

Modélisation prospective des paysages de la Forêt Classée du Haut Sassandra (Côte d'Ivoire) après la fin des conflits

M. Vignal^{1*} & J. Andrieu¹

Keywords: Modeling- SMA- Cellular automata- Clearing- Migration- Geoprospective- Côte d'Ivoire

Résumé

Il a été démontré que les conflits armés provoquent des dégradations de la biodiversité, dans ses dimensions écosystémique et spécifique. La Forêt Classée du Haut Sassandra est un cas d'étude intéressant pour ce genre de processus. En effet, durant les conflits, une infiltration massive de migrants a provoqué un brusque recul de sa couverture forestière et une perte notable de sa diversité végétale. Nous avons créé un modèle issu du croisement d'un automate cellulaire et d'un système multi-agents permettant de simuler les déplacements et les jeux d'acteurs. La simulation sociale génère des scénarios sous forme de cartes du défrichement dans la forêt classée. Ce modèle a d'abord été conçu comme un modèle rétro-prospectif pour tester des hypothèses sur les dynamiques sociales qui sous-tendent ce processus, après avoir travaillé sur sa justesse par la confrontation à la réalité. Ce modèle ayant été validé, l'objectif est de présenter une modélisation prospective pour illustrer les possibles conséquences, en termes de conservation de la couverture forestière, de différents scénarios démographiques et politiques. Par une logique géoprospective, deux scénarios seront évoqués tel que la poursuite des tendances de la période de conflit dans le modèle et une proposition de restauration écologique.

Summary

Landscapes Prospective Modeling of the landscapes of the Haut Sassandra Classified Forest (Côte d'Ivoire) After the End of the Conflicts

It has been demonstrated that armed conflicts cause biodiversity's degradation, especially in its ecosystemic and specific dimensions. The Haut Sassandra Classified Forest is an interesting case study for this kind of process. Indeed, during the conflicts, a massive migrants infiltration caused a forest cover decline and a plant diversity loss. We created a multi-agent system able to simulate the actors' movements and behaviors. The social simulation generates scenario in the form of clearing maps in classified forest. This model was first conceived as a retro-prospective model in order to test hypotheses on the social dynamics underlying this process, after having worked on its accuracy by confronting reality. This model being validated, the aim of this paper is to present a prospective modeling to illustrate, in terms of forest cover's conservation, the possible consequences of different demographic and political scenarios. Across a geoprospective logic, two scenarios are mentioned such as the continuation of conflict period trends and a proposition of ecological restoration.

¹Université Nice Sophia Antipolis, Université Côte d'Azur, Nice, France..

*Auteur correspondant: Email: matthieu.VIGNAL@unice.fr

Introduction

La Forêt Classée du Haut Sassandra (FCHS) est située au centre-ouest de la Côte d'Ivoire, entre la région du Haut-Sassandra et la région du Tonpki. Plus précisément, elle est présente entre les départements de Vavoua et de Daloa. Cette forêt classée est délimitée sur son flanc ouest par le fleuve Sassandra (Figure 1).

Située sur une plaine à micro topographie marquée, elle est parsemée d'affleurements granitiques (18). Elle appartient à la zone de forêt dense humide semi-décidue à *Celtis spp.* et *Triplochiton scleroxylon* du secteur mésophile (15). Le nord de cette forêt est une zone de transition vers la zone de forêt dense semi-décidue à *Aubrevillea kerstingii* et *Khaya grandifolia* (19, 24).

La FCHS a connu ses premières incursions agricoles en 1967. Trois ans plus tard, la Société Industrielle Forestière de Côte d'Ivoire (SIFCI) y a installé un campement d'exploitation forestière. Durant les décennies suivantes, l'angle sud-ouest de la FCHS et une petite zone à l'est du fleuve sont l'objet de défrichements de plus grandes ampleurs (22, 23). Ces incursions agricoles se sont mises en place pendant les années 1980 en raison de l'arrivée de populations dans la région. Ces deux enclaves ont été déclassées et, jusqu'au début des années 2000, 93% de la forêt a été conservé (7).

La Côte d'Ivoire a connu des conflits politico-militaires du début des années 2000 jusqu'à l'année 2011 (9). Durant cette période, les importantes migrations des populations des pays limitrophes, notamment du Burkina Faso (10), ont été facilitées, en particulier à travers des accès à une ressource foncière jusqu'ici inaccessible: les forêts classées. En effet, durant les conflits, les activités de protection ont été arrêtées engendrant d'importants processus d'installation agricole dans les espaces forestiers protégés, notamment pour la mise en place de cultures de rente telle que le cacao (7). La FCHS est un cas intéressant pour l'étude des relations entre conflits armés et conservation de la biodiversité en Afrique de l'Ouest dans la mesure où, durant les conflits, une massive infiltration de migrants dans la forêt classée a provoqué un brusque recul de la couverture forestière et une perte notable de la diversité végétale (8).

En effet, en 2013, peu après la fin des conflits, la superficie de la couverture forestière de la FCHS était déjà réduite de 50 % avec une fragmentation majeure et une réduction du nombre d'espèces végétales estimée à 40% (7).

Or, nous possédons une assez bonne connaissance d'un certain nombre de processus de cet événement : une cartographie régulière de l'occupation du sol par télédétection, une connaissance de terrain (biodiversité et paysages) avant et après les conflits et une connaissance socio-économique assez générique des migrants.

En revanche, certains processus sont peu connus, notamment la population exacte des migrants dans la FCHS et leurs pratiques durant le conflit. Les comportements individuels et collectifs, les jeux d'acteurs, les perceptions de cet environnement par les acteurs et les perceptions croisées des différents types d'acteurs sont peu connus également. Une approche modélisatrice a permis, grâce à ce qui était connu, d'essayer de simuler une partie de ce qui est mal ou peu connu. Un modèle calé sur l'espace géographique de la FCHS et sur la temporalité des conflits ainsi que des premières années de paix a permis de modéliser de façon rétrospective le déroulement des installations dans la FCHS et des défrichements en vue de la culture de cacao (2). Ce modèle, basé sur la reconstitution, jusqu'en 2013, des phénomènes déjà réalisés a été validé par de la télédétection avec une bonne correspondance tant des superficies défrichées que des structures spatiales des défrichements.

La simulation la plus réaliste donnait, pour l'année 2013, une estimation du nombre de migrants infiltrés dans la FCHS entre 17 000 et 18 000 habitants avec un taux d'évolution de la population ayant fortement augmenté entre 2006 et 2007. La distribution des tailles d'exploitation apparaîtrait entre 3 et 23 ha avec un accroissement d'un hectare par an et par ouvrier agricole. La localisation des nouveaux défrichements semblerait démontrer que les choix ne dépendent pas toujours d'une analyse des potentialités, mais résulteraient aussi de choix «au hasard» ou de localisation «a priori», comme si elles avaient été définies sur une carte sans connaître le contexte local et notamment les potentialités agronomiques (2). Grâce à ce modèle rétrospectif, nous présentons ici une modélisation prospective pour illustrer les possibles conséquences, en termes de conservation de la couverture forestière, de la poursuite de la dynamique actuelle. Pour cela, nous présentons, dans un premier temps, la mise à jour de la modélisation entre 2013 et 2016 pour confirmer la poursuite des tendances observées durant les deux premières années de paix. Ensuite, nous modélisons les conséquences de la poursuite de ces tendances. Enfin, nous proposons sans nous appuyer sur le modèle, la visualisation d'un scénario volontariste de protection et de restauration écologique d'une partie des reliques forestières encore présentes en décembre 2016.

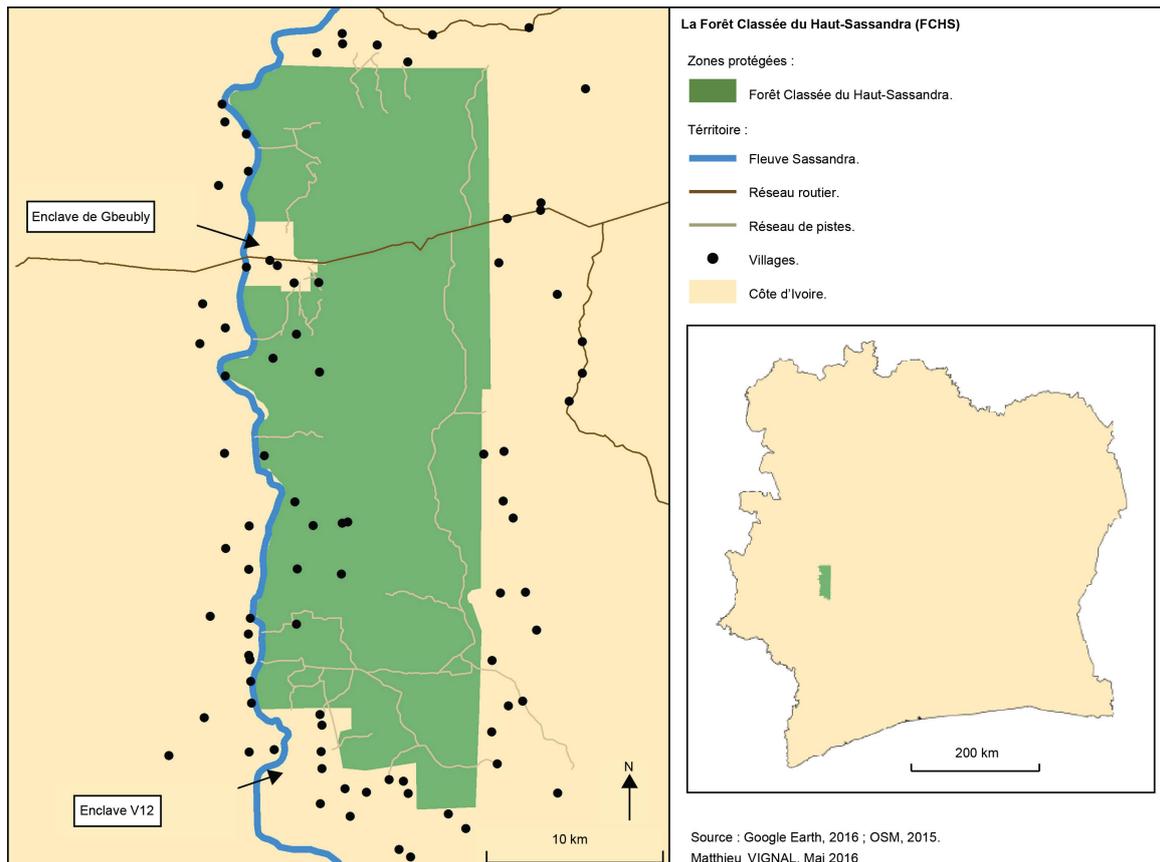


Figure 1: Localisation de la Forêt Classée du Haut Sassandra.

Données

Enquête auprès d'anciens migrants

Une enquête a été conduite en 2015 dans les villes de Koudougou et Ouahigouya auprès de 80 personnes retournées au Burkina Faso après une migration en Côte d'Ivoire (30). Cette enquête par questionnaires semi-dirigés aborde des aspects qualitatifs et quantitatifs, à partir desquels des règles ont été établies dans le modèle. L'enquête nous a, par exemple, permis de définir les bornes pour centrer le modèle sur les thèmes suivants:

- La population des agents migrants (distribution en âges, genre).
- La répartition entre exploitants et ouvriers agricoles.
- La taille et la croissance des parcelles.
- Le nombre d'ouvriers agricoles par exploitation.
- Les modalités pour un ouvrier agricole de créer sa propre exploitation.
- Les conditions et les fréquences de départ des migrants de leur lieu d'installation.

Pour une utilisation dans la modélisation du défrichement de la FCHS, la principale critique faite à cette enquête est l'impossibilité d'y distinguer un comportement des installations légales en zone agricole d'un comportement propre aux installations illégales dans les aires protégées. Ainsi, d'une part, les règles du modèle issues de cette enquête ont été testées.

D'autre part, le modèle a été complété par deux sources bibliographiques centrées sur les aires protégées: les lieux privilégiés pour la mise en place d'exploitations (23), la croissance des exploitations (23), et les conditions de création des villages (1).

Données géographiques

Les données socio-économiques issues de l'enquête ne peuvent pas, à elles seules, permettre de modéliser spatialement le défrichement. Pour cela, un certain nombre de données géographiques sont nécessaires. Premièrement, deux cartes d'occupation du sol, pour les années 2002 et 2013 (25).

Deuxièmement, pour cartographier l'occupation du sol à des dates intermédiaires, six images satellitaires LANDSAT ont été acquises (Tableau 1).

La temporalité est bisannuelle jusqu'en 2009, puis annuelle. L'année 2010 ne fait pas l'objet d'une cartographie, à cause du taux de nébulosité des prises de vues disponibles.

Un modèle Numérique de Terrain (MNT) issu du SRTM a été utilisé pour définir la topographie de la forêt classée, les bas-fonds en particulier.

Les villages, les pistes, les limites de la FCHS et le fleuve Sassandra ont été obtenus en données vectorielles ou générés par photo-interprétation depuis Google Earth.

Tableau 1
Liste des Images LANDSAT analysées.

Satellite	Date de prise de vue	Résolution
Landsat 7 ETM+	19-01-2005	30 mètres
Landsat 7 ETM+	11-12-2007	30 mètres
Landsat 7 ETM+	15-09-2009	30 mètres
Landsat 7 ETM+	04-01-2011	30 mètres
Landsat 7 ETM+	01-07-2012	30 mètres
Landsat 8 OLI	11-12-2016	30 mètres

Méthode

Avant l'étape de modélisation, des cartes d'occupation du sol ont été produites. En l'absence de parcelles de réalité terrain, les images de 2005, 2007, 2009, 2011, 2012 et 2016 ont été traitées par une chaîne de classifications non dirigées (Kmeans) emboîtées selon la méthode proposée par Andrieu et Mering (3).

Ces cartes d'occupation du sol permettent de déterminer les règles de spatialité du défrichement. La mise en avant de ces règles se fait par l'intermédiaire de la morphologie mathématique (26), notamment par l'analyse de la distribution d'un ensemble autour d'une composante (27). Cela consiste à dilater progressivement une composante (les pistes, les villages, les limites de la forêt classée, le fleuve Sassandra et les bas-fonds) jusqu'à ce qu'elle englobe l'ensemble des autres composantes (les pixels agricoles). La distribution de la surface intersectée à travers les itérations permet de comprendre comment le défrichement se structure spatialement par rapport aux composantes, élément fondateur des règles de spatialité.

Sur ces bases a été réalisé un modèle multi-agents spatialement explicite utilisé dans une approche prospective.

Des comportements des acteurs au défrichement de la FCHS

Le Système Multi-Agents (SMA) élaboré permet de modéliser le défrichement dans la FCHS par une simulation sociale et sociétale. Il a pour objectif d'acquérir des connaissances sur les comportements par le test d'hypothèses. La perception et les pratiques des acteurs conditionnent le défrichement. La modélisation de ces perceptions nécessite la mise en place d'un modèle avec un emboîtement de structures et d'échelles, et avec une quantité importante d'individus ainsi que leurs interactions (6). Le modèle s'établit à échelle locale afin que les comportements individuels soient prédominants tout en permettant l'émergence de phénomènes à une échelle macro-régionale (24).

Tout cela génère une grande quantité de paramètres, ce qui induit un grand nombre de combinaisons possibles. Ainsi, le modèle élaboré s'insère dans une approche plus descriptive que simplificatrice. Il essaye d'être fidèle à la réalité afin de conserver une approche explicative (6). Les règles et les paramètres sont accessibles directement depuis l'interface. Ainsi, des processus peuvent être activés ou désactivés selon les hypothèses établies pour la simulation. Ce modèle possède dès lors une certaine flexibilité.

Le modèle mis en place est un couplage entre un Automate Cellulaire (AC) et un SMA.

L'environnement, autant que l'individu, conditionnent l'évolution spatiale du défrichement. Le modèle est composé de 237 pixels sur 654 pixels, d'une résolution de 90 mètres. Cette résolution proche d'un hectare correspond aux superficies des petites plantations (23). Le modèle est composé d'individus simulant la population de la FCHS et les acteurs qui s'y rendent de façon temporaire.

Les pixels sont caractérisés par des variables spécifiques comme l'occupation du sol, la présence de villages, de pistes, mais également par un ensemble de variables liées aux stocks forestiers et agricoles, aux exploitations agricoles (identifiant, taille, nationalité, nombre d'exploitants, etc.), et à la topographie. C'est au niveau des pixels que se réalisent l'évolution des stocks agricoles et forestiers et les processus qui régissent la dynamique de retour à la forêt.

Les individus sont divisés en quatre catégories: les exploitants agricoles migrants, les ouvriers agricoles migrants, les agents de protection de la SODEFOR et les villageois ivoiriens. Ils sont caractérisés par leurs âges, leurs espérances de vie, leurs genres, leurs situations familiales et leurs catégories professionnelles. Ils possèdent la capacité de se déplacer, de défricher, de s'implanter, de récolter des ressources forestières non ligneuses et de créer des villages. Les différents individus se situent sur les pixels. Ils peuvent modifier les caractéristiques du lieu qu'ils occupent et se déplacer. Les acteurs peuvent se percevoir mutuellement et interagir. Un individu ne peut être présent que sur un seul pixel, mais ces derniers peuvent contenir plusieurs individus. Ainsi, ce modèle repose sur les différentes interactions qui existent entre les individus, et entre les individus et les pixels.

Les migrants se caractérisent par leurs catégories professionnelles, ils ont la capacité de rejoindre une exploitation (ouvrier agricole) ou d'en fonder une (exploitant) et de créer des villages. Les villageois ivoiriens sont caractérisés par leurs catégories professionnelles.

Tableau 2
Récapitulatif du calcul de l'indice de défrichement.

Facteurs	Valeurs	Réécartonnage	Pondération
Distance aux villages	x1	y1	z1
Distance aux pistes	x2	y2	z2
Distance au fleuve Sassandra	x3	y3	z3
Distance au réseau hydrographique secondaire	x4	y4	z4
Distance aux limites de la forêt	x5	y5	z5

$$\text{Indice de défrichement} = ((y1 * z1) + (y2 * z2) + (y3 * z3) + (y4 * z4) + (y5 * z5)) / \text{Nombre total de facteurs}$$

Ils possèdent la capacité de s'implanter aux marges de la FCHS depuis les villages hors de la forêt classée pour cultiver le cacao, et de venir récolter dans la FCHS des ressources forestières non ligneuses. Enfin, les agents de protection de la SODEFOR se caractérisent par le groupe de patrouille auquel ils appartiennent. Ils peuvent incendier des exploitations illégales et expulser les migrants hors de la forêt classée.

Les variables environnementales communes aux lieux défrichés sont synthétisées par un indice de potentialité de défrichement qui réunit l'ensemble des règles de spatialité.

Il conditionne spatialement l'établissement des exploitations au sein de la forêt classée. Il prend en compte la distance aux villages, aux pistes, au fleuve, aux bas-fonds, mais également aux limites de la forêt (4, 5, 23). En effet, l'analyse du territoire permet d'établir que:

(i) les incursions agricoles sont d'autant plus importantes qu'elles sont proches des villages principaux qui bordent la FCHS.

(ii) Les pistes sont des vecteurs de propagation des défrichements. Les implantations agricoles se localisent près de ces dernières, exception faite des pistes principales où l'on observe une lisière forestière d'un pixel.

(iii) Le fleuve Sassandra est à l'origine de sols hydromorphes qui ne sont pas adaptés à la mise en place de plantations de cacao (23). Ces surfaces sont distantes en moyenne de 5 pixels de ce fleuve.

(iv) Le réseau hydrographique secondaire structure également l'implantation et la propagation de l'agriculture. Bien qu'absentes des bas-fonds, les plantations de cacao s'établissent sur les pentes adjacentes à ce réseau hydrographique.

(v) Les limites de la forêt classée forment une barrière à l'implantation de l'agriculture, au sein de l'aire protégée, d'un pixel.

Chaque variable est réécartonnée entre 0 et 1. Une pondération est établie en fonction d'une matrice de corrélation entre ces facteurs et la fréquence locale de pixels défrichés (Tableau 2). La moyenne pondérée produit l'indice final.

Les enquêtes et la littérature (1, 23, 30) permettent de calibrer le modèle. Il s'avère que les migrants burkinabés ont un âge moyen de 44 ans et sont majoritairement des hommes (90% contre 10% pour les femmes) dont 71% d'entre eux sont mariés (30).

46,7% d'entre eux se déplacent vers les espaces forestiers afin de devenir des exploitants, et 53,3 % vers les espaces agricoles afin de devenir des ouvriers (30).

L'enquête (30) indique la présence d'une sorte de contrat, de 2 à 5 ans de travaux chez un exploitant, qui permet, à terme, à un ouvrier d'obtenir ses propres terres. Les processus d'implantation ont donné naissance à des villages.

En effet, les plantations dans les forêts classées s'accompagnent de construction d'habitats (1). La structure de l'habitat évolue progressivement du campement jusqu'à la constitution d'un village où est rassemblé un ensemble d'équipements et diverses prestations (1).

La superficie des exploitations varie de 3 à 22 hectares, avec une moyenne proche de 8 hectares (7, 30). Ces exploitations accueillent 3 à 5 personnes (23, 30). L'augmentation du nombre d'employés va de pair avec l'augmentation de la superficie de l'exploitation. Celle-ci évolue, en moyenne, d'un hectare par an et par personne présente dans l'exploitation (23). 6,7% des exploitants sont spoliés de leurs terres du fait des crises politico-militaires (30). Ce sont des départs volontaires en raison des conflits ethniques, de la pénibilité du travail ou des difficultés rencontrées dans les plantations et des départs forcés (30).

Pour lutter contre les implantations agricoles, les agents de protection de la SODEFOR font déguerpir les migrants, ce qui exige des moyens humains et matériels conséquents (23). Or, pendant la période de crise, les activités de protection ont été arrêtées. Elles ont repris progressivement suite à l'accord d'Ouagadougou en 2007 (Dire d'expert). Les agents sont par ailleurs limités dans leurs actions par le manque de sanction prise à l'égard des exploitants illégaux. En effet, après les interventions des agents, les exploitants peuvent se réinstaller rapidement soit dans leurs anciennes parcelles soit ailleurs dans la forêt classée (23, Dire d'expert).

Les villageois ivoiriens se comportent selon deux modalités différentes, contradictoires d'une certaine manière (23, Dire d'expert). Premièrement, Zanh *et al.*, (29) confirment que les Ivoiriens prélèvent des ressources forestières non ligneuses (RFNL) dans la FCHS. Près de 30% de la population des villages des alentours de la FCHS prélève quotidiennement des RFNL (Dire d'expert).

Ces incursions participent en quelque sorte à la surveillance. En effet, lorsqu'ils rencontrent des exploitations illégales, certains contactent les agents de protection pour les leur signaler (Dire d'expert). Deuxièmement, certains Ivoiriens ont mis en place des plantations de cacao dans la FCHS (Dire d'expert). Les rares villageois qui se sont implantés l'ont fait en bordure de la forêt classée, sous forme de front pionnier (23) et loin des exploitations des Burkinabés (Dire d'expert).

Pour synthétiser, les données insérées dans le modèle sont :

- La carte d'occupation du sol de 2002.
- Un indice de potentialité de défrichement qui permet de conditionner spatialement le défrichement dans la FCHS.

- Un ensemble de règles issues d'une enquête (30) et de la littérature (1, 23), permettant de simuler des comportements sociaux et sociétaux.

- Un ensemble d'hypothèses sur le nombre de migrants burkinabés présents dans la forêt classée en 2002, mais également sur la manière dont ils s'insèrent dans la forêt ainsi que leur mode de déplacement dans cette dernière, sur le taux d'évolution de la population de migrants burkinabés et sur la relation entre les villageois ivoiriens et les agents de protection de la SODEFOR.

Une synthèse des règles du modèle et l'ensemble des hypothèses réalisées ont été soumises à discussion auprès des collègues ivoiriens et burkinabés du programme D2PCPCI appartenant aux disciplines suivantes: écologie et sociologie. Les migrants burkinabés, depuis les villages, entrent dans la FCHS et se déplacent soit vers les espaces forestiers afin de défricher une parcelle et devenir chef d'exploitation, soit vers les espaces agricoles afin de devenir des ouvriers agricoles. L'implantation dans les zones forestières est conditionnée partiellement par l'indice de potentialité de défrichement. Dans les exploitations, c'est le nombre d'ouvriers qui conditionne l'intégration d'un nouveau migrant (30). Si l'indice ne permet pas la création d'une exploitation ou que le nombre maximum d'ouvriers dans l'exploitation est atteint, alors les migrants se déplacent de nouveau à la recherche d'un lieu où s'implanter.

Après l'implantation d'un nouveau migrant dans une exploitation, cette dernière augmente sa surface d'un pixel. De plus, chaque exploitation voit chaque année sa surface augmentée d'un nombre de pixels équivalent à son nombre d'ouvriers (23). Lorsqu'un ouvrier est présent depuis une certaine durée dans une exploitation, celui-ci peut décider de partir pour défricher une parcelle dans une zone forestière et devenir un chef d'exploitation (30).

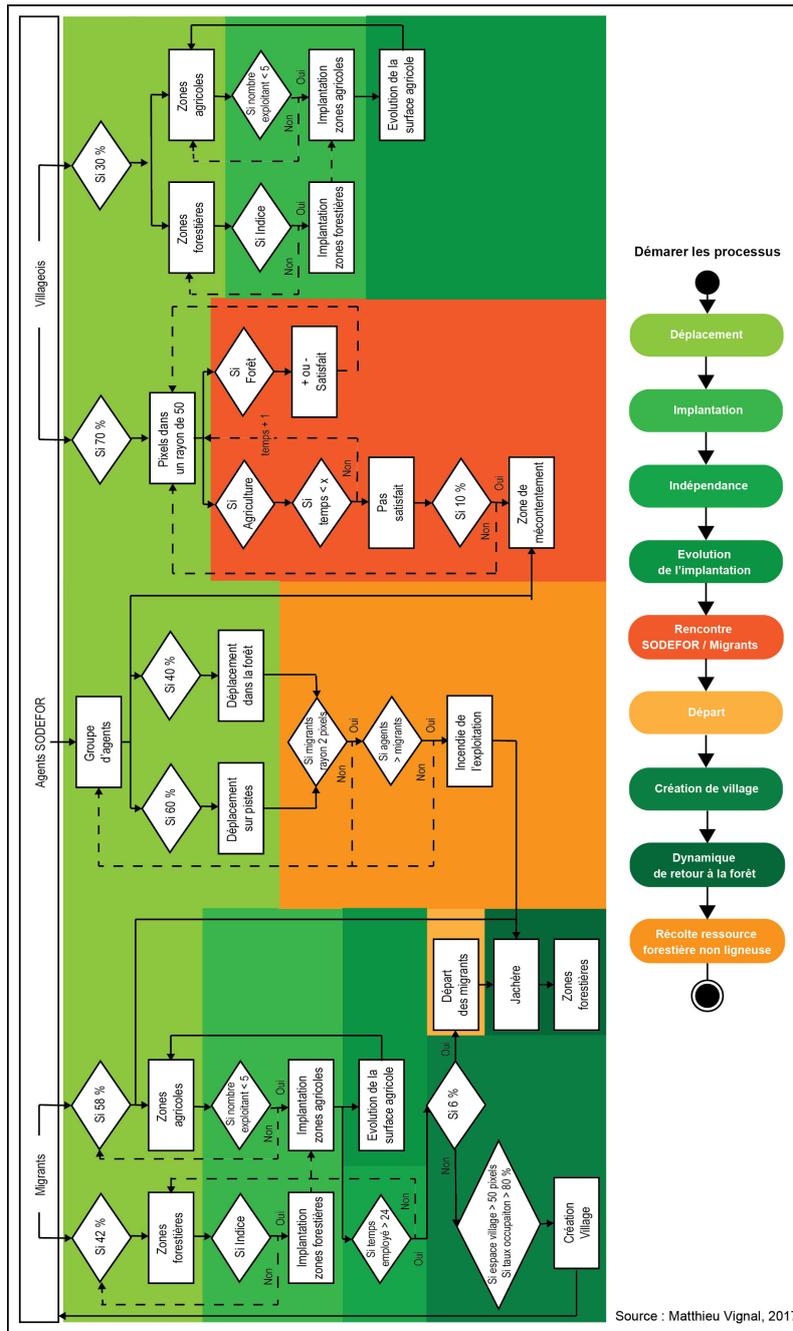
Lorsqu'une grande densité de migrants est présente sur un espace assez éloigné des villages, un nouveau village est créé. Cette création d'un village ajoute une étape possible dans l'arrivée des migrants (1).

Les villageois ivoiriens proviennent des villages des environs de la FCHS. Premièrement, concernant les exploitations de cacao, ils possèdent le même comportement que les migrants burkinabés. La différence repose sur le fait que les villageois se déplacent uniquement près de leurs villages, à la limite de la FCHS, car ils considèrent comme dangereuse l'installation au sein de la forêt classée en raison de possibles tensions avec les exploitations en place (Dire d'expert). Ainsi, ils mettent en place un défrichement sous forme de front pionnier périphérique (23). Ces derniers s'implantent aux bords de la FCHS en respectant une distance minimum aux exploitations des migrants. Cette distance est égale à la distance de vision dans une forêt dense soit une centaine de mètres. Semblable à celle des migrants, l'implantation dans les zones forestières est conditionnée par l'indice de potentialité de défrichement et dans les exploitations, c'est le nombre d'ouvriers qui conditionne l'intégration d'un nouvel ouvrier.

Deuxièmement, les villageois ivoiriens se déplacent dans la forêt près de leurs villages afin de récolter des ressources forestières non ligneuses (29). Ils se déplacent progressivement jusqu'à rencontrer un pixel de forêt. Les ressources sont supposées être proportionnelles à l'homogénéité du site forestier. En revanche, si au bout d'un certain temps, ils ne rencontrent pas de forêt, alors, ils peuvent décider de contacter les agents de protection pour leur signaler les exploitations illégales.

Les agents de protection se déplacent en groupe, soit sur les pistes qui traversent la FCHS, soit directement au sein de la forêt (Dire d'expert). Lorsqu'un groupe rencontre une exploitation, deux possibilités se présentent : si les migrants sont en nombre supérieur aux agents de protection ou si l'exploitation bénéficie d'une protection politique (distribution aléatoire dans le modèle), les agents sont impuissants. Au contraire, si les migrants sont en nombre inférieur et sans protection politique, les agents de protection peuvent incendier les cultures (Dire d'expert). Dans ce cas, un enrichissement se met en place.

Ces friches représentent les espaces prioritaires pour la mise en place de cultures par de nouveaux migrants (23). Les exploitants présents sur cette exploitation se déplacent afin de trouver un nouveau lieu propice à la mise en place d'une exploitation. Enfin, la rudesse des conditions physiques et sociales entraîne des départs des migrants de la FCHS.



Source : Matthieu Vignal, 2017

Figure 2: Diagramme d'activités du modèle.

La mise en culture du cacao et la disparition de la couverture arborée sont séparées de trois ans. En effet, c'est le temps nécessaire entre l'instant où les jeunes plants de cacao sont plantés et l'instant où la canopée est ouverte pour leur permettre une production maximale (17). Cela se traduit dans le modèle par l'instauration d'un compteur : au bout de 36 mois, le pixel, où est présente l'exploitation, est considéré agricole. Avant, ce pixel est un espace intermédiaire où tous les processus liés aux zones agricoles s'effectuent, mais où l'occupation du sol n'est pas encore définie comme «agricole». Le diagramme d'activités (Figure 2) illustre le fonctionnement de ce modèle.

La validation du modèle s'effectue en cinq indices :

- la correspondance quantitative entre le nombre de pixels agricoles observés par télédétection et le nombre de pixels agricoles simulés,
- le coefficient de similarité «Simil» (28),
- l'indice Kappa (11),
- l'indice de forme (20) moyen des taches agricoles,
- la comparaison des structures spatiales des zones agricoles par variographie (12).

La validation rétro-prospective du modèle est réalisée dans un premier temps à l'horizon 2013. Cette date correspond à la date de fin de conflit à laquelle s'ajoute l'inertie entre installation et disparition de la canopée.

La carte de 2016 permet d'affiner la calibration du modèle selon la dynamique récente post-conflits. Pour ce faire, trois paramètres ont dû être modifiés : en effet, en raison de la saturation de l'environnement par les espaces agricoles et de la rareté des espaces forestiers disponibles, d'une part, le taux d'arrivée des migrants burkinabés semble s'être réduit de 40% entre 2013 et 2016, et d'autre part, ces migrants semblent parcourir des distances deux fois plus importantes selon des directions 25% plus aléatoires. Une fois validé, le modèle est utilisé dans une approche prospective. En effet, l'objectif est ici d'anticiper le futur de ce territoire par l'intermédiaire d'une démarche modélisatrice reposant sur les dynamiques spatiales et sociales du défrichement (19). Pour Gourmelon (14), la géoprospective regroupe «un ensemble de pratiques visant à anticiper à moyen et/ou long terme, les devenir des espaces, soit en explorant leurs futurs plausibles, soit en simulant les évolutions les conduisant à une situation considérée comme possible à un horizon donné». Ici, aucun horizon n'est préalablement défini puisque l'objectif est de connaître, dans le cadre du rythme actuel des défrichements, quelle sera l'année où la FCHS ne comportera plus aucune couverture forestière. Le terme de «couverture forestière» est ici employé pour désigner la canopée, c'est-à-dire l'étage supérieur de la forêt (16). Dès lors, la simulation s'arrête lorsque la canopée disparaît¹.

Proposition d'une protection et restauration écologiques

La modélisation prospective se base sur la continuité des tendances actuelles et prévoit la disparition totale du couvert forestier. Ainsi, la seule façon de proposer un deuxième scénario prospectif est d'imaginer une modification complète de la situation menant à la protection et à la restauration écologique.

Ce scénario complètement théorique, sans prise en compte de la réalité sociale est en rupture totale avec les tendances observées et modélisées.

Ce scénario ne prétend aucunement constituer un conseil aux gestionnaires de la forêt classée ni aux autorités locales. Il ne prétend pas non plus être en mesure de résoudre la question de l'application sociale, économique ou juridique d'un tel scénario. Il a pour humble objectif une unique visualisation cartographique d'un autre futur possible que la poursuite des tendances actuelles.

Ainsi, contrairement à la modélisation qui a produit le premier scénario, il ne se base que sur l'analyse spatiale des reliques forestières en décembre 2013 et 2016. L'application de préceptes de l'écologie du paysage (13), et avant tout la recherche d'une continuité écologique, a permis de cartographier ce qui, à moindre effort, pourrait peut-être permettre de sauvegarder *in situ* quelques espèces et d'assurer quelques services écosystémiques.

La première étape est d'étudier la localisation des reliques. Pour cela nous avons réalisé une cartographie de la fréquence locale des reliques forestières en 2016 à échelles locales sur des fenêtres coulissantes locales de 90, 150 et 210 mètres de côté.

Sur la base de la somme de ces trois images de fréquence locale, une carte du plan de tendance avec une polynomiale d'ordre 5 permet de localiser les grands ensembles de forte densité de forêt à l'échelle de la FCHS. Un seuil est ensuite appliqué à cette carte du plan de tendance à la valeur moyenne. Ceci met en évidence une grande zone au sud de la FCHS où les reliques forestières sont les plus denses. Dans un deuxième temps, nous partons de l'hypothèse que la durée de l'activité agricole est un facteur défavorable à la restauration. Ainsi, dans l'optique d'une potentielle restauration forestière, l'image binaire des zones en forêts de la carte d'occupation du sol de 2013 est soumise à une labélisation et une quantification des surfaces des taches pour rechercher la plus grande tache continue à cette date. Le croisement de la plus grande tache en 2013 et de la zone de plus grande densité en 2016 produit une cartographie de ce qui peut être considéré comme le plus grand potentiel de protection ou restauration.

¹Cette disparition se traduit, dans le modèle, par une surface forestière inférieure à 5 000 pixels (soit 4 % du territoire), mais également par une fragmentation importante de l'espace forestier en l'occurrence, une dispersion importante des pixels de forêt au sein de la FCHS.

Cette zone est croisée avec les taches de forêt de 2016 pour distinguer les zones de plus grand potentiel de protection, là où la forêt est encore présente en 2016 et de plus grand potentiel de restauration là où elle a disparu entre 2013 et 2016. Une labellisation des taches de plus grand potentiel de protection permet de quantifier la superficie de chaque tache pour cartographier les enjeux: c'est-à-dire les plus grandes taches proches les unes des autres qu'il serait possible de relier avec une restauration sous forme de corridors. Les corridors sont proposés sous la forme des lignes les plus courtes possibles qui relient entre elles les taches de grande taille au sein de cette zone potentielle. L'application de ces corridors à la carte du plus grand potentiel de protection permet, par une nouvelle labellisation de cartographier une tache unique qui associe entre elles les taches sélectionnées, ainsi reliées (sur la carte) par un réseau de corridors proposés dans ce but.

Résultats

Modélisation satisfaisante des dynamiques paysagères actuelles de la FCHS

Les zones agricoles qui représentent 5% en 2002, 48,7% en 2013 et 72% en 2015 (2, 8), représentent 85% du territoire en décembre 2016. La fin des conflits armés n'a pas entraîné la fin du défrichement dans la FCHS. Une légère inflexion de la courbe des défrichements s'observe (Figure 3) mais celle-ci résulte uniquement de la saturation, en espaces agricoles, du territoire de la FCHS.

En effet, il ne reste plus que quelques taches de forêt sur ce territoire, principalement localisées dans les zones inadaptées à la mise en place de culture de cacao. Ces zones sont d'une part, situées près du fleuve Sassandra et dans les bas-fonds, là où les sols sont hydromorphes, et d'autre part, près des pistes, ce qui explique en grande partie la forme rectiligne de ces lambeaux forestiers.

Au regard de l'évolution du phénomène de défrichement dans la FCHS, le modèle mis en place est valide dans la mesure où la simulation permet d'obtenir une correspondance quantitative de 101% en 2013 (47 100 ha modélisés et 46 700 ha observés), une correspondance spatiale de 40% et un indice Kappa de 0,6. Il en est de même pour la forme des taches agricoles simulées, la valeur de l'indice de forme est 1,31 contre 1,32 pour la forme des taches agricoles observées par télédétection. Le coefficient de corrélation entre les structures spatiales du modèle et celles de la télédétection est de 0,99.

D'après le paramétrage sélectionné, le résultat de la simulation en décembre 2016 présente une correspondance quantitative de 99% (81 100 ha modélisés et 81 900 ha observés) et une correspondance spatiale de 80% avec la réalité observée par télédétection.

L'indice Kappa est de 0,76. Il apparaît que le modèle simule un défrichement pas assez important au centre-sud-ouest de la FCHS (Figure 4). Par ailleurs, l'indice de forme, pour le résultat de la simulation, est de 1,45 contre 1,58 pour les taches agricoles observées par télédétection.

Les formes agricoles simulées suivent moins fidèlement la réalité physique des bas-fonds de la FCHS. Cela résulte de la pondération, insuffisante, des bas-fonds dans l'indice de potentialité de défrichement.

À ce rythme, quel devenir pour la FCHS?

D'après le modèle, si le rythme des défrichements devait suivre la tendance actuelle, la FCHS connaîtrait la fin de sa couverture forestière dès le mois de décembre 2017. En effet, les zones agricoles représenteraient probablement près de 96% du territoire, avec 2% pour les zones agricoles sous couverture de la canopée, contre 2% pour la forêt de bas-fonds et de bord de chemin (Figure 5). Par rapport à 2016, il s'agit d'une évolution de 12% des superficies défrichées. En correspondance à ces défrichements, probablement, nous avons estimé à près de 74 000 les personnes installées dans 25 000 exploitations dont la taille serait comprise entre 1 et 22 hectares, avec une moyenne de 4,4 hectares par exploitation. Ces exploitations comprendraient de 1 à 5 personnes avec, en moyenne; 3,2 personnes par exploitation. Une comparaison de ces chiffres avec ceux de la simulation à l'horizon 2016 est proposée dans le tableau 3.

Le temps est court, mais cela ne doit pas pour autant empêcher de réfléchir à l'illustration d'un plan de sauvegarde ayant pour objectif de maintenir les espaces forestiers restants et d'un zonage de réseau écologique pour assurer la connectivité entre ces espaces de sorte à permettre de visualiser les enjeux de conservation de ces dernières reliques.

En 2013, une grande tache reliait encore une majeure partie des zones forestières, en particulier le sud, particulièrement dense et connecté.

En 2016, les reliques de forêt se localisent toujours essentiellement au sud. Plus de la moitié d'entre elles sont localisées dans les bas-fonds et près d'un sixième sont localisées de part et d'autre des pistes. Les reliques forestières de 2016 peuvent être caractérisées chacune par leur taille et la densité locale de l'ensemble qu'elles forment. Elles peuvent être insérées dans une enveloppe spatiale plutôt favorable à une restauration écologique.

La plus grande tache de relique forestière correspond aux bas-fonds ramifiés de l'extrême sud-est de la FCHS, elle mesure près de 1 000 ha. Elle est presque connexe à plusieurs grandes taches (entre 45 et 450 ha) alignées en pas japonais selon un axe sud-est nord-ouest jusqu'au fleuve Sassandra.

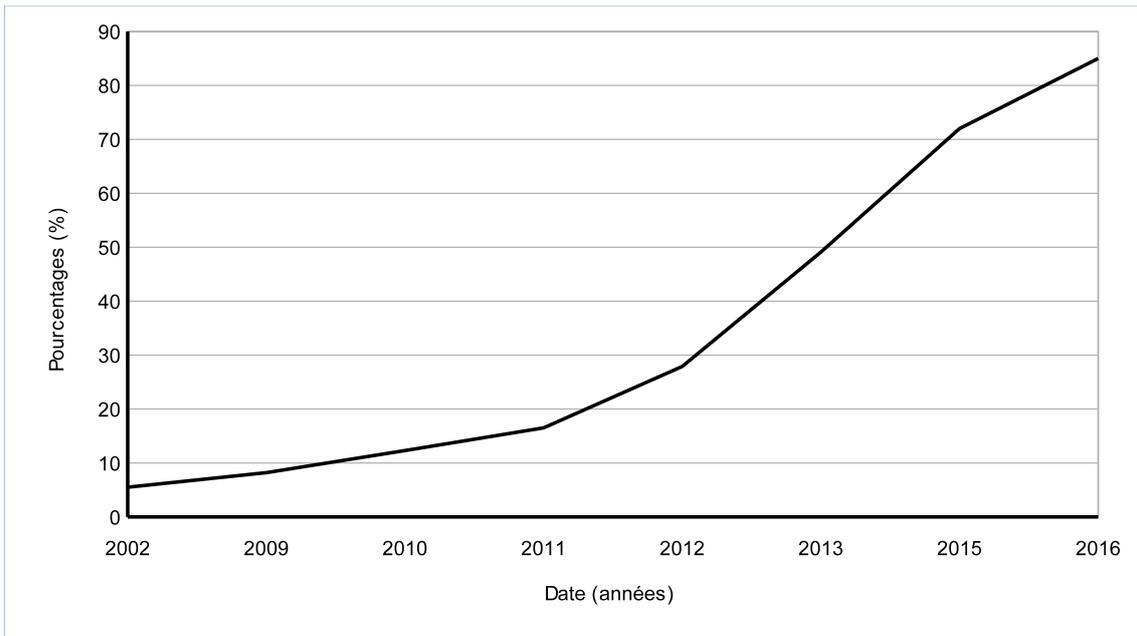


Figure 3: Évolution des surfaces agricoles dans la FCHS.

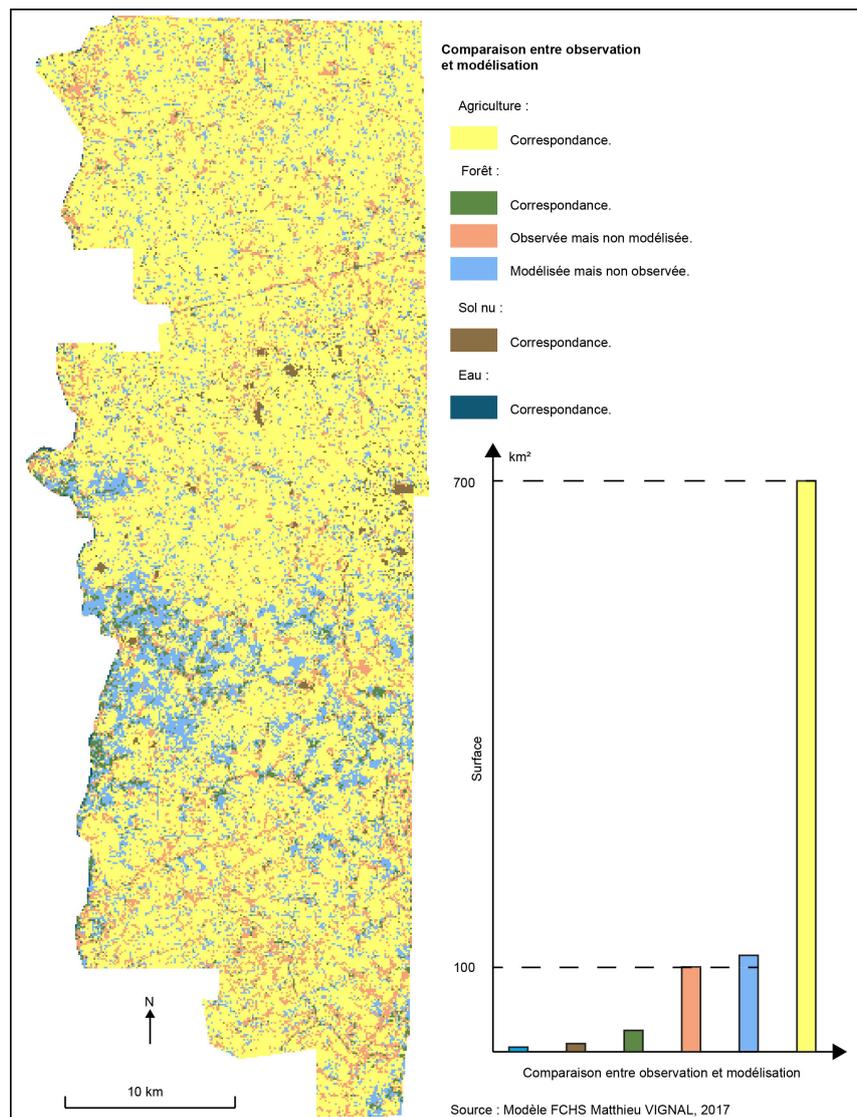


Figure 4: Comparaison entre les zones agricoles observées et celles modélisées dans la FCHS en 2016.

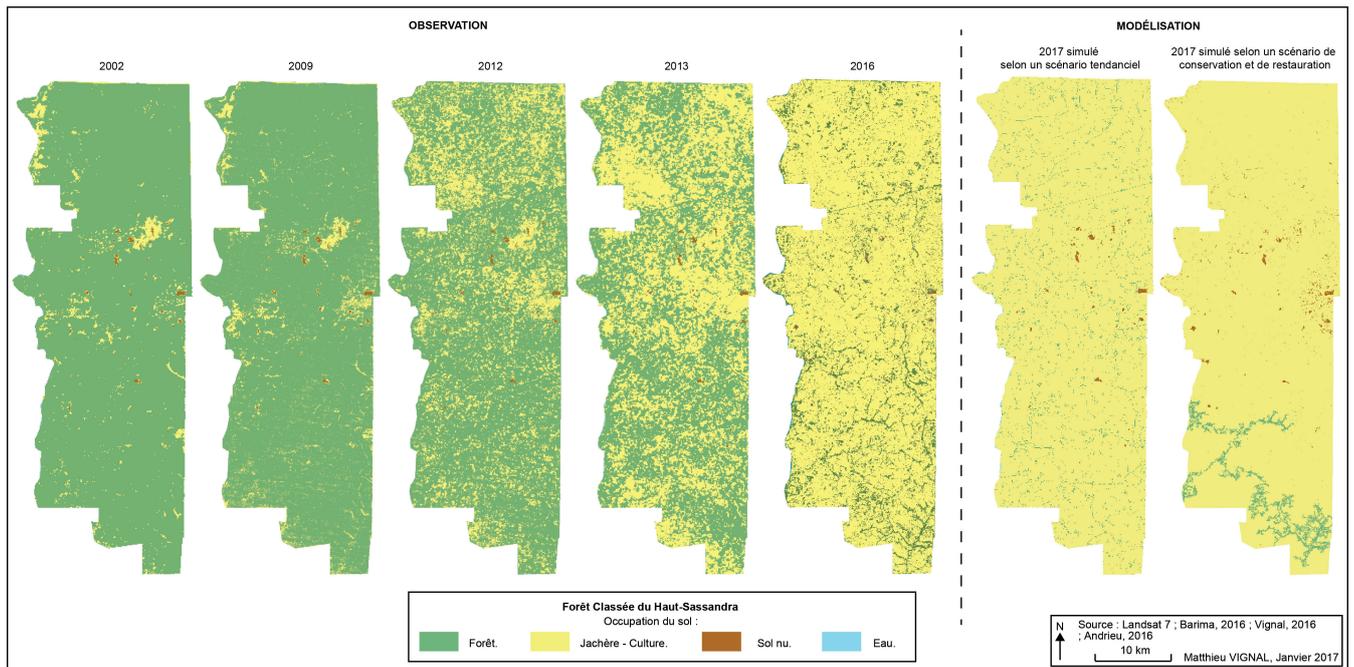


Figure 5: Évolution du paysage de la FCHS entre 2002 et 2016, et mise en avant des scénarios établis dans cette étude.

Tableau 3

Comparaison entre la simulation à l'horizon 2016 et la prospective à l'horizon 2017.

Informations	Simulation décembre 2016	Simulation décembre 2017
Cultures	84,60%	95,60%
Cultures sous couvert arboré	13,00%	2,00%
Forêt	2,00%	2,00%
Sol nu	0,30%	0,30%
Eau	0,10%	0,10%
Population dans la FCHS	60 000	74 000
Exploitation dans la FCHS	21 000	25 000
Taille minimale d'une exploitation	1	1
Taille maximale d'une exploitation	22	22
Taille moyenne d'une exploitation	4,4	4,4
Population minimale d'une exploitation	1	1
Population maximale d'une exploitation	5	5
Population moyenne d'une exploitation	3	3,2
Villages	46	58

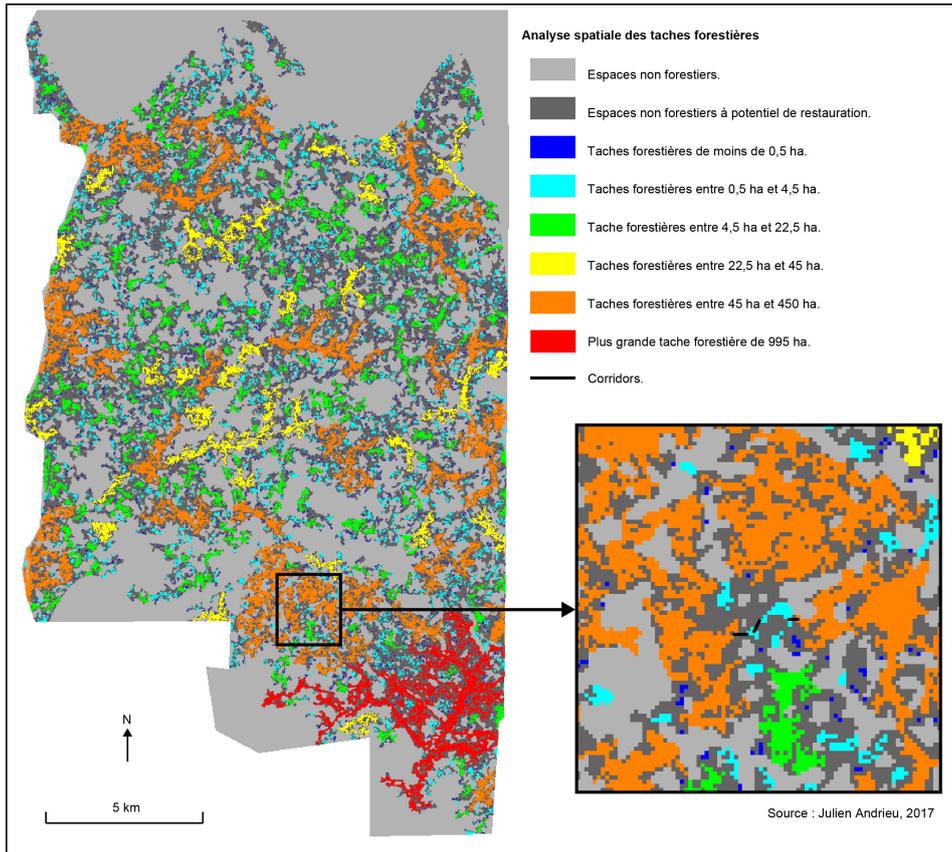


Figure 6: Taille et potentielle de connexité des taches en 2016.

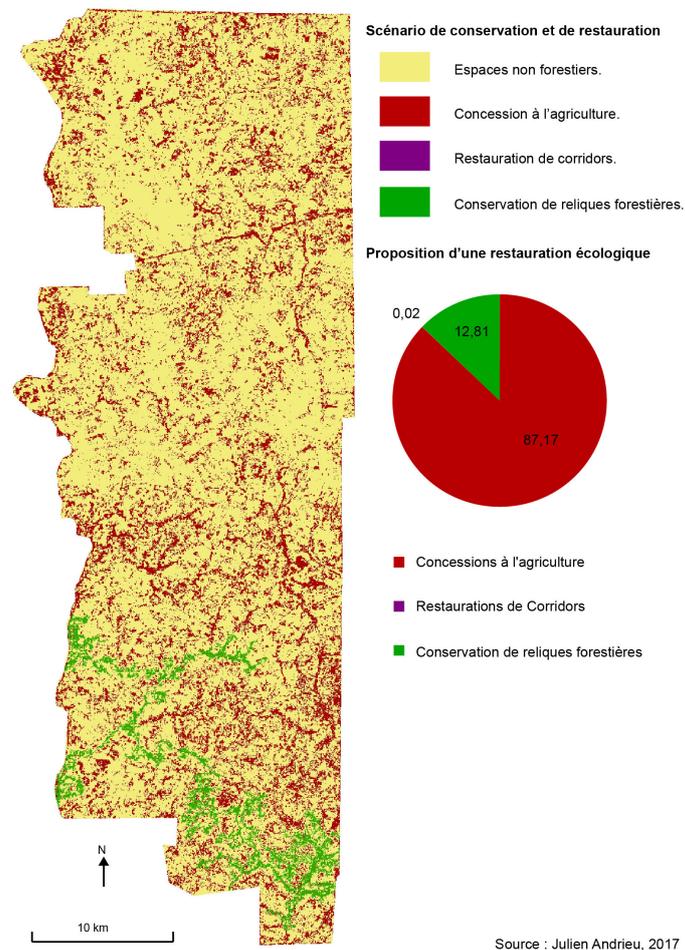


Figure 7: Cartographie d'un scénario de conservation et de restauration de 12,8% de ce qui est encore en forêt en décembre 2016.

Cet axe est lui-même presque connexe à un axe perpendiculaire, en pas japonais, partant du fleuve (plus au sud) vers le nord-est (Figure 6). Il suffirait de 29 petits corridors dont la superficie totale serait de 4,77 ha (chaque corridor faisant entre 0,09 et 0,72 ha) pour reconstituer la connexité d'une sélection de grandes taches reliées entre elles dans le sud de la FCHS. La tache ainsi produite constituerait 2 778 ha, soit 2,9% de la forêt Classée du Haut Sassandra, et 12,8% de ce qui est encore en forêt en décembre 2016 (Figure 7). En effet, les 18 872 ha (87,2%) qui ne sont pas ici proposés à la conservation pourraient encore être concédés à l'agriculture au nom de la sécurité alimentaire. Les superficies à replanter, de 4,77 ha, correspondent à 0,005% de la FCHS et à 0,025% de ce qui est encore en forêt en 2016 mais qui serait concédé à l'agriculture. Il serait peut-être possible, plutôt que des plantations, d'envisager de transplanter les individus sur pieds mais menacés des espèces endémiques ou protégées.

Discussion

Ce projet de modélisation, débuté en 2013, servait à tester des hypothèses sur les populations infiltrées et les jeux d'acteurs que ces infiltrations avaient générés. À cette époque, la superficie forestière justifiait encore la réflexion sur les scénarios de conservation et sur les possibles avènements de la FCHS. L'inertie de la science et celle des acteurs Ivoiriens de la conservation de la forêt, face à la rapidité de ce défrichement ont rendu obsolète, à la fin de 2016, l'approche en scénarios. Ainsi, pour conclure cette étude, le modèle n'a-t-il servi qu'à annoncer une date de la disparition totale de la forêt qui est probablement assez exacte étant donné que seule une année est à simuler. Nous avons intégré, dans le modèle, une inertie de 3 ans entre le début de la plantation de cacao et la disparition de la canopée, ainsi, nous avons modélisé que 13% des zones cartographiées en forêt en 2016 sont déjà des plantations sous couvert arboré.

Face à une telle prévision, le scénario d'une protection et d'une restauration prend une allure particulièrement utopique. En effet, rien dans les dynamiques sociales et territoriales ne donne la moindre crédibilité à ce scénario. Cependant, en présentant une méthode de sélection de taches forestières à conserver et de définitions de potentiels corridors à restaurer nous avons voulu offrir la possibilité d'illustration de méthodes de planifications d'urgence puisque c'est souvent à ce stade d'urgence que les décisions politiques en faveur de l'écologie sont prises.

En outre, il est vrai que, si l'on reste dans le carcan conceptuel d'une dichotomie agriculture/forêt, la forêt est en effet condamnée. Cependant, la planification

d'un paysage agroforestier où l'activité agricole s'insérerait harmonieusement dans une gestion de ce qui reste du couvert arboré est peut-être envisageable dans les zones hydromorphes du sud de la FCHS. Dès lors, ce qui est cartographié comme une continuité écologique pourrait avoir une valeur de planification, non de conservation de la forêt mais de création d'une trame agroforestière assurant quelques services écosystémiques et hébergeant quelques espèces menacées par la récente et rapide déforestation. Il reste à préciser que parler ici de continuité écologique n'est valable qu'à l'échelle locale puisque les connexions aux autres régions forestières voisines ne sont pas étudiées.

Il faut également préciser que les estimations démographiques annoncées dans cette étude sont dépendantes des caractéristiques des exploitations, notamment de leurs tailles et de leurs capacités d'accueil. Dès lors, ces estimations doivent être nuancées au regard de deux éléments.

Premièrement, les caractéristiques des exploitations implémentées dans ce modèle sont issues des résultats de l'enquête de Zerbo et Hema (30), qui n'est pas propre aux installations illégales dans les aires protégées. Or, il est probable que les caractéristiques des exploitations illégales au sein de la forêt classée diffèrent de celles énoncées dans cette enquête. Deuxièmement, plusieurs phases caractérisent les implantations dans la forêt classée, or, dans le modèle, les caractéristiques des exploitations restent stables au cours du temps. Il apparaît probable qu'un changement de phase entraîne une modification des caractéristiques des exploitations. Ces modifications, non simulées dans le modèle, feraient varier les estimations démographiques établies dans cette étude.

Conclusion

Il a été possible de paramétrer un modèle couplant AC et SMA qui simule relativement bien le processus de défrichement qui a eu lieu depuis le début des années 2000 et qui a réduit la FCHS à une couverture boisée de 15% en décembre 2016, laquelle couverture devrait disparaître d'ici à décembre 2017. Face à ce constat, a été présenté, sans fondement social, économique ou politique, un plan de sauvegarde de dernière minute de 3 % de la surface totale de l'aire protégée. Cependant, rien ne nous permet d'espérer une inversion de la tendance ni même un blocage du processus. Aujourd'hui, il s'agit donc de réfléchir, d'une part, sur les potentialités agroforestières de ce territoire et, d'autre part, de tester ce modèle sur d'autres aires protégées pour lesquelles des processus proches ont lieu mais où un espoir de conservation est encore possible.

Références bibliographiques

1. Amani Y. C. & Toure A., 2015, Implantations humaines et dégradation des forêts classées du sud-ouest de la Côte d'Ivoire: cas des Rapides Grah. *Taloha*, **21**, 1- 9.
2. Andrieu J., Barima Y.S.S., Moreno D., Vignal M. & Zerbo R., 2016, *De l'enquête à la modélisation rétro-prospective (2001-2015) de la déforestation de la Forêt Classée du Haut-Sassandra dans un contexte de conflit armé (Côte d'Ivoire)*. Colloque "changements socio-environnementaux et dynamiques rurales en Afrique de l'Ouest" Paris. 4 et 5 juillet 2016.
3. Andrieu J. & Mering C., 2008, Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale ouest-africaine: exemple des Rivières du Sud du delta du Saloum au Rio Geba, *Télédétection Editions Sci.*, **8**, 2, 93-118.
4. Bamba I., Mama A., Neuba D.F.R., Koffi K. J., Traore D., Visser M., Sinsin B., Lejoly J., Bogaert J., 2008, Influence des actions anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas-Congo (R.D. Congo). *Sci. & Nat.*, **5**, 1, 49 – 60.
5. Bamba I., Barima Y.S.S. & Bogaert J., 2010, Influence de la densité de la population sur la structure spatiale d'un paysage forestier dans le bassin du Congo en R. D. Congo, *Trop. Conserv. Sci.*, **3**, 1, 31-44.
6. Banos A., 2013, *Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et SHS, Habilitation à diriger des recherches*, soutenue le 2 décembre 2013, 107p.
7. Barima Y.S.S., Assale A.A.Y., Vignal M., Andrieu J. & Godron M., 2016, Caractérisation post conflits armés des perturbations dans la forêt classée du Haut-Sassandra en Côte d'Ivoire, *Afr. Sci.*, **12**, 6, 66 – 82.
8. Barima Y.S.S., Kouakou A.T.M., Bamba I., Sangne Y.C., Godron M., Andrieu J., Bogaert J., 2016, Cocoa crops are destroying the forest reserves of classified forest of Haut-Sassandra (Ivory Coast), *Global Ecol. Conserv.*, **8**, 85-98.
9. Bouquet C., 2011, *Côte d'Ivoire, le désespoir de Kourouma*, Armand Colin, 336p.
10. Bredeloup S., 2003, La Côte d'Ivoire ou l'étrange destin de l'étranger, *Rev. Eur. Migrations Int.*, **19**, 2, 85-113.
11. Cohen J., 1960, A coefficient of agreement for nominal scales, *Educ. Psychol. Meas.*, **20**, 27-46.
12. Dauphine A. & Voiron-canicio C., 1988. *Variogrammes et structures spatiales*. RECLUS, 56p.
13. Forman R.T.T. & Godron M., 1986, *Landscape ecology*. John Wiley & sons, 640p.
14. Gourmelon F., Houet T., Voiron C., Joliveau T., 2012, La géoprospective, apport des approches spatiales à la prospective, *Espace Géogr.*, **2**, 97 – 98.
15. Guillaumet J.L. & Adjanohoun E., 1971, La végétation de la Côte d'Ivoire in Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire, *Mémoires Orstom*, **50**, 157 - 253.
16. Halle F., 2014, *Eloge de la plante: Pour une nouvelle biologie*. Points Sciences, 346p.
17. Kebe B.I., N'guessan K.F., Tahiri G.M., Assiri A.A., Koko L. K., Kohi N. J., Irie B.Z. & Koffi N., 2009, *Bien cultiver le cacao en Côte d'Ivoire*. Rapport technique, Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), 4p.
18. Kouame N., Tra Bi H.F., Etien D.T. & Traore D., 1998, Végétation et flore de la forêt classée du Haut-Sassandra en Côte d'Ivoire, *Rev. Cames*, **00**, 28-35.
19. Masson-Vincent M. & Dubus N., 2013, *Géogouvernance, utilité sociale de l'analyse spatiale*. Editions Quae, 215p.
20. McGarigal K. & Marks B.J., 1995, *FRAGSTAT: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying landscape structure*. Rapport technique, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR.
21. Nackoney J., Molinario G., Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. & Furuichi T., 2014, Impact of civil conflict on primary forest habitat in northern Democratic Republic of the Congo, 1990-2010, *Biol. Conserv.*, **170**, 321 – 328.
22. Oswald J., Bigot S. & Brou Yao T., 2003, *Evolution géo-historique de la Forêt Classée du Haut-Sassandra (Côte d'Ivoire)*. XII World Forestry Congress, Québec City, Canada, 7p.
23. Oswald J., 2005, *Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000)*, thèse de doctorat de Géographie de l'Université des Sciences et Technologies de Lille soutenue le 10 décembre 2005, 304p.
24. Saint-Julien T., 1985, *La diffusion spatiale des innovations*. RECLUS, 37 p.
25. Sangne C.Y., Barima Y.S.S., Bamba I. & N'Doume C-T.A., 2015, Dynamique forestière post-conflits armés de la Forêt classée du Haut-Sassandra (Côte d'Ivoire). *VertigO*, **15**, 3, 18p.
26. Serra J., 1969, *Introduction à la morphologie mathématique*. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Ecole des Mines de Paris, N° 3, 160p.
27. Voiron-Canicio C., 1995, *Analyse spatiale et analyse d'images*. Reclus, 190p.
28. Voiron-Canicio C., 2006, *Modélisation spatio-morphologique de l'urbanisation du littoral languedocien*, UMR Espace, 15p.
29. Zanh G.G., Barima Y.S.S., Kouakou K.A. & Sangne Y.C., 2016, Usages des produits forestiers non-ligneux selon les communautés riveraines de la forêt classée du Haut-Sassandra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire), *Int. J. Pure App. Biosci.*, **4**, 5, 212 - 225.
30. Zerbo R. & Hema K.B., 2015, La dynamique migratoire des burkinabé en Côte d'Ivoire dans la période de crise politico-militaire de 2000 à 2011: accessibilité aux terres agricoles et les investissements liés à la culture du cacao, *Projet D2PCPCI*, 42

M. Vignal, Français, Doctorant, Université Nice Sophia Antipolis, Université Côte d'Azur, Nice, France.

J. Andrieu, Français, PhD, Enseignant-chercheur, Université Nice Sophia Antipolis, Université Côte d'Azur, Nice, France.