Possible", explore l'interaction entre le modèle de simulation et les acteurs impliqués. Cette partie vise à utiliser le modèle calibré pour envisager différents futurs possibles et à engager un dialogue avec les acteurs sur la plausibilité des scénarios simulés.

Première partie

Le plausible

1 Un peu de contexte

1.1 Les agropasteurs et la terre : un modèle conceptuel ARDI

Ce travail s'inscrit dans la dynamique de constitution de **Living-Lab** tout au long du projet DSCATT. Dans le cadre de ce travail, la méthodologie ARDI¹ a été revisitée en ACARDI (Aspiration, Contraintes, Acteur, Ressources, Dynamique, Interaction)². L'enjeu avec ACARDI est de laisser aux participants la possibilité d'exprimer un grand nombre d'éléments qui restreignent le fonctionnement du système, pour ensuite définir ensemble quels sont ceux auquel on peut légitimement répondre dans le cadre du projet. Le projet sert alors de filtre sous forme de contrainte généreuse³ aux ambitions des participants. On essaye alors d'échapper à la vi-

1. Michel ETIENNE, Derick DU TOIT et Sharon POLLARD. « ARDI : A Co-construction Method for Participatory Modeling in Natural Resources Management ». en. In : *Ecology and Society* 16.1 (mars 2011). Publisher : The Resilience Alliance. ISSN : 1708-3087. DOI : 10.5751/ES-03748-160144. URL : <https://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art44/> (visité le 11/11/2021).

2. PERROTON et al., cf. note 2.

3. Emilie GOMART. « Towards generous constraint : freedom and coercion in a French addiction treatment ». In : *Sociology of Health & Illness* 24.5 (2002), p. 517-549. DOI : <https://doi.org/10.1111/1467-9566.00307>. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1467-9566.00307>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-9566.00307>.

1 Un peu de contexte

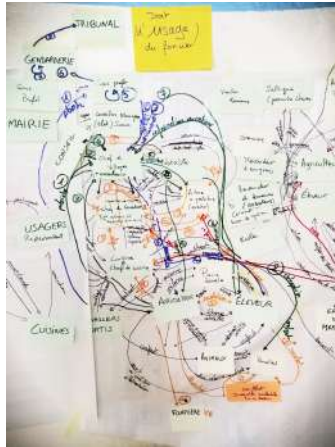
sion dominante de la recherche et du développement, en cheminant collectivement avec les acteurs⁴.

Parmi les enjeux identifiés par les acteurs, la question de la **gestion concertée de la fertilité** et de la **jachère** joue un rôle important ainsi que la **restauration du parc à faidherbia**.

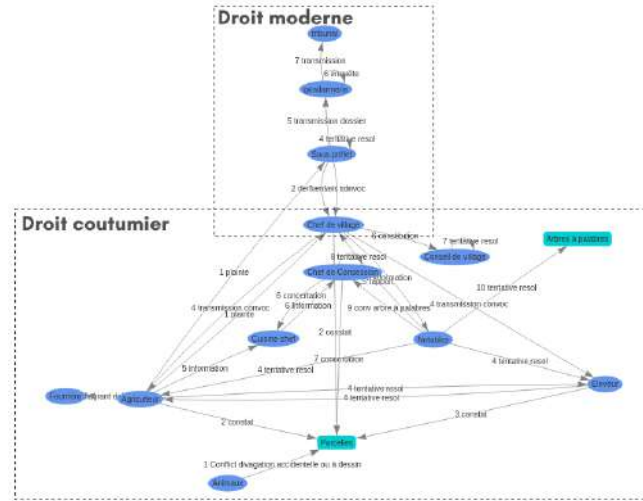
À partir de ce système d'interactions formalisé par un graphe ARDI vaste et enchevêtré, on peut isoler différentes parties du système, pour ajuster la focale à des questions plus précises (c.f. la gestion des conflits fig. 1.1b).

4. Jacques RANCIÈRE. *Le maître ignorant : cinq leçons sur l'émancipation intellectuelle*. Spanish. OCLC : 916138028. Paris : Fayard, 2003. ISBN : 978-2-264-04017-6.

1 Un peu de contexte



(a) Une portion de PARDI réalisé en octobre 2021



(b) Mise au propre du PARDi sur la gestion des conflits

FIGURE 1.1 – En partant de la question de du maintien de la jachère, les acteurs ont eu besoin d'explicité "la gestion traditionnelle du foncier". Sur la figure (a) on a le PARDI a la main, tandis-que sur la figure (b) le PARDI est mis au propre et un focus particulier est fait sur les instances de gestion des conflits. On observe la co-existence de deux types de droit : le droit coutumier et le droit moderne. Le chef de village est à l'interface entre les deux.

1.2 Une zone déjà connue de la recherche

Diohine est un village du bassin rachidier, au Sud-Ouest de Dakar, dans la région et département de Fatick. Il compte environ 4700 habitants en 2020. Un certain nombre de projets y ont déjà été menés à bien parmi lesquels, entre autres, le projet Animal Change (2011-2015)⁵ et le projet CERA0 (2014- 2018)⁶. Le projet DSCATT (2019-2014) bénéficie donc de données solides constituées lors des précédents projets. En particulier, à Diohine, nous allons nous concentrer sur le quartier de **Sassem**, pour lequel on dispose :

1. de données démographiques précises⁷,
2. de données de pluviométrie partielles⁸
3. de la surface approximative des parcelles et de la proportion de jachère⁹, c.f. fig 1.2

5. *An Integration of Mitigation and Adaptation options for sustainable Livestock production under climate change*, <https://cordis.europa.eu/project/id/266018>, consulté le 7 février.

6. "Étude à long terme en vue d'une intensification écologique de la production de céréales dans les zones de savanes en Afrique de l'Ouest pour une auto adaptation des agrosocioécosystèmes tropicaux face aux changements globaux". Les concepts développés dans les sciences de l'écologie et de la complexité seront utilisés pour analyser des agrosocioécosystèmes viables et durables sur la période des cinquante dernières années ainsi que de vérifier leur viabilité et leur durabilité. Dans CERA0, il s'agissait donc de déterminer les règles clés à respecter dans l'orientation de futurs programmes d'intensification agricole.» source <https://ur-green.cirad.fr/projets/cerao>, consultée le 7 février 2024.

7. Valérie DELAUNAY, Alice DESCLAUX et Cheikh SOKHNA. *Niakhar, mémoires et perspectives : recherches pluridisciplinaires sur le changement en Afrique*. fre. Dakar Marseille : l'Harmattan Sénégal IRD, 2018. ISBN : 978-2-343-15671-2 978-2-7099-2669-0.

8. Mariana ODRU. « Flux de biomasse et renouvellement de la fertilité des sols à l'échelle du terroir. Etude de cas d'un terroir villageois sereer au Sénégal. » Master 2. Cergy-pontoise : ISTOM, 2013. (Visité le 03/06/2024).

9. ODRU, cf. note 8; Elise AUDOUIN. « Comparaison de deux terroirs en terme de flux de biomasse et de bilan d'azote en vue de proposer des voies d'intensification écologique ». Master 2. Toulouse : Purpan, 2014.

1 Un peu de contexte

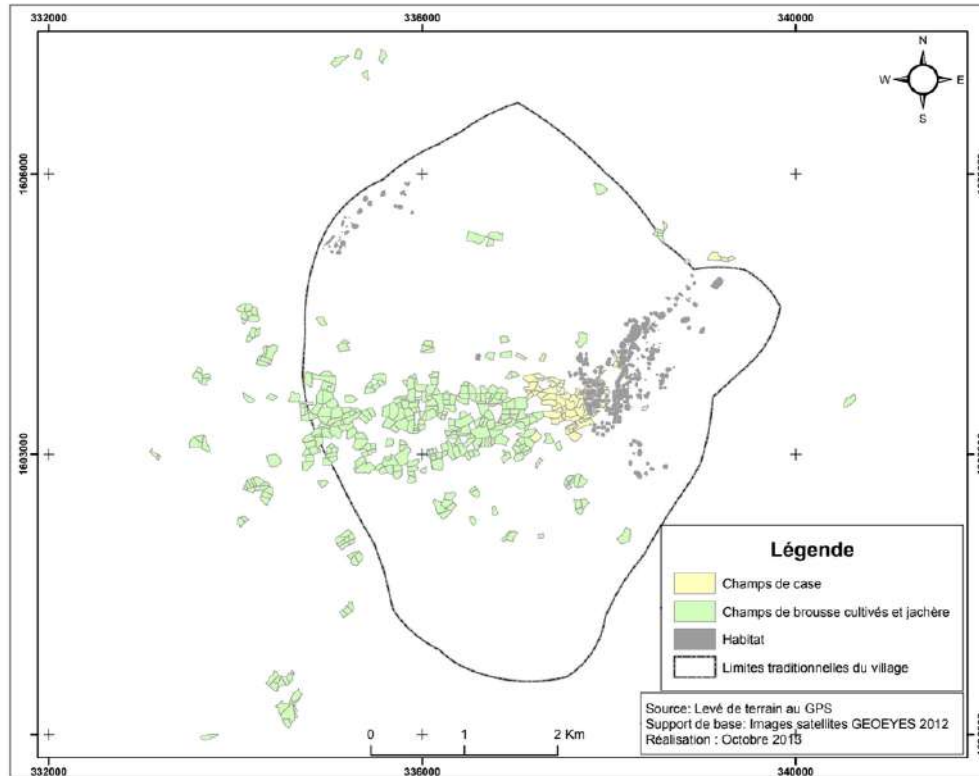


FIGURE 1.2 – Le parcellaire de Diohine, dans Audouin (2014, p. 112)

2 Pourquoi faire un modèle et des simulations ?

2.1 Pourquoi simuler sur un ordinateur ?

Nous expliquons l'utilisation de la modélisation et de la simulation informatique aux acteurs en mobilisant deux arguments :

1. le graphe PARDI est statique : il décrit l'agencement des choses, leur structure, mais pas la façon dont le système évolue. Un modèle de simulation, au contraire, est dynamique et la machine peut activer les interactions de façon répétée pour observer leur effet dans le temps
2. un modèle de simulation peut calculer à large échelle (spatiale et temporelle). Si on peut simuler le rendement d'une parcelle sur un an, il n'est pas beaucoup plus difficile de simuler celui de 200 parcelles sur 30 ans.

2 Pourquoi faire un modèle et des simulations ?

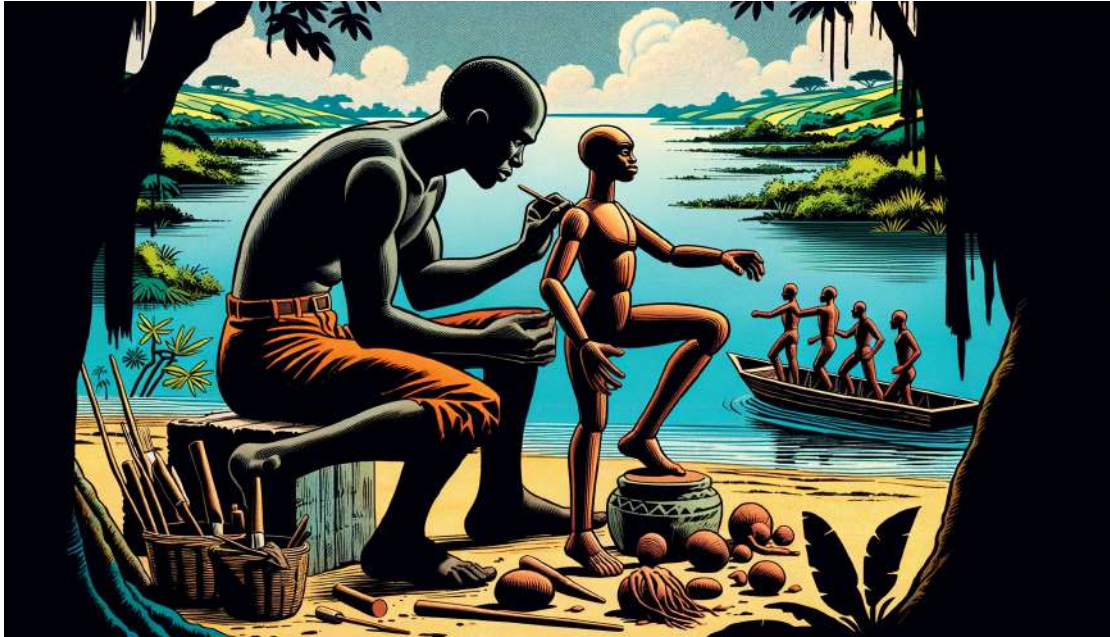


FIGURE 2.1 – Un modèle est une reproduction de la réalité

2.2 Le modèle de simulation

"un modèle est une abstraction qui simplifie le système réel étudié [...] pour se focaliser sur les aspects qui intéressent le modélisateur et qui définissent les problématiques du modèle."¹

Nous avons dans un premier temps présenté le modèle de simulation aux acteurs comme une machine à fabriquer des histoires, en précisant que si le modèle est une machine à écrire des histoires, ce sont bien les humains qui les racontent.

Nous avons construit le modèle à partir de ce que racontent les agropasteurs de Diohine en temps qu'experts. Ont ainsi participé à la construction : Paul Sene, Pierre Faye, Ameth Thiaw, Marie-Hélène Diouf, Aissatou Faye, Marcel Diouf, Ndiaye Fatou, Ndeye Thiamal, Joseph Sene, Idrissa Faye, ainsi que Simon, Assane Diouf, Ablaye Faye.

1. Patrick COQUILLARD et David HILL. *Modélisation et Simulation d'écosystèmes*. fr. Masson, 1997.

2 Pourquoi faire un modèle et des simulations ?

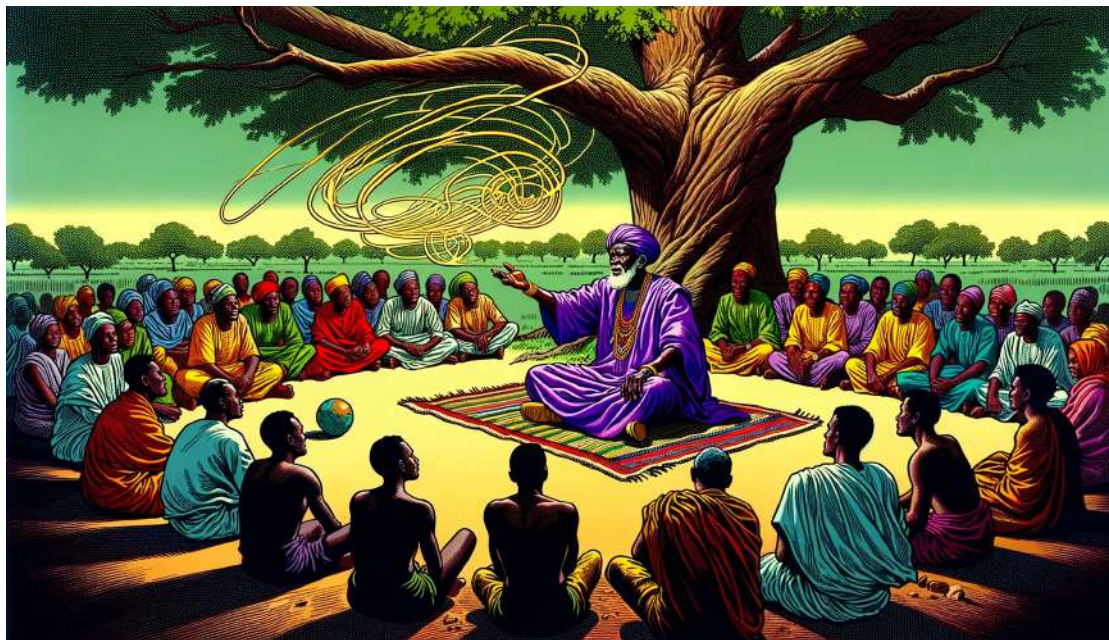


FIGURE 2.2 – Un modèle pour raconter une histoire

3 Éléments d'architecture du modèle

3.1 Les cuisines, le troupeau et les parcelles

Le modèle vise à étudier l'effet des dynamiques et des pratiques socio-agricoles des agropasteurs sur leur environnement. Plus précisément, il s'attache à exposer les influences mutuelles et les tensions qui s'exercent entre démographie, surface agricole disponible, troupeau, fertilité des sols, maintien de la jachère et solidarité entre les cuisines du village.

On peut grossièrement voir le modèle comme un triplet de sous-modèles :

- un **sous-modèle agropastoral**, qui simule l'assolement, le rendement des parcelles agricoles en mil et en arachide, l'évolution de leur fertilité (amendements en fumure et érosion) et la dynamique du troupeau
- un **sous-modèle démographique**, qui simule la dynamique de la population des cuisines du fait des naissances, des migrations et suivant leur sécurité alimentaire, ainsi que leur recomposition par éclatement et absorption
- un **sous-modèle de solidarité**, qui simule les prêts de parcelles et les dons de nourriture entre les cuisines

Nous avons inévitablement simplifié la réalité. Le modèle laisse de côté de nombreux aspects de l'agropastoralisme à Sassem :

3 Éléments d'architecture du modèle

- les champs de case
- les petits ruminants
- les conflits entre éleveurs et agriculteurs
- la culture de pastèque, niébé, bissap, sorgho
- le maraîchage
- les décisions collectives d'orientation des cultures à l'issue de la grande chasse traditionnelle (Xooy), des recommandations des saltigués où des «vieilles mamans»
- la succession et l'héritage



FIGURE 3.1 – Les cuisines, le troupeau et les parcelles

3.2 Simuler un an du quartier

Boucle de simulation

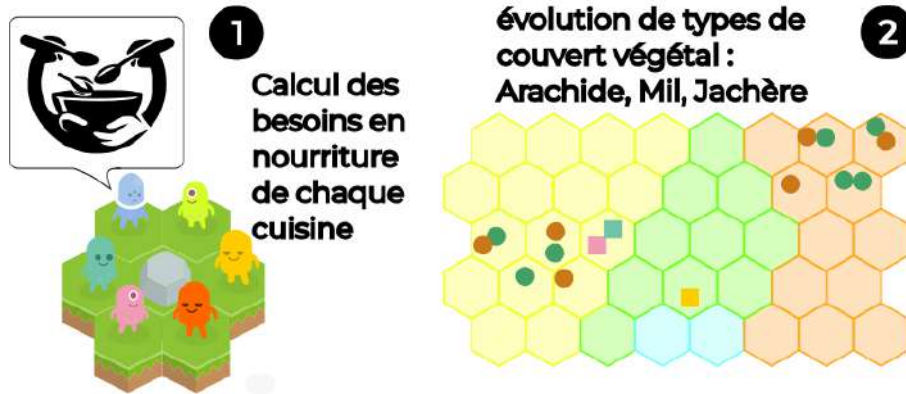


FIGURE 3.2 – Poster : Première partie de la boucle de simulation

3 Éléments d'architecture du modèle

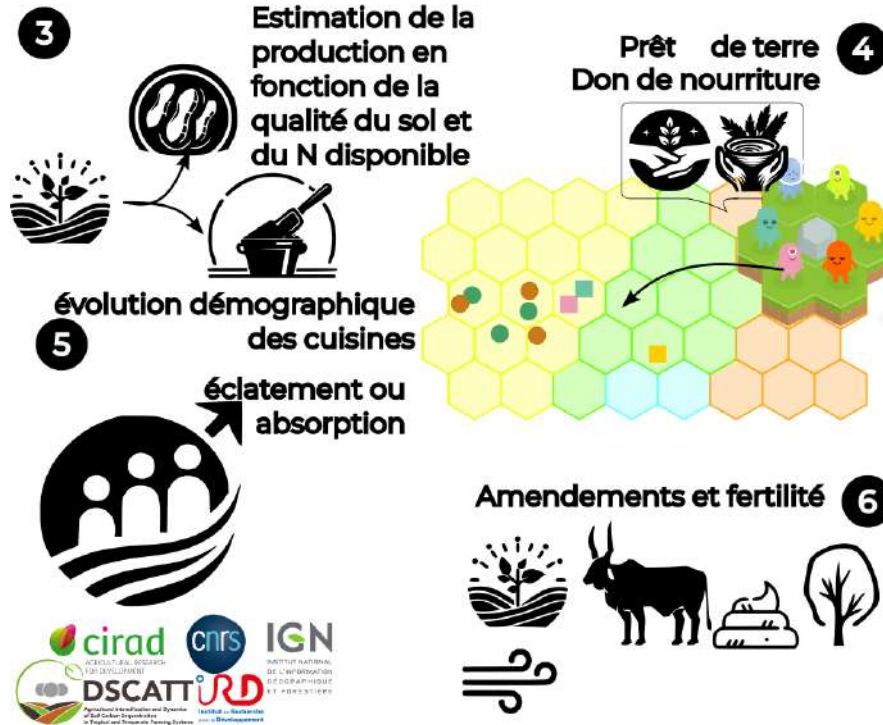


FIGURE 3.3 – Poster : seconde partie de la boucle de simulation

3.3 La solidarité entre cuisines et la jachère communautaire

Ci-contre, fig 3.4, un des posters utilisés en atelier qui expose

- la dynamique de composition et de recomposition des cuisines au fur et à mesure des éclatements ou absorptions de celles-ci.
- les actes qui fondent le réseau de solidarités qui relie les cuisines : le prêt de parcelles aux cuisines en insuffisance et le don de nourritures aux cuisines en situation de précarité alimentaire.

La jachère est considérée par les participants comme le motif de discussion et concertation dans le village. Par là même, elle permet par son existence de maintenir un espace de discussion et de médiation entre les habitants. C'est moins l'objet que le processus de concertation qui les intéresse ici.

3 Éléments d'architecture du modèle

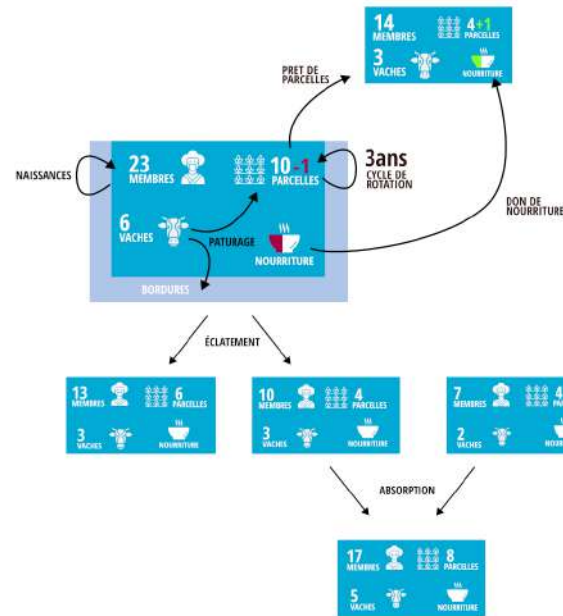


FIGURE 3.4 – Poster : Dynamique des cuisines et solidarités à l'oeuvre

4 Les entrées et les sorties de la simulation

4.1 Le village simulé

Les caractéristiques prises en compte dans le village simulé cherchent à s'approcher de celles de Sassem.

Le village est composé de **23 cuisines de 16 personnes** : il y avait 368 personnes en 1995 à Sassem.

Nous considérons **320 parcelles** de champs de brousse (les champs de case ne sont pas simulés) pour une surface totale de **180 hectares** : c'est approximativement la surface des champs de brousse de Sassem.

Nous disposons de données démographiques sur 25 ans à Sassem, et cela correspond aussi à la durée d'une génération humaine¹ : ce sera la durée de nos simulations.

Dans ce village simulé, nous avons expliqué la différences entre entrée et sortie du modèle ainsi :

- on peut **choisir** certaines choses : les **entrées** du modèle
- on **observe** certaines choses : les **sorties** du modèle

1. la durée d'une génération varie selon les disciplines entre 22 et 33 ans

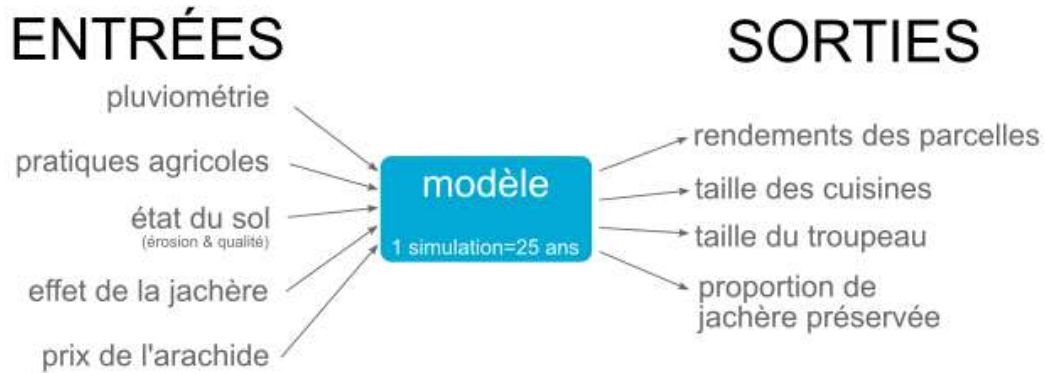


FIGURE 4.1 – Une sélection d entrées et sorties du modèle, pour expliciter le fonctionnement du modèle.

4.2 Les Entrées

Le modèle possède plusieurs entrées (ou paramètres) affectant sensiblement le résultat d’une exécution : changer la valeur d’un paramètre d’entrée modifiera les valeurs des sorties du modèle.

Dans notre modèle, il existe plusieurs types de paramètres :

- des paramètres *techniques* qui ont vocation à être fixés. Pour ces paramètres, nous ne connaissons pas avec suffisamment de précision (voire pas du tout) les valeurs acceptables du point de vue thématique.
- des paramètres de *contrôle*. Ils sont associés à des pratiques décrites par les acteurs et pour lesquelles il existe des alternatives. Par exemple pour le don de parcelles : prêter toutes ses parcelles excédentaires, ne prêter que des parcelles en culture (et pas en jachère cette année là) ou ne rien prêter du tout. Ces paramètres ont vocation à être mis en compétition lors de l’exploration du modèle (après calibrage, cf. voir section 5) où nous les ferons varier pour en observer les effets sur les métriques qui décrivent le système.

Par exemple, le **prix de vente de l’arachide** peut varier. C’est un paramètre² qu’on peut fixer pour la durée de la simulation. Pour déterminer une valeur numérique **plausible**, il nous faut nous interroger collectivement : «Combien de riz peut-on acheter avec 1kg d’arachide?», tout en concédant que garder ce prix de vente constant pendant 25 ans est une simplification peut-être trop réductrice.

2. Le statut de ce paramètre est intermédiaire entre technique et contrôle et peut être discuté : on peut le considérer comme technique, et fixer sa valeur après consultation des acteurs, tout comme le considérer comme un contrôle et faire en quelque sorte rentrer l’État dans le modèle par le biais de l’intensité de l’effort qu’il consent à la subvention de l’arachide.

Déterminer la valeur d'une entrée du modèle permet également de simuler un ou plusieurs fonctionnements **possibles** du village. Reprenons notre exemple du prix de vente de l'arachide et de ses conséquences :

Si 1kg d'arachide se vend pour 2 kgs de riz pendant 25 ans, le village sera-t-il prospère ?

ou encore :

Si 1kg d'arachide se vend pour 500g de riz, quelle sera la conséquence pour la viabilité alimentaire du village ?

Autrement dit : pour s'aider à réfléchir sur la place de l'arachide dans l'agriculture du village, on s'interroge en formulant des questions sur les entrées³ du modèle, on en tire des hypothèses (ici le prix de vente de l'arachide, culture de rente⁴, et son utilisation pour l'alimentation sous forme de conversion en riz) , que l'on simule. Les conséquences de ces hypothèses sont observées après comparaison et analyse des sorties du modèle.

3. et les sorties !

4. la page du site inter-réseau : <https://www.inter-reseaux.org/ressource/bulletin-mensuel-n351-dinformation-sur-les-marches-agricoles/>, consultée le 3 février.

Culture	prix
Mil	230 CFA/kg
Arachide coque	248 CFA/kg
Riz vallée	268 CFA/kg

TABLE 4.1 – Prix des denrées en 2023 d’après inter-réseau

4.3 Entrées du modèle et régimes possibles 1/2

La Table 4.2 présente un aperçu complet des paramètres d’entrée possibles pour le modèle, ouvrant ainsi un vaste champ d’exploration pour les chercheurs et les praticiens. En contrôlant la variation des valeurs de ces variables d’entrée, il est possible d’examiner comment chaque modification affecte les résultats pour comprendre de manière approfondie les dynamiques sous-jacentes. Cette flexibilité dans la configuration des entrées offre la possibilité de tester divers scénarios et de confronter leurs effets.

4 Les entrées et les sorties de la simulation

Nom de l'entrée	Traduction	Valeur typique
kitchenSize	nombre de personnes par cuisine	16
kitchenMinimumSize	taille en dessous de laquelle une cuisine est absorbée	8
kitchenMaximumSize	taille au dessus de laquelle un éclatement se produit	31
splitKitchenOffspringSize	taille de la cuisine qui s'établit après un éclatement	13
RotationCycle	stratégie d'assolement	triennal
OwnFallowUse	peut-on rogner sur sa jachère ?	jamais
LoanStrategy	Quelles parcelles prêter ?	Toutes y compris Jachère
FoodDonationStrategy	Bénéficiaires des dons de nourriture	Tous
HerdStrategyDry	Parcage des bêtes en saison sèche	Partout le jour, propriétaire la nuit
HerdStrategyWert	Parcage des bêtes en saison humide	Partout le jour, propriétaire la nuit
ManureDepositStrategy	Stratégie de fumure des parcelles	fume les parcelles plantées de Mil
FertilizerStrategy	Stratégie d'épandage de l'engrais	Uniformément sur les parcelles
MulchingStrategy	Proportion de paillage/résidus laissée au sol	0%
nbFaidherbia	nombre de faidherbia par hectare	4
giniParcels	indice d'inégalité du nombre de parcelles par cuisine	0.2
expandingHerdSize	ratio de surface pâturée en dehors des parcelles	1.4
populationGrowth	accroissement naturel annuel de la population	2%
supportPolicy	engrais subventionné par l'État	0
peanutSeedToFood	poids de riz obtenu par la vente d'un kilo d'arachide,	1.45 kg
simulationLength	durée en année de la simulation	26
soilQualityBasis	qualité initiale du sol	0.57
fallowBoost	effet d'une année de jachère sur la fertilité du sol	0.0001
erosion	ratio de réduction annuel de la fertilité du sol	0.001
rainFall	précipitations annuelles en mm	600 mm

TABLE 4.2 – Les entrées du modèle

4.4 Les sorties

Le modèle de simulation simule 25 ans (d'une partie) de la vie du village. Cette période de temps peut être caractérisée par différentes mesures. L'interprétation de ces mesures peut se faire de trois façons :

- Considérer les **dynamiques**⁵, qui suivent l'évolution d'une quantité au cours des années simulées, par exemple la population du village pendant 25 ans.
- Considérer l'**état final** (ou moyenné sur les cinq dernières années par exemple) du système village au bout de la période simulée. Par exemple, la taille finale du troupeau, la qualité du sol finale, etc.
- Considérer la valeur **moyenne** ou médiane d'une mesure sur toute la durée simulée, par exemple le rendement moyen sur la période.

5. ou des trajectoires, des séries temporelles de données

4 Les entrées et les sorties de la simulation

Le tableau 4.3 liste les sorties du modèle de simulation, leur signification et, quand c'est possible, des valeurs «espérées» c'est-à-dire qui témoignent que la simulation a produit des résultats proches de ce que la littérature, les données, ou les acteurs peuvent nous dire à propos du quartier de Sassem. Nous revenons sur ces indicateurs dans la section 5 qui aborde la calibration.

Nom de la sortie	Traduction	Valeur espérée
populationSlope	pente de la droite ajustant les populations du village	5.6
populationRSquare	coefficient d'ajustement entre population simulée et observée	0.9
populationDynamic	population du village (25 valeurs)	croissance régulière de 360 à 490 hab
medianMilYield	rendement médian de mil sur 25 ans	650kgs/ha
kitchenSizeAverage	taille moyenne des cuisines sur 25 ans	16
effectiveFallowRatioDynamic	ratio de jachère préservée (25 valeurs)	-
populationGrowth	taux d'accroissement de la population	2%
kitchenSizeDynamic	taille moyenne des cuisines (25 valeurs)	-
herdDynamic	taille du troupeau (25 valeurs)	-
migrantDynamic	migrations annuelles (25 valeurs)	-
lastPopulation	taille finale du village	488 habitants
lastMilYield	rendement de mil final	650 kg/ha
lastHerdSize	taille finale du troupeau	160 UBT
nbAbsorbedKitchens	nombre cumulé d'absorptions de cuisines	-
milYieldLast5YearsAverage	rendement moyen de mil sur les cinq dernières années	650 kg/ha

TABLE 4.3 – Les sorties du modèle

4.5 Notre choix de sorties

Beaucoup de combinaisons d'observables peuvent être considérées pour caractériser une simulation (c.f. table 4.3). Nous en avons retenu cinq : le rendement de mil, la population du village, la qualité de sol, la proportion de jachère préservée, et la taille du troupeau.

Le **rendement** des parcelles de mil nous indique si le modèle agronomique est correctement paramétré : les rendements sont-ils proches de ceux que déclarent les acteurs ?

La **qualité de sol**, qui s'entend comme la «capacité fonctionnelle des sols à fournir des services écosystémiques dont la production de biomasse végétale en ce qui nous concerne»⁶ et qui constitue un levier multiplicateur de rendement. On sait que cette quantité décroît au cours du temps dans un contexte de production agricole. On observe donc cette décroissance (vitesse et quantité finale de biomasse produite).

La **population** du quartier (en combinaison avec le rendement) nous permet de répondre à la question «Y a-t-il à manger pour tout le monde ? » Cette population peut être observée plus finement au niveau de sa répartition en cuisines : ces tailles de cuisines sont-elles crédibles ?

La **taille du troupeau** , en tant que principal levier de fertilité et donc le rendement des parcelles nous renseigne sur la viabilité alimentaire du système village. Le cheptel observé ici concerne uniquement les bêtes que peut soutenir le système, à l'exclusion des bêtes qui partent en transhumance une partie de l'année.

6. définition de Dominique Masse, lors d'une communication personnelle le 22 février 2024

La **proportion de jachère intacte** nous indique si la croissance démographique du village se fait au prix de l'abandon de la jachère, c'est-à-dire sa mise en culture.

Ces cinq sorties sont celles que nous (modélisateurs) avons sélectionnées en amont de la co-construction des expériences de simulation avec les acteurs, et sont donc mentionnées à titre d'exemples préliminaires.



FIGURE 4.2 – Un agro-pasteur devant des bottes de mil.

5 Calibration du modèle

5.1 Démarche de calibration

Le calibrage d'un modèle consiste à trouver des valeurs pour les paramètres techniques (section 4.2). Pour estimer ces valeurs, on teste la capacité du modèle ainsi paramétré à produire des sorties proches de ce que l'on observe dans la réalité. On parle d'*objectifs de calibration*. Pour cela, on utilise une méthode de calibration automatique distribuée dans OpenMOLE : NSGA2¹. Cette méthode est dite en «marche arrière» par opposition à une simulation en «marche avant» qui consiste à fixer des paramètres et à regarder l'effet sur les sorties. Ici on se focalise sur les sorties attendues du modèle et non sur les entrées.

En effet, il est difficile de prévoir les sorties d'un modèle de simulation, lorsqu'on en fixe les entrées. Il est encore plus difficile de trouver les valeurs d'entrées qui permettent d'atteindre un objectif, c'est-à-dire une certaine valeur pour chacune de ses sorties. Cela est d'abord dû à la complexité du modèle de simulation (de multiples mécanismes sont à l'oeuvre dans le modèle, et s'influencent mutuellement). Mais également parce que certains objectifs sont contradictoires et difficiles à concilier en un compromis acceptable. Par exemple dans notre cas, il sera difficile de tripler la population du quartier sans jamais mettre en culture les parcelles

1. Calibration avec NSGA2 (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*), dans OpenMOLE (consultée le 07/02/24) : <https://openmole.org/Calibration.html>

de la jachère : il n’y a sans doute pas suffisamment de terre sur le territoire du village pour nourrir autant de monde.

L’objectif final du processus de calibration est d’obtenir un modèle opérationnel, c’est-à-dire sur lequel on pourra évaluer des modifications de pratiques (paramètres de contrôles) pour donner à voir les conséquences d’un changement de pratique, ce que nous ferons dans un deuxième temps (cf. section II).

5.2 Paramètres à calibrer

Au cours de la modélisation, quatre paramètres ont émergé sans que l’on puisse leur attribuer une valeur ni par l’intermédiaire des acteurs ni par l’état de l’art :

- *peanutSeedToFood* : taux de conversion entre l’arachide et le riz. Dans le modèle, il n’existe pas d’argent. On utilise l’arachide, culture de rente, comme monnaie d’échange pour acheter de la nourriture complémentaire – essentiellement du riz. Nous avons donc besoin d’un taux de conversion de l’arachide en riz. Même si nous avons recueilli en atelier quelques informations, celles-ci sont trop parcellaires pour avoir une information fiable. Notre connaissance préalable : *peanutSeedToFood* $\in [1.0; 2.0]$, c’est-à-dire entre une équivalence de prix arachide-riz (1.0) et un riz deux fois moins cher que l’arachide (2.0).
- *soilQualityBasis* : dans le modèle de sol, nous calculons chaque année la qualité du sol décrite plus haut. *soilQualityBasis* est la valeur initiale pour cette qualité du sol. Chaque année on lui ajoute des quantités issues des pratiques du sol (fumure, paillage, jachère, présence de faidherbia). Elle est aussi diminuée chaque année par un facteur d’érosion. Cette variable prend ses valeurs dans : *soilQualityBasis* $\in [0.1; 6.0]$
- *erosion* : est la dégradation du sol après une année de culture. Ce ratio, inférieur à 1, vient

dégrader la valeur de Qualité de sol annuelle. Notre connaissance préalable : $erosion \in [0.05; 1.0]$.

- $fallowBoost$: est l'effet sur la qualité du sol de la pratique de la jachère une année donnée. Cette quantité est un facteur multiplicatif à effet positif, donc plus grand que 1. Notre connaissance préalable : $fallowBoost \in [1.0; 1.1]$

$$\begin{aligned} soilQuality_{-1} &= soilQualityBasis \\ soilQuality_n &= (soilQuality_{n-1} + manureBoost_{n-1,n-2} \\ &\quad + mulchingBoost_{n-1} + faidherbiaBoost) * erosion * fallowBoost \end{aligned}$$

avec $erosion < 1$, $fallowBoost \geq 1$ et $n \in \{-1, \dots, 25\}$

5.3 Objectifs de calibration

Les objectifs de la calibration sont composées de données de l'état de l'art et de dires d'acteurs sur les 25 dernières années. Nous qualifions deux objectifs thématiques : le premier basé sur des critères démographiques et l'autre sur des critères agronomiques.

5.3.1 Objectif démographique

L'objectif démographique est composé de la somme de 3 indicateurs normalisés à 1 :

- la démographie du quartier de Sassem entre 1995 et 2020 (c.f. tab. 5.1,²),
- la pente de la droite ajustant ces données (5.67) et
- l'écart à la population de Sassem en 2020 (488 personnes)

5.3.2 Objectif agronomique

L'objectif agronomique est composé de la somme de 4 indicateurs normalisés à 1 :

- la quantité de jachère effective³ sur l'ensemble du quartier en 2013 : 20%, ce qui signifie qu'environ 13% de la jachère a été rognée cette année là (écart à 1/3 de la surface en moyenne sur un assolement triennal). L'objectif retenu est la moyenne de la jachère effective sur une fenêtre de 5 ans autour de cette date, soit entre 2011 et 2015.
- la quantité de jachère effective en fin de simulation dont on estime qu'elle équivaut à 10% de la surface totale du quartier.
- l'écart à la taille de troupeau attendue à dire d'acteur en 2020, soient 170
- l'écart au rendement de mil à dire d'acteur sur les cinq dernières années : 700 kg / ha. Ce dernier objectif sera observé moins strictement que les autres car sa valeur estimée par les acteurs laissait paraître une variabilité assez grande («entre 600 et 800» selon les acteurs).

2. DELAUNAY, DESCLAUX et SOKHNA, cf. note 7.

3. ODRU, cf. note 8.

Année	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Population	358	371	384	378	368	370	363	386	408	409	411	411	402
Année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Population	417	434	455	450	460	477	468	467	466	475	487	492	488

TABLE 5.1 – Démographie du quartier de Sassem issue des données de l’observatoire IRD de Niakhar

5.4 Résultats

L’exécution de l’algorithme de calibrage selon deux objectifs fournit un front de Pareto, c’est-à-dire un ensemble de points dans l’espace à deux dimensions des objectifs. Il n’est pas possible de dire sur ce front quelle solution est la meilleure, car passer d’un point à un autre augmente la qualité selon une dimension mais la dégrade selon une autre.

5 Calibration du modèle

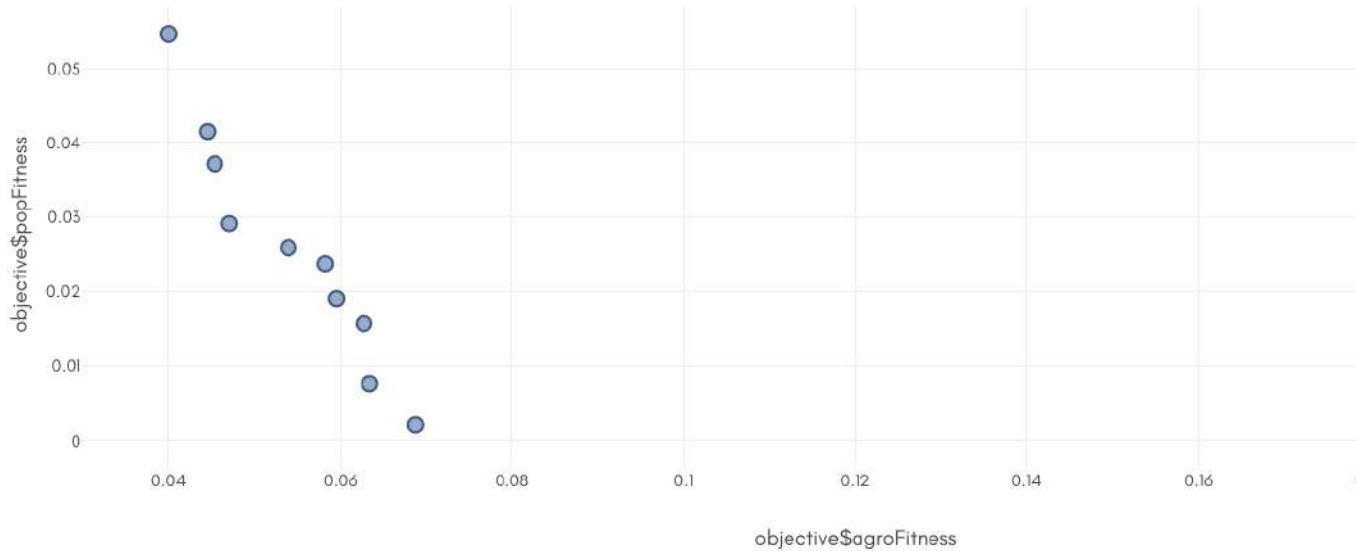


FIGURE 5.1 – Front de Pareto en fin de calibrage.

Pour choisir une solution parmi celles du front de Pareto, nous pouvons examiner les valeurs de paramètres d'entrées qui ont mené aux différentes valeurs d'objectifs. Nous utilisons pour cela un «parallel plot» (figure 5.2) permettant de mettre en regard les entrées et les objectifs.

On constate sur ce graphique, que les valeurs des deux objectifs à minimiser sont très bas (0.05 maximum pour l'objectif de population pour une valeur maximum possible de 1.0 et 0.08 pour l'objectif agronomique sur une valeur maximum possible de 1.0). Nous sélectionnons des valeurs de rendement les plus faibles (autour de 700kg/ha), puis nous sélectionnons la meilleure valeur de taille de troupeau (171). Il ne reste après ce filtrage qu'une seule trajectoire. Elle ajuste parfaitement la population (R^2 excellent et valeur finale de 488)

- *peanutSeedToFood* : l'observation des prix de l'arachide et du riz sur les 25 dernières années indiquent que le rapport moyen entre le prix du riz et le prix de l'arachide oscille entre 1.0 et 1.2, ce qui est conforme avec la trajectoire sélectionnée.
- *soilQualityBasis* : pour ce paramètre théorique, nous n'avons aucune information pour nous guider.
- *erosion* : cette valeur d'érosion sur la qualité de sol globale équivaut à une érosion du sol de 1.16% / an, ce qui est cohérent avec des valeurs d'érosion dans la zone.
- *fallowBoost* : Ce ratio multiplicateur positif (1.0162047788142692) est très faible au regard de l'érosion globale (0.7572877603285619). Ce rapport corrobore les dires de D. Masse⁴ qui estime que l'effet positif de la jachère sur une année assez faible. L'effet de la jachère est donc à considérer plus sur sa capacité à nourrir du bétail qui fumera les terres que sur son effet régénérateur intrinsèque. C'est donc un effet indirect sur la qualité du sol.

4. Communication personnelle le 01/02/2024

5 Calibration du modèle

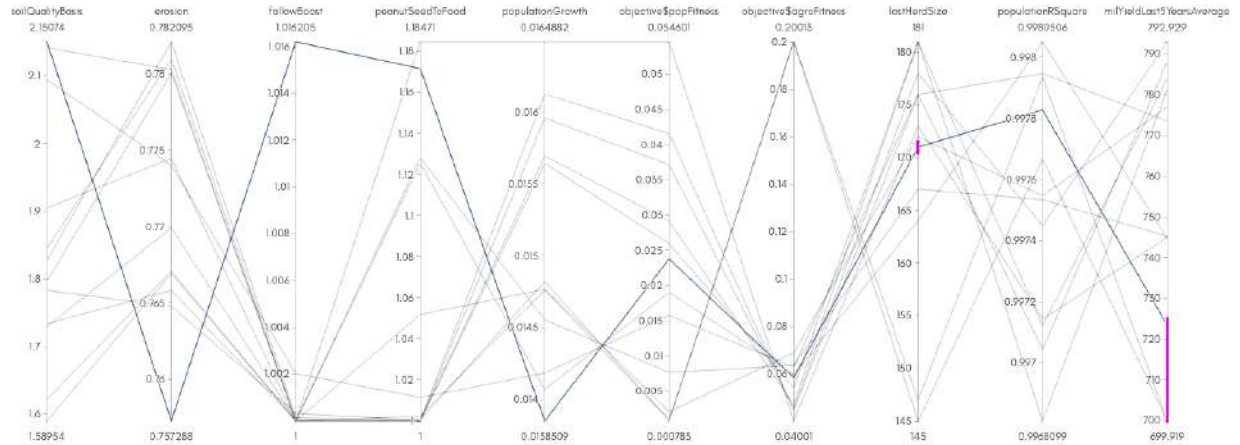


FIGURE 5.2 – Les meilleures trajectoires de la calibration

Cette analyse nous permet de sélectionner quatre trajectoires. Puis nous sélectionnons celle dont l'objectif le plus contraignant (le premier) est le plus bas. Nous obtenons ainsi les valeurs suivantes :

- $soilQualityBasis = 2.150742049489815$
- $fallowBoost = 1.0162047788142692$
- $erosion = 0.7572877603285619$
- $peanutSeedToFood = 1.171642708235363$

5.5 Présentation de la démarche de calibration du modèle aux acteurs



FIGURE 5.3 – Poster : Simulation expliquée par la métaphore de la recette de Thiéboudienne : marche avant

5 Calibration du modèle



FIGURE 5.4 – Poster : Calibration expliquée par la métaphore du Thiéboudienne : marche arrière

5.6 Bénéfices méthodologiques de la calibration dans un contexte d'accompagnement

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, la calibration a pour but de rendre le modèle opérationnel, en l'ajustant, autant que possible, aux mesures et aux données qui décrivent le système cible; dans notre cas : la démographie de Sassem sur 25 ans, les rendements de mil à dire d'acteurs, la taille approximative du troupeau du quartier etc.

Il nous semble que la calibration d'un modèle dans un contexte d'accompagnement est bénéfique à plusieurs titres.

D'abord, elle permet de pousser le modèle dans ses retranchements : l'optimisation d'objectifs par algorithmes génétiques est aveugle et gloutonne, et n'hésitera pas à sélectionner des combinaisons de valeurs d'entrées irréalistes ou qui "tordent" le fonctionnement normal du modèle, si cela lui permet d'atteindre ses objectifs. À charge aux modélisateurs de définir soigneusement les objectifs et les domaines de définitions des entrées du modèle pour rester dans des gammes de valeurs d'entrée qui ont du sens.

Il ne faut pas dissimuler que ces nombreuses calibrations itérées sont coûteuses en temps de calcul et de travail, et demandent de nombreux allers-et-retours entre le modèle et nos connaissances du système cible : il faut relire de la littérature, poser des questions aux experts du domaine etc. La calibration ne peut définitivement pas se faire pendant les ateliers avec les acteurs.

Nous pensons cependant que la calibration du modèle a toute sa place dans la modélisation d'accompagnement pour au moins trois raisons.

D'une part, pour les modélisateurs, elle renforce la confiance dans le modèle : la calibration, puisqu'elle met le modèle à rude épreuve, permet d'arriver à des niveaux d'ajustements très fins entre les mécanismes du modèles et leurs effets, et de débusquer des bugs pernicieux nichés très profond dans le code du modèle.

D'autre part, la calibration augmente le pouvoir descriptif du modèle, car elle permet de trouver des valeurs "utiles" (au sens où elles permettent de remplir des objectifs) à des paramètres techniques autrement très difficiles voire impossible à mesurer empiriquement. Dans notre modèle par exemple, l'intensité de l'érosion aurait été impossible à mesurer directement ou en interrogeant les acteurs. La calibration nous a permis de modéliser l'*effet* de ce phénomène dont on sait qu'il existe (la qualité des sols tend à diminuer avec le temps), en le

considérant grosso modo comme un terme de fuite dans le bilan azoté dans le sous-modèle du sol. Notre modèle s'en trouve plus expressif, plus descriptif.

Enfin, un modèle calibré est crédible aux yeux des acteurs, puisqu'il a justement été calibré pour être capable de reproduire ce qu'ils ont décrit au préalable en tant qu'experts. Cela s'observe évidemment bien mieux pour les sorties du modèles, où les ordres de grandeur et les unités en particulier, sont pratiquement les mêmes⁵ que celles invoquées par eux dans les ateliers. Ces résultats sont plausibles, ressemblants, et plus immédiatement accessibles et critiquables que ceux d'un modèle jouet par exemple.

De là, si les acteurs n'ont pas décelé d'écart trop important entre la réalité et les sorties d'un modèle de simulation calibré sur des données, il devient bien plus naturel de prolonger ces simulations et d'entamer l'exploration du modèle à des fins de prospective, pour envisager les simulations possibles : c'est l'objet de la seconde partie de ce rapport.

5. Il faudra parfois être capables de convertir à la volée les kilos de mil en nombre de bottes, mais un travail de conversion a été fait avec les participants. Une botte de mil représente environ 10 kilos de grain.

Deuxième partie

Le possible

Extension de l'usage du modèle : Évaluer les conséquences -Diversifier - Évaluer les trajectoires possibles

Nous proposons dans ce projet d'étendre l'approche de la modélisation d'accompagnement (ComMod)⁶ par **l'exploration de ce modèle**. Il s'agit cette fois de vérifier avec les acteurs non plus *ce qu'il est plausible* de se passer dans le quartier, mais de *ce qu'il serait possible* de se produire. Dans la phase de calibration, nous avons utilisé des données et des pratiques en cours lors des 25 dernières années (1995-2020). Nous nous plaçons désormais sur une fenêtre temporelle future (2020-2045) en fixant les paramètres techniques appris lors de la phase de calibration. La valeur du reste des paramètres – dits de contrôle – seront modifiées selon les expériences.

Dans cette phase exploratoire, nous utiliserons le modèle comme guide aidant à expliciter les conséquences de changements de pratiques. Cela consiste à contrôler la variation des entrées du modèle, à exprimer des objectifs de sorties et à en rechercher des solutions qui y mènent.

L'exploration d'accompagnement (ComExp)⁷ est une branche de l'exploration de modèle dont le but est d'enrichir la co-construction de savoirs partagés par les acteurs en donnant à voir :

6. Olivier BARRETEAU et al. « Our Companion Modelling Approach ». en. In : *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6.1 (mars 2003). URL : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/1.html#bousquet1999> (visité le 03/04/2015).

7. Etienne DELAY et al. « ComExp : une manière d'introduire l'exploration avec les acteurs ». eng. In : Le Cauvel, France : ComMod, 2020. URL : <https://agritrop.cirad.fr/596985/> (visité le 02/05/2021); Paul CHAPRON et al. « Co-construire un modèle de simulation et son exploration : les pratiques des agro-pasteur de Diohine ». fre. In : Section : IGN [Institut géographique national] (FRA); CIRAD-ES-UMR SENS (SEN); CNRS (FRA); CNRS (FRA). restricted : CNRS, juin 2022, 1 p., 1 diaporama (19 vues). URL : <https://easychair.org/smart-program/FRCCS2022/2022-06-20.html#talk:196374> (visité le 02/09/2022).

- l'effet sur les sorties lors de la variation d'un paramètre d'entrée : «*What if?*»
- la diversité des sorties possibles
- la comparaison de scénarios proposés par les acteurs
- l'évaluation de plusieurs trajectoires menant à un objectif donné (issu des aspirations)

Nous décrirons dans ce rapport principalement l'exploration en marche avant effectuée avec les acteurs lors de l'atelier, et évoquerons les autres méthodes pour les travaux à venir.

6 Explorer en marche avant – évolution *one factor at time*

Lors de l’atelier de février, une fois la calibration effectuée, on a demandé aux participants de tester une à une des configurations d’entrée différentes pour mieux comprendre ce qu’il se passe dans le modèle et comment la situation peut évoluer dans les 25 prochaines années en faisant varier un paramètre à la fois (*One factor at a time*)¹. L’horizon temporel de 25 ans a été choisi pour leur permettre de se projeter au-delà d’une génération. Pour le dire autrement, il s’agit de penser aux conditions auquel devrons faire face leurs enfin, ou plus sûrement leurs petits enfants.

Nous avons parcouru 6 scénarios à un seul changement de valeur de paramètre à partir de la 26^{ème} année. Nous appellerons par la suite le moment de ce changement de valeur : le point de bascule.

1. Nous restons très conscients de la limite de ce type d’exploration. En effet, *i)* de cette façon, nous ne sommes pas en mesure d’évaluer ce qu’E. Morin appelle la virtualisation de variable. C’est-ce qui peut se passer quand un contrôle du modèle dans certaines configurations, masque l’effet d’un autre contrôle. *ii)* on considère que le système de pratiques n’évoluera pas dans des configurations éloignées qui n’ont pas été prises en compte dans la co-construction. Cela reste néanmoins extrêmement intéressant pour donner des intuitions aux participants et nous aider à penser des conditions aveugle d’un point de vue sociale. On y reviendra dans la section 7.1.

1. Une trajectoire de base qui prolonge les paramétrages utilisés dans le village jusqu'ici (pas de modification de paramètre)
2. Une trajectoire où la pluviométrie passe de 600mm à 700mm. Il est évident qu'un changement radical de pluviométrie dans les 25 à venir est impossible mais il permet de montrer une trajectoire associée à un changement de valeur de paramètre facilement imaginable.
3. Une trajectoire avec une augmentation du nombre de *Faidherbia* (de 4/ha à 6/ha).
4. Une trajectoire où la solidarité n'a plus lieu au sein du village (plus de prêts de parcelle et plus de dons de nourriture)
5. Une trajectoire où la jachère est abandonnée systématiquement (rotations sur 2 ans)
6. Une trajectoire où les bêtes peuvent pâturer partout où elle le souhaitent jour et nuit (alors que le scénario nominal les garde au piquet la nuit dans les parcelles des propriétaires).

L'analyse des résultats de simulation fournit des informations sur l'impact de plusieurs stratégies de gestion des ressources. Voici quelques observations sur 5 mesures (fig. 6.1, 6.2 et 6.3) dans le contexte des 6 scénarios décrits avant.

Précisons tout d'abord le protocole de ces analyses. Les simulations se déroulent sur 50 ans. Les 25 premières années sont paramétrées avec les conditions réelles décrites par les acteurs et avec les valeurs de paramètres de calibrage obtenus pour les paramètres techniques. Notamment la croissance démographique reste toujours aussi soutenue (*1.38% de croissance annuelle*) sur les 50 années de simulation.

On va s'intéresser aux résultats en entrant par les scénarios.

Scenario de base :

Le scénario de base poursuit les tendances décrites et observées ces 25 dernières années. On observe une accélération de la perte de qualité de sol autour de la 15^e année de simulation quand la jachère commence à être rognée. En effet, moins de jachère signifie une moindre capacité à accueillir du bétail et donc une fumure moindre, d'où la baisse de qualité de sol. À partir du point de bascule, les pratiques actuelles (scénario de Base) ne permettent pas de contenir la baisse rapide de la qualité du sol. Comme la jachère est rognée un peu plus chaque année pour nourrir une population toujours en croissance soutenue (fig 6.2a), la qualité du sol tend progressivement vers celle d'un système à rotation bisannuel, c'est-à-dire sans jachère (scénario n°5, en violet). Les rendements de mil continuent à diminuer 6.1b jusqu'à se stabiliser en dent-de-scie autour de 525kg/ha. La taille du troupeau (fig. 6.2b) qu'on est en mesure de nourrir à partir du territoire se réduit également au fur et à mesure de la disparition de la jachère (qui abrite le troupeau une partie du temps). Enfin la population continue de monter au-delà du point de bascule jusqu'à un maximum qui correspond au moment où la jachère a complètement disparu (fig. 6.2a), c'est-à-dire autour de 30 ans. L'érosion de la fertilité, et les difficultés à la reconstituer par le troupeau tirent le système démographique dans un équilibre dynamique autour de 450 individus pour le quartier.

Scénario pluvieux :

Nous avons simulé ce scénario par ce qu'il est défini par les participants comme un scénario pluviométrique d'une bonne année. Avant le point de bascule, la quantité de précipitation utilisée est de 600mm chaque année. D'un point de vue didactique, cela nous permet aussi d'envisager qualitativement l'effet compensatoire sur le système socio-spatial de bonnes années à répétitions. Ce scénario avec une pluviométrie de 700mm tend progressivement vers la trajectoire de base. Cette pluviométrie a une incidence sur les rendements de mil qui restent

supérieurs au scénario de base (fig. 6.1b). Cette meilleure pluviométrie permet donc de retarder le moment où la jachère est totalement rognée (fig. 6.2a) en apportant des rendements plus fort.

Les troupeaux disposent de plus de résidus de récolte ce qui leur permet de se stabiliser à un nombre d'individus plus haut que dans les scénarios de base et le scénario sans jachère (fig 6.2b). Ces meilleurs rendements de mil permettent de supporter également une population plus élevée que le scénario de base. On retrouve donc ici les idées véhiculées par les participants aux ateliers qui comptent beaucoup sur la pluie pour activer le système.

Scénario *Faidherbia* :

Le scénario où l'on augmente le nombre de *Faidherbia* par hectare (passant de 4/ha actuellement à 6/ha²) est de loin le plus propice au maintien de la qualité du sol (et même à une augmentation pendant quelques années). Cette trajectoire en nette amélioration de la qualité du sol a un effet immédiat sur les rendements en mil qui suivent une trajectoire en cloche pour se stabiliser à plus de 15% plus haut (fig. 6.1b). La jachère tend à disparaître, mais cette disparition est très largement retardée dans les 25 années de futur simulé. La taille du troupeau (fig. 6.2b) atteint des valeurs les plus hautes des 6 scénarios simulés. Cela est dû à une disparition tardive des surfaces de jachère, et a des rendements de culture améliorés. Enfin, du point de vue de la population, il semble que l'augmentation à 6 *Faidherbia* par hectare permet d'atteindre les démographies les plus fortes (fig.6.3).

Scénario sans solidarité (couleur moutarde) :

2. En gardant à l'esprit que les acteurs considèrent que le nombre adéquat de *Faidherbia* par hectare est de l'ordre de 20.

Le scénario où l'on supprime les mécanismes de solidarité permet de garder une haute qualité de sol (fig 6.1a). La raison est simple : cela entraîne un vaste exode de la population (fig. 6.3), ainsi les rendements et la jachère peuvent être préservés (fig. 6.1b6.2a). La taille des troupeaux se stabilise au-dessus de 150 individus, ce qui permet de maintenir la fertilité des sols, de la jachère, et les rendements de mil. Si ce scénario est le plus propice aux rendements et à la fertilité des sols, il est également celui qui met le plus en tension les populations entraînant de nombreux départs du village.

Scénario d'abandon de la jachère systématique L'abandon de la jachère au moment du point de bascule du système fait suivre à la qualité du sol la même trajectoire que le scénario de base. Ceci s'explique par le fait que dans le scénario de base, on tend vers un système de culture bisannuel du fait de la disparition progressive de la jachère.

Sénario de pâturage de partout

Le scénario favorisant un pâturage libre des bêtes sur toutes les parcelles de la jachère, puis et sur toutes les parcelles après la récolte³, permet ponctuellement d'améliorer la qualité des sols, mais finalement ne fait que retarder le décrochage (fig. 6.1a). La courbe des rendements suit la même trajectoire. Le haut de la courbe en cloche étant le moment où la jachère a réussi à se stabiliser (pendant 10 ans). Une fois que la jachère recommence à être mise à contribution pour les cultures, le nombre de têtes de bétail que le territoire peut abriter est lui aussi amené à diminuer en suivant le même type de trajectoire en cloche (fig. 6.2b). Une hypothèse pour expliquer ce comportement pourrait être que dans ce type de pâturage, la fumure est moins soumise à la disparité de surface agricole ce qui permet dans un premier temps de répartir de

3. Les pratiques actuelles amènent généralement à fumer les parcelles qui seront en mil l'année suivante.

6 Explorer en marche avant – évolution one factor at time

manière plus homogène les apports fertiles, mais cela finit tout de même par être insuffisant au regard de la population.

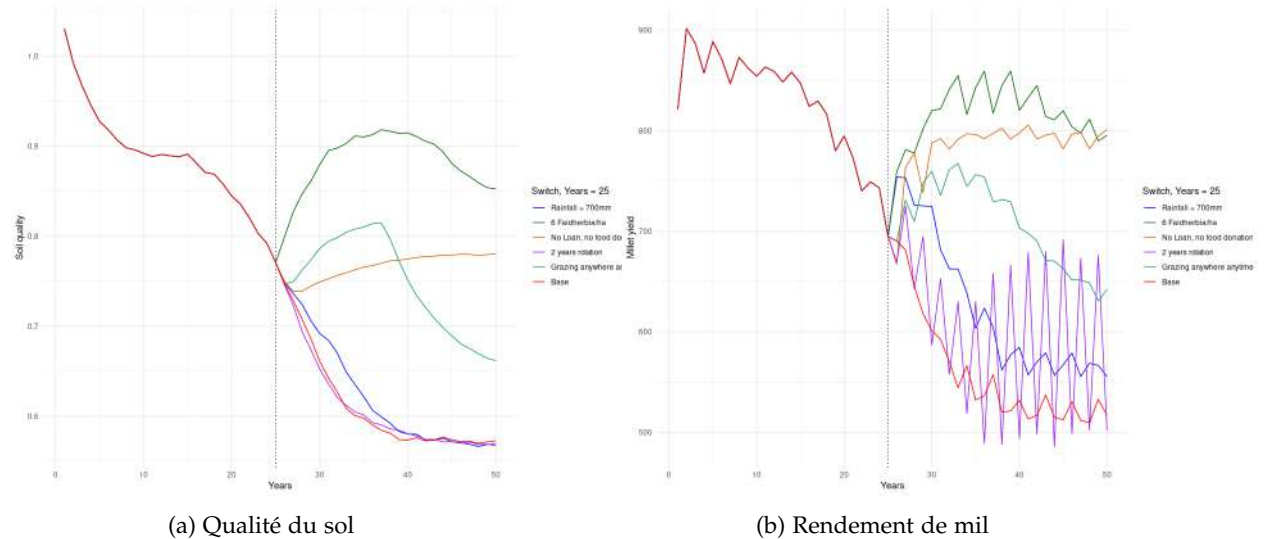


FIGURE 6.1 – Les figures montrent l'évolution du système au regard des 6 scénarios, avant et après un point de bascule simulé au bout de 25 ans de simulation. La fig. a) reprend l'évolution de la qualité du sol, fig. b) l'évolution du rendement de mil.

6 Explorer en marche avant – évolution one factor at time

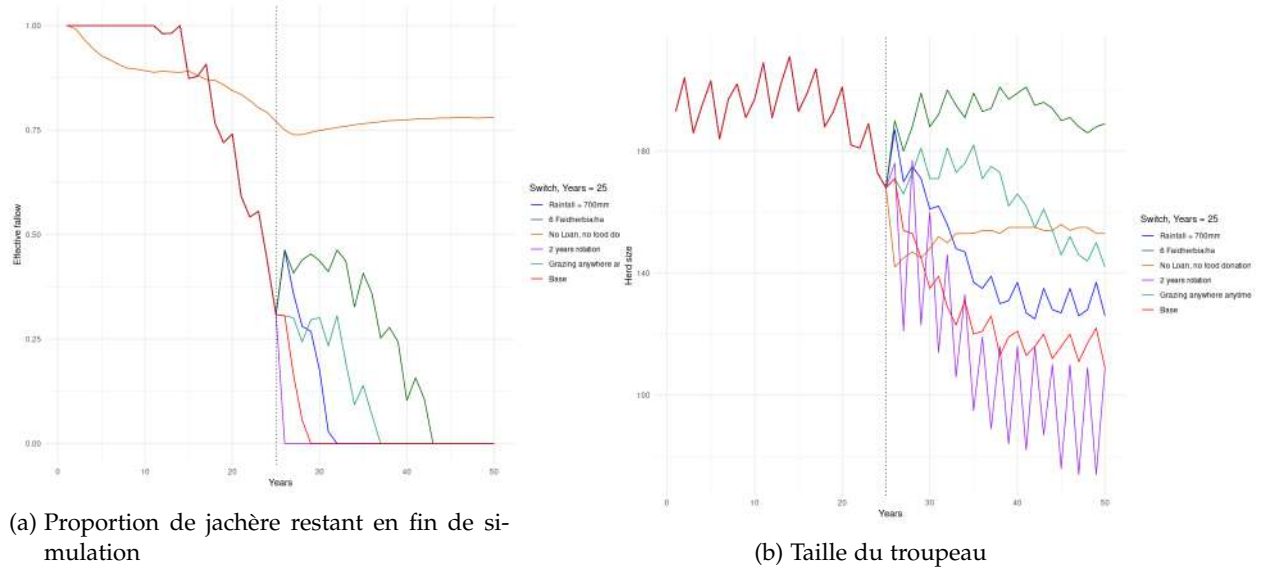


FIGURE 6.2 – Les figures montrent l'évolution du système au regard des 6 scénarios, avant et après un point de bascule simulé au bout de 25 ans de simulation. La fig. a) suit l'évolution de la jachère au cours de la simulation (quand la jachère est à 1, elle n'a pas été touchée pour d'autres pratiques, quand elle est à zéro elle n'existe plus), fig. b) l'évolution du cheptel qu'il est possible de nourrir sur la surface du village.

6 Explorer en marche avant – évolution one factor at time

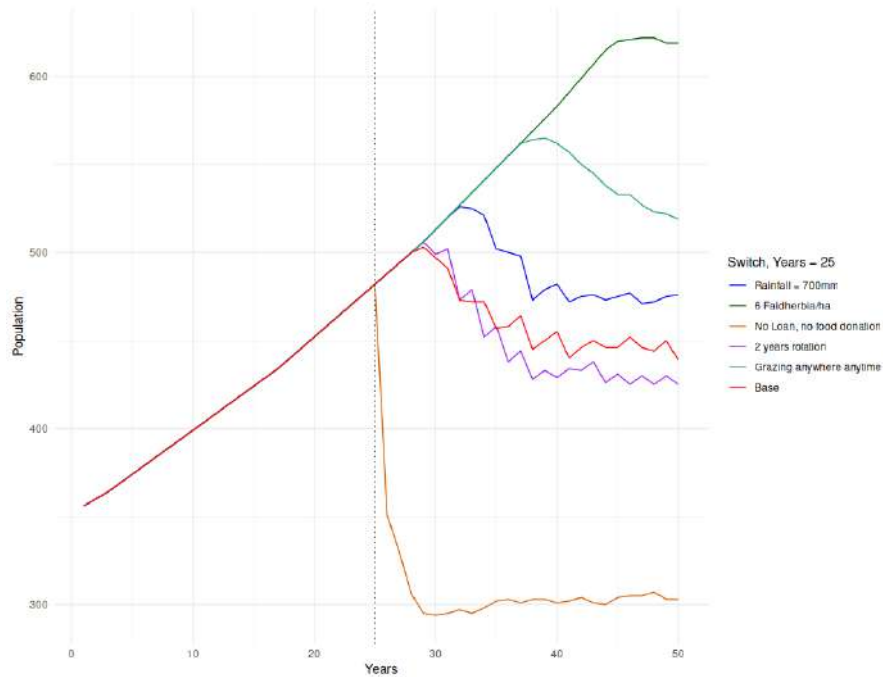


FIGURE 6.3 – Évolution de la population selon plusieurs scénarios à partir de l'année 25

7 Explorer la diversité des résultats de simulations

Nous avons procédé en deux temps : le premier où nous avons manipulé le modèle avec les acteurs pour produire des scénarios contrastés pour lesquels nous leur proposons des narratifs. Puis, dans un second temps, nous avons travaillé avec les participants à construire collectivement des narratifs pour les simuler ensuite ensemble. Cette stratégie a permis aux acteurs de se saisir du modèle avec tact¹, pour ensuite aller l'interroger dans des situations qui leur semblaient intéressantes. Et de fait, les deux situations simulées avec eux nous ont donné à voir des situations de désaccord au sein du groupe quant aux orientations individuelles et collectives. Il faudrait donc continuer l'accompagnement pour que ces discussions puissent avoir lieu au delà du groupe multiacteur initialement constitué pour représenter différents types d'acteurs.

1. Pour STENGERS, (Isabelle STENGERS. « 5. L'art des modèles ». fr. In : *Cosmopolitiques*. Les Empêcheurs de penser en rond. Paris : La Découverte, 2022, p. 482-495. ISBN : 978-2-35925-222-4. URL : <https://www.cairn.info/cosmopolitiques--9782359252224-p-482.htm> [visité le 05/03/2024], p.490) "Le tact est une qualité le plus souvent requise de ceux qui ont affaire à des humains, mais il désigne en fait une problématique beaucoup plus générale, celle d'une relation créée avec un être à qui l'on suppose un problème, et dont on croit pouvoir identifier le problème, mais dont on ne sait pas comment ce problème se pose pour lui. Le tact traduit donc une obligation qui limite le pouvoir de celui qui pense connaître le problème : il sait, accepte et veut une relation qui intègre la question ouverte de ce « comment », et qui aménage le temps approprié à la création d'une réponse à cette question"

7.1 Produire des situations contrastées à discuter

Les situations suivantes sont des exemples d'utilisations du modèle en marche avant, en interprétant les valeurs d'entrées et les sorties, présentées aux acteurs pendant l'atelier

Première situation (c.f. fig. 7.1a)

Au Sénégal, à Diohine, la pluie n'a pas manqué, les récoltes d'arachide ont été normales (430kg/ha), mais l'arachide s'est assez mal vendue. L'inflation ne s'est pas calmée et le riz est resté relativement cher. Les cuisines du quartier n'ont pas planté de faidhebria, le nombre d'arbres a réussi à se maintenir en petit nombre dans les champs.

La croissance démographique s'est maintenue dans la même trajectoire que ces 50 dernières années, mais la taille des cuisines (les familles) s'est un peu réduite (10 personnes). Il y a donc une tension sur la ressource de champs, et la jachère n'existe presque plus, ce qui met en tension les troupeaux des famille et la fertilité des champs qui doit être compensée autrement.

Deuxième situation (c.f. fig. 7.1b)

Au Sénégal, à Diohine, peu de pluie (300mm). Cette sécheresse a mis en difficulté les plantations, l'arachide est devenue précieuse et se vend cher du fait des moindres récoltes. Les familles du quartier n'ont pas planté de faidhebria, le nombre d'arbres a réussi a se maintenir en petit nombre dans les champs.

La croissance démographique s'est maintenue dans la même trajectoire que ces 50 dernières années, mais les difficultés économiques ont contraint les familles à l'exode vers les métropoles. Cette diaspora aide avec de maigres moyens les familles restées au village. La jachère a repris une place importante dans le système de culture, ce qui a permis d'augmenter le nombre de vaches que les familles possèdent. La vie pastorale est bien plus forte.

Troisième situation (c.f. fig. 7.1c)

Au Sénégal, à Diohine, la pluie se maintient. Les récoltes d'arachide et le mil ont réussi à rester assez bonnes grâce à cette pluie sahélienne. La fertilité des sol est conservée car les familles ont réussi à stimuler le renouvellement des arbres. Ces arbres qui perdent leurs feuilles pendant la saison des pluies permet d'utiliser les principes de l'agro-écologie.

La population du village est restée assez basse du fait de l'émigration. La jachère a pu garder un rôle important dans les pratiques des agriculteurs. Le bétail profite de cet espace en saison des pluies ce qui stimule la fertilité de ces sols.



(a) Première situation



(b) Deuxième situation



(c) Troisième situation

FIGURE 7.1 – Les images générées par DALL-E, et qui ont illustré les situations contrastées. Ces images ont été montrées aux participants pour rattacher le narratif de la simulation à un artefact visuel.

7.2 Des proposition d'exploration par les acteurs

Lors de l'atelier des 5 et 6 février 2024, nous avons divisé les participants en deux groupes en leur demandant de proposer des visions alternatives du futur que nous pourrions ensuite regarder au prisme du modèle.

Deux propositions alternatives ont été élaborées :

Groupe 1 (c.f. fig 7.2a :

La pluie est au rendez-vous sur cette période. Les pluies sont suffisantes et bien réparties sans poche de sécheresse ; les récoltes sont donc plutôt favorables. Il n'y a pas de conflit avec les voisins et le bétail peut donc sortir des limites du village pour pâturer d'autres espaces. Pourtant la fumure est insuffisante, seulement 30% des terres bénéficient d'apports. Il y a plus d'arbres, les habitants se sont saisis de la question de la régénération du parc arboré, des pépinières communautaires se sont montées pour accompagner le reboisement. La devise : 'produire, planter, entretenir'. Les utilisateurs de la terre sont chargés de protéger des outils de travail du sol, une fraction des pousses spontanées. Les inégalités sociales, et notamment d'accès à la terre, ont été prises en charge par la population. On a pris soin des plus démunis en leur fournissant des surfaces de terrain données par les nantis. De cette façon on améliore la justice foncière. Ça mettra à l'aise les cuisines nanties qui n'auront plus besoin de subvenir au besoin des cuisines les plus démunies. Cela peut être fait par contrat pour sécuriser les différentes parties.

L'état maintient le prix du riz de manière à conserver un taux de change de 2 avec l'arachide. C'est-à-dire qu'on peut acheter 2 kg de riz avec 1 kg d'arachide.

L'état maintient et amplifie la subvention aux engrais. N.B. : Aujourd'hui l'engrais subventionné est insuffisant : 11000 CFA pour un sac qui permet d'amender $\frac{1}{4}$ d'hectare de mil. Sur le

marché non subventionné on trouve le sac entre 13000 et 16000 CFA (ce sont des sacs de 50kg).

La démographie dans la zone a baissé et les jeunes couples font entre 2 et 3 enfants. Les enfants d'aujourd'hui ont plus de besoins qu'avant.



(a) Première situation



(b) Deuxième situation

FIGURE 7.2 – Les images générées par DALL-E, à partir des narratifs des acteurs

Groupe 2 (c.f. fig 7.2b)² :

La région a bénéficié d'une bonne répartition des précipitations, recevant de la pluie au moins une fois toutes les deux semaines pendant trois mois, ce qui a favorisé la croissance des

2. Merci à François Vendel (CIRAD - UMR SENS) pour l'accompagnement des acteurs sur ce groupe

7 Explorer la diversité des résultats de simulations

cultures. Les cultures de mil ont particulièrement bien réagi, avec des rendements impressionnants de 1 300 kg par hectare. Ces résultats sont dus à l'adoption de pratiques agricoles efficaces dans la région, incluant l'utilisation de 10 tonnes de compost par hectare.

La communauté a compris l'importance de renouveler les arbres de *Faidherbia*, et en 25 ans, le nombre d'arbres par hectare est passé de 5 à 7.

Pour promouvoir l'équité, les autorités locales ont redistribué les terres de manière équitable entre les familles, résultant en huit parcelles de terre par ménage.

Le niveau de vie des familles est estimé par le rapport entre les prix du riz et de l'arachide. Actuellement, ce ratio est de 1.21, indiquant que le riz est relativement cher par rapport à l'arachide, une culture commerciale. Cela peut limiter l'accès au riz pour certaines familles.

Le gouvernement a réduit les subventions pour les engrais, n'offrant qu'un sac de 50 kg aux familles en besoin.

La population n'ayant pas évolué, beaucoup ont migré vers les villes en quête de meilleures opportunités.

8 Bilan réflexif technique et méthodologique

Nous avons présenté dans ce rapport une première expérimentation de l’exploration d’accompagnement (ComExp); quelques éléments techniques et méthodologiques méritent d’être précisés et améliorés.

8.1 Un modèle déterministe, rapide et polymorphe

Le modèle de simulation a été développé de façon ad-hoc, sans utiliser de plateforme de simulation à base d’agents (ce qui pourrait limiter sa diffusion à la communauté des modélisateurs), ni d’interface graphique représentant le modèle et son évolution. Couplés à d’autres techniques bien choisies¹, ces choix ont abouti à un modèle dont le temps d’exécution est inférieur à la seconde. Le code source est disponible ici : <https://github.com/ElCep/DSCATT/tree/master/model/scala>

Par ailleurs, une attention particulière a été portée à rendre le modèle de simulation déterministe. En réduisant toutes les sources d’aléatoire, on s’assure que le modèle produise

1. e.g. l’utilisation de fonctions récursives efficaces et le pré-calcul d’allocations des parcelles aux cuisines pour différents niveaux d’inégalité.

un, et un unique résultat pour un jeu de paramètre d'entrée. Ainsi, nous n'avons pas à réaliser des réplifications comme il est d'usage avec des modèles stochastiques. Ces réplifications obligent d'ordinaire à considérer le comportement moyen (ou médian) d'un potentiellement grand nombre d'exécutions du modèle à paramétrage constant, ce qui allonge d'autant la durée des expériences.

Enfin, le modèle expose des mécanismes dont on peut changer l'implémentation aussi simplement qu'on change la valeur d'un paramètre. Par exemple, le mécanisme de prêt de parcelles existe en 3 variantes : *Pas de prêt*, *Prêts de n'importe quelle parcelle excédentaire*, *Prêts de parcelles n'étant pas en jachère cette année*. On peut donc explorer non seulement des valeurs de paramètres mais également plusieurs versions (ou familles) de modèles. Cette approche permet en outre d'ajouter des implémentations facilement pour étendre les champs d'investigation dans le futur.

8.2 Un environnement de calcul performant et disponible immédiatement

Même si le modèle s'exécute rapidement, les méthodes d'exploration d'OpenMOLE , en particulier la calibration et l'exploration de son espace de sortie (PSE) nécessitent un grand nombre d'exécutions du modèle, qu'il n'est pas raisonnable de lancer sur une machine personnelle, quand bien même le modèle est rapide.

Nous pouvions mobiliser un cluster de 128 CPU pour nos plans d'expériences : le délai moyen d'attente pour observer les premiers résultats de calibration était environ d'une demie-heure, ce qui offre une souplesse très confortable pour faire des allers et retours avec les

acteurs : d'une journée à l'autre, nous pouvions rentrer de l'atelier avec des idées de scénarios ou d'objectifs exprimés par les acteurs, lancer nos calculs en fin de journée et le soir, préparer les résultats exposés le lendemain en atelier.

8.3 Faire jouer le modèle sans interface graphique

Beaucoup de plateformes de simulation à base d'agents, comme GAMA, Netlogo ou Comas, proposent une visualisation de l'environnement et des agents qui composent un modèle à base d'agents.

Dans notre cas, une exécution du modèle consistait simplement en la saisie des paramètres d'entrées dans le code du modèle, et à une sortie standard dans un terminal.

Cela n'a pas semblé perturber ou frustrer les acteurs, qui au contraire cherchaient activement des yeux les lignes où étaient inscrites les valeurs d'intérêt (e.g. la population du village chaque année, ou la taille du troupeau) pour voir ce qui changeait d'un scénario à l'autre.

Néanmoins, dans une itération ultérieure de ComExp, une sortie graphique (éventuellement animée bien que ce ne soit pas incontournable) pour décrire plus finement des séries temporelles, et les afficher côte-à-côte, sera un appui utile.

9 Perspectives

9.1 Les prochaines explorations du modèle : diversifier les sorties par la méthode PSE, remonter aux origines avec la méthode OSE

Étant donnée l'interaction complexe entre les mécanismes du modèle, et leur conséquence variable en fonction des valeurs d'entrées, il est difficile de délimiter a priori l'étendue des sorties distinctes possibles du modèle.

Nous utilisons pour cela une méthode d'exploration dédiée, PSE (pour Pattern Space Exploration)¹, pour estimer l'étendue des sorties différentes selon plusieurs dimensions dans l'espace des sorties, lorsqu'on laisse libre ses entrées.

PSE produit de la diversité, et cette diversité recouvre des situations très contrastées, qu'il est intéressant de confronter les unes aux autres et de discuter. Inévitablement, certaines situations sont obtenues pour des valeurs d'entrées extrêmes² qu'il est peu probable d'observer sur

1. Guillaume CHÉREL, Clémentine COTTINEAU et Romain REUILLON. « Beyond Corroboration : Strengthening Model Validation by Looking for Unexpected Patterns ». en. In : *PLOS ONE* 10.9 (sept. 2015). Publisher : Public Library of Science, e0138212. ISSN : 1932-6203. DOI : 10.1371/journal.pone.0138212. URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0138212> (visité le 06/06/2023).

2. voire impossibles dans la réalité, tout dépend des valeurs que l'on s'autorise à fournir en entrée.

le terrain. Pourtant, ces situations enrichissent la discussion dans un contexte d'exploration d'accompagnement : elles donnent des points de repère, des valeurs de référence possibles, utiles pour préciser et nuancer le discours que l'on produit à propos d'autres situations, plus plausibles³.

Pour chaque situation découverte par PSE, on dispose d'un paramétrage (le vecteur des valeurs d'entrées) qui y a abouti. Ce n'est pas le seul susceptible de mener à la situation, seulement l'un d'entre eux. Pour approcher l'ensemble des antécédents d'une situation (i.e. les différents paramétrages qui y mènent), nous utilisons une autre méthode dédiée : OSE (Origine Space Exploration). PSE et OSE se combinent bien : on peut identifier dans l'étendue des possibles découverts par PSE quelques situations intéressantes , et découvrir comment y parvenir par la méthode OSE.

Dans le cas où une situation intéressante possède plusieurs antécédents, ceux-ci peuvent être discutés collectivement, comme des scénarios alternatifs «équivalents», puisqu'ils produisent la même situation terminale, mais emploient des moyens différents (i.e. des valeurs de paramètres d'entrée) pour y parvenir.

Cette exploration combinée «PSE puis OSE» nous paraît intéressante à mobiliser pour la Recherche-Action

9.2 Recherche Action

Il serait intéressant d'expérimenter les résultats de l'exploration OSE du modèle dans un contexte d'accompagnement.

3. paul_chapron_co-construire_2022-1; DELAY et al., cf. note 7; CHAPRON et al., cf. note 7.

L'idée serait de retourner à Diohine en atelier et de mobiliser les acteurs pour :

- exposer les antécédents découverts par OSE pour quelques situations "désirables".
- confronter et comparer les antécédents, en mettant l'accent sur les entrées pour lesquelles les acteurs ont une marge de manoeuvre : les faidherbia, le planning familial, la taille du troupeau.
- discuter la crédibilité des valeurs d'entrées des résultats d'OSE : peut-on s'en approcher ? qui réunir pour en parler ?
- esquisser l'implémentation : au quotidien, comment faire pour atteindre les valeurs d'entrées ?
- discuter l'acceptabilité de ces éventuels changements : peuvent-elles faire l'objet de concertations collectives régulières au même titre que l'orientation des cultures ?

9.3 Recherche académique

L'approche relationnelle des méthode ARDI a l'avantage d'amener au même niveau dans la concertation des objets d'enjeux assez découplés à première vue : jachère, faidherbia, rendement, démographie, solidarité. La modélisation et l'exploration du modèle qui en découle prolonge cet avantage, et renforce le statut du modèle comme outil de médiation et d'activation des liens entre ces dimensions. C'est ce que nous voudrions diffuser comme «résultats».

Nous prévoyons de décrire le modèle et son exploration dans deux articles : le premier qui présente le modèle et sa calibration sur les données et les éléments apparus en ateliers, le second plus centré sur la méthodologie de ComExp et comment elle complète l'approche ComMod en intégrant l'exploration du modèle au cours de l'accompagnement.

9.4 Conclusion

Ce travail est le résultat de la conduite d'un processus ComMod de bout en bout, y compris en introduisant l'exploration d'accompagnement⁴. La capacité à mener ce processus de A à Z nous a permis non seulement de calibrer le modèle avec des données, ce qui est courant en science, mais également de l'ajuster selon l'avis d'experts, en considérant les participants comme tels⁵. Cette calibration, en automatisant la détection de motifs dans des indicateurs élaborés avec les acteurs, représente une innovation sur le plan méthodologique.

Une fois le modèle calibré, il devient possible de simuler l'impact à long terme d'une pratique sur 25 ans, mais également de réaliser des simulations rétroactives (méthode OSE), partant des résultats obtenus après 25 ans pour analyser les trajectoires ayant conduit à ces résultats.

Cet exercice de simulation prospective et rétrospective est particulièrement stimulant d'un point de vue méthodologique pour les participants, et favorise l'émergence de discussions sur des sujets cruciaux⁶, tels que la démographie et la planification familiale, ou l'impact de la taille du cheptel en remettant en question la nécessité de la reproduction de celui-ci.

Bien que ce rapport mette en avant certains résultats, le processus de recherche a soulevé de nombreuses autres questions. Aussi bien vis-à-vis du modèle lui-même, que vis-à-vis des pratiques de modélisation. Du point de vue du modèle, nous nous interrogeons maintenant sur l'impact des inégalités spatiales dans la distribution des terres, sur les flux migratoires, et

4. DELAY et al., cf. note 7 ; CHAPRON et al., cf. note 7.

5. PERCEVAL, Kaamelott, Livre I, Tel un chevalier, "je suis souvent victime des colibris, sous-entendu des types qu'oublie toujours tout. Euh non. . . Bref, tout ça pour dire que je voudrais bien qu'on me considère en tant que tel"

6. et que nous nous représentions d'ailleurs comme des sujets sensibles voire tabou, mais qui ont été abordés franchement et naturellement par les acteurs eux-mêmes.

sur les dynamiques d'absorption ou de fragmentation des unités de cuisines, qui sont autant de facteurs à l'œuvre dans les pratiques socioagricoles des agropasteurs de Diohine. Du point de vue des pratiques de modélisation, le fait de réaliser ce travail en coopération avec les acteurs nous a amenés à identifier ensemble les éléments nécessaires au modèle de simulation, puis à nous écarter afin que la machine puisse l'analyser. Les scientifiques observent alors les activités du modèle, notamment ce qu'elle parvient à détecter, et cherchent à comprendre et corriger les éventuelles imperfections (les bugs).

Ce processus d'ajustement se répète jusqu'à ce que le modèle fonctionne comme prévu. Bien qu'il y ait interaction au départ, une fois que la machine atteint un fonctionnement stable, le scientifique acquiert de nouvelles connaissances et peut réinterpréter l'expérience différemment. Au cours de ce processus, les concepteurs (acteurs locaux ou scientifiques) peuvent vivre des transformations profondes, se fondant dans le rôle de l'appareil, et se confronter à la réalité qu'ils tentent de saisir. STENGERS⁷ écrit "le monde témoigne à travers la machine, le fonctionnement de la machine s'explique à partir du monde". Les modèles de manière générale cherchent à répondre à deux finalités : *i*) soumettre le terrain, le dompter, anticiper, prédire, *ii*) stimuler les questions, faire exister le terrain par les questions. Il y a donc une relation de pouvoir entre terrain et modèle que nous avons cherché à minimiser, car de cette manière on peut réduire le décalage entre les perceptions des acteurs et les implications de leurs actions. Nous avons essayé d'éviter une science participative purement extractive. Il est essentiel de ne pas se contenter de puiser des connaissances dans les communautés sans retour, mais de s'assurer que ces connaissances servent réellement à améliorer la situation de ceux qui y contribuent.

7. Isabelle STENGERS. « 4. L'artifice et la vie ». fr. In : *Cosmopolitiques*. Les Empêcheurs de penser en rond. Paris : La Découverte, 2022, p. 465-481. ISBN : 978-2-35925-222-4. URL : <https://www.cairn.info/cosmopolitiques--9782359252224-p-465.htm> (visité le 05/03/2024), p.475.

Remerciements

Merci !

Merci à tous les acteurs participant ou ayant participé à nos ateliers : Marie-Hélène, Aïssatou, Ndieye, Pierre, Simon, Joseph, Paul, Ameth, Marcel, Idrissa, Ablaye, Hassan. À Myriam GRILLOT, et encore plus Arthur SCRIBAN, pour nous avoir partagé leur modèle de sol et nous avoir éclairés de leur lumière agronomique, à Abigail FALLOT pour son soutien sans faille et son goût pour les métaphores inspirantes, à Dominique MASSE pour ses conseils avisés et son recul sur les modèles multi-agents qui tentent de faire de l'agronomie, son goût pour le partage et son amour de l'histoire de la zone, à Habibou ASSOUMA pour nous avoir appris la composition du bol alimentaire des vaches sahéliennes. Un Grand Merci à Maxime COLOMB, pour avoir conçu pour nous un modèle qui produise des parcelles en assolement triennal, à Thibault RAFFAILLAC pour son outil de visualisation de PSE⁸. à Valérie DELAUNAY et Lucas BROUTIN pour avoir partagé leurs données démographiques et arboricoles de la zone de Diohine, aux personnes du projet CERAIO, pour les données spatiales décrivant les parcelles de Sassem, à l'IJC Lab du CNRS pour nous avoir laissé utiliser leur cluster.

Les images d'illustration ont été générées avec DALL-E.

8. DataViz <https://traffaillac.github.io/visuMOLE/>, consulté le 4 février 2024.