

## Mémoire pour la validation du master 1 GAED parcours NOURAD

# Réflexions géographiques pour une exploration d'accompagnement : quelle concertation à Diohine (Sénégal) pour la régénération du *kad* (*Faidherbia albida*) ?

Par Lucas Broutin

Année de soutenance : 2022

Présenté le : 7 septembre 2022

Devant : Alexis Gonin et Etienne Delay

**Organisme de formation** : Université Paris Nanterre

**Organisme d'accueil** : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD)

**Directeur** : Alexis Gonin (LAVUE)

**Maîtres de stage** : Etienne Delay, Abigail Fallot, Arthur Perrotton (CIRAD)

# Remerciements

Je tiens avant tout à remercier Etienne Delay. D'abord, pour avoir cru en ce stage et mener les longues démarches pour trouver des financements. Ensuite, pour m'avoir fait découvrir avec enthousiasme son univers scientifique. Enfin et surtout, pour m'avoir chaleureusement accueilli au Sénégal et apporté du soutien quand cela était nécessaire.

Je remercie aussi chaleureusement Abigail Fallot, pour sa disponibilité et son aide, tout au long de ma présence au CIRAD à Montpellier. Merci également à Arthur Perrotton pour son engagement.

Je tiens à remercier Alexis Gonin, mon tuteur de stage, pour ses remarques avisées.

Mes remerciements vont aussi à mon père, plutôt familier des corrections de mémoire d'art ou de design, qui a pris la peine de se plonger dans celui-ci.

Merci à tous les chercheurs du labo SENS et au personnel administratif avec qui j'ai pu échanger, Nathalie Rovis particulièrement.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à Aissatou Faye, qui m'a aidé quotidiennement dans mon travail à Diohine et qui m'a montré ce qu'était la *Teranga* sénégalaise. Merci à Robert Diatte avec qui j'ai partagé la majorité de mes repas, aux gardiens, Boukar, Elhadji, Issa et au chef de la station de Niakhar, Adiouma Faye.

Un grand merci à toutes les personnes rencontrées, qui ont pris le temps de me partager leur précieux savoir. Rien n'aurait pu être possible sans leur participation.

Je tiens aussi à saluer Pape Faye, Lucie Van Houtte, les volontaires internationaux, doctorants et stagiaires de l'IRD à Dakar ainsi que les stagiaires du CIRAD à Montpellier. Il était important pour moi de partager ces moments d'amitié.

## Résumé :

Le village Diohine, situé au cœur du bassin arachidier sénégalais, est caractérisé par la survivance d'instances de concertation villageoises traditionnelles. Au sein du projet DSCATT (Dynamiques de la Séquestration du Carbone dans les sols agricoles de zones Tropicales et Tempérée), différentes séries d'ateliers y ont été menées dans le but de co-concevoir, avec un groupe d'acteurs locaux, une vision partagée du futur souhaitable de leur village et des pratiques en jeu pour y parvenir. Cette étude s'inscrit dans ce processus d'accompagnement en prenant comme objet l'arbre. Face à la dégradation du parc arboré et à l'augmentation de la pression sur les ressources ligneuses, il s'agissait d'une part de mieux saisir les enjeux locaux gravitant autour de l'arbre, d'autre part, d'initier un processus concertatif autour de sa gestion. La tenue d'ateliers avec les parties-prenantes et la conduite d'entretiens et d'observations, ont permis d'identifier et de hiérarchiser les enjeux de la gestion du parc. La régénération du *Faidherbia albida* apparaît ainsi comme l'élément central du maintien de la vitalité du socio-écosystème productif de Diohine. Un modèle informatique a pu être formalisé, pour soutenir les réflexions autour des potentialités de densification du parc. Après avoir été discuté avec les parties-prenantes, il a fait l'objet d'une exploration algorithmique visant à faire émerger des éléments de prospective, à intégrer dans les délibérations. Le temps passé par les agriculteurs dans les champs en saison sèche ; leur capacité à faire de la protection des pousses un sujet quotidien ; l'organisation de réunions spécifiquement dédiées à la protection des arbres apparaissent ainsi déterminants pour assurer une densification du parc à *Faidherbia albida*. Cet usage original du modèle ancre l'étude dans le champ émergent de "l'exploration d'accompagnement".

## Table des matières

<b>Remerciements.....</b>	<b>2</b>
<b>Résumé :.....</b>	<b>3</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>6</b>
<b>Partie I : Fondement et intérêt de la démarche de modélisation d'accompagnement, au regard du contexte territorial de Diohine .....</b>	<b>10</b>
<b>1. Le socio-écosystème productif de Diohine .....</b>	<b>10</b>
A. Un territoire sahélien, soumis à de fortes contraintes pédo-climatiques .....	11
B. Le bassin arachidier, une zone rurale et agricole fortement anthropisée.....	13
C. Le parc arboré : un élément central du socio-écosystème productif de Diohine de plus en plus menacé. ....	17
<b>2. La modélisation d'accompagnement au service de la gestion des ressources renouvelables comme ancrage conceptuel et méthodologique.....</b>	<b>21</b>
A. Etudier les ressources renouvelables à travers l'approche par les communs. ....	21
B. La notion de socio-écosystèmes complexes pour répondre aux enjeux environnementaux actuels.....	23
C. Le modèle multi-agents, un outil particulièrement adapté à la géographie et à l'approche par les communs .....	25
D. La modélisation comme objet intermédiaire au service de l'accompagnement.....	27
<b>Partie II : Appréhender la complexité du « système arbre » à travers un processus de modélisation d'accompagnement : l'évolution d'un travail sur le terrain.....</b>	<b>30</b>
<b>1. Structuration et modélisation du système arbre à Diohine.....</b>	<b>31</b>
A. Déterminer les éléments du système et comprendre son fonctionnement général. ....	31
B. Compléter le système à travers un travail d'enquête qualitative : observations et entretiens ...	35
C. La modélisation et ces choix .....	37
<b>2. Les enjeux liés à la gestion du parc à <i>Faidherbia albida</i> : usages, besoins, surveillance et protection. ....</b>	<b>38</b>
A. Le <i>Faidherbia</i> au centre de nombreux besoins et usages.....	39
B. Le mode actuel de gestion du parc.....	45
C. Les raisons de l'absence de régénération : menaces multiples et freins .....	52
<b>3. L'implémentation du modèle et sa validation par les acteurs .....</b>	<b>60</b>
A. Des hypothèses fortes au cœur du modèle. ....	60
B. Le modèle et ses composantes .....	61
C. La nécessité de confronter ses choix et d'ancrer le modèle dans les préoccupations locales.....	65
<b>Partie III : Exploration de scénarios de gestion du parc à kad: l'utilisation du modèle après le retour du terrain. ....</b>	<b>71</b>
<b>1. Intérêt de la simulation dans une démarche d'accompagnement.....</b>	<b>71</b>
A. Expérimentation <i>in silico</i> comme affranchissement des contraintes temporelles et spatiales... 71	
B. Expérimentation comme "béquille" pour l'esprit humain .....	72

<b>2. Méthode et caractéristiques de l'exploration.....</b>	<b>72</b>
A. Un travail fondé sur l'analyse des états finaux du modèle.....	72
B. Une calibration hybride et parfois périlleuse.....	73
C. La formuler d'objectifs a priori et l'utilisation de méthode algorithmique pour prévenir l'explosion paramétrique. ....	74
<b>3. Quelques résultats de l'exploration.....</b>	<b>76</b>
A. Deux explorations distinctes et comparables.....	76
B. L'analyse de Saltelli ou la détermination des paramètres importants.....	76
C. Les plans complets autour de la surveillance populaire et de la surveillance déléguée.....	77
D. Le PSE ou la visualisation des possibles du modèle en matière de sécurité alimentaire et énergétique. ....	80
<b>4. L'exploration du modèle permet la réouverture du questionnement et le constat des éléments à approfondir.....</b>	<b>82</b>
A. L'ouverture vers de nouvelles pistes de discussion. ....	82
B. Les carences du modèle. ....	83
<b><i>Conclusion.....</i></b>	<b><i>84</i></b>
<b><i>Bibliographie.....</i></b>	<b><i>86</i></b>
<b><i>Table des figures et des tableaux.....</i></b>	<b><i>88</i></b>
<b><i>Annexes.....</i></b>	<b><i>89</i></b>

# Introduction



*Figure 1 : Photo dans la brousse silencieuse, Diohine le 27/04/2022 à 12 :57.*

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. Près de Diohine, le village dans lequel j'ai été amené à travailler, l'environnement et le parc arboré me paraissent alors particulièrement fragiles et dégradés.

Cette intuition paysagère est renforcée par les travaux, menés récemment dans le village. A.Perroton, A.Fallot et E.Delay, chercheurs au CIRAD, ont entrepris depuis mai 2021 (Perrotton et al. 2021), différentes séries d'ateliers pour co-concevoir avec des habitants de

Diohine, une vision commune du futur souhaitable de leur village. A travers les discussions ont émergé plusieurs aspirations de nature très diverses, allant d'un meilleur transfert de connaissances entre acteurs à une meilleure maîtrise de l'eau. Parmi ces aspirations, nombre d'entre elles portaient sur la restauration de l'environnement local. Dans un contexte de dérèglement climatique global et de forte croissance démographique, l'agrosystème de Diohine apparaît effectivement, aux chercheurs extérieurs comme aux habitants locaux, particulièrement dégradé. "Plus d'arbres", voilà notamment ce que souhaitent les habitants pour freiner la sahélisation (Lericollais, 1999). Ce présent travail prend comme point de départ cette aspiration formulée collectivement. Il constitue un prolongement des ateliers menés par A. Fallot, A. Perroton et E. Delay. D'une part parce qu'il a été conduit sous leur précieuse supervision, et d'autre part, parce que le travail a été mené à Diohine, avec le même noyau d'acteurs.

Si la réflexion autour de l'enjeu de la densification du parc arboré découle des aspirations locales, elle s'inscrit également dans les ambitions scientifiques du projet DSCATT. Le projet « Dynamiques de la Séquestration du Carbone dans les sols agricoles des zones Tropicales et Tempérées » est mené par plusieurs unités du Labex Agro<sup>1</sup>. Il vise à mieux comprendre les mécanismes de séquestration du carbone dans les sols agricoles, dans le but d'assurer la sécurité alimentaire et de lutter contre le changement climatique à l'échelle mondiale. Il s'agit pour cela d'étudier "les dynamiques à l'œuvre au niveau des sols, des agrosystèmes qu'ils supportent et des territoires ruraux qui les abritent, afin de fournir de nouveaux éclairages sur la fertilité des sols, la durabilité des pratiques agricoles et les possibilités de les améliorer en intensifiant la séquestration du carbone dans les sols"<sup>2</sup>. Dans ce vaste cadre, les systèmes agroforestiers sont au centre des préoccupations en tant que potentielles sources de séquestration du carbone. La densification du parc arboré, en augmentant la quantité de carbone stocké dans les sols, permet d'une part de maintenir localement la fertilité et de l'autre de lutter contre le changement climatique à l'échelle régionale voire mondiale.

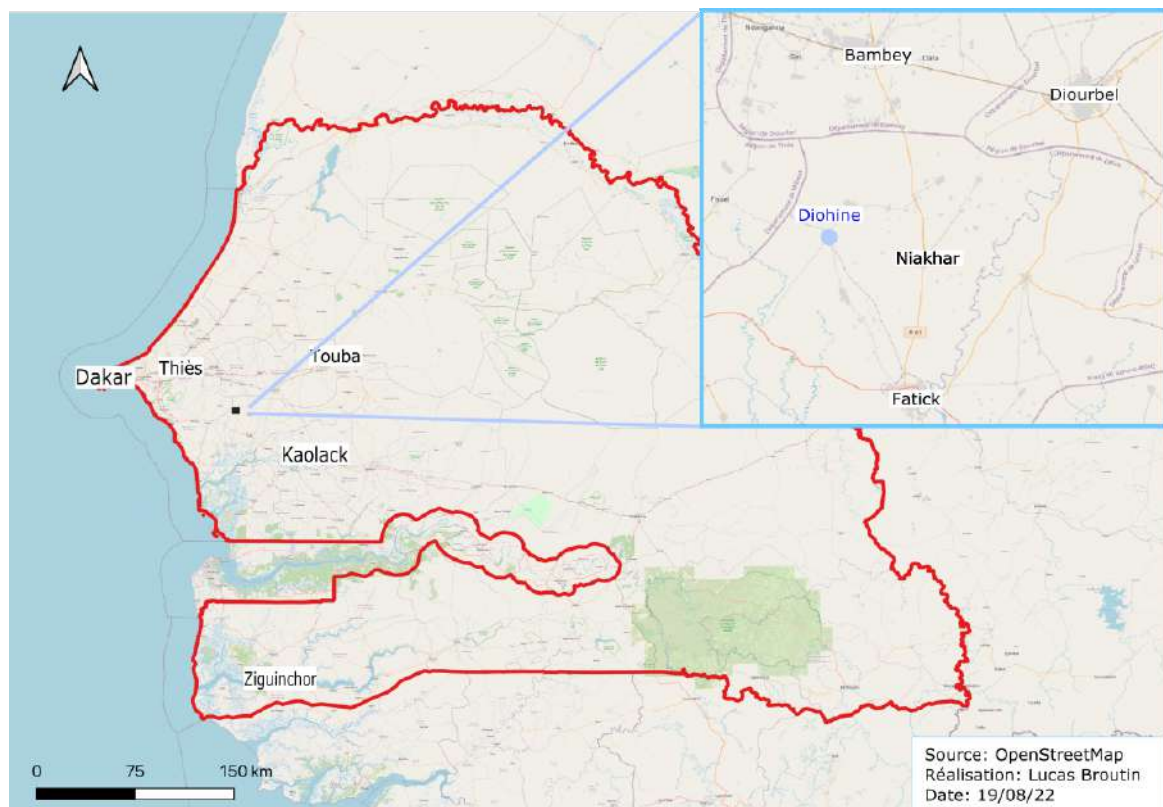
Le projet DSCATT est conduit sur 4 sites : en France, au Zimbabwe, au Kenya et au Sénégal. Le site sénégalais qui nous intéresse est caractérisé par un système agro-sylvo-pastoral ancien dans lequel le *Faidherbia albida*, acacia fertilisant les champs, occupe une place structurante. Le site est localisé au cœur du bassin arachidier historique, plus précisément dans la région de

---

<sup>1</sup> « Laboratoire d'Excellence » mettant en collaboration plusieurs unités de recherche montpelliéraines.  
<https://www.agropolis-fondation.fr/Le-Labex-AGRO-80?lang=fr>

<sup>2</sup> [www.dscatt.net](http://www.dscatt.net)

Niakhar, dans laquelle l'IRD (Institut de Recherche et de Développement) est présent depuis de nombreuses décennies. En effet, l'observatoire population, santé, environnement de Niakhar, qui englobe 30 villages des environs, a été créé en 1962. Le site a donc été choisi pour l'abondance des données qui y ont été produites depuis plus de 50 ans. La zone est relativement bien connue en comparaison avec la majorité des territoires soudano-sahélienne. Les habitants des villages sont ainsi accoutumés à la présence et la sollicitation des chercheurs. Cependant, l'écart entre leur engagement et les bénéfices qu'ils tirent des différents travaux de recherche a pu créer des frustrations de la part des habitants et une réticence à répondre aux requêtes des scientifiques. Face à cette densité d'interventions, il a semblé impératif d'intégrer les habitants dans le travail de recherche, pas uniquement en tant que sources de connaissances mais comme concepteurs de questionnaire (Houllier, 2016 p.13). Cette posture provient autant d'un impératif éthique, celui d'assurer la réciprocité des échanges entre chercheurs et locaux, que de la conviction de la fécondité scientifique d'une démarche de co-construction. Diohine s'est avéré être un lieu particulièrement propice à la structuration d'ateliers délibératifs, où sont « [discutées et développées] des solutions collectives à des problèmes socio-écologiques complexes » (Perrotton *et al*, 2021). Au regard des 30 villages de l'observatoire, son fonctionnement est singulier.



**Figure 2 :** Carte de localisation de Diohine.



La particularité de Diohine réside dans l'existence de réseaux de solidarités forts, notamment sur le plan inter-religieux. Dans un village qui regroupe autant de musulmans que de catholiques, les fêtes religieuses permettent le renforcement des liens fraternels entre voisins et entre membres des différentes communautés religieuses. Le village se singularise surtout par le maintien d'instances de concertation villageoises traditionnelles. A l'inverse des autres villages de l'observatoire, Diohine a gardé un système de "gestion concertée de la fertilité", à travers le maintien de sa jachère communautaire (P.Chapron *et al*, 2021). Au regard de cet élan collectif, l'absence de concertation autour de la question spécifique des arbres est surprenante. Comment expliquer l'apparente non-régénération du parc à Faidherbia, alors même qu'elle semble constituer une préoccupation locale partagée ? Ainsi l'objectif est d'une part de mieux comprendre les dynamiques d'usage et les mécanismes régulateurs qui influencent la régénération du parc arboré. De l'autre, il s'agit d'initier, par une démarche de recherche impliquée, un processus de concertation autour de la gestion des ressources naturelles locales.

Par quels processus de gestion locale du parc agroforestier faire face à la dégradation environnementale ?

Pour saisir la complexité du socio-écosystème de Diohine et du sous-système structuré autour de l'arbre, il a semblé judicieux d'adopter une approche fondée sur la modélisation multi-agent, utilisée comme outil d'accompagnement. Cette méthode, particulièrement utilisée dans l'UMR SENS<sup>3</sup>, s'avère technique et exigeante. Nous ne pourrions faire l'économie d'une brève présentation ainsi que d'une justification de son usage, au regard du contexte territorial de Diohine (Partie I). Une fois sur le terrain, accompagner un processus de gestion territoriale nécessite le recours à une grande flexibilité méthodologique. La modélisation informatique, les entretiens, les observations participantes et les ateliers se sont articulés pour donner naissance à une représentation co-construite et commune du « système arbre ». J'ai tâché de synthétiser cette vision commune dans un modèle informatique, pour que celui-ci devienne un artefact fécond pour penser les processus de régénération du parc arboré (Partie II). Une fois le modèle

---

<sup>3</sup> « L'UMR SENS – Savoirs, Environnement, Sociétés – positionne ses recherches sur la dimension sociétale (incluant les enjeux sociaux, économiques, politiques, culturels) des dynamiques environnementales actuelles. Elle rassemble des chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens et doctorants de trois institutions : le CIRAD, l'IRD et l'Université Paul Valérie Montpellier 3. La particularité de cette équipe est sa pluridisciplinarité, à la fois à l'intérieur des sciences sociales (anthropologie, économie, géographie, sociologie, droit, science politique) et entre les sciences sociales, les sciences de la vie et de l'environnement (agronomie et écologie) et les sciences et technologies (modélisation et informatique). » <https://umr-sens.fr>

stabilisé et le terrain achevé, l'utilisation du modèle change. Il n'est plus un objet guidant les questionnements et les discussions mais devient un socle pour l'expérimentation (Peschard, 2013). Le modèle informatique *in silico*<sup>4</sup>, en s'affranchissant des contraintes spatiales-temporelles permet d'expérimenter des modes de gestions originales, fruits de la créativité du modélisateur et des utilisateurs du modèle. Les scénarios prospectifs qui émergent de l'exploration n'ont pas pour vocation de prédire l'évolution du parc arboré mais de donner naissance à des discussions sur la gestion des ressources naturelles. Le modèle, fondé sur des données qualitatives, est un outil d'accompagnement du "faire-commun" (Partie III).

## Partie I : Fondement et intérêt de la démarche de modélisation d'accompagnement, au regard du contexte territorial de Diohine

### 1. Le socio-écosystème productif de Diohine

Pour comprendre les caractéristiques et le fonctionnement du territoire d'étude, l'abondante littérature issue des recherches menées au sein de l'observatoire de Niakhar a été une source formidable d'information. Cependant l'expérience du terrain a été nécessaire pour comprendre certaines subtilités. Si les éléments exposés ici proviennent avant tout de la littérature scientifique, certains sont issus des observations de terrain.

---

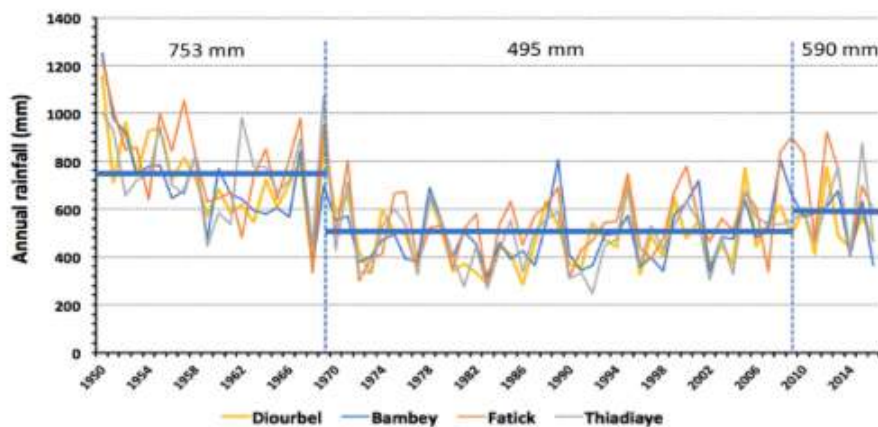
<sup>4</sup> « La recherche *in silico*. Ce vocable indique le début et l'ampleur d'un phénomène en biologie moléculaire: les recherches ne sont plus seulement *in vivo* ou *in vitro*, mais ont un recours de plus en plus essentiel aux analyses informatiques » Gabriel Gallezot, 'La Recherche *in Silico*' (2002)

## A. Un territoire sahélien, soumis à de fortes contraintes pédo-climatiques

### i. Climat et pluviométrie

Le village de Diohine est soumis à un climat sahélo-soudanien, caractérisé par l'alternance entre une saison sèche de huit à neuf mois et une saison des pluies de trois à quatre mois, à partir de juin. Les températures ont une faible amplitude annuelle, les moyennes mensuelles s'étalant de 24 °C pour les mois de décembre et janvier à 30°C entre mai et octobre. Les amplitudes diurnes sont à l'inverse très grandes puisqu'elles peuvent aller jusqu'à 24 °C. (Y.Diop, 2020)

A partir d'un travail sur les indices standardisés de précipitations des stations environnantes (Fatick, Bambey, Diourbel, Thiadiaye), W.Faye distingue et met en évidence trois phases de l'évolution pluviométrique récente. Une période de relative abondance de 1950 à 1969, une période de sécheresse où les pluies sont largement déficitaires de 1970 à 2008 et une période de reprise depuis 2009 (cf. Figure 3). Avec une réduction de la pluviométrie d'environ 34%, les quatre décennies ont été particulièrement dramatiques. Malgré la relative reprise des pluies depuis 2009, les problèmes climatiques subsistent. En effet, deux phénomènes tendent à fragiliser l'agrosystème en augmentant l'incertitude climatique : la forte variabilité interannuelle des précipitations d'une part, la réduction du nombre de jours de pluies par an de l'autre. La variabilité interannuelle concerne à la fois le total pluviométrique (cf. Figure 3) et la répartition des pluies. Les dates des premières pluies sont de plus en plus irrégulières, ce qui est particulièrement problématique puisqu'elles conditionnent le démarrage des activités de semis. L'anticipation nécessaire au bon démarrage de la saison des cultures est ainsi de plus en plus difficile. La réduction du nombre de jours de pluie est tout aussi préoccupante puisqu'elle occasionne de nombreuses pauses pluviométriques (W.Faye, in prep). Pouvant durer plus de 40 jours, ces intervalles inter-pluies peuvent avoir des conséquences néfastes sur la vitalité des cultures.



**Figure 3** : Évolution des pluies annuelles dans la zone de Diohine, d'après les données des stations climatiques de Diourbel, Bambey, Fatick et Thiadiaye (W.Faye, 2022)

La longueur de la saison sèche et les faibles volumes de précipitations rendent la disponibilité en eau très réduite pendant une grande partie de l'année, contraignant fortement certaines activités, notamment l'agriculture. L'arrivée des pluies est essentielle puisqu'elle marque le démarrage de la saison des cultures. Ainsi, l'irrégularité climatique croissante tend à fragiliser le système agricole pluvial hérité, en renforçant l'incertitude sur le calendrier culturel.

## ii. Nature et pollution des sols.

La zone d'étude se caractérise par des sols sableux appelés *dior* ou *djoor* dont la fertilité dépend des apports en matière organique (résidus de culture, fumier). On y trouve aussi des sols plus argileux (*deck* ou *semi-deck*), plus riches mais plus difficiles à cultiver. La salinisation des sols, dont les causes locales restent peu étudiées, est particulièrement forte sur le territoire. Elle concerne surtout les zones de bas-fond, inondées pendant la saison des pluies, mais s'étend aussi à certaines zones de culture. La salinisation est particulièrement préoccupante puisqu'elle rend impossible la croissance de certaines espèces végétales. Ainsi les activités maraîchères disparaissent et certains écosystèmes se transforment peu à peu. Enfin, la pollution plastique est un autre phénomène qui menace la fertilité/vitalité des sols. Bien que les déchets plastiques soient présents partout sur le territoire, ils n'ont pas encore fait l'objet d'études spécifiques.

Diohine se trouve ainsi dans une zone où les contraintes pédo-climatiques sont particulièrement fortes. L'environnement y apparaît particulièrement dégradé. Or, dans une région agricole qui se densifie, la vitalité de l'environnement constitue une condition *sine qua non* à la survie des populations.

## B. Le bassin arachidier, une zone rurale et agricole fortement anthropisée

Le bassin arachidier est une zone densément peuplée où l'agriculture est encore largement présente. L'agrosystème est fondé sur le triptyque : culture céréalière, élevage et parc à acacia (Audoin, 2015).

### iii. La structure de la société *sereer*

Diohine se situe dans une zone où l'ethnie majoritaire est l'ethnie *sereer*. L'organisation socio-spatiale de la société *sereer* se structure autour de plusieurs unités de peuplement imbriqués : la cuisine<sup>5</sup>, la concession, le quartier et le village. Ces unités renvoient à des formes géographiques ou sociales, qui structurent la vie du village et les réseaux de solidarités. La cuisine regroupe les personnes qui participent à l'alimentation et qui mangent ensemble. La concession est l'unité résidentielle qui regroupe souvent les membres d'une famille élargie, constitués en une ou plusieurs cuisines. Elle est formée de plusieurs habitations et d'une cour délimitée par une haute clôture en tige de mil. La forme des villages *sereer* se structure autour de ces cellules de peuplement puisque les concessions forment une nébuleuse de petits îlots de peuplement (Pélissier, 1999), comme on peut le voir sur l'image satellite ci-dessous. Les quartiers regroupent plusieurs concessions liées entre elles par des relations sociales héritées. Anciennes subdivisions sociologiques et administratives, l'importance des quartiers dans le fonctionnement de la vie du village est de plus en plus faible (Pélissier, 1999). Enfin le village est un ensemble de quartiers sous l'autorité d'un chef de village. C'est l'intronisation du chef qui permet à un regroupement de concession de prendre le titre de village. Encore aujourd'hui, le chef du village joue un rôle central dans la vie villageoise. En tant que représentant officiel de l'autorité administrative, il a à sa charge plusieurs missions : la collecte des impôts, le

---

<sup>5</sup> Terme utilisé dans la majorité des travaux sur la culture *sereer* voir (Pelissier, 1999) ou (Lericollais, 1972)

contrôle de l'application des lois etc<sup>6</sup>. Il se trouve aussi au cœur de l'organisation des activités communautaires et informelles du village : fêtes, réunions etc.



*Figure 4 Image satellite d'un quartier de Diohine, montrant la structure du village en îlot (Google Earth)*

#### iv. L'organisation spatiale du système de culture

Diohine se situe dans un territoire rural où l'activité agricole reste au centre du fonctionnement de la société. L'espace cultivé par la communauté villageoise, ou terroir villageois (Rabot 1990), est organisé autour de l'espace du village. A proximité directe des habitations se trouvent les champs de cases. A environ 500 mètres, les champs intermédiaires puis enfin, 500 mètres plus loin, les champs de brousse. Ce découpage est particulièrement visible en saison des pluies puisque les types de champs se distinguent par leur système de culture. Les champs de case constituent l'espace des cultures vivrières de mil. Ils sont rendus particulièrement productifs, par l'apport de fumure et de déchets de cuisine. Les champs intermédiaires connaissent une rotation entre la culture de mil et celle d'arachide. On y retrouve, en association avec ces cultures, du niébé fourrager et du bissap. Les champs intermédiaires bénéficient également de l'apport de fumure par le parcage nocturne des troupeaux en saison sèche. Enfin, les champs de brousses sont ceux qui accueillent la jachère communautaire. Elle est en rotation sur trois zones, dont les contours sont définis collectivement chaque année, lors de la fête d'ouverture des cultures (Delay et al, 2022). La rotation triennale voit se succéder la jachère, l'arachide puis le mil. Cependant, l'ordre de rotation n'est pas toujours respecté puisque

<sup>6</sup> Article 35 du Code des collectivités locales de 1995 <http://www.jo.gouv.sn/spip.php?article7746>

certaines agriculteurs manquent de semences d'arachide. Certains agro-pasteurs décident alors de cultiver du mil avant l'arachide pour profiter de l'effet fertilisant du parcage hivernal de leurs bêtes. Les activités agricoles démarrent avec les premières pluies, généralement vers la deuxième quinzaine de juin. Le mil est semé à sec, l'arachide après la succession de plusieurs pluies. Les dernières récoltes se font quant à elles vers la mi-décembre. La présence dans les champs est donc particulièrement importante de juillet à décembre.

#### v. L'élevage bovin multifonctionnel, au cœur du système productif

L'élevage à Diohine peut être divisé en deux sous-systèmes : le système domestique et le système extensif divagant (Audouin *et al*, 2015). C'est ce dernier qui nous intéresse tout particulièrement.

Si les petits herbivores divagants (moutons, chèvres, ânes) sont nombreux, seuls les bovins ont été considérés dans cette étude. L'élevage bovin est un élevage en troupeaux, qui regroupent des bêtes pouvant appartenir à plusieurs éleveurs. L'effectif des troupeaux demeure très hétérogène et difficile à déterminer puisque le dénombrement des bêtes reste tabou (Idrissa Faye, 2022).

Historiquement exclusivement sédentaire, l'élevage à Diohine est désormais également transhumant. La jachère collective, qui représente environ 20% de la surface agricole utile (Audouin *et al*, 2015), permet à un certain nombre de troupeaux de rester au village pendant la saison des cultures. Actuellement, 19 agro-pasteurs continuent à pratiquer un élevage sédentaire en parquant leur troupeau dans la jachère, pendant une période allant du semis de l'arachide (premières pluies) aux récoltes (mi-décembre).

L'élevage est central dans le fonctionnement de l'agrosystème mais aussi dans celui de la société rurale. Les bovins, tout comme certains animaux de cour (mouton, cheval, chèvre) sont avant tout une réserve de valeur. Ils peuvent être vendus en cas de besoin. Ils sont sacrifiés de façon ostentatoire lors des fêtes traditionnelles et religieuses. Les troupeaux de bovins sont aussi de grandes sources de fertilisation des terres cultivées. Les déjections produites pendant la vaine pâture, le parcage nocturne et le parcage hivernal permettent des transferts d'azotes particulièrement importants, vers certaines parcelles (Audouin *et al* 2015). Les stratégies de parcage et de fumage s'avèrent ainsi particulièrement complexes. Elles sont négociées par les éleveurs qui associent leurs bêtes dans un même troupeau. Elles sont dirigées vers certaines parcelles spécifiques qui se situent près des habitations.

Ainsi, l'élevage est largement multifonctionnel : “Si le bétail représente d’abord le type traditionnel de thésaurisation, il est aussi le producteur d’une ressource appréciée, le lait, et surtout l’indispensable instrument d’entretien de la fertilité des sols et de la pérennité des champs.” (Pelissier, 1999)

## vi. Croissance de la population et migration

Diohine est un village relativement peuplé, d’environ 4500 habitants. La densité dans le bassin versant de Diohine est de 259 habitants/km<sup>2</sup> (Waly Faye, 2022). Elle est particulièrement élevée au regard d’autres espaces ruraux sénégalais<sup>7</sup>. La croissance démographique est toujours très élevée dans la zone puisque la fécondité se maintient à 6 enfants par femmes environ.

Cependant les effectifs de population fluctuent au cours de l’année à cause des migrations qui sont majoritairement saisonnières (Delaunay et Lalou, 2015). Pendant la saison sèche, beaucoup de jeunes partent dans les capitales régionales Thiès (90km), Kaolack (80km), Fatick (35km) pour étudier ou travailler. Cependant, les flux de migration se tournent principalement vers Dakar (140km), qui concentre une grande partie des activités économiques non-agricoles du pays. Dans des villages où les opportunités de travail extra-agricoles sont rares, 36% des hommes et 25% des femmes migrent pour s’assurer un revenu pendant la saison sèche (*ibid*). Le rythme et la durée des migrations est généralement défini selon les activités agricoles. Cependant, pour les étudiants, calendrier culturel et calendrier scolaire peuvent interférer, rendant l’organisation des travaux agricoles particulièrement difficile.

Dans un territoire semi-aride où les ressources se raréfient, les migrations constituent une pratique d'adaptation des populations aux contraintes environnementales (*ibid*). Pourtant leur volume ne semble pas suffisant pour limiter de façon significative l’augmentation des pressions sur les ressources naturelles. Ainsi, le poids du peuplement entraîne une réduction des espaces non cultivés, de parcours et de jachère ainsi que la dégradation du parc arboré (Lericollais, 1999).

---

<sup>7</sup> Observatoires de population, santé et environnement du Sénégal a produit de nombreuses données démographiques sur les sites de Bandafassi (région de Kédougou) et de Mlomp (Casamance)  
<https://lped.info/wikiObsSN/?OpSe>



### C. Le parc arboré : un élément central du socio-écosystème productif de Diohine de plus en plus menacé.

On peut qualifier le système de culture de Diohine de système agroforestier tant l'arbre est un élément central des dynamiques agraires. Avec la fumure précédemment évoquée, l'arbre, plus précisément le *Faidherbia Albida*, est source de fertilité. Une source sans laquelle le système ne pourrait être viable. L'enjeu de la survie et de la densification du parc arboré est ainsi lié à celui d'assurer la sécurité alimentaire à l'échelle locale.

#### vii. L'Évolution récente du parc marqué par la dégradation environnementale.

Le parc arboré a subi une grande dégradation depuis les années 70. (Lericollais, 1999). La grande sécheresse de 70 a été un événement qui a entraîné de profondes mutations du socio-écosystème. Elle a provoqué une réduction de la densité et de la diversité du parc arboré. Le déficit pluviométrique et l'abaissement du niveau de la nappe phréatique ont entraîné la disparition de certaines espèces et la réduction brutale des effectifs de certaines essences (fromagers, manguiers etc.). Sur les 58 espèces présentes sur le territoire, 15 avaient besoin de plus de 400 mm d'eau, quelque unes de plus de 600 mm. La chute des grands arbres briseurs de vent a engendré une augmentation de l'érosion éolienne et une dégradation de la strate herbacée sur l'ensemble de la zone.

Au-delà du bouleversement environnemental, la grande sécheresse a entraîné des mutations agricoles et sociales profondes. Tout d'abord, certains espaces de culture ont subi de profondes transformations. A cause du manque d'eau, les champs de case, anciennement "jardin de case", ont vu disparaître les pratiques maraîchères et les grands fruitiers au profit de la culture exclusive de mil. Ces mêmes pratiques ont disparu également des bas-fonds, à mesure qu'ils se salinisent.

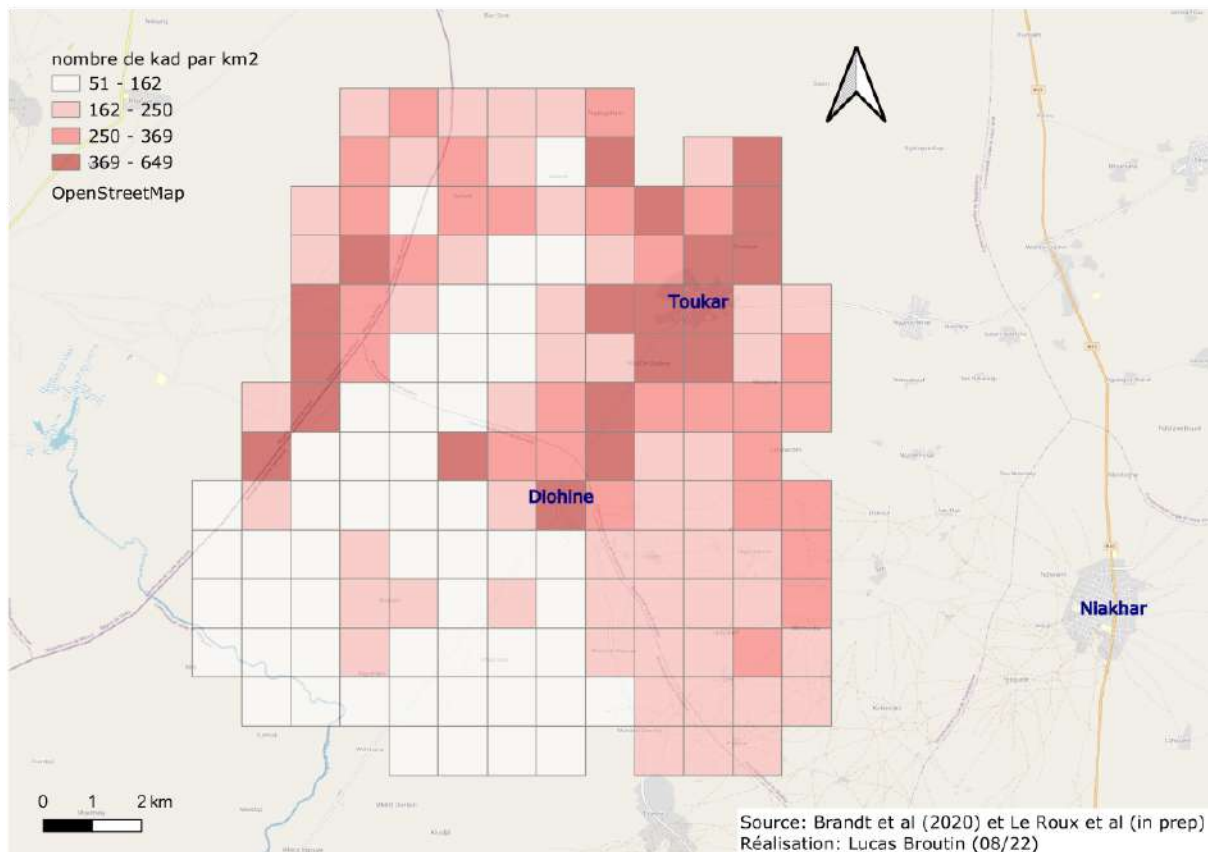
Ensuite, le système d'élevage s'est également profondément transformé. Face à la perte de nombreuses bêtes, liée à l'allongement soudain de la période de soudure, les éleveurs n'ont eu d'autres choix que d'envoyer leur troupeau en transhumance. Le système transhumant est donc relativement récent à Diohine et provient d'une nécessité de sauver les bêtes d'une mort certaine.

Pour A. Lericollais les raisons de la dégradation du parc ne sont pas seulement climatiques. La croissance démographique associée à la réduction brutale du nombre d'arbres, a suscité une forte augmentation des pressions anthropiques sur l'ensemble du parc. Ainsi le parc arboré actuel apparaît particulièrement dégradé et fragile.

#### viii. État et formes actuelles du parc arboré.

Qu'en est-il de la situation actuelle ? Comme pour le système agraire, le parc arboré s'organise en auréoles radio-concentriques autour du village (Lericollais, 1999). Dans les rues et les concessions, l'*Azadirachta indica* (Neem) représente l'espèce majoritaire. Son feuillage permanent et dense offre un bon ombrage et procure le fourrage pour les troupeaux de bovins et les petits ruminants domestiques. Quelques vieux roniers, fromagers et baobabs subsistent mais restent minoritaires. Ce sont souvent des arbres sacrés, sous lesquels se perpétuent les cérémonies religieuses et villageoises. A la sortie des villages, au niveau des champs de case, l'espèce majoritaire demeure le baobab. Certains vieux individus attestent d'un peuplement ancien. Il est surtout utilisé pour l'alimentation humaine : ses feuilles entrent dans la préparation quotidienne du couscous, les enfants se régalent de leurs fruits. Les zones humides de marigots accueillent une végétation buissonnante dense. Cependant, la végétation des bas-fonds est fortement dégradée du fait de leur salinisation. Le *mbourdou*, arbre halophile, représente désormais l'espèce végétale majoritaire, malgré sa relative inutilité.

Les espaces cultivés sont traversés principalement par des *Faidherbia albida* localement appelés *kad*. La structure du parc à *kad* résulte d'une longue histoire agraire. La distribution des arbres ne provient pas de processus naturels mais bel et bien de l'activité paysanne ancienne. Aujourd'hui, la densité du peuplement est faible. Cette réduction est imputable aux changements de climats mais également à l'intensification des activités humaines, puisque les densités de populations augmentent alors même que les effectifs de peuplements ligneux diminuent fortement (Lericollais, 1999). La densification des jeunes individus est en reprise mais demeure insuffisante pour retrouver une densité similaire à celle d'avant la sécheresse (Delaunay et al, 2015).



**Figure 5 :** Carte des densités de *Faidherbia albida* au kilomètre carré, à Diohine et dans les villages environnants

Les plus fortes densités d'arbre se retrouvent dans les villages et à proximité. Le nombre d'arbres décroît à mesure que l'on s'éloigne des espaces habités, sans que l'on puisse toutefois parler de gradient, tant les spécificités micro-locales sont fortes.

Les arbres ont de nombreuses fonctions essentielles pour les populations : alimentation humaine, fourrages pour le bétail, médicaments utilisés dans la pharmacopée traditionnelle, matériel pour l'artisanat et la construction, source d'énergie domestique (M. Ba, 2019) Comme il m'a été répété plusieurs fois lors des entretiens : "Nous vivons avec les arbres". Cependant, au-delà des produits ligneux et non ligneux, les arbres remplissent également de nombreux services écosystémiques. Les *kad* jouent un rôle particulièrement important dans le fonctionnement de l'agroécosystème. Ils sont l'objet de notre étude.

ix. Le *kad*, un élément fondamental de la vitalité du territoire de Diohine.

Les effets bénéfiques des *Faidherbia albida* sur leur milieu proche s'avèrent nombreux. Certains sont particulièrement étudiés dans la littérature scientifique, d'autres sont évoqués de façon récurrente par les habitants.

L'effet fertilisant du *Faidherbia* est largement connu et étudié. Le *kad* tire sa force de sa phénoménologie inversée. En saison sèche, l'ombrage que produit son large houppier est un refuge pour les animaux divagants et les oiseaux. Ils y urinent et défèquent, enrichissant ainsi le sol sous l'arbre. La perte progressive de ses feuilles alimente également les sols par l'apport de matière organique végétale. Cet apport est particulièrement bénéfique puisqu'il intervient juste avant le début de la saison des cultures puisque les *Faidherbia albida* perdent leur feuillage à partir du mois de mai. Enfin, l'absence de feuilles en saison des pluies permet de limiter la concurrence entre les cultures et l'arbre.

La caractérisation de l'effet fertilisant du *Faidherbia albida* sur les rendements des cultures associées fait l'objet de nombreuses études. Dans une étude récente, O.Roupsard, cherche à déterminer jusqu'où les plantes de mil sont affectées par le *Faidherbia albida*. Y.Aghohessou entreprend le même travail pour les plants d'arachide. Ils trouvent respectivement que l'arbre affecte positivement la production de mil jusqu'à 17m et celle d'arachide jusqu'à 9 m (Roupsard *et al*, 2020 et Y.Aghohessou, 2020).

Les *Faidherbia albida* ont également un effet sur l'hydrologie de la région. Pour les habitants, ils attirent les pluies. S'il est difficile de prouver scientifiquement cette corrélation, il est admis que les *Faidherbia albida* permettent d'améliorer les performances hydrauliques des sols (W.Faye, en cours). La macroporosité des sols et leur capacité d'infiltration sont augmentées à proximité des *Faidherbia*. Le *kad* facilite l'infiltration de l'eau dans les sols et limite ainsi le ruissellement et l'évapotranspiration. Le pivot racinaire qui permet à l'arbre de capter l'eau de la nappe et ainsi de garder son feuillage en saison sèche, assure aussi la recharge de celle-ci. Alors que leur consommation en eaux profondes pouvait apparaître comme un facteur limitant à la densification du parc, voire comme un contre-argument à celle-ci (Roupsard *et al*), l'étude des flux de sèves (Matteo Pourchanin, en cours) et des effets du système racinaire sur la perméabilité des sols (W.Faye, 2022) ont montré que l'arbre pouvait concourir au maintien des ressources en eau du territoire.

Enfin, les *Faidherbia albida* permettent de limiter l'érosion éolienne et ainsi l'appauvrissement des sols. Dans un contexte où les sols sont de moins en moins couverts en saison sèche, par la végétation ou par les résidus de culture, l'effet brise vent des *Faidherbia albida* pourrait s'avérer particulièrement important.

A travers les changements climatiques, culturels et démographiques récents, le socio-écosystème de Diohine est en pleine mutation. Grâce à la présence ancienne de l'IRD dans la zone de Niakhar, les dynamiques naturelles et sociétales qui le composent ont été particulièrement bien explicitées. Pourtant, à l'aune des récentes mutations, réfléchir à travers des approches séquencées, agronomiques ou démographiques, ne s'avèrent pas suffisantes pour saisir la complexité qui caractérise le socio-écosystème productif de Diohine. Parce que l'adaptation des populations et le maintien d'un environnement sain semble aussi passer par un renforcement des capacités locales de gestion des ressources naturelles, il nous a semblé bienvenu d'adopter une approche scientifique fondée sur la modélisation multi-agent au service de l'accompagnement. Il s'agit à présent de clarifier cet ancrage scientifique et de démontrer sa pertinence.

## 2. La modélisation d'accompagnement au service de la gestion des ressources renouvelables comme ancrage conceptuel et méthodologique.

### A. Etudier les ressources renouvelables à travers l'approche par les communs.

Les communs, comme objet scientifique, apparaissent à la suite de la parution du célèbre article de G.Hardin "*The Tragedy of the Commons*". Dans cet article, le biologiste constate, à partir

de l'exemple d'un pâturage exploité en commun, l'impossibilité d'assurer la durabilité par la propriété commune. Mû par un comportement optimisateur, chaque pasteur fait paître ses bêtes, en dépit d'une potentielle surexploitation des ressources. Face à l'inévitable épuisement des "biens communs", deux solutions existent : la propriété individuelle fondée sur la partition de la ressource commune et la gestion par une institution tiers et supérieure, l'Etat (Fabien Locher in *universalis*, 2010).

Malgré la postérité de la thèse de G.Hardin dans la sphère politique, le raisonnement est rapidement remis en cause. Deux hypothèses de G.Hardin posent particulièrement problème: le comportement optimisateur et individualiste des acteurs (*homo oeconomicus*) et leur incapacité à communiquer pour former des règles communes d'usage. Alors qu'elle avait été déconsidérée par Hardin, la gestion communautaire, c'est-à-dire la formation d'un ensemble de règles localement négociées, va être placée au centre des études portant sur les ressources naturelles renouvelables.

Les travaux d'Elinor Ostrom, viennent redéfinir le cadre analytique de l'étude des ressources renouvelables et de l'approche par les communs. Dès lors, les communs ne renvoient plus à des ressources dont l'accès est libre par tous mais à des ressources mises en propriété commune. Le commun est autant la ressource que le système normatif qui a été défini par la communauté d'utilisateurs pour assurer sa durabilité. Dans son livre *Governing the commons*, E.Ostrom détermine les principes sur lesquels se fonde la gestion collective durable des ressources naturelles. Pour que le commun puisse voir le jour et se maintenir, la gestion doit se fonder sur des limites claires, des règles explicites, une surveillance efficace, des sanctions graduelles, des mécanismes locaux de résolution des conflits et une autonomie relative du système de gouvernance vis-à-vis des autorités officielles.

Dans ce travail, la définition retenue des communs est celle de S.Aubert *et al* dans *Approche par les communs de la terre et des ressources qu'elle porte. Guide opérationnel*: " les communs tissés autour de la terre et des ressources reposent sur des relations qui s'établissent, se maintiennent et se renouvellent entre 1) un groupe d'utilisateurs 2) un ou plusieurs ressources (naturelle ou non), grâce à 3) la production et l'application par le groupe d'utilisateurs de règles d'usage de la, ou des ressources considérées. Dans ce contexte, les communs constituent un ensemble de pratiques. Ils fournissent aussi une grille d'analyse de l'action collective et des systèmes de propriété et d'utilisages".

Le commun, qui n'existe pas en soi mais qui est construit par l'intentionnalité d'un groupe, invite le scientifique à adopter une nouvelle approche théorique et éthique. E.Ostrom formule ce changement ainsi:

« En tant qu'institutionnaliste étudiant des phénomènes empiriques, je pars du principe que les individus tentent de résoudre les problèmes d'une manière aussi efficace que possible. Il est de ma responsabilité, en tant que scientifique, d'identifier ces problèmes, et lorsqu'(ils) impliquent un manque de prévisibilité, d'information ou de confiance, ainsi que des niveaux élevés de complexité et des difficultés transactionnelles, les efforts d'explication doivent prendre ouvertement ces problèmes en compte au lieu de les ignorer » (p 40). Ostrom *Governing the Commons*.

L'étude des communs appelle donc à la structuration d'un nouveau cadre scientifique (Ostrom, 2009). La science analytique qui s'efforce de réduire la complexité des phénomènes en les considérant un à un à travers des approches disciplinaires séquencées, s'avère incapable d'apporter des solutions satisfaisantes aux problèmes environnementaux émergents (E.Ostrom 2009). Il apparaît désormais nécessaire de construire la complexité plutôt que de l'ignorer. L'étude des communs s'articule ainsi avec le champ des sciences de la complexité, qu'il s'agit de décrire à présent.

## B. La notion de socio-écosystèmes complexes pour répondre aux enjeux environnementaux actuels

Le cadre d'analyse Ostromien se fonde largement sur la notion de *social-ecological systems*, socio-écosystèmes en français. Pour comprendre ce concept, il s'avère nécessaire de présenter succinctement les notions de système et de complexité avant de s'intéresser à l'articulation entre le social et l'écologique, constitutive de la notion de socio-écosystème.

Le système peut être défini comme "une collection d'objets en interaction" (Coquillard et Mill, 1997). Les trois éléments constitutifs du système sont : la frontière, qui le délimite, les composantes en interaction qui le composent, et l'observateur qui les définit. Le système n'existe pas "en soi" mais provient de "l'intention de l'observateur et [de] la situation d'action qui vont servir à découper une partie du réel en fonction de sa pertinence dans une situation d'action donnée" (Delay et al, 2022). Ainsi, le système, en tant que partie du réel subjectivé, est situé dans un cosmos de systèmes potentiels, dans lesquels il s'imbrique ou avec lesquels il interagit. En d'autres termes, le système n'est pas un vase clos. Il est ouvert, sensible aux

perturbations internes, des sous-systèmes qui le composent, comme à celles provenant d'éléments externes.

La complexité d'un système réside dans la non-linéarité des interactions qui le composent. Une interaction est non linéaire si elle ne peut être décrite par une causalité simple et univoque (Delay *et al*, 2022). On parle aussi de rétroaction c'est-à-dire d'"interaction dans laquelle la perturbation d'une variable provoque le changement d'une seconde variable, qui influe à son tour sur la variable initiale" (GIEC, 2019). Les interactions non linéaires font ainsi émerger des comportements globaux imprévisibles. Dans un système complexe, le fonctionnement global du système n'est pas la somme des interactions prise une par une puisque des éléments fonctionnent de façon autonome dans et par le modèle. Le fonctionnement d'une ruche est un exemple de système complexe. L'émergence de phénomènes globaux, non-anticipables et non-réductibles, constitue l'élément central de la complexité. Selon E.Morin, « on peut appeler émergence les qualités ou propriétés d'un système qui présente un caractère de nouveauté par rapport aux qualités ou propriétés des composants considérés isolément ou agencés différemment dans un autre type de système » (Morin, 1977). L'émergence est dite forte quand elle est perçue par les composantes et qu'elle affecte ainsi leur comportement. Si ce n'est pas le cas, on parle d'émergence faible (Bommel, 2009 p.87).

Les socio-écosystèmes sont des systèmes complexes comprenant des composantes biophysiques et des composantes sociétales en interaction. En abolissant la distinction entre les dynamiques naturelles et les dynamiques sociales, le concept permet d'intégrer l'Homme dans le fonctionnement des écosystèmes et ainsi de redéfinir la compréhension des interactions entre l'homme et son milieu. Intégrer l'homme dans le fonctionnement des écosystèmes nous invite à redéfinir les principes de protection des ressources renouvelables et des espaces dit "de nature". Il ne s'agit plus de préserver ou de restaurer des systèmes naturels, où l'homme est absent ou exclu, mais de réfléchir à la façon dont les dynamiques humaines et biophysiques s'articulent pour maintenir un équilibre entre la santé des écosystèmes et la survie des populations.

Ce tournant conceptuel est accompagné d'un tournant méthodologique et technique. En effet, certains outils s'avèrent particulièrement adaptés à l'analyse des systèmes complexes. C'est le cas notamment des modèles de simulation à base d'agent.



## C. Le modèle multi-agents, un outil particulièrement adapté à la géographie et à l'approche par les communs

### x. Une brève définition des systèmes multi-agents.

Les systèmes multi-agents sont un outil informatisé de formalisation des systèmes complexes. L'entité essentielle est l'agent. Il est défini par Ferber (1995, p.13) comme :

"[...] une entité physique ou virtuelle :

- 1) qui est capable d'agir dans un environnement ;
- 2) qui peut communiquer directement avec d'autres agents ;
- 3) qui est mue par un ensemble de tendances (sous forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- 4) qui possède des ressources propres ;
- 5) qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement ;
- 6) qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;
- 7) qui possède des compétences et offre des services ;
- 8) qui peut éventuellement se reproduire ;
- 9) dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception et des communications qu'elle reçoit".

Les agents peuvent tout aussi bien renvoyer à des entités "physiques" (individus ou objets palpables) qu'à des entités "virtuelles" (réseaux sociaux, organisations, institutions) (Delay, 2015). Ils évoluent dans un espace virtuel contraignant et structurant.

### xi. L'espace et l'environnement au cœur du fonctionnement des SMA.

Les SMA se fondent sur l'intelligence artificielle distribuée (E.Delay, 2015) : chaque agent évolue de façon autonome et acquiert un comportement propre au gré des interactions. A l'inverse des formalisations mathématiques par équations, les SMA posent comme principes la non-équivalence et la non-interchangeabilité des individus. Le vecteur de singularisation des agents est l'environnement. Parce que les interactions sont ponctuelles et localisées, elles

affectent uniquement les agents en présence. L'environnement, marqué par une certaine hétérogénéité spatiale, a donc une importance particulière dans les modèles SMA, en tant qu'espace contraignant. Cependant les SMA ne tombent pas dans le déterminisme spatial absolu. Si l'environnement conditionne l'évolution des agents, ces derniers en retour affectent sa structure. La diversité des comportements localisés/situés est créatrice d'hétérogénéité spatiale au même titre que l'hétérogénéité spatiale entraîne une diversification des comportements. Cette correspondance demeure centrale pour Ferber qui affirme que :

*“la toute la puissance des SMA résulte de cette boucle : les agents agissent de manière autonome dans un espace contraint par la structure de la société dans laquelle ils évoluent, cette structure résultant elle-même des comportements de ces agents. On se trouve donc là dans une boucle de dépendance entre agents et société d'agent, entre niveaux micro et macro, entre individu et collectif qui se trouve finalement au cœur de la problématique des systèmes complexes dans les sciences humaines et sociales. [...] Ce n'est donc pas un hasard si les SMA apparaissent comme un outil majeur pour modéliser des sociétés. [Ferber, 2006]*

Pour reprendre la terminologie de G. Di Méo et en la transportant dans le contexte de la modélisation à base d'agents, les SMA rendent possible l'articulation entre les paradigmes vertical et horizontal qui structurent l'histoire de la pensée géographique. Le premier se donne comme objet l'ensemble des interactions et interdépendances qui se nouent entre la biosphère et les sociétés. Il apparaît dans les SMA à travers la dimension contraignante et structurante de l'environnement. Le second considère la spatialité, c'est-à-dire la manière dont les individus et les groupes sociaux participent à l'organisation et à la différenciation des espaces, comme élément géographique majeur. “Cette géographie [vise] à concevoir des lois de l'espace, en tenant compte des phénomènes de diffusion, d'attraction, de polarisation qui structurent l'espace géographique dans son horizontalité” (G.Di Méo, 2005)

## xii. Une approche intégrative structurant les SMA

Les modèles SMA s'avèrent être des outils particulièrement adaptés à l'étude des ressources renouvelables (Bommel 2009). En effet, ils permettent d'adopter une approche intégrative particulièrement féconde pour comprendre les environnements et les ressources qu'ils portent.

« L'intégration se décline en :

–Intégration des savoirs scientifiques multidisciplinaires, des sciences biophysiques pour comprendre les dynamiques des ressources naturelles, aux sciences humaines et sociales pour comprendre les pratiques d’acteurs, leur coordination, leurs dynamiques économiques, politiques et sociales ;

–Intégration des savoirs locaux et des pratiques qui conditionnent les stratégies d’acteurs ;

–Intégration des objectifs d’acteurs ayant des intérêts diversifiés, voire contradictoires. » (Bommel, 2009)

Le modèle est un objet « passeurs de frontière entre les différents mondes disciplinaires » (Lepage, 2016). L’approche intégrative apparaît ainsi comme une condition à l’interdisciplinarité, qui ne pourrait se limiter à la juxtaposition des points de vue disciplinaires indépendamment formalisés. Or cette interdisciplinarité est elle-même une condition pour l’étude des défis environnementaux actuels (Ostrom, 2009). L’intérêt scientifique du modèle réside dans sa capacité à représenter les systèmes complexes et ainsi à mieux les comprendre. En rendant visibles certains comportements émergents, il permet la formulation d’un certain nombre d’hypothèses relatives à la gestion des ressources renouvelables. Ainsi, le modèle apparaît aussi comme un outil politique et opérationnel au service de la gestion territoriale. Puisqu’il permet l’intégration de divers savoirs et la confrontation d’objectifs parfois contradictoires, il apparaît comme un “artefact qui explicite le point de vue commun en construction” (Le Page, 2016). Il possède donc également un intérêt opérationnel.

## D. La modélisation comme objet intermédiaire au service de l’accompagnement

### xiii. L’approche ComMod

Ce travail s’inscrit dans des approches développées au sein du collectif ComMod, une association de chercheurs créée en 2003. ComMod est la compression de Companion Modelling, traduit par modélisation d’accompagnement. Les chercheurs du collectif utilisent

la modélisation multi-agents, les jeux de rôles ou le théâtre forum, pour accompagner des évolutions collectives de gestion des ressources renouvelables (Bommel 2009).

Le mouvement est avant tout une posture éthique qui repose sur plusieurs principes :

- la science impliquée, qui stipule qu'une recherche doit être menée pour ses intérêts scientifiques, la production de savoir sur les systèmes complexes, mais aussi pour ses intérêts opérationnels, l'*empowerment* des sociétés participantes.
- la reconnaissance de la pluralité des régimes de savoir. Les acteurs locaux développent au cours de leur vie une expertise empirique/praticienne qui est tout aussi légitime et féconde que l'expertise scientifique.
- la primauté de l'apprentissage social sur l'apport ponctuel de solutions techniques. Il ne s'agit pas d'apporter des réponses toutes faites aux problèmes mais d'améliorer le processus de prise de décision. Cela passe par le renforcement des capacités individuelles des acteurs (y compris les chercheurs) "à i) prendre conscience des objectifs et des perspectives parfois différents des uns et des autres ; ii) formuler collectivement une question ; iii) comprendre les interdépendances entre acteurs et la complexité du système de gestion; iv) apprendre à travailler ensemble et à faire confiance au groupe; créer des relations informelles et formelles" (LePage, 2016)
- la transparence du processus de modélisation et sa dimension itérative, nécessaire pour aborder des problèmes complexes. "Face à un processus évolutif, itératif et continu, il s'agit de proposer un accompagnement évolutif, itératif et continu." (CoMmod, 2003)

#### xiv. Le modèle comme moyen et non pas comme fin.

Le modèle est ainsi considéré comme un "objet médiateur aux discussions entre différents chercheurs et acteurs engagés dans la co-construction d'un point de vue commun" (Le Page, 2017). Son objectif n'est pas de prédire le plus précisément possible des événements futurs, comme pourrait le faire un modèle météorologique. Le modélisateur ne cherche pas non plus à déterminer la meilleure voie à adopter dans un contexte donné statique, comme le ferait un modèle d'optimisation d'agronome ou d'économiste. Le modèle ne permet pas au modélisateur d'apporter des réponses mais de mettre en discussion des éléments formels. Dans un contexte où l'incertitude sur l'évolution des ressources naturelles est élevée, chaque utilisateur ou

groupe d'utilisateurs peut ainsi se demander : "que peut-il advenir?", "que puis-je faire", "que vais-je faire", "comment le faire" (Godet 1991).

« La modélisation d'accompagnement s'insère alors dans un processus de médiation, même si elle ne couvre pas à elle seule l'ensemble du processus. Les acteurs apprennent collectivement en créant, modifiant ou observant les simulations. Car simuler, c'est agir sur le processus de décision, en créant ou modifiant des représentations. La modélisation d'accompagnement conduit les acteurs à partager des représentations et des simulations, comprenant les actions possibles (règles, aménagements...) qu'ils envisagent sur le milieu. Cependant, elle ne prend pas en charge les autres étapes possibles du processus, qui concerneraient une expertise plus quantifiée (taille d'un aménagement, production estimée, etc.). Elle intervient donc en amont de la décision technique, lorsqu'il s'agit d'appuyer la réflexion des différents acteurs concernés, en vue de parvenir à une représentation partagée de la problématique et des voies possibles pour engager un processus de prise en charge. » (ComMod, 2003)

Ainsi, le modèle constitue un objet de synthèse illustrant une représentation d'un système collectivement construite. S'il paraît utile, c'est aussi que la rigueur exigée par le formalisme de la modélisation force les discours à être particulièrement clairs et transparents :

« le grand avantage de la modélisation, par rapport aux subtilités des rhétoriques écrites ou parlées, est qu'elle oblige à expliciter très en détail les présupposés du discours et des intentions pour mieux les partager. » (Pumain, 2016).

Si Pumain décrit ici la façon dont le modélisateur expose son travail dans un cadre scientifique, son propos semble pouvoir s'appliquer aux interactions que suscite l'utilisation d'un modèle dans le cadre d'un atelier.

Considérer l'arbre comme élément d'un socio-écosystème marqué par la complexité, semblait nécessaire pour enrichir la recherche. *Le Faidherbia albida* fait l'objet de nombreuses études dans la région de Diohine. Notre parti pris est de ne pas le considérer seulement comme un élément biophysique en soi. Il s'agit de l'étudier aussi à travers les multiples usages et mécanismes de régulation qu'il produit et qu'il structure. L'objet de notre étude n'est pas le

*Faidherbia albida* en tant qu'entité biologique mais en tant que système environnemental structurant. Il ne s'agit pas de nier l'utilité des travaux d'agronomie qui le considère comme tel, en se donnant pour objectif de rendre un phénomène spécifique plus intelligible : sa croissance, sa capacité à capter du carbone, ses dynamiques de rejets etc. Ils ont d'ailleurs abondamment nourri ce présent travail. Cependant il semble nécessaire de garder en tête qu'ils ne constituent pas la seule source de connaissance légitime et qu'ils ne peuvent procurer à eux seuls des réponses satisfaisantes. Parce que la durabilité des ressources renouvelables semble devoir passer par la formation d'un ensemble de règles localement négociées, l'implication des acteurs locaux dans la démarche apparaît nécessaire. Ainsi, l'impératif de la participation est dicté par des considérations opérationnelles de bonnes gestions des ressources. Il s'avère également provenir de besoins scientifiques. En effet, les acteurs locaux demeurent les premiers dépositaires des savoirs sur les systèmes complexes.

## Partie II : Appréhender la complexité du « système arbre » à travers un processus de modélisation d'accompagnement : l'évolution d'un travail sur le terrain.

Pour répondre à l'enjeu de la régénération du parc à *kad*, il a fallu rendre collectivement la complexité du système arbre, compris ici comme l'ensemble des composantes du socio-écosystème de Diohine qui influencent d'une manière ou d'une autre l'état du parc à *kad*.

Cette partie a un double usage : exposer les résultats du terrain et les lier au processus de construction du modèle. La version actuelle du modèle est le résultat de l'acquisition progressive des données. Le modèle demeure en constante évolution à mesure que les questionnements se précisent ou changent de direction : “*The model is not a formalized deduction but an interactive dialogue*” (Funtowicz.et Ravetz, 1993). Dans une logique inverse, l'acquisition des données a elle-même été conditionnée par la formalisation informatique. Le rôle du modèle peut être comparé à celui d'une boussole qui guide les déplacements et les avancées du chercheur sur le terrain.

## 1. Structuration et modélisation du système arbre à Diohine

Ici, la méthodologie adoptée comprend trois étapes : la co-détermination des éléments du système à travers un atelier, la précision des caractéristiques des composantes (comportement, effectif, centralité etc.) à travers un travail complémentaire d'entretiens et d'observation participante et enfin l'implémentation des données qualitatives brutes dans le modèle. Cette partie permet de décrire le processus de structuration du système arbre, partie du socio-écosystème productif de Diohine, dont l'élément primordial est le *Faidherbia albida*.

### A. Déterminer les éléments du système et comprendre son fonctionnement général.

La première étape du terrain a été de définir le système c'est-à-dire de lui assigner des frontières et de comprendre son fonctionnement interne. Elle s'est faite à travers un atelier d'une journée, qui a regroupé 8 habitants du village, un traducteur venant d'un village des environs, Etienne Delay et moi-même. Les participants avaient déjà participé à certains ateliers mené par A.Perrotton, A.Fallot et E.Delay.

Lors de cet atelier nous avons eu recours à la méthode PARDI (Etienne, 2011). Elle pourrait être défini comme un temps de co-construction d'un système complexe lié à une problématique donnée. Il s'agit, à partir d'une question en apparence simple (Problématique), de déterminer les Acteurs, les Ressources, les Dynamiques et les Interactions c'est-à-dire les composantes d'un système. La problématique fait office de frontière fondatrice du système, puisqu'elle pousse les participants à évoquer certaines entités et à en exclure d'autres (filtrage).

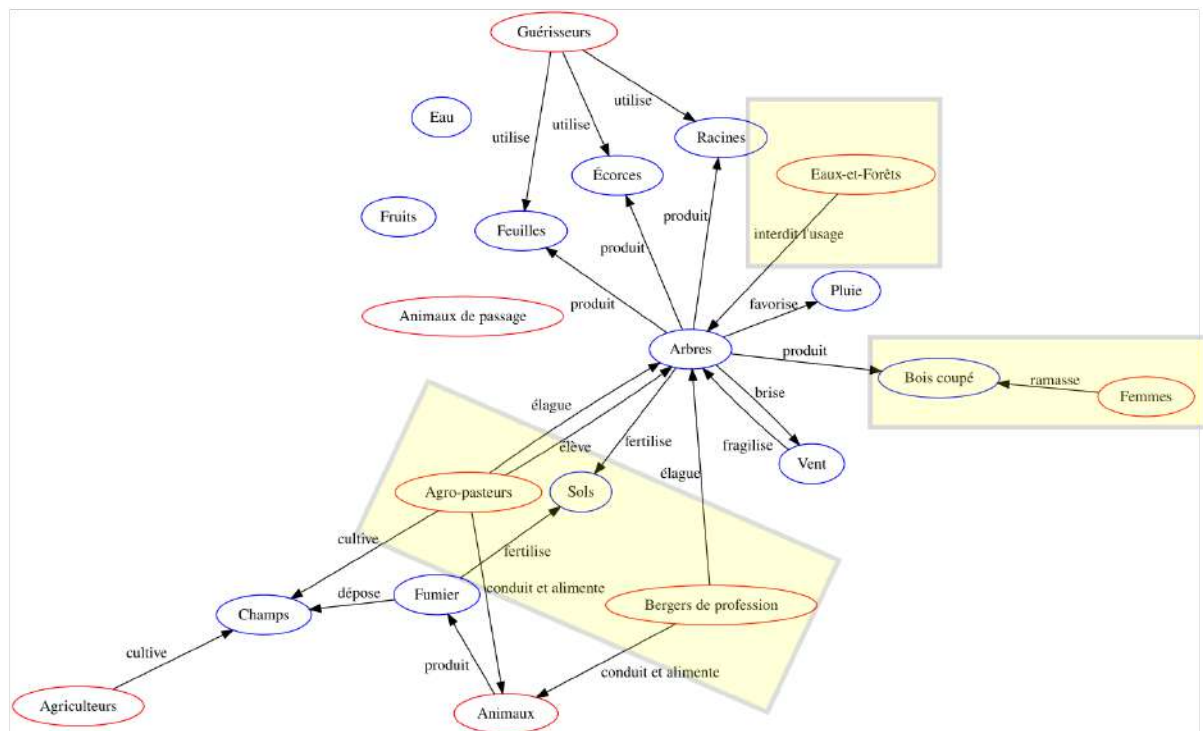
La méthode PARDI se fonde sur la constitution d'un modèle conceptuel qui prend la forme d'un diagramme. Dans ce diagramme les ressources et acteurs sont représentés par des nœuds, les interactions et les dynamiques par les flèches qui relient les nœuds entre eux.

A travers la méthode PARDI, il s'agit d'interroger des individus évoluant dans le même système. Par le partage des différents points de vue, l'atelier pousse les participants à adopter une vision réflexive sur leur quotidien. L'atelier a réuni 7 habitants de Diohine et des villages aux alentours : un agropasteur et une agropasteure, un vendeur de semences, un instituteur, une agricultrice et un agriculteur sans bétail, un membre de la mission catholique (Caritas). Les participants ont des statuts sociaux différents : ils n'habitent pas dans les mêmes quartiers, n'ont pas la même activité professionnelle ni le même niveau de vie. Ils pouvaient ainsi posséder des représentations du monde, donc du système-arbre, semblables ou différentes. L'intérêt de l'atelier est justement de confronter ces différents points de vue. Malgré la diversité des profils, il est nécessaire de mettre en exergue l'absence des jeunes au sein du groupe.

La problématique de l'atelier était la suivante : comment l'arbre améliore-t-il la fertilité des sols? Elle a été formulée en amont, sans les habitants participants. Cependant, elle s'intègre dans un travail mené quelques mois plus tôt, avec les mêmes acteurs, dans lequel les enjeux de fertilité et de restauration environnementale ont été soulevés (A.Fallot et A.Perroton). Partir d'un enjeu formulé par les participants paraissait nécessaire pour mettre en place une démarche de science participative, dans laquelle les habitants contribuent à la collecte de données mais aussi à la définition du problème (Houllier, 2016). La simplicité de la question permet à la fois de la rendre intelligible et surtout de ne pas trop restreindre le champ des discussions. Si elle paraît moins pertinente une fois le travail de terrain achevé, puisque l'enjeu n'est pas tant de comprendre les mécanismes de fertilisation des sols mais d'assurer la densification du parc agroforestier, elle a été le socle des premières réflexions, sur l'objet d'étude "arbre".







**Figure 7 :** Diagramme des composantes du système-arbre relevées pendant l'atelier PARDI (en bleu les ressources, en rouge les acteurs, les interactions sont symbolisées par les flèches)

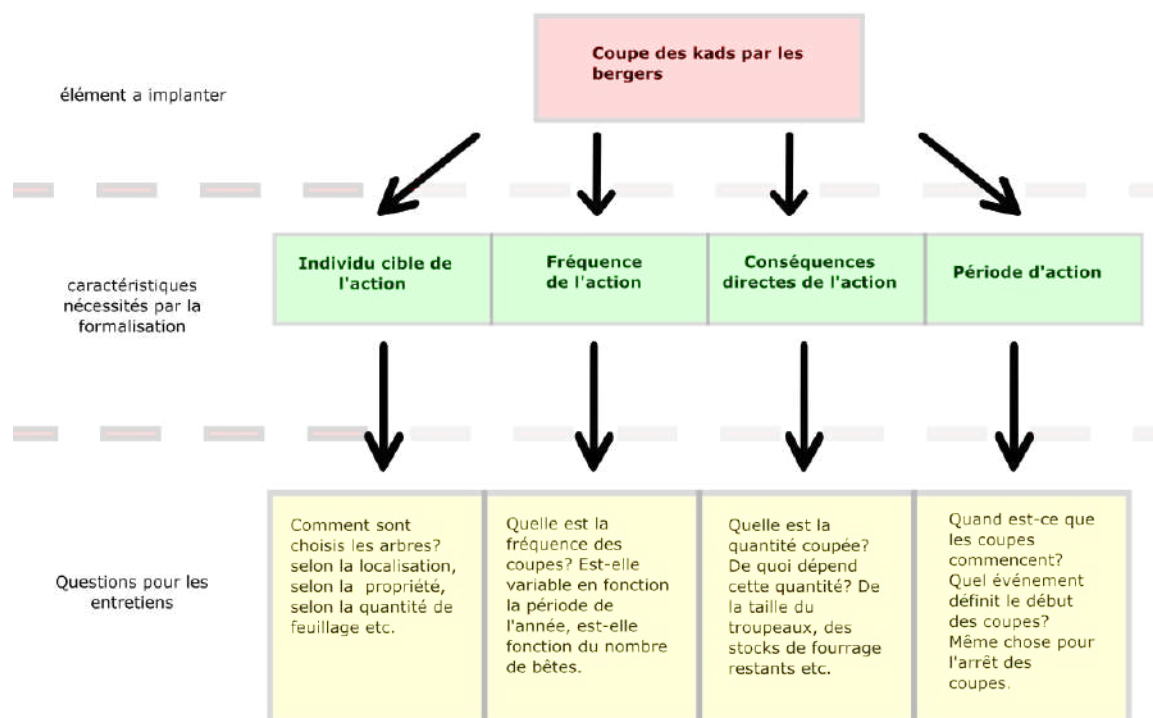
Les acteurs du système évoqués par les participants sont les suivants :

- Agriculteurs : paysans qui cultivent principalement du mil et de l'arachide et qui n'ont pas de bovins.
- Agro-pasteurs : agriculteurs qui possèdent des bovins. Ils peuvent garder le troupeau mais délèguent souvent la tâche à un ou plusieurs de leurs enfants.
- Bergers de profession : gardiens de troupeau rémunérés, qui ne possèdent pas de parcelles et qui sont souvent étrangers à la région.
- Guérisseurs : aussi appelés charlatan. Ils prélèvent les produits des arbres pour la médecine traditionnelle (pharmacopée).
- Agent des Eaux et Forêts : paramilitaire chargé par l'État de mener la politique de protection et de gestion de l'environnement dans la zone.
- Femmes : sous-entendu "femmes qui ramassent du bois".
- Animaux : bovins exclusivement, les petits ruminants n'ayant finalement pas été considérés.
- Animaux de passage : les bêtes appartenant aux troupeaux en transhumance qui transitent dans la zone pour une courte durée.

L'atelier a donc permis de constituer un premier système, socle des futures analyses. Il a également permis d'identifier les éléments du système qui nécessite un approfondissement particulier. En effet, certains éléments ont particulièrement été sujet à discussion : le ramassage du bois par les femmes, la différence entre les agro-pasteurs et les bergers professionnels, l'absence de l'agent des Eaux-et-Forêts. Ces éléments apparaissent en jaune sur la figure 7

## B. Compléter le système à travers un travail d'enquête qualitative : observations et entretiens

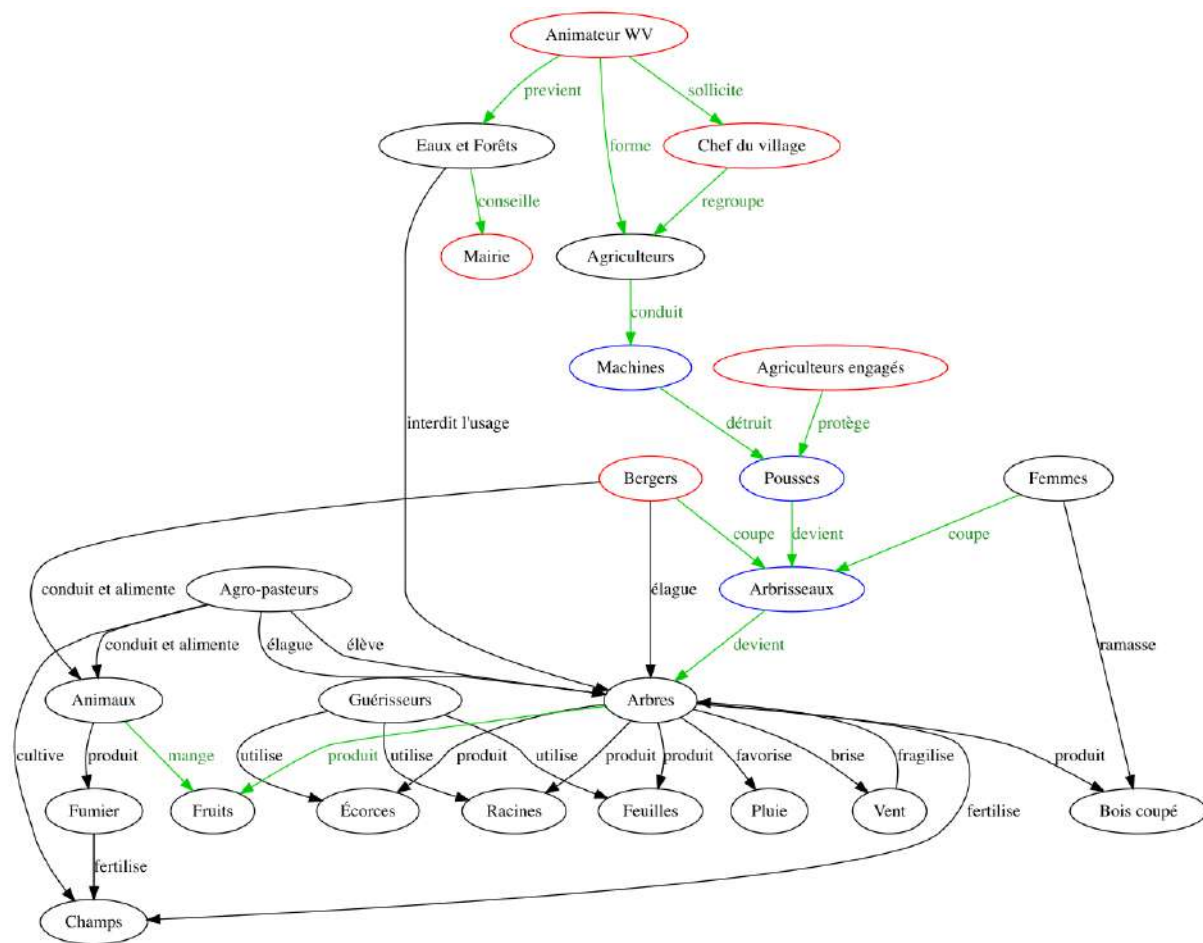
A la suite de cet atelier, un travail d'enquête qualitative a été mené sur la base d'entretiens et d'observations. Ce travail d'enquête avait pour objectif de préciser les dynamiques naturelles et les comportements individuels des acteurs évoqués pendant l'atelier. On cesse de considérer le système dans sa totalité pour s'intéresser à des sous-systèmes spécifiques. La préparation des entretiens a pu être nourrie par le processus d'implémentation des éléments du système dans le modèle informatique. En ajoutant un agent ou une interaction dans le modèle, diverses questions peuvent se poser : À quelle fréquence telle interaction a lieu ? Quel est l'effectif de la classe de tel agent ? Par le processus de formalisation, la construction du modèle permet de faire émerger des questionnements clairs et précis. Ainsi les entretiens se déroulaient souvent en deux temps : un premier temps très peu guidé, un second beaucoup plus structuré, où je posais les questions très spécifiques, guidé par les besoins de formalisation du modèle informatique.



**Figure 8** : Schéma montrant le cheminement de pensée du modélisateur, de l'implémentation informatique à l'enquête qualitative.

Le travail d'enquête qualitative a également permis de soulever les imprécisions et de compléter le système avec de nouvelles composantes. En effet, certaines composantes évoquées ne semblaient plus avoir leur place dans le fonctionnement actuel du système-arbre. A la suite de plusieurs entretiens avec des agro-pasteurs, les bergers professionnels s'avèrent ne pas avoir leur place dans le système puisqu'ils n'existent pas à Diohine. De nouveaux acteurs, jouant un rôle important dans l'utilisation ou dans la gestion du parc à *kad*, ont pu également être identifiés et ajoutés. La figure ci-contre permet de synthétiser les ajouts et les modifications apportés.

Au-delà des ateliers et des entretiens programmés, évoluer dans un village, pendant près de trois mois, a enrichi ma compréhension des enjeux locaux et a permis d'installer une confiance avec les habitants. Ainsi, les interactions informelles et quotidiennes ont également constitué une formidable source de connaissance.

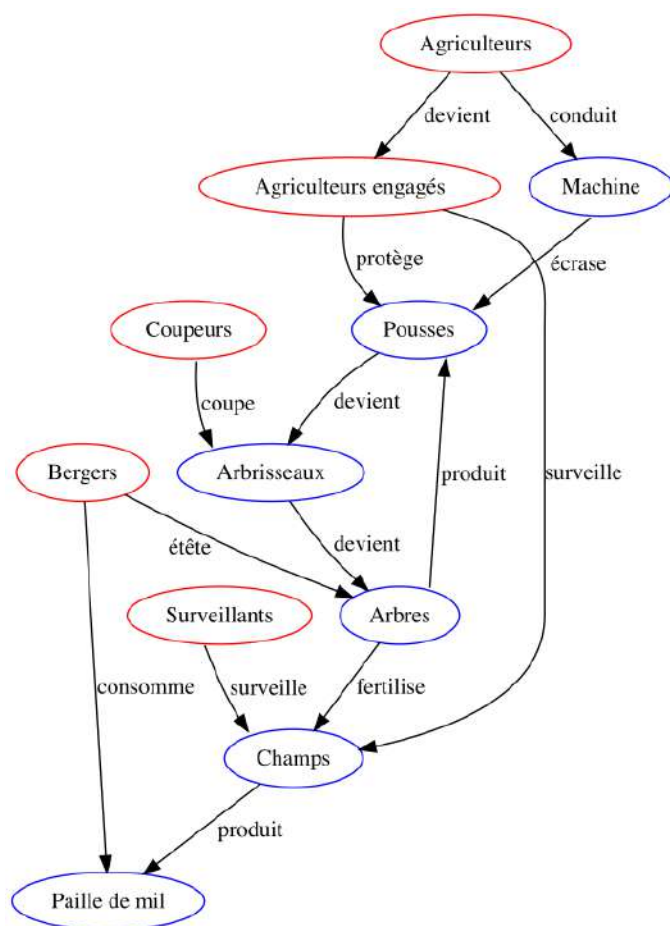


**Figure 9 :** Diagramme des composantes du système-arbre, avec les ajouts issus du processus d'enquête (en noir les éléments de l'atelier, en couleur les éléments ajoutés).

### C. La modélisation et ces choix

La construction du modèle informatique à proprement parler s'apparente à un second processus de simplification et de subjectivation (cf. PI.2.B). Il s'agit de monter en abstraction pour éviter l'usine à gaz et pour rendre les résultats plus intelligibles. Certains éléments évoqués par les acteurs n'ont pas été pris en compte dans le modèle, parce qu'elles ne me semblaient pas tous pertinents pour répondre à son objectif. La frontière du système a ainsi été redéfinie à plusieurs reprises, au gré des évolutions du questionnement.

Le processus de formalisation est ponctué de choix personnels qu'il est nécessaire de justifier. Pour assurer la transparence de la formalisation et l'ancrage du modèle dans les préoccupations locales, un atelier de présentation-validation a été mené avec les acteurs. Il a regroupé neuf habitants du village, dont six ayant participé à l'atelier précédent. Cet atelier a permis de définir une version stabilisée du modèle, décrite par le diagramme ci-dessous.



**Figure 10 :** Diagramme des composantes du système-arbre apparaissant directement dans le modèle informatique

Ce travail d'ateliers et d'enquête qualitative, largement influencé par la construction progressive du modèle, ont fait émerger plusieurs enjeux liés à l'état et la gestion du parc d'acacia *faidherbia* à Dioghine. Il s'agit maintenant de présenter ces résultats.

## 2. Les enjeux liés à la gestion du parc à *Faidherbia albida* : usages, besoins, surveillance et protection.

La partie présente constitue l'exposition de ces enjeux liés à la gestion du parc à kad. Ils apparaissent très divers. Elle suit un cheminement chronologique, celui du terrain, de ses avancés, errances et bifurcations.

## A. Le *Faidherbia* au centre de nombreux besoins et usages

- xv. L'usage fourrager du *Faidherbia albida* : un usage dominant à replacer dans un système complexe d'alimentation du bétail

Compte tenu des conditions pédo-climatiques peu favorables, le système d'alimentation du bétail de Diohine est marqué par une longue période de soudure. Du mois de mars à la fin du mois de juillet l'herbe s'avère insuffisante pour nourrir intégralement les troupeaux. Le fourrage est alors un élément essentiel à leur survie, les bêtes devant être nourries quotidiennement par les éleveurs. Or, ces mêmes conditions climatiques font que les ressources fourragères sont rares. L'alimentation des bovins durant la saison sèche s'avère ainsi être une véritable gageure.

Les résidus de culture stockés et les ligneux fourragers constituent les deux principales sources d'alimentation des troupeaux en saison sèche. Les résidus de culture sont nombreux : paille de mil, fanes d'arachide, niébés fourragers etc. Le niébé fourrager est peu répandu et produit en quantité trop faible pour pouvoir constituer un aliment conséquent tout au long de la période. Le foin d'arachide, constitué des fanes d'arachide, est quant à lui conservé pour les animaux plus nobles, les chevaux notamment. Il peut également être vendu pour alimenter les marchés urbains sur lesquels la demande est particulièrement forte, notamment à l'approche de certaines fêtes comme la *Tabaski*, équivalent sénégalais de l'*Aïd El-kébir*. La paille de mil à l'avantage d'être produite en grande quantité (une centaine de fagots de paille à l'hectare selon les habitants) et d'être utilisée uniquement pour l'alimentation du bétail, et dans une moindre mesure pour l'entretien ou la construction de palissades. C'est donc le seul résidu de culture qui peut être considéré comme un fourrage essentiel à la survie des troupeaux. Alors que les résidus étaient autrefois laissés dans les champs, la quasi-totalité des agriculteurs ramassent désormais leurs "tiges de mil". Ils les regroupent en grand tas dans les champs proches des habitations. Certains agriculteurs rassemblent leur tas avec ceux des membres de leur concession ou avec leurs associés. Cependant, beaucoup d'agriculteurs, notamment ceux sans bétail, n'ont pas besoin de ses tiges. Elles sont tout de même collectées, dans la perspective d'être vendues. Pour ceux qui en font usage, la paille de mil est donnée quotidiennement aux troupeaux. La quantité donnée dépend moins du nombre de têtes que de l'état du stock. Ainsi

pour un troupeau de 25 vaches, 10 fagots sont donnés par jour en début de saison sèche contre environ 7 à la fin. Face à l'épuisement du stock, il existe deux **réactions**. La première est de partir en transhumance, la seconde est d'acheter de la paille pour reconstituer les stocks. La transhumance a un coût social et économique certain : difficulté à fonder un foyer pour les jeunes bergers qui partent tous les ans, dépenses pour l'abreuvement, les traitements vétérinaires, l'alimentation et autres besoins du berger etc. Ainsi, tous les éleveurs ne font pas partir leurs troupeaux. Dans le système intégré où la fumure est une ressource précieuse, les éleveurs transhumants ne peuvent enrichir leur champ autant que les sédentaires. Cependant, pour les éleveurs avec de grands troupeaux, partir en transhumance est souvent la seule façon de sauver leurs bêtes.

Les arbres constituent la seconde ressource fourragère locale. Dès que l'herbe vient à manquer, les éleveurs coupent quotidiennement des arbres pour faire manger leur troupeau. La coupe des arbres s'apparente à un élagage partiel ou intégral. L'étêtage, c'est-à-dire l'élagage intégral de l'arbre, est le type de coupe le plus répandu. Les éleveurs sédentaires s'y adonnent tout au long de la période, les éleveurs transhumants jusqu'au départ de leur troupeau. Si tous les arbres de la zone sont utiles et utilisés par les locaux, peu d'espèces le sont à des fins fourragères. Seuls le *faidherbia albida* et le neem peuvent être considérés comme des ligneux fourragers. Ces deux essences se distinguent sur plusieurs points. Alors que le *faidherbia albida* est une des essences emblématiques de la zone, le neem, originaire d'Inde, n'est apparu à Diouane que tardivement, après la sécheresse de 1970. Le neem, à l'inverse du *Faidherbia albida*, est une espèce que l'on plante. Ainsi les deux essences s'opposent par leur localisation. Les neems sont plantés dans les villages, souvent à l'intérieur des concessions ou le long des pistes, alors que le *Faidherbia* n'est présent que dans les champs. Le neem est souvent considéré comme un bien individuel alors que les *Faidherbia* semble constituer un bien commun<sup>8</sup>. Dernier point d'opposition, cette fois-ci biophysique : la phénoménologie. Les Neems ont une phénoménologie continue alors que les *Faidherbia* ont une phénoménologie inverse. Ces derniers perdent ainsi leur feuille plus précocement. Ils sont donc peu à peu délaissés à mesure que la saison des pluies approche.

---

<sup>8</sup> Lors d'un entretien, une habitante explique pourquoi il est plus accepté de couper des *neems* que des *kad* en ces termes : « il a planté ses neems alors que les *Faidherbia* ont été planté par le bon dieu ».



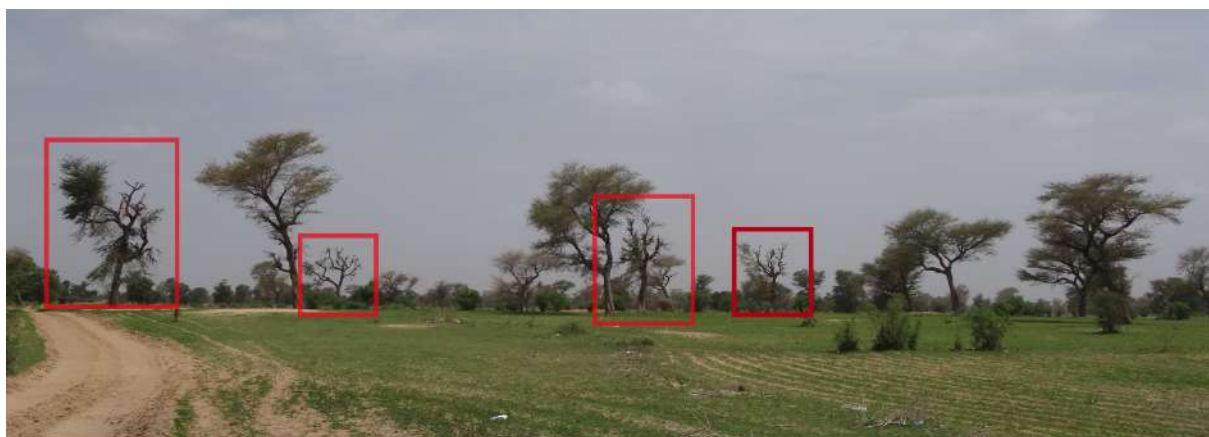


**Figure 11 :** Troupeau s'alimentant après l'étêtage d'un *Faidherbia albida*

En tant que ligneux fourragers, les neems sont souvent préférés aux *Faidherbia albida*, et cela pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les *neems* disposent d'une plus grande quantité de fourrage que les *kad*. Alors qu'un vieux neem peut alimenter un troupeau de 25 bêtes pendant deux ou trois jours, il faut étêter au moins un *Faidherbia albida* par jour pour nourrir ce même troupeau. Cette différence de volume de fourrage se creuse d'autant plus à mesure que la saison des pluies approche. Puisque les *Faidherbia albida* perdent peu à peu leurs feuilles à partir de mai, ils ne constituent plus une source de fourrage suffisant dans les mois qui suivent. Au-delà de la quantité, la qualité du fourrage est mise en avant par les éleveurs. Ces derniers le

considèrent comme un “médicament pour les vaches”. Le *neem* possède également de bonnes caractéristiques nutritionnelles. Enfin, sa coupe s’avère moins risquée que celle du *Faidherbia albida*. Puisqu’il n’a pas de fonction fertilisante et qu’il est aisément plantable, le neem est moins protégé par le code forestier, à tel point que la majorité des personnes rencontrées considèrent que son élagage est légal. En réalité, il est nécessaire de demander une autorisation d’élagage auprès du représentant des Eaux et Forêts sous peine d’être amendé. Cependant, les demandes sont très rares. L’accès aux neems, qui sont principalement présents dans l’espace privé des concessions, se fait par le biais d’arrangements entre le propriétaire de l’arbre et l’éleveur. L’accord est toujours le même : le berger se charge de couper l’arbre, fait manger ses bêtes puis laisse le bois coupé aux propriétaires de l’arbre. L’intérêt apparaît donc réciproque mais l’accès aux neems n’est pourtant pas systématique. Malgré la solidarité des habitants vis-à-vis des éleveurs, ces derniers peuvent ne pas trouver d’arbre au village. Ils prennent alors le risque de couper des *Faidherbia albida*.

Quand on déambule dans les champs, on constate que de nombreux acacias ont effectivement été élagués ou étêtés (Figure 12). Pourtant, les agro-pasteurs rencontrés affirment tous avoir cessé de couper des acacias pour nourrir leur troupeau. En effet, depuis le mois de mars 2022, le contrôle des coupes a été renforcé et plusieurs amendes ont été distribuées par l’agent des Eaux et Forêts. Le choix d’arrêter les coupes est lié à la crainte de recevoir une amende, d’autant plus que les montants pour coupe de *kad* peuvent monter jusqu’à plusieurs centaines de milliers de francs CFA.



**Figure 12 :** *Faidherbia albida* étêtés dans la brousse de Diohine (rectangle rouge) le 18/06/2022

Que ce soit par peur de l’amende ou par simple respect des règles, les coupes de *kad* ont diminué dans la zone de Diohine. Pourtant, la pratique subsiste en se faisant plus discrète. Les arbres sont désormais coupés à des heures où personne ne passe dans les champs: la nuit, à

l'aube, ou vers midi lorsque le soleil et la chaleur sont particulièrement écrasants. Les outils de coupe changent également. Alors que la machette, le "coupe-coupe", constituait l'instrument privilégié jusqu'alors, il est peu à peu remplacé par des outils moins bruyants.

Pourtant, si elles sont bien faites, les coupes ne compromettent ni la santé du *kad*, ni sa reproduction (D.Pommier & H.Guérin, 1996). Selon les participants aux ateliers, le *kad* met trois ou quatre ans à se régénérer, après un étêtage. Un émondage raisonné pourrait ainsi permettre aux habitants de tirer parti des différentes fonctions du parc à *kad* : celles de nourrir les bêtes, de fournir du bois et de fertiliser les champs. (D.Pommier & H.Guérin, 1996).

#### xvi. La récupération du bois de coupe dans un contexte de rareté du bois de chauffe

Les ressources en bois demeurent très limitées à Diohine. Un des participants aux ateliers affirme que la ressource est si rare qu'il est plus facile, lors des préparatifs d'une fête, de se procurer une vache que de récupérer la quantité de bois nécessaire à la cuire. En période sèche, la recherche de bois pour la cuisine reste une activité pratiquée quasiment quotidiennement par les femmes. En saison des pluies, une fois que les travaux aux champs démarrent, elles ne disposent plus d'assez de temps pour d'autres activités que la cuisine et l'agriculture. La recherche de bois s'intensifie donc à l'approche de la saison des pluies puisque les femmes anticipent et forment des stocks.



**Figure 13 :** *Stockage du bois pour l'hivernage dans l'enceinte d'une concession de Diohine (18/04/2022)*

La constitution des stocks commence de plus en plus tôt à mesure que la ressource se raréfie. Alors qu'elle se faisait de mi-avril à fin mai, elle débute désormais avant avril et se prolonge jusqu'aux premières pluies. La raréfaction de la ressource pousse également les femmes à couper ou récupérer n'importe quelle ressource ligneuse. On verra notamment par la suite que le prélèvement ou la coupe des pousses de *faidherbia* par les femmes est un obstacle majeur à la régénération du parc. Cependant, elles ne s'attaquent pas directement au *kad* adulte. Lorsqu'un berger étête un *Faidherbia*, il prévient les femmes de sa cuisine pour qu'elles puissent récupérer le bois, une fois que les vaches ont mangé les feuilles. Les bergers coupent souvent, et même de préférence, des arbres qui ne sont pas dans leurs propres parcelles, notamment parce qu'ils ne disposent pas d'assez d'arbres dans leurs parcelles. Or le bois de coupe appartient au propriétaire de la parcelle dans laquelle l'arbre a été coupé. Les femmes s'exposent ainsi à de potentiels conflits. Si le propriétaire surprend les ramasseuses, il peut exiger son bois et les blâmer de vol. Cependant la pratique est tellement répandue qu'elle semble socialement acceptée.

L'étêtage des *Faidherbia* et des neems constitue donc des événements importants dans la constitution des réserves de bois. Le volume important de bois récupéré est essentiel pour

assurer les besoins en bois de chauffage et de construction. Les branches de Neems sont souvent utilisées pour la construction, là où celles du *Faidherbia* sont souvent brûlées. Face à la raréfaction des ressources ligneuses, les populations se sont adaptées. La pénurie de bois constitue l'un des facteurs de son abandon progressif : les constructions en bois laissent place, peu à peu, à celles en béton, des systèmes de chauffage à gaz se diffusent progressivement etc. Cependant, beaucoup de foyers restent encore dépendants du bois. Ainsi, dans un contexte où les ressources ligneuses sont déjà rares, la réduction des coupes d'arbres pourrait augmenter encore davantage les tensions autour du bois.

En se concentrant sur les différents usages du *kad*, un paradoxe a émergé. Face à l'incompressibilité de certains usages, liés aux besoins primaires de chauffe et d'alimentation des troupeaux, la politique de stricte interdiction d'usage des *faidherbia albida*, mise en place par les Eaux et Forêts semble vaine, voire contre-productive. En effet, en déplaçant ces usages dans la sphère de l'illégalité, certaines pratiques, qui semblaient inoffensives, mettent désormais en péril la survie des arbres. L'adoption de nouveaux outils de coupe, moins bruyants mais aussi moins précis et l'augmentation de la rapidité de coupe tendent à abîmer l'arbre, compromettant sa repousse. Ainsi, semble poindre une première limite au mode actuel de gestion du parc arboré. Il s'agit maintenant de mieux comprendre le fonctionnement de cette gestion.

## B. Le mode actuel de gestion du parc

### xvii. L'évolution des acteurs et l'externalisation de la surveillance

A Dioghine, les structures collectives de solidarité et de gestion sont particulièrement bien préservées. Contrairement aux autres villages des environs, un système de gestion collective de l'espace perdure. Le *mis*, ou la grande chasse rituelle, est une fête traditionnelle durant laquelle l'organisation du territoire productif est définie collectivement (Delay et al, en cours). Parmi les nombreux événements du *mis*, des régions diurnes par quartiers sont organisées pour « [définir l'orientation des cultures et négocier l'accès à la terre] » (Delay *et al*, en cours). L'emprise de la jachère communautaire, ainsi que celles des champs d'arachide et de mil sont définies puis centralisés à l'échelle du village. Pourtant force est de constater qu'aucune concertation portant sur la gestion du parc arboré n'existe actuellement. Comment comprendre



cette absence, dans un village où les structures villageoises de concertation sont pourtant bien préservées?

La gestion villageoise des arbres a bien existé à Diohine. Avec une pointe de nostalgie, un participant aux ateliers, évoque l'ancienne organisation villageoise fondée sur la responsabilité de chacun à protéger les jeunes *kad* et à prendre garde à la bonne régénération du parc. L'arrivée des Eaux et Forêts a entraîné la disparition du système régulateur villageois, et par conséquent l'attention des habitants à protéger le parc.

S'il est difficile de connaître l'efficacité de l'ancienne régulation communautaire, on peut au moins déterminer les failles de la gestion actuelle du parc arboré : manque de moyens, étendue vaste de l'espace à surveiller, nombreuses activités menées par l'agent etc.

La protection et la régénération des ressources naturelles est assurée, à Diohine comme sur l'ensemble du territoire sénégalais, par la Direction des Eaux et Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols (DEFCCS). Pour plus de concision, on la nommera Eaux et Forêts par la suite. Cet organisme public, créé sous la colonisation, a subi de nombreuses réformes au cours de son histoire. Aujourd'hui, on pourrait dire que l'institution est un organisme paramilitaire décentralisé. Dans une tradition qui date de la colonisation, les agents des Eaux-et-Forêts sont des militaires qui opèrent en uniforme. Depuis les années 1990, l'agence des Eaux-et-Forêts, qui était fortement centralisée, a connu un mouvement progressif de décentralisation (G.Blundo, 2014). Aujourd'hui, l'institution se divise sur le territoire national en secteurs, brigades et triages, correspondant respectivement aux niveaux départemental, intercommunal (arrondissement) et communal.

Dans la région de Diohine, l'échelon communal du triage n'existe pas. Sans que cela soit bien clair, il semble tout de même que cette absence soit liée à un manque de moyen financier. La gestion forestière est ainsi menée, à Diohine, par la brigade de Tattaguine qui opère au niveau de l'arrondissement. Elle souffre elle aussi d'un manque de moyens matériels, financiers et humains. La "pénurie structurelle" (G.Blundo, 2014) dans laquelle se trouvent les organes déconcentrés des Eaux et Forêts, secteur (département), brigade (arrondissement), triage (commune), concerne l'ensemble du territoire national. Cependant, elle s'avère particulièrement forte dans les zones sèches, qui sont pourtant celles où les enjeux environnementaux demeurent les plus préoccupants. Dans le système centralisé d'allocation des ressources, différencié selon les territoires, le volume de subventions dépend avant tout de

la rentabilité économique des espaces forestiers (*ibid*). Ainsi, les territoires du bassin arachidier perçoivent moins de subventions que les territoires de Casamance notamment.

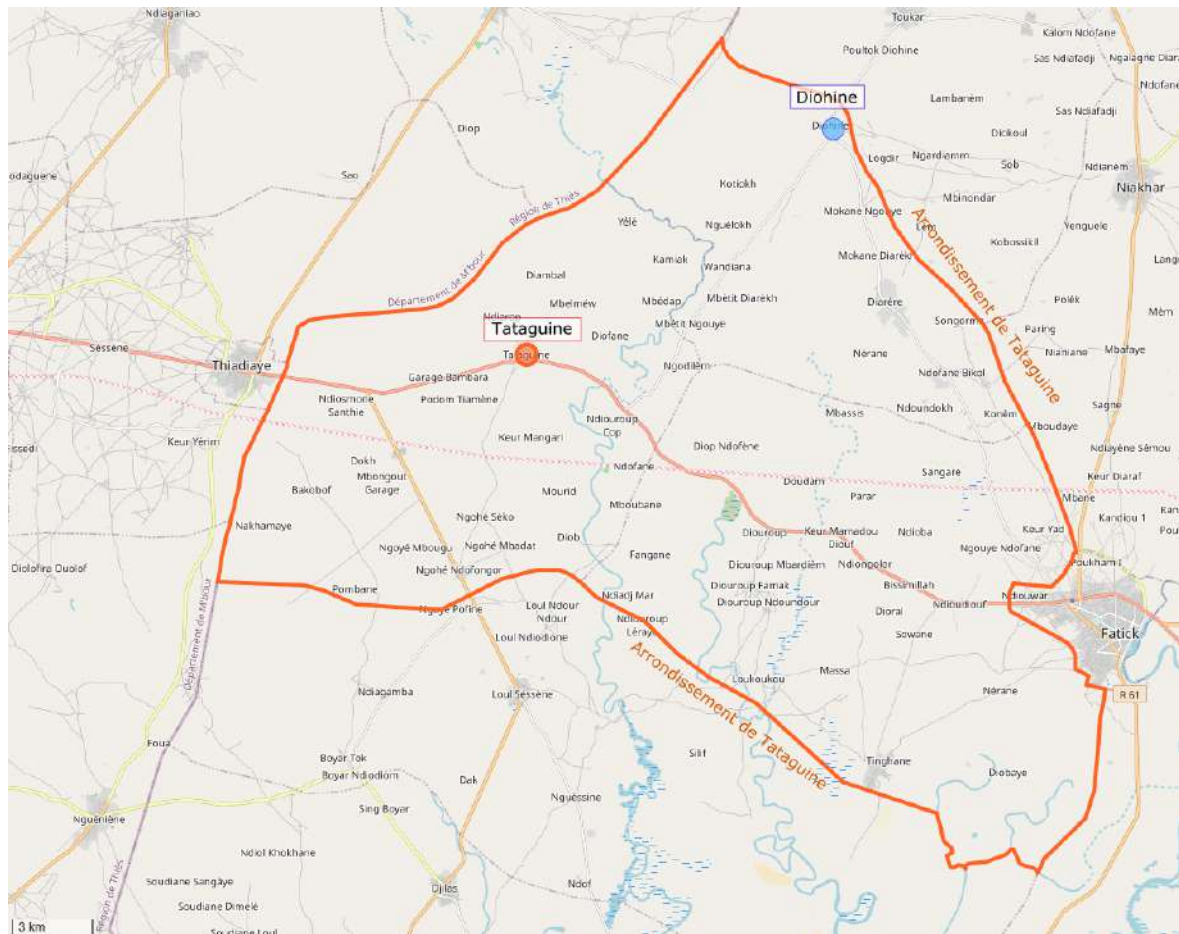
Le dénuement de la brigade de Tattaguine se traduit d'abord dans les effectifs. Alors qu'elle opère sur un espace regroupant 52 villages, la brigade ne comporte qu'un seul agent, épaulé par un stagiaire bénévole. L'arrondissement de Tattaguine regroupe les communes de Diarrère, Diouroup et Tattaguine qui compte respectivement 23, 11 et 17 villages. La superficie de l'arrondissement s'élève à pas moins de 53119 hectares soit 531 km<sup>2</sup>, ce qui semble immense au regard du nombre d'agents.

La couverture de cette vaste zone s'avère d'autant plus difficile que les moyens matériels de transport ne sont pas assurés. D'une part, les axes/routes bitumées sont rares, la majorité des voies de circulation étant des pistes particulièrement sableuses en saison sèche. De l'autre, en l'absence de tout dédommagement, l'agent, au moment de l'entretien, n'avait plus de moto fonctionnelle depuis plus d'un mois. Ne pouvant plus se déplacer, il se limitait donc exclusivement à un travail de bureau, ce qui semblait être peu adapté aux différentes missions dont il a la charge : police forestière, appui des paysans, conseils aux équipes communales etc. Ainsi, à Dihine comme dans les autres villages de l'arrondissement, la présence de l'agent est très rare. Elle l'est d'autant plus à Dihine puisque le village se trouve au confins de l'arrondissement (cf. Figure 14).

Le manque de moyen humain force également l'agent à multiplier les casquettes et les tâches. Il assume les fonctions de policier, formateur, conseiller, agent de sensibilisation etc. Certaines activités, considérées comme prioritaires, occupent la majeure partie de son temps, au détriment des autres activités. La police forestière apparaît ainsi comme une activité résiduelle. Aucun temps spécifique ne lui est alloué. Aucun déplacement n'est entrepris spécialement pour surveiller la brousse. Si l'agent ne peut être réellement qualifié de surveillant, il reste l'interlocuteur à qui l'on s'adresse pour régler les conflits. Quand une personne est surprise sur le fait et qu'elle ne se montre pas coopérante, l'agent des Eaux-et-Forêts est appelé pour régler le conflit.

Ainsi, pour épauler l'agent, un système de surveillance villageois a été mis en place. A l'issue de réunions organisées par l'ONG World Vision International, des surveillants bénévoles ont été désignés dans chaque village. Ils ont pour mission de prévenir l'agent des Eaux-et-Forêts en cas d'activités illégales de coupe. Les surveillants sont désignés lors des réunions et se

regroupent à l'échelle des villages au sein d'un "comité de veille". Quantifier leur nombre et leur investissement effectif dans la surveillance s'avère cependant difficile. Le surveillant rencontré était quelqu'un de très occupé, investi dans beaucoup d'initiatives du village. Le chef du village, qui est censé former un groupe avant la réunion, sollicite souvent des personnes particulièrement influentes et investies dans la vie du village. Or, ces personnes ne semblent pas être celles qui disposent du plus de temps pour surveiller efficacement la brousse. Le fait qu'elle ne soit pas rémunérée peut aussi avoir un effet négatif sur leur investissement.



**Figure 14 :** Arrondissement de Tataguine

Le passage d'un régime de régulation organique, fondé sur la coordination des usages par les acteurs internes, à un mode de régulation mécanique, reposant sur un acteur externe pose ainsi plusieurs problèmes : d'abord l'absence relative du régulateur, l'agent de la brigade de Tataguine, puis la déconnexion entre le régime de droit moderne et les conditions socio-économiques des villageois.



xviii. Le problème des régimes de droit moderne et traditionnel.

L'objectif du système de police forestière consiste à diminuer les coupes, dans la perspective d'améliorer l'état du parc arboré. L'efficacité du système réside à la fois dans son potentiel coercitif et dans sa force de sensibilisation. Or, le système actuel est en partie fondé sur le droit moderne, dont les règles et les lois semblent ne pas coïncider avec les réalités locales. Le système de droit moderne, porté par l'agent des Eaux et Forêts, est très coercitif. Il met en avant deux mécanismes de régulation souvent utilisés : l'autorisation et l'amende.

Pour toute coupe d'arbre, qu'elle s'apparente à un élagage ou à un abattage, il est toujours nécessaire de formuler une demande à la brigade des Eaux et Forêts. Les demandes ne peuvent concerner que les essences qui ne sont pas protégées par le code forestier. Les kad ne peuvent donc faire l'objet de demande, alors même que l'élagage semble parfois nécessaire à leur survie. En effet, selon certains habitants de Diohine, les vieux arbres qui possèdent de nombreuses branches sont particulièrement exposés au vent violent des orages de l'hivernage.

Les démarches qui permettent d'acquérir une autorisation de coupe sont nombreuses et contraignantes. Il est nécessaire de recueillir l'autorisation de la mairie avant de pouvoir présenter la demande à la brigade des Eaux et Forêts de Tataguine, qui doit ensuite identifier l'arbre pour donner son accord. Dans un territoire où le maillage administratif est lâche (cf figure 14) et où il est difficile de se déplacer rapidement, envisager de tels déplacements a donc un coût certain. A titre d'exemple, pour les habitants de Diohine, la mairie de Diarère est à 7km et la brigade Tataguine à 15km. De plus, ces demandes nécessitent la disponibilité du personnel de la mairie et de l'agent des Eaux-et-Forêt, ce qui freine d'autant plus les démarches. Face à cette complexité administrative, les demandes demeurent rares et les coupes souvent illégales. Pourtant, les amendes sont lourdes. D'après l'article 54 du code forestier de 2018 :

*“Quiconque, en violation des dispositions du présent Code, coupe ou enlève un ou des arbres, les ébranche, les émonde ou les écorce abusivement ou exploite des produits forestiers accessoires, est puni d'un emprisonnement de six (06) mois à deux (02) ans et d'une amende de cinq cent mille (500.000) francs CFA à un million (1.000.000) de francs CFA ou de l'une de ces deux peines seulement, sans préjudice de la confiscation et des dommages et intérêts.”*

Pour les espèces protégées, comme le *Faidherbia albida*, la peine de prison et l'amende sont encore plus élevées, allant de 2 à 5 ans d'emprisonnement et de 2.000.000 à 5.000.000 de francs CFA d'amende (article 55 - Code forestier). Si de telles peines n'ont pas été infligées à Diohine, plusieurs bergers des environs ont reçu de lourdes amendes.

Face à de telles sommes, l'agent des Eaux et Forêts ne peut raisonnablement appliquer le montant réel des amendes. Il essaye d'être particulièrement compréhensif en recourant à l'amende en dernier ressort. Il peut également minorer les montants.

Le système de surveillance des ressources forestières à Diohine peut donc être considéré comme un système hybride. Sur le papier, il se fonde sur le droit moderne, impassible et particulièrement coercitif. Pourtant, il laisse une large part à la négociation. Le recours au droit moderne *stricto sensu* demeurent particulièrement exceptionnel. Cependant, il semble être efficace puisque les amendes contractées sont particulièrement traumatisantes pour les amendés mais également pour tous leurs pairs. Le recours aux arrangements sociaux semble provenir de la nécessité de s'ancrer dans le cadre normatif traditionnel et de se rapprocher des réalités économiques locales. Cependant, par le passé, le régime traditionnel de résolution des conflits s'est lui aussi avéré relativement inefficace pour assurer la pérennité de la surveillance.

Comme nous l'avons vu précédemment, les dispositifs communautaires/locaux de protection du parc arboré sont quasi inexistantes sur le territoire. Pourtant, cela n'a pas toujours été le cas. A la fin du XXème siècle, la dégradation environnementale brutale que connaît Diohine, a poussé les habitants à s'organiser collectivement pour sauver les arbres. Les habitants de Diohine se sont regroupés dans le but de désigner pour chaque quartier, une personne chargée de surveiller la brousse. Les personnes choisies restaient inactives pendant la saison sèche, période de surveillance, et pouvaient ainsi prendre le temps pour déambuler dans la brousse. La surveillance se faisait quotidiennement, pendant l'intégralité de la matinée (6h-13h) puis en fin de l'après-midi (17h-19h). Quand le surveillant surprenait un coupeur, il n'allait pas directement à sa rencontre, mais prévenait dans un premier temps le chef du village. Ce dernier convoquait alors le coupeur, le surveillant et d'autres habitants, pour fixer une amende. Le montant de celle-ci n'était pas fixe. Il dépendait de l'essence, le *kad* occasionnant des amendes plus élevées, du type de prélèvement mais surtout de la richesse du sanctionné. Cette résolution à l'amiable des conflits, que l'on retrouve fréquemment dans le système de résolution des conflits à Diohine (Delay et al, en cours), ne débouchait pas nécessairement sur une amende. L'interpellé ne réglait en réalité que très rarement son amende. Or, la rémunération des

surveillants se faisait avec la moitié des montants perçus au titre de l'amende. Face à la dureté du travail et à l'absence de rémunération suffisante, les surveillants ont tous peu à peu démissionné, mettant un point final à la gestion communautaire du parc arboré. Ce mode de surveillance s'est avéré efficace, en tout cas, aux yeux des personnes rencontrées. Cependant, il n'a pu se pérenniser à cause du manque de personnes investies dans la surveillance et de l'absence de revenu perçu, liée à un système d'amende trop accommodant.

xix. La faible considération du *kad* et le problème de l'immensité de la brousse.

Les acteurs institutionnels de la gestion sont finalement relativement nombreux : la mairie, l'animateur de World Vision International, l'agent des Eaux et Forêts. Les actions menées avec les populations locales le sont tout autant : campagnes de reboisement, construction d'une pépinière communale, restauration des bois villageois etc. Cependant elles sont concentrées géographiquement puisque toutes ces initiatives sont menées dans l'espace du village. Deux éléments peuvent expliquer cette concentration des initiatives dans les villages. Tout d'abord, la brousse est un espace vaste où l'activité en saison sèche demeure très faible. Il semble difficile, compte tenu des moyens disponibles, de mettre en place des dispositifs efficaces de reboisement sur un si large espace. Ensuite, la faible activité en brousse pose le problème, précédemment évoqué, de la surveillance de cet espace.

De plus, le *kad*, l'arbre qui nous intéresse et qui est largement majoritaire dans l'espace des champs, ne peut faire l'objet de plantation. Si la littérature des années 1990 affirme l'efficacité des campagnes de plantation de *Faidherbia* (CIRAD-CTFT, 1988), cette option semble avoir été abandonnée tant par les institutionnels que par les scientifiques. Cet abandon semble lié à un rapport coûts-bénéfices défavorable (Van den Beldt, 1996).

Ainsi l'espace des champs et les *kad* apparaissent relativement délaissés par les acteurs de la gestion du parc arboré. Cependant une technique agro-forestière est particulièrement mise en avant : la régénération naturelle assistée (RNA). Elle est mise en place dans de nombreux territoires sahéliens d'Afrique de l'Ouest. Pourtant, elle semble avoir du mal à porter ces fruits à Dioghine.

## C. Les raisons de l'absence de régénération : menaces multiples et freins

xx. La RNA, une technique partiellement implantée sur le territoire.

La RNA est une technique agro-forestière de protection des rejets naturels produits par les arbres et arbustes des champs cultivés. La RNA consiste à la fois en la sélection des rejets les plus vigoureux et les mieux positionnés, leur protection ou la signalisation et enfin l'élagage sélectif des branches. Ainsi, la RNA vise à la fois la sauvegarde des petites pousses et l'accélération de leur croissance.

A Diohine, la RNA est portée principalement par l'ONG World Vision International. Pour atteindre son objectif de "Reverdier le Sénégal", l'organisation a recruté dans chaque commune un animateur, chargé de la sensibilisation et de la gestion de l'environnement local. L'animateur opérant à Diohine travaille en étroite collaboration avec la mairie de Diarrère. Il couvre l'entièreté de la commune c'est-à-dire les 23 autres villages la constituant. Ses activités et objectifs sont nombreux, l'adoption et la diffusion des techniques de RNA n'en représente qu'une partie. L'animateur a organisé des réunions de formation dans chaque village. Ces réunions peuvent être décrites en 3 étapes: réunion théorique, apprentissage pratique par la visite d'un champ, formation d'un comité de veille. Lors de la première partie théorique, il s'agit de sensibiliser les participants aux avantages des arbres et principalement des *Faidherbia*. Les services écosystémiques liés à l'eau et à l'érosion y sont souvent plus mis en avant que les avantages fertilisants. Dans un second temps, est organisée la visite d'une parcelle où la RNA est mise en place. Il s'agit alors de former les participants au repérage des pousses les plus vigoureuses puis à celui des branches à conserver. Le dernier temps de la réunion consiste en la formation d'un comité de veille à l'échelle du village. Alors que les réunions regroupent environ 30 personnes, l'effectif du comité de veille regroupe 5 personnes. Elles sont désignées à la fin de la réunion. Elles ont pour mission de surveiller les champs du village. Or en l'absence de toute rémunération, leur investissement ne semble pas maximal. L'objectif de former 345 paysans à l'échelle de la commune a été atteint. Des formations ont été dispensées dans tous les villages. Pourtant, les activités de l'animateur semblent peu connues à Diohine. Tout d'abord, aucun des participants des ateliers que nous avons menés, pourtant particulièrement investis dans les activités du village, n'avait participé ou entendu parler de ces réunions. Ensuite, le chef du village, qui avait pourtant organisé la réunion, ne se souvenait plus de l'identité des personnes participantes. La seule personne rencontrée qui avait participé

à une réunion de World Vision, n'était pas de Diohine. Dans son quartier, seules 10 personnes avaient participé. Ainsi, l'ancrage des activités de World Vision est encore partiel.

Malgré tout, la décision de protéger les pousses de *Faidherbia albida* dans ses champs ne provient pas uniquement de la participation à ces réunions. Parmi les six protecteurs de pousses rencontrés, seule une personne avait participé à cette réunion. Les motifs sont en réalité très divers. Certaines personnes affirment protéger leurs pousses depuis qu'elles ont vu les arbres de leur champ mourir. La prise de conscience de la dégradation de son environnement proche est ainsi un facteur d'adhésion/d'engagement. Dans une zone où la présence des chercheurs et des ONG reste importante, l'engagement peut se faire à la suite d'études et d'intervention sur le terrain. Les habitants, en voyant des étrangers intéressés par la *Faidherbia albida*, prennent conscience de l'importance de protéger les rejets.

#### xxi. Les multiples menaces qui interviennent pendant la croissance de l'arbre

La visite de plusieurs parcelles dans lesquelles les pousses sont protégées, a permis de faire le constat de la grande difficulté à assurer une régénération efficace du parc, et ce même à l'échelle de la parcelle. En effet, la régénération naturelle des acacias se heurte à plusieurs menaces, qui interviennent à des stades de croissance différents.

Les freins évoqués dans la littérature semblent assez différents de ceux qui ressortent de l'expérience de terrain. Dans un rapport du CIRAD, des agronomes identifient plusieurs obstacles principaux : “la dent du bétail ou des rongeurs, la concurrence herbacée et les feux de brousse”<sup>9</sup>. Pourtant les freins évoqués par les participants aux ateliers et les protecteurs de pousse sont différents. Les trois principaux obstacles sont les suivants : la destruction des jeunes pousses par les machines lors des travaux agricoles, l'attaque des jeunes pousses abîmées par les termites et enfin la coupe des jeunes individus.

La menace que représentent les termites n'a pas pu être clairement identifiée/analysée. Les avis sur les termites sont ambivalents : “Elles sont comme nous, bonnes et mauvaises” (Assane Diouf, 2022). Elles permettent l'aération et l'enrichissement des sols mais s'attaquent également aux stocks de céréales et aux arbres. En ce qui concerne les jeunes pousses, il faut porter une attention particulière à ne pas endommager la pousse lors du tuteurage. En perforant les racines, la pose d'un tuteur peut mettre la pousse à la merci des termites. Les habitants

---

<sup>9</sup> [https://agritrop.cirad.fr/418332/1/document\\_418332.pdf](https://agritrop.cirad.fr/418332/1/document_418332.pdf)

encerclent les stocks de céréales avec des cendres de cuisine pour faire fuir les termites. Cette pratique pourrait être mise en œuvre avec les jeunes pousses, si les termites devenaient une menace particulièrement forte.

La destruction des jeunes pousses par les machines agricoles demeure bien plus problématique. Les machines, qui sont exclusivement des charrettes attelées, sont utilisées à trois reprises lors de la saison des cultures. Le premier passage correspond aux semis, le second au démariage/désherbage, et enfin le dernier est dédié à la récolte de l'arachide. A l'occasion de ce dernier passage, les pousses sont particulièrement menacées. Lors des semis et du démariage les pousses sont relativement visibles puisque le sol est encore quasiment à nu. A l'inverse, lors de la récolte de l'arachide, le sol est encore couvert de hautes herbes, ce qui rend difficile l'évitement des pousses si celles-ci ne sont pas signalées (cf. figure 15).



**Figure 15 :** Utilisation d'une charrette attelée lors de la récolte de l'arachide. (Etienne Delay, 2021)

Le passage de la charrette demande une certaine force physique. La machine est ainsi généralement conduite par un jeune homme, aidé par un enfant qui dirige le cheval de trait.



La protection des pousses contre les machines se fait souvent par un simple signalement. La pousse peut être tuteurée, ce qui permet également de la maintenir droite pour favoriser sa croissance. Des branches mortes sont utilisées mais sont parfois volées par des ramasseuses de bois. Des pieds d'*Euphorbia balsamifera*, une plante fréquemment utilisée comme clôture, peuvent également être plantés, faisant office de tuteur naturel (cf. Figure 16). Ces dispositifs ont l'avantage d'être très peu coûteux. Beaucoup de protecteurs déplorent cependant leur relative inefficacité face à celle que pourraient fournir des protections en métal.



**Figure 16 :** Tuteurage des pousses de *Faidherbia albida* : Tuteur en bois (gauche), *Euphorbia balsamifera* (droite)

Pour les protecteurs, la signalisation des pousses permet aussi de prévenir les coupes. En montrant que celle-ci est protégée, le dispositif de protection permettrait de dissuader les coupeurs. Le dispositif signale à la fois la plante et l'intention de protection. Or, cela ne semble pas vraiment efficace compte tenu du nombre de pousses coupées qui ont pu être observées sur le terrain.

Ainsi, la dernière menace majeure demeure celle des coupeurs. Elle apparaît à un stade de croissance plus avancé que les menaces précédentes. Les individus sont alors au stade d'arbrisseau. Les épines, les feuilles et les premières branches sont apparues.

Il a été difficile de s'entretenir avec des coupeurs tant il est rare que des habitants affirment couper des pousses. Les constatations faites ici proviennent de propos rapportés, non pas par les coupeurs eux-mêmes mais par les protecteurs et les participants des ateliers. Selon eux, les individus qui coupent ces arbrisseaux correspondent à différents profils. Les plus pointés du doigt sont les jeunes bergers. Ils coupent pour tester le tranchant de leur machette ou pour utiliser la branche coupée comme bâton ou projectile. Cependant, il semble falloir tempérer cette observation puisque les jeunes du village sont systématiquement accusés par les plus anciens. Parfois, des femmes prélèvent par ci par là du bois, lors de leur recherche quotidienne. Enfin, des personnes, notamment les maraîchers, utilisent les branches piquantes des *kad* pour renforcer leurs clôtures. Le jeune *faidherbia* ne meurt pas après une coupe, le système racinaire robuste assure sa survie, mais sa croissance repart tout de même de zéro.



**Figure 17 :** Arbrisseau coupé dans un champ intermédiaire

- xxii. Comment comprendre l'écart entre les préoccupations environnementales et la protection effective des *Faidherbia albida*.

Après tout cela, on constate que l'écart est grand entre la volonté affichée par les habitants d'assurer la régénération du parc à *Faidherbia* et les résultats effectifs de la protection. En effet,



si beaucoup de personnes sont conscientes de la nécessité de protéger les pousses, peu obtiennent des résultats satisfaisants.

On peut identifier deux raisons principales à cet écart : le manque de moyens et la difficile diffusion de l'information à l'intérieur même des familles.

Tous les protecteurs et les personnes qui souhaitent protéger les rejets des *Faidherbia* s'accordent sur le manque de moyens disponibles pour protéger les arbres efficacement. Certains évoquent la possibilité d'utiliser des protections en métal, mais elles ont un coût financier trop élevé pour la majorité des villageois.

Pourtant ; la protection des arbres du village semble moins sommaire et plus systématique que celle des *Faidherbia albida*. Les arbres protégés sont souvent entourés de parpaings et maintenus par de robustes tuteurs (cf. Figure 18).



**Figure 18 :** Protection d'un anacardier à l'intérieur d'une concession

Dans les champs intermédiaires et les champs de case, les fruitiers font également l'objet d'une protection plus méticuleuse que celle des *Faidherbia*. Les manguiers et les anacardiers sont systématiquement tuteurés, entourés de plusieurs pieds d'*Euphorbia balsamifera* sur lesquels sont parfois posées des branches épineuses.

Il semble donc que l'intérêt de protéger un *kad* apparaît moins pressant que celui de protéger des arbres dont l'utilité est plus directe (alimentation humaine, ombrage). Cependant, si la protection des *kad* est plus faible, c'est qu'elle demande beaucoup plus d'efforts. Les distances à parcourir pour atteindre certains champs de brousse, la chaleur écrasante qui y règne ainsi

que l'immensité de certaines parcelles, sont autant d'éléments qui dissuadent les protecteurs à s'investir davantage dans la protection des *Faidherbia albida*.

Le second problème réside dans le fait que les personnes qui souhaitent protéger les rejets de leurs champs ne sont pas toujours celles qui assurent les travaux agricoles. Les personnes qui participent aux activités communautaires sont très souvent les chefs de famille et les chefs de concession du village. Ce sont quasiment exclusivement des hommes d'un âge avancé. A l'inverse, parce que le labeur est particulièrement pénible, ce sont souvent les jeunes adultes qui assurent le gros du travail de semis et de récolte. Or, selon plusieurs protecteurs, les jeunes hommes de leur famille n'écoutent pas toujours les recommandations des aînés et n'évitent pas les pousses de *Faidherbia*. Comme souvent dans les discussions, les plus jeunes, qu'ils soient bergers ou agriculteurs, apparaissent comme les bouc-émissaires idéaux pour les problèmes du village. Si leur rôle dans la non-régénération du parc arboré reste à déterminer, cette situation nous apprend deux choses. D'une part, que la communication intergénérationnelle peine à être assurée à Diohine. De l'autre que les jeunes sont laissés à la marge de la vie communautaire villageoise puisqu'ils semblent ne participer ni aux réunions, ni aux prises de décisions relatives à l'organisation collective. L'intégration des jeunes dans les démarches de RNA semble être un élément essentiel pour assurer la régénération du parc.

Le travail de bibliographie et l'enquête de terrain a permis l'acquisition d'un volume de données relativement conséquent. Les enjeux identifiés sont nombreux : assurer une meilleure surveillance des espaces champêtre, diffuser les méthodes de protection des pousses, accroître l'efficacité de la protection etc. Parmi tous ces enjeux, certains n'ont pas fait l'objet d'une formalisation spécifique. Il s'agit désormais de présenter le modèle, structuré par et pour le terrain.

### 3. L'implémentation du modèle et sa validation par les acteurs

Le modèle que j'ai construit à partir des données de terrain est un modèle à base d'agents implémenté sur Netlogo 6.2.2 (Wilensky 1999)<sup>10</sup>. Pour qu'il soit efficace, c'est-à-dire capable de faire émerger des discussions autour des enjeux de la gestion du parc à *kad*, nous avons fait des choix de modélisations. Tous les éléments précédemment évoqués ne s'y trouvent donc pas.

#### A. Des hypothèses fortes au cœur du modèle.

Le modèle se fonde sur des hypothèses fortes qui découlent des observations de terrain. Elles occupent le rôle de frontière puisque c'est au regard de celles-ci que certains éléments ont été placé au centre du modèle et d'autres à la périphérie des réflexions.

##### Hypothèse 1 :

La régulation mécanique<sup>11</sup>, portée par des acteurs institutionnels exogènes, ne semble pas constituer une matrice de réflexion féconde, c'est-à-dire à même de produire des scénarios intéressants. En effet, les changements affectant la régulation mécanique des ressources renouvelables, sont entraînés par des décisions ponctuelles et centralisées sur lesquelles il est difficile d'avoir une emprise: un changement législatif, une augmentation des budgets de l'organisme chargé de la protection etc. Les acteurs dont l'action repose sur des financements et sur un cadre normatif exogènes sont ainsi évincés ou mis à distance. C'est le cas de l'agent des Eaux et Forêts, de la mairie de Diarrère et de l'animateur de World Vision international.

##### Hypothèse 2 :

La densification du parc passe par la protection des rejets de *Faidherbia albida*. Puisque la plantation semble avoir été abandonnée par l'ensemble des acteurs de la gestion forestière,

---

<sup>10</sup> Le modèle est disponible que github : <https://github.com/LucTin4/real-tree-model> consulté le 15 aout 2022

<sup>11</sup> Dans l'article « Repenser la gouvernance des systèmes complexes », Delay et al., en reprenant les travaux de Durkheim, distingue régulation mécanique et régulation organique des ressources naturelles. Dans une vision mécanique, le régulateur est externe au système et la gouvernance se fonde sur le « *command and control* ». A l'inverse, la vision organique repose sur l'auto-organisation d'une régulation par les acteurs internes du système. Elle constitue une tentative de « faire commun » <https://agritrop.cirad.fr/601179/>

seules les méthodes relatives à la RNA sont envisagées. Si l'efficacité de la protection est toute relative à Diohine, un agriculteur qui protège ses pousses dans le modèle les protège efficacement.

### Hypothèse 3 :

La densification du parc ne met pas en péril la disponibilité des ressources en eau (cf. PI,1,C). Il n'existe donc pas de seuil à partir duquel la densification du parc serait considérée comme affectant négativement la vitalité de l'environnement.

## **B. Le modèle et ses composantes**

Pour décrire de façon rapide et exhaustive un modèle, le protocole ODD, formalisé par Grimm & Railsback en 2011 est communément utilisé par les modélisateurs de SMA. ODD signifie "*Overview, design concepts, and details*". Il permet d'assurer la répliquabilité et la transparence du modèle. Cependant, j'ai choisi de présenter le modèle de façon plus concise et plus littérale, en m'inspirant toutefois de la structure du protocole.

### **L'objectif du modèle**

Le modèle cherche à évaluer des solutions de gestion du parc à *Faidherbia albida*, amenant à sa diversification. Il se focalise sur l'exploration d'initiatives locales dites communautaires.

### **L'environnement et son fonctionnement : composantes et interactions**

L'espace simulé, à travers lequel les agents interagissent, représente 100 hectares. Il se compose de 1000 entités spatiales (patches) ayant une taille de 10m<sup>2</sup> (résolution). L'espace représenté reste exclusivement agricole puisque l'espace habité du village est condensé en un point. Les zones qui ne sont pas cultivées, zone humides, parcours, n'ont pas été représentées. La superficie de l'espace de simulation représente environ un vingtième de la superficie totale de Diohine.

Le pas de temps irréductible est le jour. Les différents éléments du système (interactions etc.) prennent en compte la saisonnalité des activités agricoles. Tous les 364 jours, une nouvelle année commence et le rythme des saisons continue. On peut considérer une seconde unité temporelle : l'année, qui est constituée de saisons. En début de simulation, on considère que les trois premières années servent à initialiser le modèle.

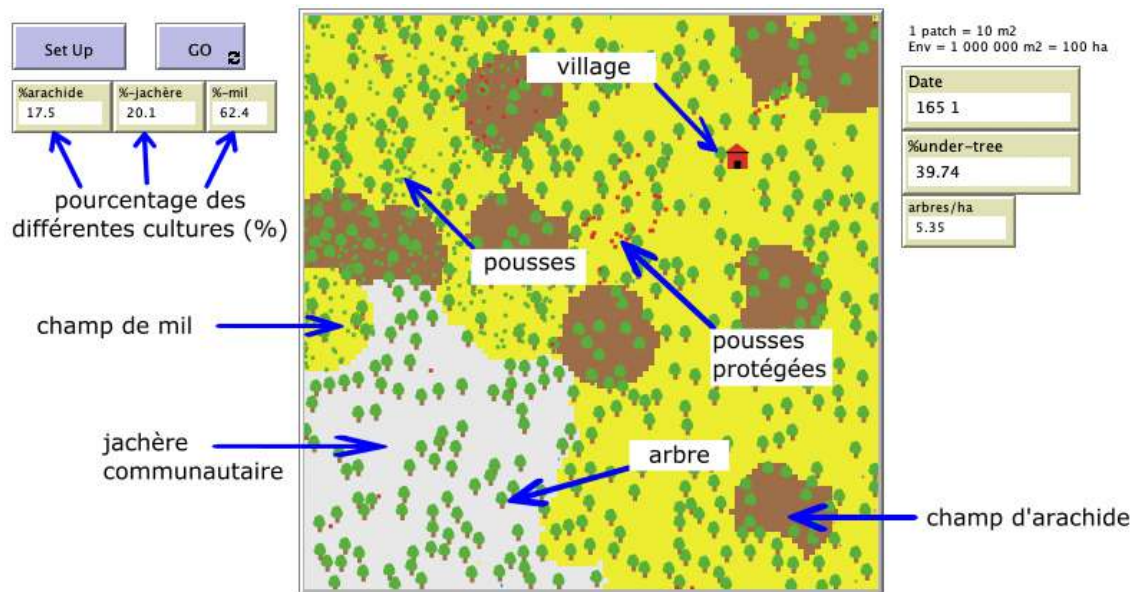
Dans le modèle, l'environnement de Diohine a été partiellement reconstitué en l'initialisation à travers un paysage neutre<sup>12</sup>. On a tenté de reproduire le système de culture à travers l'emprise de chaque culture, les différents types de champs, la jachère et les rotations. La même chose a été entreprise pour le parc arboré et ses dynamiques naturelles. La densité actuelle de *Faidherbia albida*, leur mécanisme de rejets, leur croissance, de la pousse à l'arbre mort, ainsi que leur effet fertilisant sur les cultures ont été implémentés. Dans cet environnement évoluent des agents humains : des bergers qui, accompagnés de leur troupeau, coupent des arbres, des coupeurs de pousses, et des agriculteurs qui cultivent leurs champs. Les activités humaines mettent en péril la régénération du parc : les jeunes pousses sont écrasées par les machines, les arbrisseaux sont coupés par les coupeurs et les kad sont étêtés par les bergers. Voilà l'environnement tel qu'il s'organise dans le modèle. Seules les activités affectant directement les dynamiques de régénération du parc ont été considérées. L'écrasement des pousses et la coupe des arbrisseaux freinent évidemment la régénération. La coupe des kad peut aussi être problématique puisqu'elle limite le nombre de rejets.

Les entités du modèle sont ainsi relativement nombreuses : certaines demeurent statiques (arbres, parcelles et village), d'autres en mouvement (bergers, agriculteurs, coupeurs et surveillants).

L'environnement est généré lors d'une phase d'initialisation (*set up*). Ensuite, les différentes actions et interactions sont répétées à chaque pas de temps lors d'une seconde phase. A chaque action est associée une période d'activation qui renvoie à la saisonnalité des activités humaines et des processus biophysiques. Par exemple, entre le jour 1 et 140 de l'année, équivalent aux mois de juillet, août, septembre, octobre, novembre, les troupeaux et bergers se déplacent uniquement dans la jachère.

---

<sup>12</sup> Pour Siaini et al. 2018, "Neutral landscape models are algorithms which generate landscape patterns in the absence of biotic and abiotic processes[...]. These models were originally developed as null models to test landscape-scale hypotheses"



**Figure 19 :** Interface de Netlogo, permettant de visualiser les éléments du modèle.

### Les modes de protections et de surveillance

Dans cet environnement, on cherche à tester des modes de protection et de surveillance du parc à kad. A l'inverse de l'implémentation de l'environnement, il ne s'agit pas de reproduire fidèlement le socio-écosystème tel qu'il nous apparaît mais de faire preuve de créativité en cherchant des modes de gestion innovants. Qu'est ce qui pourrait être fait? Cette question peut trouver de nombreuses réponses, qui peuvent être proposées par le modélisateur mais aussi par les utilisateurs du modèle, entendu ici comme les participants aux ateliers. L'environnement simulé est alors un socle pour l'expérimentation

“À votre avis, que se passerait-il si nous ajoutions quelques-unes de ces caractéristiques essentielles des êtres humains socialisés : hétérogénéité des attributs, des capacités et des stratégies, intentionnalité, réflexivité, hiérarchies en tout genre, relations préférentielles (réseaux sociaux), etc.? C'est ici que la simulation informatique prend tout son sens, dans cette possibilité nouvelle de plonger au cœur de la complexité des sociétés humaines en compagnie de modèles simples, maniables et robustes. Notre créativité a tout à y gagner, si nous nous y prenons bien...” (A.Banos, 2010).

Pour l'instant, un mode de protection et deux modes de surveillance existent dans le modèle.

Un mode de protection, autour de la diffusion et l'adoption des techniques de la RNA a été formalisé. Les agriculteurs s'engagent peu à peu dans la protection des pousses en fonction de l'intérêt perçu (à les protéger). L'intérêt est représenté par un score qui évolue positivement selon plusieurs événements : la participation à des réunions, la constatation de la réussite des voisins, les discussions informelles. Ce score peut également décroître sous l'effet des coupes successives et de l'absence prolongée de discussion. A partir d'un certain score, l'agriculteur s'engage. Il peut se désengager si son score baisse trop.

Les deux modes de surveillance sont indépendants et substituables. Ils ne peuvent être simulés en même temps. L'intérêt, lors de l'exploration, sera justement de comparer leur efficacité, leurs coûts etc.

Le premier mode se fonde sur une surveillance déléguée. Comment cela a pu être fait dans le passé, des surveillants sont chargés par l'ensemble du village d'arrêter les coupeurs. Leur nombre est variable et détermine le nombre de champs dont ils auront la responsabilité. Si un seul surveillant a été désigné, il aura à charge l'entièreté de l'espace. Sinon l'espace est divisé par le nombre de surveillants, qui s'occupent chacun d'une zone.

Le second mode se fonde sur une surveillance généralisée, où chacun des agriculteurs est responsable de la surveillance de son champ. Le protecteur doit ainsi investir un certain volume horaire dans la surveillance de ses pousses. Il est plus ou moins enclin à dénoncer les coupeurs qu'il surprend, et l'est de moins en moins à mesure que ses pousses sont coupées.

### **Émergence**

L'intérêt des modèles SMA est d'analyser l'émergence de certains comportements globaux.

La densité du parc, le nombre d'arbres et leur répartition spatiale constituent les résultats émergents centraux du modèle. Les mécanismes de dégradation et de densification du parc demeurent trop complexes pour déterminer sans modélisation les conditions initiales qui leurs sont associées.

Dans ce modèle l'émergence est dite "faible" puisque les comportements globaux émergents ne sont pas perçus en retour par les agents.



## C. La nécessité de confronter ses choix et d'ancrer le modèle dans les préoccupations locales.

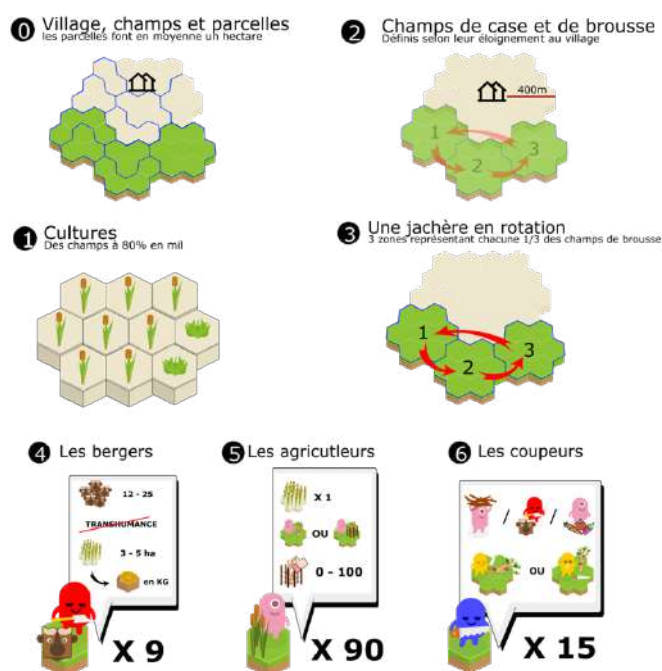
### xxiii. La présentation du modèle et sa validation

Pour assurer la transparence du processus de modélisation et pour prévenir tout contresens ou oubli de la part du modélisateur, un atelier de validation a été mené à la fin de l'expérience du terrain. Il a permis de stabiliser une version du modèle, qui ne pourrait toutefois être considérée comme sa version finale.

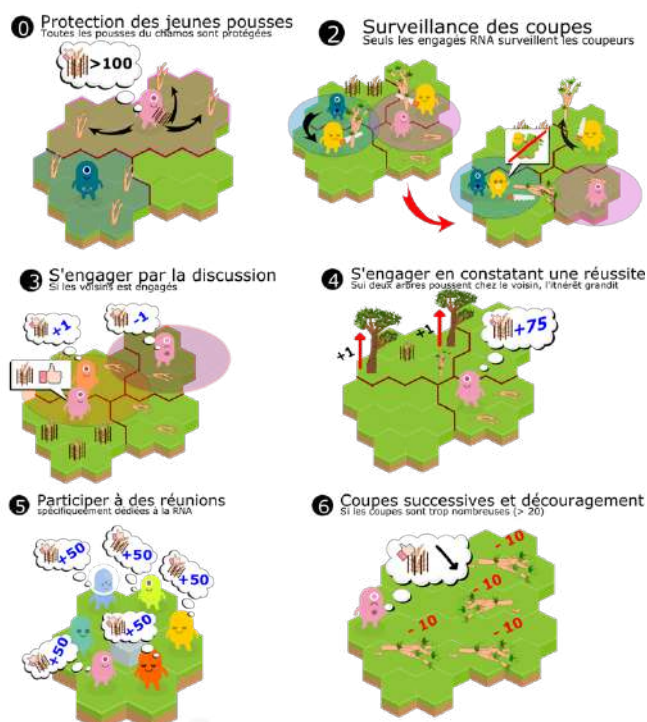
La présentation du modèle s'est faite avec l'aide de posters (illustrations). Sur ces posters figurent les différents éléments du modèle.

La première affiche représente les éléments constitutifs de l'agro-système de Diohine: les champs et les différents agents humains. La seconde affiche décrit les dynamiques biophysiques et interactions qui affectent les *Faidherbia albida*. La troisième et dernière affiche présente le fonctionnement de l'engagement des agriculteurs dans la démarche de protection des arbres ainsi que les mécanismes de surveillance.

### L'agrosystème de Diohine: champs, cultures, agents

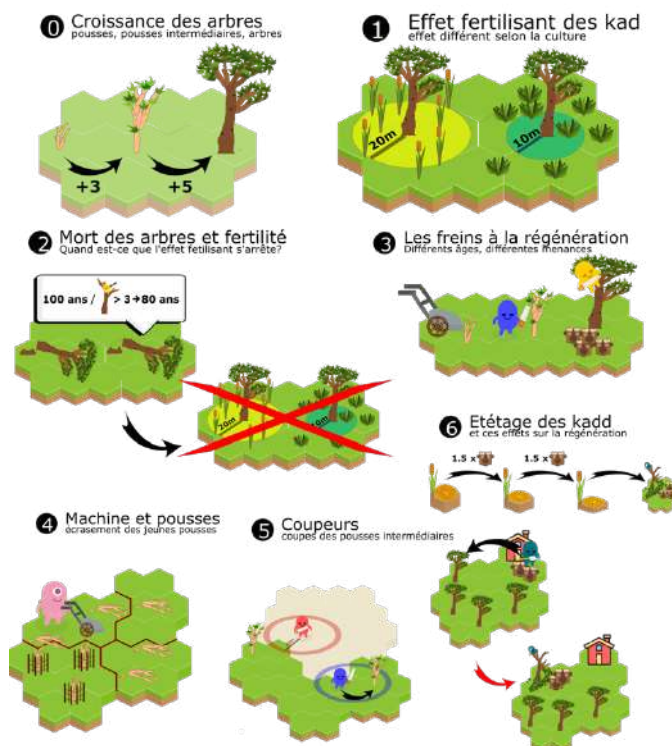


## La régénération du parc à *Faidherbia albida*: engagement, protection et surveillance



UMR SENS - CIRAD - 2022  
Réalisation : Lucas Broutin & Etienne Delay

## Le parc à *Faidherbia albida* structuré par des divers dynamiques et interactions



UMR SENS - CIRAD - 2022  
Réalisation : Lucas Broutin & Etienne Delay

**Figure 20** : Affiches explicatives mobilisées pendant l'atelier pour décrire le modèle<sup>13</sup>

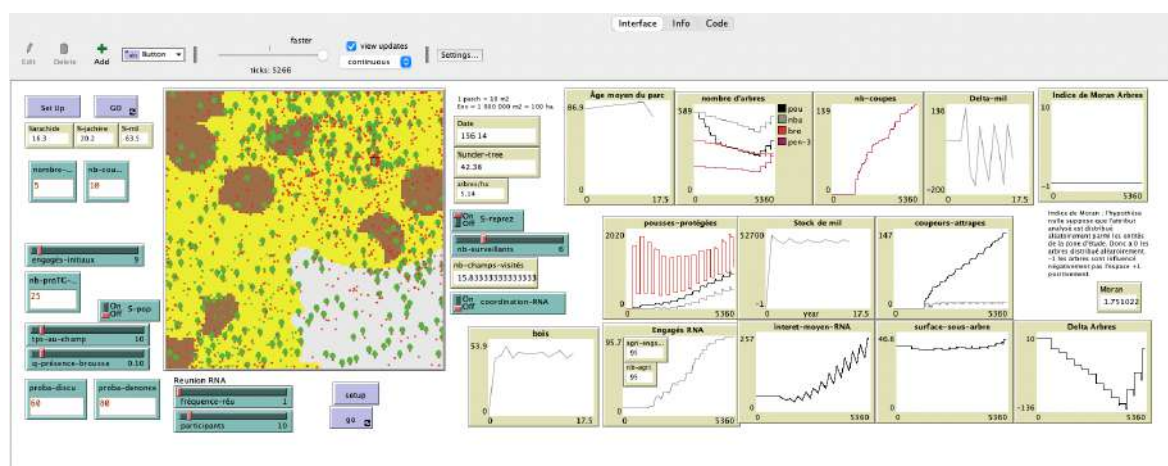
Tous ces éléments ont été présentés tels qu'ils apparaissent dans le modèle. Une grande attention a été portée à la différence entre les éléments du réel et leur manifestation dans le modèle. Il s'agissait de savoir si les simplifications faites lors de la formalisation étaient acceptables et si les calibrations semblaient correctes.

Pour que les acteurs comprennent que le modèle n'est pas statique, comme pourrait le laisser croire le format des affiches, il a également été présenté tel qu'il apparaît dans le logiciel. Sur la photo X on peut voir l'interface du modèle projeté sur le mur lors d'une simulation. Si elle permet de montrer que le modèle est dynamique, l'interface du logiciel est malheureusement un peu complexe pour constituer le socle de discussion en atelier.



**Figure 21** : Projection de l'interface du logiciel lors de l'atelier

<sup>13</sup> A retrouver en annexe, pour plus de lisibilité.



**Figure 22 :** Interface du logiciel avec l'ensemble des graphiques de suivis des indicateurs

#### xxiv. L'ancrage du modèle dans les préoccupations locales : indicateurs et viabilité

L'atelier de validation a aussi été l'occasion d'ancrer encore davantage le modèle dans les préoccupations locales. Puisqu'il a pour objectif de faire naître des discussions autour de la gestion du parc de *Faidherbia albida*, il faut que les participants perçoivent, à travers les résultats du modèle, l'intérêt de protéger les arbres.

Ainsi l'un des objectifs de l'atelier était ainsi de co-construire des indicateurs de suivi-évaluation, sur lesquels pourraient reposer les scénarios issus de l'exploration. Les indicateurs qui intéressent le modélisateur et qui apparaissent au cours de la modélisation sont nombreux :

Indicateurs
Nombres d'arbres
Âge moyen du parc
Indice de Moran sur arbres
Surface sous les arbres
Nombre de pousses protégées

Nombre d'arbrisseaux protégés
Nombre de coupes
Nombre de coupeurs attrapés
Nombre d'engagés
Intérêt moyen des agriculteurs pour la RNA
Stock de mil

**Tableau 1** : Indicateurs de suivi du modèle formulés par le modélisateur

Cependant, tous ne font pas sens pour les participants. Certains de ces indicateurs ne peuvent pas non plus être mesurés localement. Ainsi, ils ne peuvent pas être qualifiés d'indicateurs puisqu'ils ne permettent pas d'attester d'une évolution. A titre d'exemple, mesurer l'âge moyen des arbres du parc de Diohine s'avère particulièrement difficile, même pour les agronomes.

Tout d'abord une densité d'arbre idéale a été déterminée. Elle est de 25 arbres par hectare, correspondant à un arbre tous les 20 mètres. A titre de comparaison la densité actuelle se trouve plutôt autour de 2.3 arbres/ha<sup>14</sup>. Puisque la densification du parc était déjà une de leurs aspirations (Perroton et al. 2021) on leur a demandé ce qu'ils cherchaient à travers celle-ci. D'un point de vue purement économique, la densification du parc leur semblait favorable en termes de production de mil et de bois de chauffage. L'augmentation du nombre de *Faidherbia* dans les champs permet d'accroître la surface sous les arbres, et ainsi les rendements. D'autre part, si le droit d'usage était autorisé, cette même augmentation permettrait de limiter la raréfaction des ressources ligneuses. Il a fallu ensuite comprendre comment sont quantifiées les récoltes de mil et celles de bois, en d'autres termes comment sont mesurés ces stocks. Le mil se compte en sac de 10kg et le bois en charrette. Deux indicateurs ont ainsi été co-construits: le stock annuel de sac de mil et le volume annuel de bois exprimé en charrette. Ils pourront servir de base commune lors de la présentation des résultats du modèle.

A partir de ces deux indicateurs des seuils de viabilité ont été déterminés par les participants.

Encadré: La théorie de la viabilité est une théorie mathématique formalisée pour étudier les *systèmes dynamiques contrôlés*, c'est-à-dire des systèmes qui évoluent sous certaines contraintes. A partir de contraintes de viabilité, qui sont ici des seuils critiques sous lesquels

<sup>14</sup> Densité calculée à partir des données de Leroux et al. (2022), également été utilisé pour la figure 4.

il n'est plus possible de vivre, une typologie duale des évolutions peut être faite: les évolutions viables et celles qui ne le sont pas. L'ensemble des états du système qui sont à l'origine d'évolutions viables sont appelés *noyau de viabilité* (C.Bernard 2011).

Le seuil critique de mil défini par les participants s'élève à 600 kg/an. En dessous de cette valeur, les quantités de mil ne permettent pas de nourrir toute une famille de 20 personnes, pendant un an. Le seuil équivaut environ à la production actuelle, ce qui montre que le maintien de la fertilité des terres devient particulièrement urgent. Le seuil critique de bois, à partir duquel une famille de 20 personnes ne pourrait subvenir à ses besoins, s'élève à 9 charrettes par an. Actuellement, les familles récupèrent environ 12 charrettes. Les femmes ont particulièrement participé à la détermination de ces seuils puisque qu'elles connaissent les quantités de bois et de mil utilisées quotidiennement pour la cuisine.

Définir des seuils avec les participants plutôt que par la littérature ou le calcul est particulièrement intéressant pour saisir la dimension sociale des pratiques. A Diohine, la consommation de mil reste nécessairement liée aux besoins caloriques quotidiens. Cependant, elle est également définie culturellement puisque le gâchis et le don de nourriture aux voisins sont d'usage dans la culture sereer<sup>15</sup>. Cette part, que l'on pourrait croire compressible, ne semble pas l'être pour les participants.

Ce travail de validation et de détermination des indicateurs de suivi achève une première phase de construction du modèle. Si celui-ci ne peut être considéré comme achevé, une version stabilisée et satisfaisante a été établie. Elle sera le support d'une première phase d'exploration du modèle. Cette première phase s'achève de façon concomitante avec l'expérience de terrain. S'arrêter sur cette version du modèle est aussi dicté par les impératifs matériels.

---

<sup>15</sup> L'un des acteurs a dit "c'est quelque chose que vous ne pouvez pas comprendre les toubabs, mais chez nous si on a on donne, c'est pour cela qu'on fait toujours trop a manger" c'est une forme de sociabilité qui entretient les réseaux de solidarité



## Partie III : Exploration de scénarios de gestion du parc à *kad*: l'utilisation du modèle après le retour du terrain.

Une fois que l'on a quitté le terrain, la démarche ne peut plus être la même. Le processus itératif de mise à l'épreuve du modèle par la consultation des acteurs et l'acquisition de nouvelles données, est mis en pause. Cependant ce temps permet la prise de recul sur ce qui a été modélisé et surtout la mise en place de démarches d'exploration. Les simulations successives du modèle, répétées de manière intensive, ont pour objectif de faire émerger des scénarios de gestion innovante du parc à *kad*. Ces scénarios ne renferment pas de vérité en eux-mêmes. Ils ne sont que des objets permettant la discussion et la structuration d'un point de vue commun entre les participants.

### 1. Intérêt de la simulation dans une démarche d'accompagnement.

Si l'usage des modèles informatiques est courant dans les démarches d'accompagnement menées par le groupe ComMod, l'exploration informatique l'est beaucoup moins. Dans notre approche, le modèle est aussi un outil de détermination de différents scénarios prospectifs à travers la simulation.

#### A. Expérimentation *in silico* comme affranchissement des contraintes temporelles et spatiales.

Pourquoi l'expérimentation *in silico*, c'est-à-dire l'usage d'une méthode informatique de simulation, nous apparaît judicieuse ? Le biologiste de l'évolution John Maynard Smith affirme à propos de l'usage de la méthode *in silico* en sciences de la vie: "Jusqu'à présent nous n'avons pu étudier qu'un seul système évolutif [la vie sur Terre] et nous pouvons pas attendre un voyage interstellaire pour nous en fournir un second. Si nous voulons faire des généralisations à propos des systèmes évolutifs, nous devons voir ce qu'il se passe avec des systèmes artificiels.". Face

à l'urgence de la restauration environnementale et surtout la lenteur des processus biologiques liés aux arbres, il semble impossible d'expérimenter *in vivo* différents modes de gestion à Diohine. "L'évolution expérimentale *in silico*" (ibid) permet ainsi, en se détachant des contraintes spatio-temporelles, d'évaluer différents modes de gestion. L'étude comparative, souvent utilisée en géographie, peut permettre de saisir les effets d'un mode de gestion donnée, sans devoir le mettre en place sur le territoire d'étude. Cependant, malgré les potentielles ressemblances des territoires comparés, certains déterminants locaux ne peuvent être intégrés à la discussion.

## B. Expérimentation comme "béquille" pour l'esprit humain

Pour A.Banos (2010), "le rôle de la simulation informatique est précisément de nous permettre d'identifier puis d'explorer (et donc de comprendre) des phénomènes surprenants, voire contre-intuitifs." L'exploration permet ainsi de rendre intelligible l'impensable. Elle nécessite et stimule la créativité du modélisateur et des acteurs utilisant le modèle.

L'intérêt de l'exploration est de faire émerger des scénarios innovants de densification du parc arboré. Face à la complexité du système-arbre de Diohine, on fait l'hypothèse qu'il existe des impensés, qui pourraient s'avérer être des éléments féconds pour repenser la gestion locale des ressources arborées.

# 2. Méthode et caractéristiques de l'exploration

## A. Un travail fondé sur l'analyse des états finaux du modèle.

Les simulations sont faites sur 8396 répliques. Puisqu'une réplique équivaut à un jour, 23 ans sont simulés à chaque *run*. Les données de sortie décrivent uniquement la situation finale dans laquelle se trouve le modèle à l'issue de ces 23 ans. Les 3 premières années permettant à l'environnement de s'initialiser, le modélisateur analysera les résultats en se disant: "Voilà ce qui advient après 20 ans". Nous ne prêtons donc aucune attention, au chemin emprunté pour en arriver là et à ce qu'il s'est passé pendant ces 20 années.



A partir des données de sortie, le modélisateur peut chercher à comprendre comment le système réagit à des états initiaux donnés. Il se demande alors “Compte tenu de ses paramètres initiaux, voilà comment a évolué le modèle après 20 ans”. Cela permet notamment de faire émerger les composantes qui jouent un rôle important dans l’évolution de la densité du parc. Cette démarche en appelle à la créativité du modélisateur qui peut tester un grand nombre d’états initiaux du modèle et constater leur effet sur le devenir du système. Il peut à l’inverse, pour une donnée ou un ensemble de données de sortie, remonter aux situations initiales. Il se demande alors “Quels sont le ou les ensembles initiaux de données qui sont à l’origine de cet état final?” C’est notamment par cette démarche que sont définis les noyaux de viabilité.

Avant l’analyse des résultats, l’exploration nécessite un certain nombre de prérequis qu’il s’agit de présenter ici.

## B. Une calibration hybride et parfois périlleuse

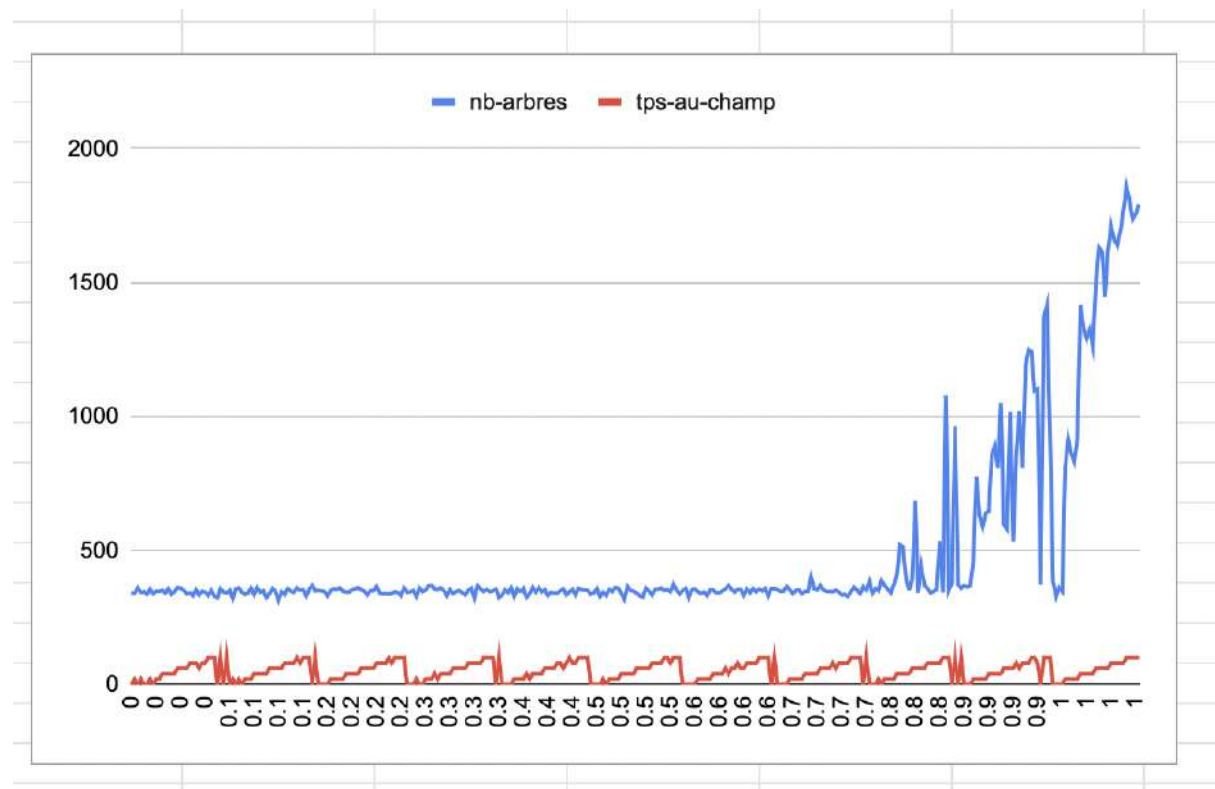
Il faut d’abord s’assurer de la bonne calibration des différents éléments du modèle. Pour beaucoup, la calibration est un processus expert réalisé par des scientifiques spécialistes d’un certain domaine dans le cadre de modèles mécanistiques établis. Pour prendre un exemple, le modèle STICS qui simule le système sol-atmosphère-culture, est un modèle agronomique créé en 1996 à l’INRAE<sup>16</sup>. Il est toujours utilisé par les agronomes, qui cherchent depuis 20 ans à le calibrer le plus précisément possible, pour que les prédictions soient les plus exactes possibles. Pour d’autres, la calibration peut se faire à “dire d’acteurs”. Comme on l’a vu plus haut, ceux-ci développent une autre forme d’expertise basée sur leurs connaissances empiriques. (Bommel, 2009, LePage 2016). Enfin on peut recourir à des méthodes algorithmiques, en identifiant les « fait stylisés » et en cherchant par l’exploration à reproduire ces formes. Si la majorité des calibrations se sont faites sur le terrain, certaines sont apparues plus périlleuses que d’autres.

Quand il est impossible de calibrer une variable à partir de relevés de terrain ou par la littérature, il s’avère parfois nécessaire de chercher un équilibre de façon ad-hoc, à partir d’une hypothèse.

---

<sup>16</sup> Institut national de recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement.

Pour prendre un exemple, lors de l'implémentation des mécanismes d'adhésion à la RNA, des problèmes d'équilibres se sont posés. Certaines variables, comme le temps que passent les paysans dans leurs champs, n'influençaient en rien l'évolution du parc arboré. Or il me semblait logique que cette variable ait une importance certaine puisque plus les paysans protecteurs sont au champ, plus ils peuvent surveiller et prendre soin de leurs pousses. En partant de l'hypothèse que le temps au champ est une variable qui doit influencer positivement l'évolution du parc, une calibration des mécanismes d'engagement s'est faite. La valeur choisie a été celle qui maximise l'effet de la présence des agriculteurs dans leurs champs sur le nombre d'arbres que compte le parc.



**Figure 23 :** Graphique permettant de calibrer la variable temps au champ en fonction de son influence sur les sorties. Par ce graphique on cherche à trouver la valeur du tps-au-champs qui maximise son effet sur l'état final du parc.

### C. La formuler d'objectifs a priori et l'utilisation de méthode algorithmique pour prévenir l'explosion paramétrique.

Face aux contraintes techniques et à l'explosion paramétrique, il est nécessaire de faire varier uniquement les paramètres qui semblent être utiles à la réflexion. L'explosion paramétrique renvoie à la croissance exponentielle des calculs liée à un trop grand nombre de paramètres variables initiaux. Ainsi, des questionnements et objectifs doivent être définis *a priori* pour guider l'exploration et restreindre le champ des états initiaux testés. Pour cela on a recours à différentes méthodes algorithmiques : des algorithmes génétiques (Saltelli et Pattern Space Exploration) et des plans complets.

Les algorithmes utilisés sont les suivants :

- Saltelli : algorithme génétique qui permet d'estimer comment chaque input influence les valeurs de sortie. Il assigne à chaque paramètre une valeur entre 0 et 1. Plus celle-ci est proche de 1, plus le paramètre est déterminant c'est-à-dire que sa modification a une grande importance sur les résultats.
- Le plan complet : À travers le plan complet on cherche à tester un ensemble de combinaisons de paramètres d'entrée qui nous intéresse. Un automate va permettre de tester toutes les combinaisons d'entrées. Cette méthode est assez simple car elle est intégrée au logiciel utilisé (Netlogo). Cependant plus il y a de paramètres, plus le plan complet est vaste. L'augmentation est exponentielle. Si le plan complet intègre un trop grand nombre de paramètres, les calculs sont longs.
- Pattern Space Exploration (PSE) : algorithme génétique qui permet d'exprimer l'espace de sortie c'est-à-dire tous les résultats qui sont atteignables par le modèle. Il délivre “ l'horizon des possibles” du modèle.

#### Encadré 2: Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes évolutionnistes d'optimisation. Ils permettent de résoudre relativement rapidement des problèmes d'optimisation dont on ne connaît pas l'issue. La métaphore fréquemment utilisée pour les décrire est celle de la l'évolution. Au sein d'une population, formée d'un ensemble d'individus, l'algorithme va sélectionner certains individus en fonction de leurs génomes eux-mêmes constitués

de gènes. Dans notre cas, la population constitue l'exploration, les individus, les différentes simulations, leur génome, les différents jeux de paramètres et les gènes .... Ils ont l'avantage de réduire la taille du plan d'exploration puisque celui-ci est ré-évalué régulièrement pour améliorer le résultat. Leur utilisation est plus complexe car elle nécessite d'embarquer le modèle dans une plateforme tiers : openMole<sup>17</sup>

### 3. Quelques résultats de l'exploration

#### A. Deux explorations distinctes et comparables.

L'exploration porte sur les deux modes de surveillance implantés (cf.PII.3.A). La première (exploration 1) s'intéresse aux potentialités d'un mode de gestion fondé sur la surveillance populaire, c'est-à-dire une situation dans laquelle tous les agriculteurs surveillent leur champ. La seconde exploration (exploration 2) étudie la surveillance dite déléguée, reposant sur la désignation et la rémunération de surveillants. Ces résultats ne sont pas exhaustifs. Il serait possible, avec plus de temps, d'explorer d'autres facettes du modèle.

#### B. L'analyse de Saltelli ou la détermination des paramètres importants

L'analyse de Saltelli (2010) a été utilisée selon deux objectifs. Le premier est purement technique. En déterminant les paramètres à faible importance, il est possible de réduire le plan complet d'exploration en fixant la valeur de ces paramètres et ainsi gagner en vitesse de calcul. Le second vise à identifier les éléments déterminants de la gestion des *kad* à Diohine, dans la perspective de les mettre en discussion lors de futurs ateliers.

Nom	Ce qu'ils décrivent	Valeurs prises	Exploration(s) Concernée(s)
fréquenceRéu	Le nombre de réunion par an, auxquelles participent 10 personnes	[1:10]	1 et 2

<sup>17</sup> Romain Reuillon, Mathieu Leclaire, and Sebastien Rey-Coyrehourcq, 'OpenMOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models', Future Generation Computer Systems, 29.8 (2013), 1981–90 <<https://doi.org/10.1016/j.future.2013.05.003>>.

probaDenonce	La probabilité que l'individu (agriculteur) qui surprend un coupeur le dénonce.	[0:100] (proba)	1
probaDiscu	La probabilité que les agriculteurs discutent entre eux de la protection des arbres de façon informelle et spontanée.	[0:100] (proba)	1 et 2
tpsAuChamp	La probabilité que les agriculteurs aillent dans leur champ en saison sèche.	[0:100] (proba)	1 et 2
qPrésenceBrousse	Directement lié au temps au champ, c'est un quotient qui marque la différence entre la présence dans les champs de case et celles dans les champs de brousse.	[0:1]	1 et 2
nbSurveillants	Nombre de surveillants assurant la protection des kads face aux coupeurs.	[0:10]	2

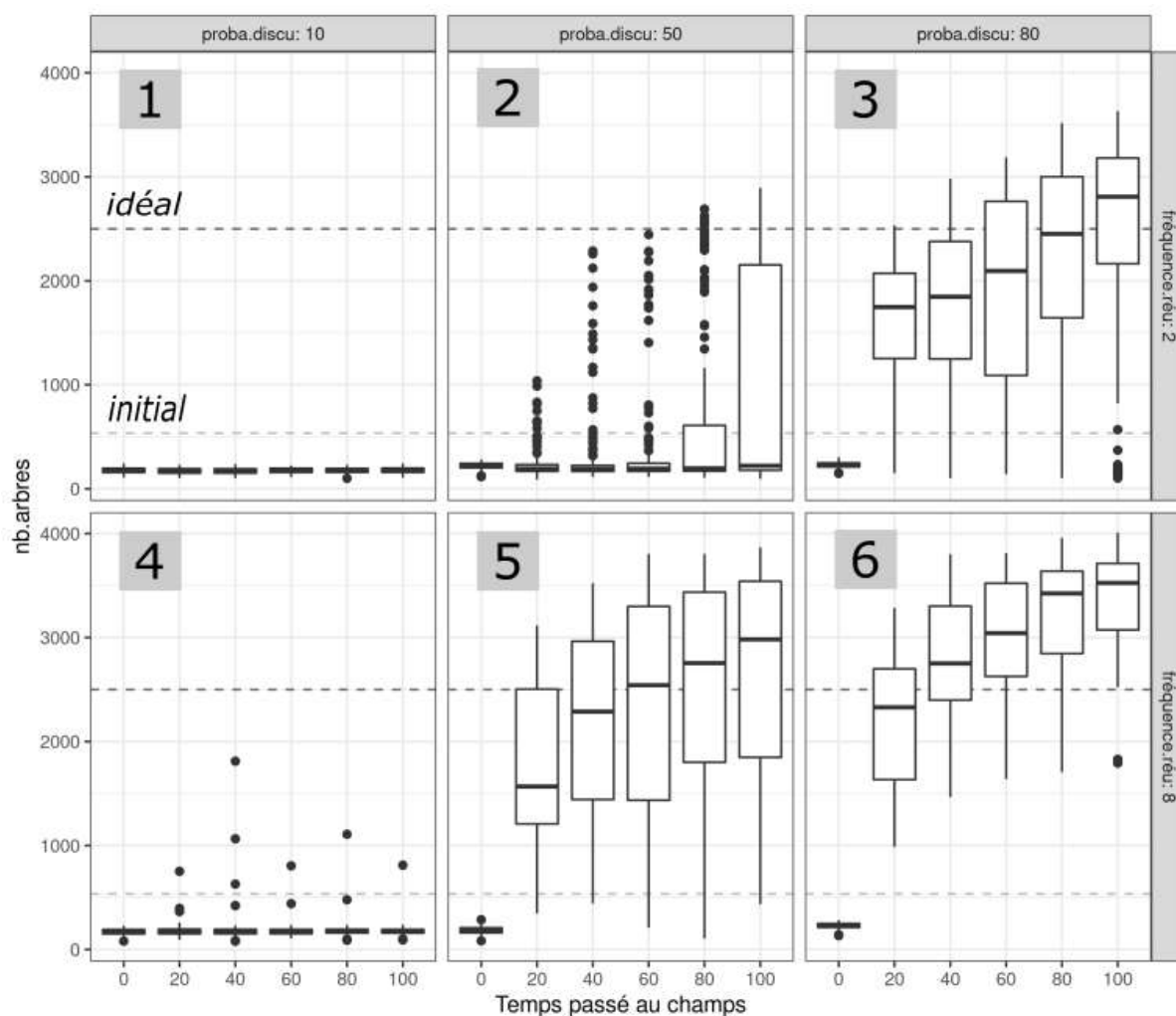
**Tableau 2 :** Paramètres testés par le Saltelli

Pour l'exploration 1, certains paramètres apparaissent particulièrement peu déterminants : c'est le cas des paramètres probaDenonce et qPrésenceBrousse. Ils ont été fixés et n'ont pas fait l'objet d'une attention particulière lors de la suite de l'exploration. A l'inverse, la probabilité de discussion est le paramètre qui détermine le plus fortement les sorties du modèle. Faire de la protection des arbres et des techniques associées un sujet semble ainsi être une condition fondamentale à la régénération du parc à *kad*.

En ce qui concerne l'exploration 2, portant sur la surveillance déléguée, les 4 paramètres, (fréquenceRéu, probaDiscu, tpsAuChamp, nbSurveillants) semblent avoir tous plus ou moins la même importance. La probabilité de discussion est relativement moins importante que dans l'exploration précédente, le temps au champ l'est étrangement un peu plus.

### C. Les plans complets autour de la surveillance populaire et de la surveillance déléguée

Deux plans complets, correspondant aux deux modes de surveillance ont été utilisés.

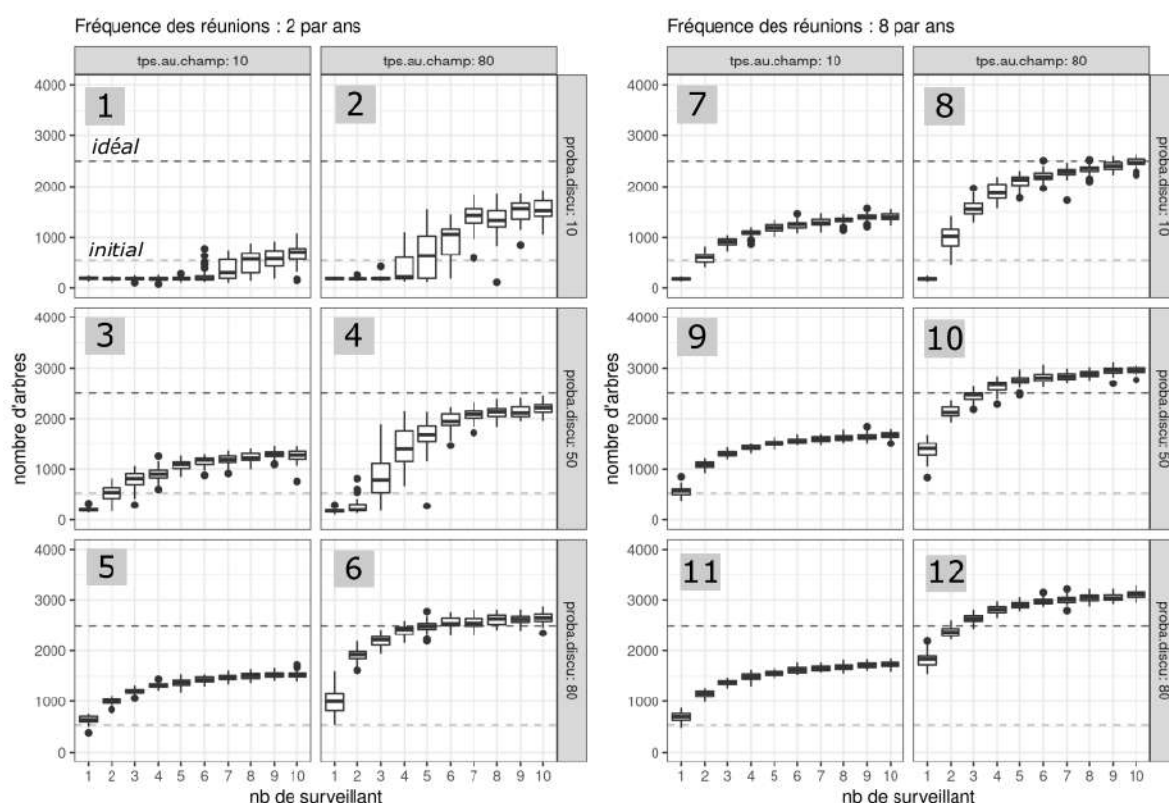


**Figure 24 :** Diagrammes à boîtes à moustache associés à l'exploration 1 (Etienne Delay)

Les figures 24 et 25 représentent les résultats d'un plan complet. Elles sont composées de multiples diagrammes dans lesquels se croisent plusieurs variables. Sur les diagrammes apparaissent plusieurs éléments : des points et des boîtes. Un point représente une simulation, une boîte représente un ensemble de simulations ou de points. Elle est elle-même constituée de plusieurs composants : un rectangle représentant l'ensemble des valeurs comprises entre le premier et le troisième quartile, une ligne qui coupe le rectangle en deux et qui correspond à la médiane et enfin des segments menant jusqu'aux valeurs extrêmes de la distribution. Les diagrammes de la figure 24 expriment chacun un nombre d'arbres en ordonnée (output), fonction du temps au champ, pour une probabilité de discussion et une fréquence de réunion données. Ceux de la figure 25 croisent le nombre de surveillants avec le nombre d'arbres en sortie, pour une probabilité de discussion, une fréquence de réunions et un temps au champ donné. Sur les diagrammes on peut voir deux seuils. Le premier s'élève à 535 arbres. Il correspond au nombre d'arbres initial de toutes les simulations. Au-delà de cette valeur, on

peut dire que le parc s'est densifié. Le second s'élève à 2500. Il correspond au nombre d'arbres idéal pour les populations (cf. PII, 3, C).

A partir de la figure 24 on peut constater plusieurs choses. Tout d'abord, les diagrammes 1 et 4 renforcent le constat de l'importance des discussions informelles autour de la RNA. Si la protection des pousses ne devient pas un sujet partagé localement, la régénération semble inenvisageable. Ensuite, le fait d'organiser des réunions autour de la RNA permet de compenser l'absence de discussions récurrentes autour de la protection des arbres. Cependant, les réunions seules ne sont pas suffisantes puisque la régénération est nulle dans la situation 4.



**Figure 25 :** Diagrammes à boîtes à moustache associés à l'exploration 2 (Etienne Delay)

Avec les résultats de la seconde exploration, présent sur la figure 25, plusieurs constats peuvent être avancés. Tout d'abord, il existe un seuil à partir duquel l'ajout de nouveaux surveillants ne modifie pas profondément l'effectif final d'arbres. Au-delà de 4 surveillants, les valeurs de sorties sont assez proches.

Ensuite, comme pour l'exploration précédente, les réunions permettent de compenser la relative absence de discussions autour de la protection des arbres.

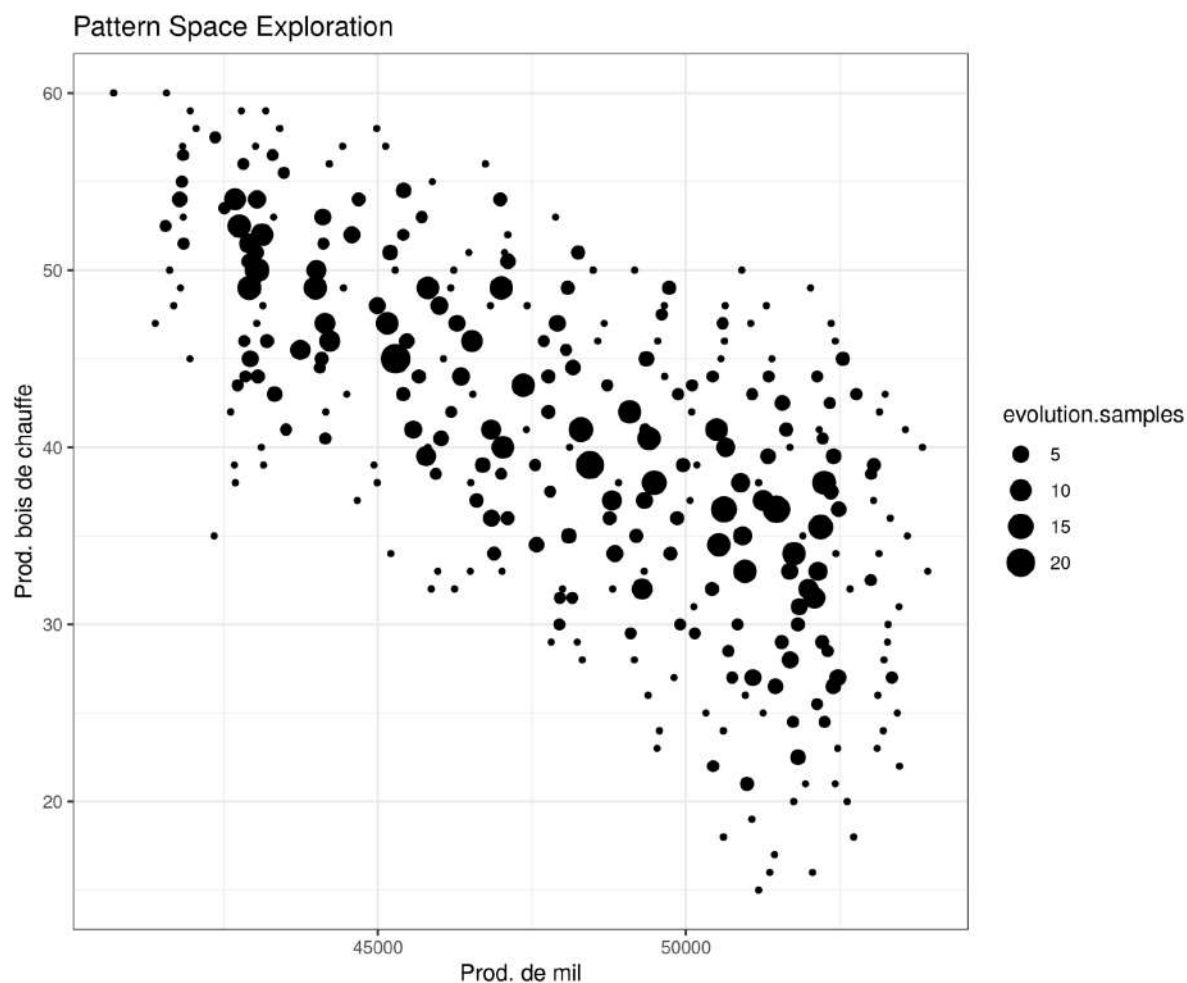
Enfin la présence de surveillants permet d'assurer une réelle régénération, malgré l'absence de discussions. Alors qu'elle semblait inenvisageable dans l'exploration 1, la densification du parc est possible avec des niveaux très bas de discussion (10). Si les habitants ne se préoccupent pas du problème, la surveillance déléguée est donc un moyen d'assurer le maintien des *kads* sur le territoire.

Les deux plans complets peuvent être comparés, puisqu'ils portent sur les mêmes paramètres. Plusieurs remarques peuvent être faites. Tout d'abord, si la surveillance populaire permet d'atteindre une densité d'arbres légèrement plus importante, la variabilité de ses résultats est beaucoup plus forte que celle de la surveillance déléguée. La forme des boîtes en atteste : elles sont très ramassées autour de la médiane sur la figure 25, très étendue sur la figure 24. Il est donc sans doute plus sûr de faire porter la charge de la surveillance sur des personnes spécialement désignées pour cela. Cependant, la désignation de surveillants à un coût financier non négligeable pour la communauté.

Ensuite, densifier le parc à *kad* ne semble pas requérir un grand investissement des populations. Sur les figures, relativement peu de valeurs sont en dessous du seuil initial de 535 arbres. Cependant le densifier significativement, c'est-à-dire atteindre la densité idéale d'arbres dans les champs, semble bien plus difficile. En effet, sur les deux figures, la majorité des valeurs se trouve en dessous du seuil de 2500 arbres. Ainsi, s'il est simple d'améliorer la situation actuelle, atteindre l'objectif de 25 arbres à l'hectare demande un investissement beaucoup plus important de la part des populations.

#### D. Le PSE ou la visualisation des possibles du modèle en matière de sécurité alimentaire et énergétique.





**Figure 26 :** *Pattern Space Exploration synthétisant les résultats des explorations 1 et 2 (Etienne Delay)*

A travers le Pattern Space Exploration, il s’agit de prendre conscience de “ l’horizon des possibles” du modèle. Chaque point du graphique correspond, selon sa taille, à une ou plusieurs sorties. Le nuage de points permet ainsi de rendre visible l’espace des sorties, les valeurs extrêmes (points aux extrémités) et les zones denses. Ce graphique est une première tentative de raccrocher l’étude du parc arboré à celle de la productivité agricole et de la sécurité alimentaire.

#### 4. L'exploration du modèle permet la réouverture du questionnement et le constat des éléments à approfondir.

L'usage du modèle comme socle de l'exploration a permis de faire émerger plusieurs choses. Des pistes de discussions ont pu être identifiées. Elles seront précieuses si d'autres ateliers sont dans le futur. Certaines carences ont pu également être mises en lumière. Elles devront faire l'objet de recherche supplémentaires.

##### A. L'ouverture vers de nouvelles pistes de discussion.

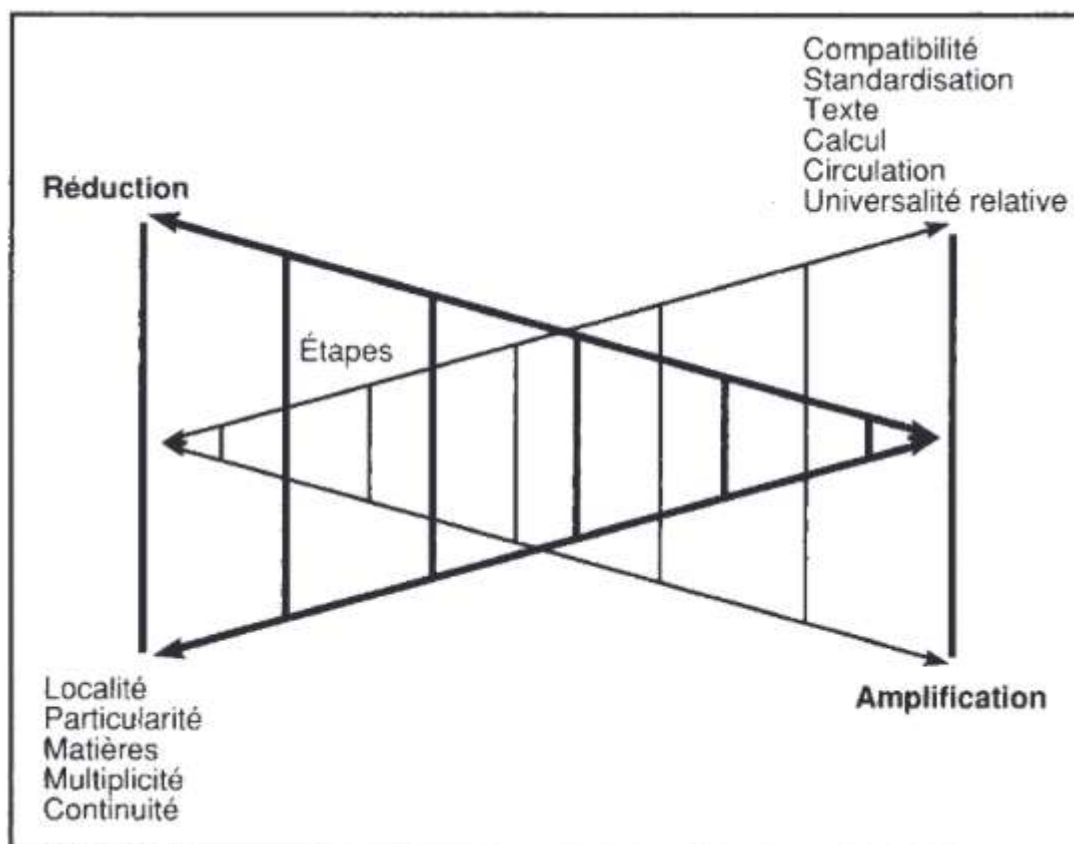


Figure 27 :

Le processus de modélisation, couplé à l'expérience de terrain, s'apparente à la réduction d'un ensemble de particularismes et d'enjeux locaux à un questionnement précis fondé sur un modèle simple. La démarche de modélisation sur le terrain a donc constitué à un transport par petites touches des éléments qui nous paraissaient saillants, invariants, au contact des acteurs. Le terrain est alors traduit en signes qui, mis ensemble, constituent un dispositif expérimental. Pour Gomart (2012), le dispositif expérimental est lié au système observable par une hypothèse de non-déformation. C'est-à-dire qu'il continue à se comporter comme le système, alors même

que nous n'avons plus ce dernier sous les yeux. L'exploration post-terrain est donc une manière de bousculer le système que nous avons observé pendant des mois et de le soumettre à des stress. L'exploration a permis de rouvrir le champ des questionnements et de véritablement rentrer dans le processus d'amplification (Latour , 2007). Ce processus d'amplification amène le chercheur à identifier des situations et des motifs de réponse du système que l'observateur n'a pas vécu sur le terrain. Loin de disqualifier le modèle ces résultats peuvent alors être discutés avec les acteurs pour aborder des situations impensées, ou impensable. Ces mises en situations avec les acteurs les préparent justement à faire face, ou à réorienter les dynamiques lorsqu'ils les verront arriver.

Les questions que soulèvent l'exploration devront être présentées et soumises à discussion lors de futurs ateliers. Voici une liste, non-exhaustive, des questionnements :

- Dans quelle mesure une surveillance déléguée pourrait être remise en place à l'échelle du village ? Quels coûts cette surveillance occasionnerait-elle ? Pourrait-on imaginer d'autres formes de rémunération que celui fondé sur l'argent ?
- Quels modes de surveillance vous apparaît le moins coûteux ou du moins le plus réalisable ? Est-il plus facile pour vous de passer beaucoup dans vos champs ou de mettre en place un système de désignation et de rémunération ?
- Comment faire de la protection des arbres un sujet localement ? Puisque l'on voit à travers les résultats du modèle que l'adhésion ne peut se faire uniquement par le biais de réunions.

## B. Les carences du modèle.

L'exploration a également permis de faire émerger plusieurs pistes qui requièrent des approfondissements. Par exemple, le lien entre la densité d'arbre et les rendements céréaliers ne semble pas analysable dans l'état actuel du modèle. Pourtant, il était au centre des préoccupations tant scientifiques que locales. A partir du PSE sur la production de mil et celle de bois de chauffe, une analyse en termes de viabilité pourrait être menée. En croisant les seuils critiques définis par les participants (cf PII.3.A), il serait possible de former un noyau de viabilité constitué d'un ensemble de points du PSE, correspondant aux situations dans lesquelles il serait toujours possible de vivre sur le territoire. Cependant il semble nécessaire

de préciser davantage les quantités produites et consommées localement, pour mieux calibrer les productions.

## Conclusion

Dans un contexte de sahélisation (Lericollais, 1999), l'absence de régénération des *kad* apparaît particulièrement préoccupante. Le *kad* est une ressource centrale dont dépendent les populations pour la cuisine, la construction de leur habitation et la fertilité de leur champ. Malgré la forte présence d'activités de recherche sur le *Faidherbia albida* dans la zone de Niakhar, la dégradation environnementale va toujours bon train. La puissance publique semble, quant à elle, ne pas être vraiment concernée puisque ses investissements sur le territoire sont très faibles.

Ainsi, à Diohine, les apports ponctuels de solutions techniques, qu'elles soient scientifiques ou politiques, ne semblent pas suffisants pour faire face aux problèmes environnementaux. Face à l'attentisme d'un changement politique structurel ou d'un apport financier providentiel, il semble nécessaire de renforcer les capacités locales de gestion territoriale. A travers le présent travail, il s'agissait autant de produire de nouvelles connaissances que d'accompagner la structuration d'un processus de gestion commune des arbres. Pour cela, il a fallu que se construise une vision commune des enjeux autour du *kad* et de sa régénération. Le modèle formalisé à cette fin est à la fois un guide pour la collecte de données, un instrument illustrant, un objet structurant les discussions (Epstein, 2008). Avec ce travail, j'avais l'ambition de participer, autant que possible, à l'amélioration des conditions locales d'existence, en tâchant d'initier un processus de faire commun autour des arbres. Ma présence prolongée sur le terrain d'étude a permis d'alimenter la dynamique de concertation précédemment initiée par mes encadrants. Cependant, pour que le travail d'accompagnement mène à la structuration d'une gestion communautaire des arbres, assurer le maintien de cette dynamique par une présence répétée sur le territoire semble fondamental. Le travail est donc loin d'être achevé.

Sûrement moins naïvement, l'ambition de cette présente étude est aussi scientifique. En effet, elle constitue l'une des premières expérimentations des potentialités de l'usage de l'exploration dans une démarche d'accompagnement. Le modèle, utilisé comme substitut à l'expérience (Pescard, 2014), permet de faire émerger de nouveaux questionnements. Ces derniers ne proviennent plus uniquement des interactions que le modèle suscite entre les usagers, mais de l'expérimentation *in silico* de mode de gestion du parc arboré. Les résultats formalisés indépendamment par le modélisateur ont pour vocation à être mis en discussion par la suite. Il semble difficile de savoir dès à présent s'ils auront l'impact collectif escompté. En d'autres termes, s'ils auront la capacité à lancer une dynamique collective. L'enjeu de l'appropriation du modèle d'exploration par les participants est ainsi au cœur de sa validité. Les résultats doivent s'avérer à la fois heuristiques et intelligibles. Ainsi, beaucoup de réflexions restent à mener sur le format de leur présentation, sur les obstacles techniques liés au faible équipement technologique local etc. L'exploration d'accompagnement est encore balbutiante. Toutefois, j'espère qu'elle aura de longues heures devant elle et surtout qu'elle permettra à la gouvernance des ressources naturelles d'être plus efficace et plus juste. Ce travail aura été l'une des premières expérimentations de son usage.

## Bibliographie

- André Lericollais. (1999). *Paysans sereer Dynamiques agraires et mobilités au Sénégal*. <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/55874>
- Aubert, S., & Botta, A. (2022). *Les communs : Un autre récit pour la coopération territoriale*. EDITIONS QUAE.
- Audouin, E., Vayssières, J., Bourgoïn, J., & Masse, D. (2018). *Identification de voies d'amélioration de la fertilité des sols par atelier participatif* (p. 337-371). <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.31712>
- Audouin, E., Vayssières, J., Odru, M., Masse, D., Dorego, G., Delaunay, V., & Lecomte, P. (2015). *Réintroduire l'élevage pour accroître la durabilité des terroirs villageois d'Afrique de l'Ouest. Le cas du bassin arachidier au Sénégal* (p. 403-428).
- Ba, M., Bourgoïn, J., Thiaw, I., & Soti, V. (2018). Impact des modes de gestion des parcs arborés sur la dynamique des paysages agricoles, un cas d'étude au Sénégal. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 18 numéro 2*, Article Volume 18 numéro 2. <https://doi.org/10.4000/vertigo.20397>
- Bernard, C. (2011). *La théorie de la viabilité au service de la modélisation mathématique du développement durable : Application au cas de la forêt humide de Madagascar*.
- Blundo, G. (2014). Les Eaux et Forêts sénégalais entre participation et militarisation. *Anthropologie & développement*, 37-38-39, 185-223. <https://doi.org/10.4000/anthropodev.481>
- Bommel, P. (2009). *Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents adaptée à la gestion des ressources renouvelables* [These de doctorat, Montpellier 2]. <http://www.theses.fr/2009MON20043>
- CODE FORESTIER | Secrétaire général du Gouvernement. (s. d.). Consulté 5 août 2022, à l'adresse <https://www.sec.gouv.sn/publications/lois-et-reglements/code-forestier>
- Delaunay, V., Deschamps-Cottin, M., Bertaudière-Montes, V., Vila, B., Oliveau, S., Dos Santos, S., Soumaré, M., & Lalou, R. (2009). *Dynamique démographique et dynamique du parc agroforestier à Faidherbia albida (Del.) A. Chev. En pays Serer (Sob, Sénégal)*.
- Delay, E. (2015). *Réflexions géographiques sur l'usage des systèmes multi agents dans la compréhension des processus d'évolution des territoires viticoles de fortes pentes : Le cas de la Côte Vermeille et du Val di Cembra* [These de doctorat, Limoges]. <https://www.theses.fr/2015LIMO0037>
- Effets du Faidherbia albida (Del.) A. Chev. Sur la productivité aérienne et souterraine de l'arachide (Arachis hypogaea L.) : Estimation du rendement et du Land-Equivalent-Ratio partiel de*

- l'arachide (LERcp) par drone—Sécheresse info.* (s. d.). Consulté 4 août 2022, à l'adresse <http://www.secheresse.info/spip.php?article113083>
- Elinor Ostrom. (1990). *Elinor Ostrom - Governing The Commons : The Evolution of Institutions for Collective Action*. <http://archive.org/details/ElinorOstromGoverningTheCommons>
- Etienne, M., Toit, D. D., & Pollard, S. (s. d.). *ARDI: a co-construction method for participatory modelling in natural resources management*. 8.
- FRA, C.-C.-. (1988). *Faidherbia albida (Del.) A. Chev. (Synonyme : Acacia albida Del.) : monographie* (Afrique tropicale). CIRAD-CTFT. <https://agritrop.cirad.fr/375602/>
- Harmand J.-M. & Seghieri J. (Éds.), *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale : Recherche de compromis entre services d'approvisionnement et autres services écosystémiques*. Éditions Quæ. <http://books.openedition.org/quae/38580>
- La modélisation comme outil d'accompagnement. (2005). *Natures Sciences Sociétés*, 13(2), 165-168.
- Lalou, R., & Delaunay, V. (2015). Chapitre 14. Migrations saisonnières et changement climatique en milieu rural sénégalais. In B. Sultan, R. Lalou, M. Amadou Sanni, A. Oumarou, & M. A. Soumaré (Éds.), *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* (p. 287-313). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9830>
- Le Page, C. (2017). *Simulation multi-agent interactive : Engager des populations locales dans la modélisation des socio-écosystèmes pour stimuler l'apprentissage social*.
- Locher, F. (s. d.). *La tragédie des communs était un mythe*. CNRS Le journal <https://lejournel.cnrs.fr/billets/la-tragedie-des-communs-etait-un-mythe>
- Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, 325(5939), 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Peltier, R., & CIRAD (Éds.). (1996). *Les parcs à Faidherbia*.
- Perrotton, A., Ba, M., Delay, E., & Fallot, A. (2021). *ACARDI : Gestion des sols agricoles et définition collective d'un futur désirable pour la zone de Diohine, Sénégal* [Conference\_item]. Adaptation and resilience of agriculture in West Africa: agroecological innovations and integration of territories. Abstracts; ISRA. <https://agritrop.cirad.fr/599599/>
- Railsback, S. F., & Grimm, V. (2019). *Agent-Based and Individual-Based Modeling : A Practical Introduction, Second Edition*. Princeton University Press.
- Roupsard, O., Audebert, A., Ndour, A. P., Clermont-Dauphin, C., Agbohessou, Y., Sanou, J., Koala, J., Faye, E., Sambakhe, D., Jourdan, C., le Maire, G., Tall, L., Sanogo, D., Seghieri, J., Cournac, L., & Leroux, L. (2020). How far does the tree affect the crop in agroforestry? New spatial analysis methods in a Faidherbia parkland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 296, 106928. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106928>
- Varenne, F., & Silberstein, M. (2013). *Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*.

## Table des figures et des tableaux

<b>Figure 1</b> : Photo dans la brousse silencieuse, Diohine le 27/04 à 12 :57. ....	6
<b>Figure 2</b> : Carte de localisation de Diohine. ....	8
<b>Figure 3</b> : Évolution des pluies annuelle dans la zone de Diohine, d'après les données des stations climatiques de Diourbel, Bambey, Fatick et Thiadiaye (W.Faye, 2022).....	12
<b>Figure 4</b> Image satellite d'un quartier de Diohine, montrant la structure du village en îlot (Google Earth) .....	14
<b>Figure 5</b> : Carte des densités de <i>Faidherbia albida</i> au kilomètre carré, à Diohine et dans les villages environnants .....	19
<b>Figure 6</b> : Photo du diagramme formé pendant l'atelier (on retrouve sur en jaune les acteurs, en vert les ressources. Les interactions sont représentées par des flèches). ....	33
<b>Figure 7</b> : Diagramme des composantes du système-arbre relevées pendant l'atelier PARDI (en bleu les ressources, en rouge les acteurs, les interactions sont symbolisées par les flèches) .....	34
<b>Figure 8</b> : Schéma montrant le cheminement de pensée du modélisateur, de l'implémentation informatique à l'enquête qualitative. ....	36
<b>Figure 9</b> : Diagramme des composantes du système-arbre, avec les ajouts issus du processus d'enquête (en noir les éléments de l'atelier, en couleur les éléments ajoutés). ....	37
<b>Figure 10</b> : Diagramme des composantes du système-arbre apparaissant directement dans le modèle informatique .....	38
<b>Figure 11</b> : Troupeau s'alimentant après l'étêtage d'un <i>Faidherbia albida</i> .....	41
<b>Figure 12</b> : <i>Faidherbia albida</i> étêtés dans la brousse (rectangle rouge).....	42
<b>Figure 13</b> : Stockage du bois pour l'hivernage dans l'enceinte d'une concession.....	44
<b>Figure 14</b> : Arrondissement de Tataguine.....	48
<b>Figure 15</b> : Utilisation de la charrette attelés lors de la récolte de l'arachide. (Etienne Delay, 2021).....	54
<b>Figure 16</b> : Tuteurage des pousses de <i>Faidherbia albida</i> : Tuteur en bois (gauche), <i>Euphorbia balsamifera</i> (droite) .....	55
<b>Figure 17</b> : Arbrisseau coupé dans un champ intermédiaire .....	56
<b>Figure 18</b> : Protection d'un anacardier à l'intérieur d'une concession .....	58
<b>Figure 19</b> : Interface de Netlogo, permettant de visualiser les éléments du modèle. ....	63
<b>Figure 20</b> : Affiches explicatives mobilisées pendant l'atelier pour décrire le modèle .....	67
<b>Figure 21</b> : Projection de l'interface du logiciel lors de l'atelier .....	67
<b>Figure 22</b> : Interface du logiciel avec l'ensemble des graphiques de suivis des indicateurs .....	68
<b>Figure 23</b> : Graphique permettant de calibrer la variable temps au champ en fonction de son influence sur les sorties. Par ce graphique on cherche à trouver la valeur du tps-au-champs qui maximise son effet sur l'état final du parc.....	74
<b>Figure 24</b> : Diagrammes à boîtes à moustache associés à l'exploration 1 .....	78
<b>Figure 25</b> : Diagrammes à boîtes à moustache associés à l'exploration 2 .....	79



<b>Figure 26</b> : Pattern Space Exploration synthétisant les résultats des explorations 1 et 2 ....	81
<b>Figure 27</b> : .....	82

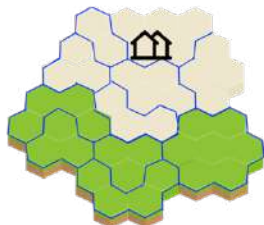
<b>Tableau 1</b> : Indicateurs de suivi du modèle formulés par le modélisateur .....	69
<b>Tableau 2</b> : Paramètres testés par le Saltelli .....	77

## Annexes

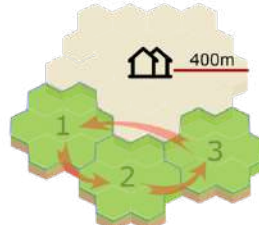
*Affiches mobilisées lors des ateliers de présentation du modèle*

# L'agrosystème de Diohine: champs, cultures, agents

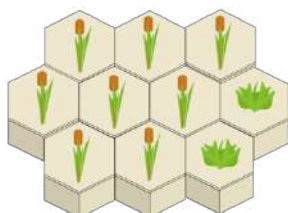
**0** Village, champs et parcelles  
les parcelles font en moyenne un hectare



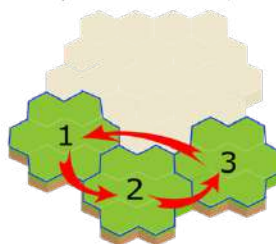
**2** Champs de case et de brousse  
Définis selon leur éloignement au village



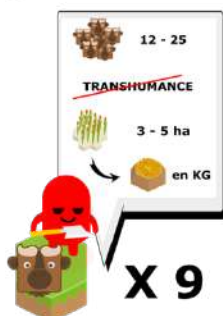
**1** Cultures  
Des champs à 80% en mil



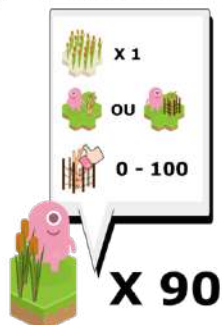
**3** Une jachère en rotation  
3 zones représentant chacune 1/3 des champs de brousse



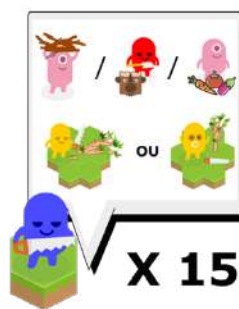
**4** Les bergers



**5** Les agriculteurs



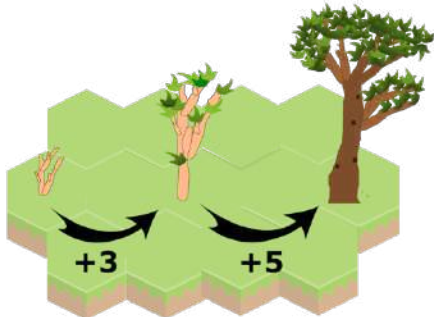
**6** Les coupeurs



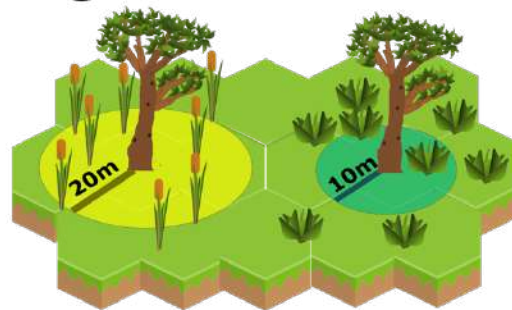
UMR SENS- CIRAD - 2022  
Réalisation: Lucas Broutin & Etienne Delay

## Le parc à *Faidherbia albida* structuré par des divers dynamiques et interactions

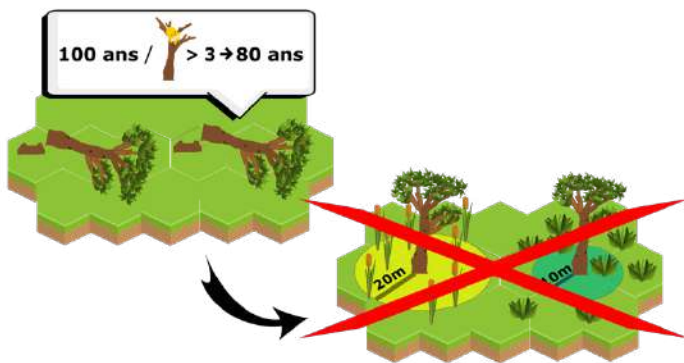
### 0 Croissance des arbres pousses, pousses intermédiaires, arbres



### 1 Effet fertilisant des kad effet différent selon la culture



### 2 Mort des arbres et fertilité Quand est-ce que l'effet fertilisant s'arrête?



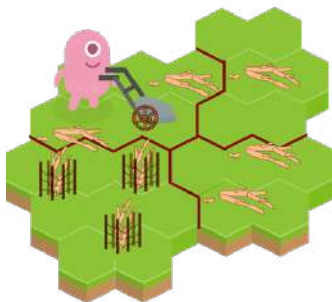
### 3 Les freins à la régénération Différents âges, différentes menaces



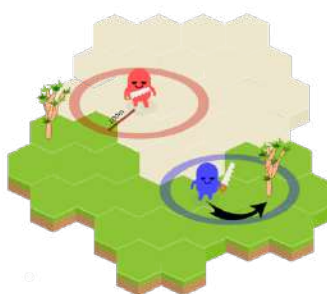
### 6 Étéage des kadd et ces effets sur la régénération



### 4 Machine et pousses écrasement des jeunes pousses

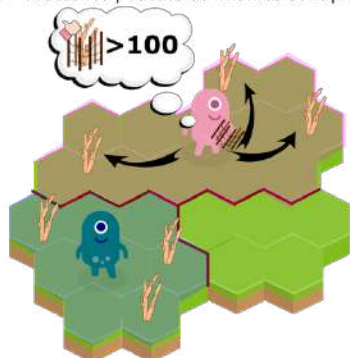


### 5 Coupeurs coupes des pousses intermédiaires

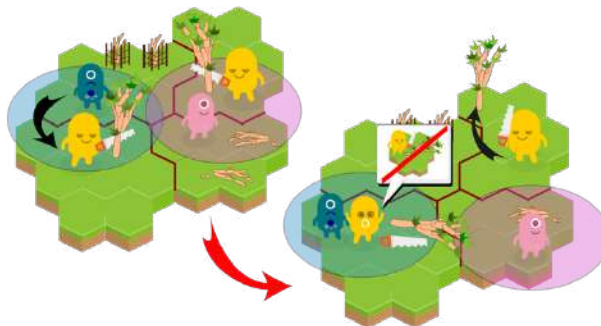


## La régénération du parc à *Faidherbia albida*: engagement, protection et surveillance

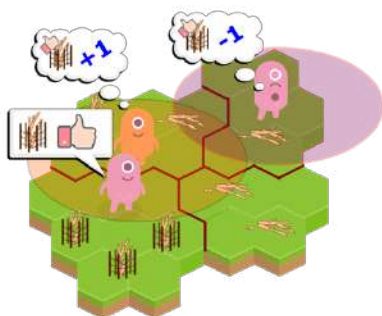
### 0 Protection des jeunes pousses Toutes les pousses du chamso sont protégées



### 2 Surveillance des coupes Seuls les engagés RNA surveillent les coupeurs



### 3 S'engager par la discussion Si les voisins est engagés



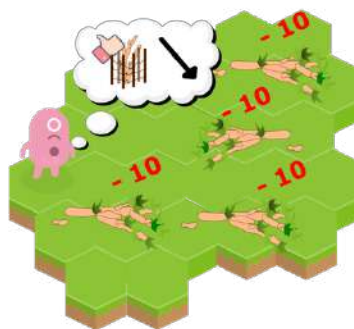
### 4 S'engager en constatant une réussite S'il deux arbres poussent chez le voisin, l'itinérèr grandit



### 5 Participer à des réunions spécifiquement dédiées à la RNA



### 6 Coupes successives et découragement Si les coupes sont trop nombreuses (> 20)



**Tableau des personnes rencontrées à l'occasion d'entretiens ou d'ateliers.**

Nom	statut/activité	Lieu de résidence	Circonstance de la rencontre
Jean Marone	éleveur avec troupeau sédentaire	Sassem	Entretien
Bouré Silmangue Marone	éleveur et <b>saltigué de Diohine</b>	Sassem	Entretien
Bouré Diouf	éleveur avec troupeau sédentaire	Sassem	Entretien, visite de son champ, coupage d'arbre avec lui
Cheikh Diouf	Ancien surveillant de quartier - surveillance des espaces de champs	Maroneme, dans la concession de Paul Sène	Entretien
Jean-Marie Cheikh Ndiaye	Adjoint au maire de la mairie de Diarère	Maroneme	Entretien
Modou Dione	Animateur de Vision mondiale	travail à la mairie de Diarère et souvent présent à la brigade des E&F à Tattaguine aussi	Entretien
David Danfa	Agent des Eaux & Forêts	Tattaguine	Entretien
Jean Marie ..??	Agriculteur avec bétail, protégeant les arbres.	La concession proche de celle de Gorgui Faye (Sassar?)	Entretien et visite de son champ
Simon Pierre Tine	Paysans leader formateur (RNA), Trésorier du lycée de Diohine, secrétaire exécutif du dispensaire, Collecteur/surveillant du marché	Meme (petit village sur la route de Toukar).	Entretien et visite de son champ
Nicolas Diouf	ancien instituteur	Sassem	Atelier + plusieurs fois chez lui avec Aissatou
Issakha Ndiaye	Président des éleveurs de Niakhar	Niakhar	Rencontré au cybercafé de

			Niakhar, un jour de marché
Guedj ??	En charge de la vaccination des bovins	Poulander	Entretien + croisé plusieurs fois devant chez Edouard Diagne, chef du village + atelier
Guedj Diouf	Président des éleveurs de Diohine	Poulander	Entretien + atelier
Mad Diouf	Neveu de Guedj, est aussi éleveur	Poulander	Entretien
Gorgui Faye	Agriculteur avec bétail avec troupeau transhumant (en association avec son neveu)	Sassar	Entretien
Ngor Faye	Frère de Gorgui Faye, a également des vaches	Sassar	Entretien
Joseph Sène	Président de l'ASUFOR, Directeur de l'école catholique de Sassar (et autre), représentant de la Caritas Diohine	Sassar	Entretien + atelier
Assane Diouf	Agriculteur avec bétail	Barry Sine	Atelier
Pierre Faye	Membre de la Caritas (mission catholique)		Atelier
Ameth Thiaw	Bana-bana et vendeur de semences	Gadjack	Atelier
Ndeye Thiamal	Agricultrice sans bétail	Sassem	Atelier
Marie-Hélène	Revendeuse de semences/spéculation en début d'hivernage	Maroneme	Atelier

Ndjira Diouf			
Paul Sène	Agriculteur avec bétail, proche du chef du village	Maroneme	Atelier + entretien
Ablaye Faye	Agriculteur sans bétail, protecteur de pousses	Sassem	Atelier
Seynabou Gakou	Agricultrice sans bétail	Sassem	Atelier
Edouard Diagne	Chef du village, agriculteur avec bétail	Maroneme	Entretien