



HAL
open science

Cartographie de l'utilisation du sol à échelle locale à partir des images Google Earth : approche méthodologique appliquée aux terroirs villageois sénégalais

Ibrahima Diédhiou, Catherine Méring, Oumar Sy, Tidiane Sané

► To cite this version:

Ibrahima Diédhiou, Catherine Méring, Oumar Sy, Tidiane Sané. Cartographie de l'utilisation du sol à échelle locale à partir des images Google Earth : approche méthodologique appliquée aux terroirs villageois sénégalais. Photo-Interprétation. European Journal of Applied Remote Sensing (PIEJARS), 2023, 8 (58), pp.5. 10.54695/pi.58.1-4.0005 . halshs-04081547

HAL Id: halshs-04081547

<https://shs.hal.science/halshs-04081547>

Submitted on 27 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cartographie de l'utilisation du sol à échelle locale à partir des images Google Earth :

Approche méthodologique appliquée aux terroirs villageois sénégalais

Ibrahima Diédhiou¹, Catherine Mering², Oumar Sy³, Tidiane Sané³

ibrahima.diedhiou@univ-lorraine.fr, cmering.up7@gmail.com

oumarsy@univ-zig.sn, tsane@univ-zig.sn

¹LOTERR Centre de Recherche en Géographie de l'université de Lorraine

²Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain – UMR 8236, Université Paris Cité

³Laboratoire de Géomatique et d'Environnement – LGE, Université Assane Seck (Ziguinchor)

Résumé :

La télédétection optique demeure l'un des outils les plus performants pour identifier à petite et moyenne échelle, les dynamiques d'occupation et de changements du sol. Cette performance est toutefois limitée, lorsqu'il s'agit d'appréhender des phénomènes à l'échelle locale, là où se produisent essentiellement les interactions à l'origine de la dynamique générale observées à moyenne échelle. C'est cette contrainte que ce travail cherche à dépasser en proposant une approche méthodologique reproductible permettant de caractériser, à partir des images à très haute résolution, à la fois les ligneux selon leur organisation spatiale et les différents usages du sol au sein des terroirs villageois. La procédure développée ici s'appuie essentiellement sur les outils de la Morphologie Mathématique et de la classification non dirigée. Dans une région comme la Sénégambie méridionale la cartographie de l'occupation et des usages du sol par analyse des images issues de Google Earth a permis de dénombrer les ligneux, de calculer leur densité, de mesurer les superficies selon les types d'usage, et leur évolution spatio-temporelle et de mettre ainsi en évidence les pratiques agricoles en cours dans ces terroirs.

Mots clés : *Cartographie automatique, Couvert ligneux, Images Google Earth, Morphologie Mathématique, Occupation du sol, Sénégambie méridionale, Terroirs villageois*

Introduction

L'avènement des globes virtuels comme les produits Google Earth au début des années 2000 a permis de mieux comprendre l'occupation du sol à échelle fine et son évolution spatio-temporelle. Les mosaïques d'images assemblées et fournies par ces globes virtuels permettent désormais d'identifier des objets aux échelles locales. C'est pour cette raison que Genevois et Jouneau-Sion (2008) considèrent ces produits comme prometteurs d'une géographie plus concrète et plus proche des pratiques sociales. Aujourd'hui les informations fournies par les

images Google Earth sont utilisées dans plusieurs domaines tels que la planification urbaine (Malarvizhi et al., 2016, Puissant et Weber, 2003 ; e-geopolis), le suivi de l'environnement (Hudak et al., 2001 ; Munyati et al., 2011 ; Symeonakis et al., 2014 ; San Emeterio et Mering, 2016), l'ingénierie (Qi et al., 2016 ; Liasis et al., 2016), la prévention face aux risques naturels (Ozer, 2014) ou encore le renseignement militaire (Boulangier, 2011), ou civil (Challéat et Larceneux, 2014).

Une méthode de cartographie de l'occupation et des usages du sol à l'échelle des terroirs villageois à l'aide d'images Google Earth est proposée ici. La particularité de cette méthode réside dans sa capacité à mettre en évidence de manière semi-automatique les usages du sol à l'échelle des terroirs villageois. A la différence des approches traditionnelles de cartographie à partir d'images à haute résolution accessibles via les nombreuses plateformes et logiciels, cette méthode d'analyse numérique des images à échelle métrique et infra-métrique permet de produire des cartes à grande échelle des paysages ruraux et de leurs éléments constitutifs.

1. Présentation de la région d'étude

La Sénégambie méridionale, aussi appelée par Dias et Da Silva Horta (2007) « Petite » Sénégambie, est un territoire, d'environ 20 753,27 km² situé entre les bassins des fleuves Casamance et de la Gambie maritime (fig. 1). A l'instar de la plupart des états voisins de l'Afrique de l'Ouest, le Sénégal et la Gambie partagent au-delà de leurs frontières qui font office de rupture, une histoire, une identité, des pratiques, des coutumes et des dialectes communs (Diallo, 2015).

Selon les derniers recensements généraux de la population (datant de 2012 pour le Sénégal et de 2003 pour les quatre divisions de la Gambie), cette région transfrontalière compterait environ 1996550 habitants, soit une densité moyenne d'environ 98 habitants/km².

D'un point de vue climatique, la Sénégambie méridionale appartient au domaine soudanien qui se subdivise en deux blocs nord et sud regroupant chacun deux variantes : littorale et continentale. Ces variantes se caractérisent essentiellement par des différents paramètres climatiques dont la combinaison permet à une zone de s'individualiser grâce notamment à la spécificité de son micro-climat : selon la saison, la mousson alterne avec l'alizé maritime sur le littoral et avec l'harmattan sur le continent. La région est parcourue par un réseau hydrographique dense composé de deux cours d'eau principaux que sont la Casamance et la

Gambie, ainsi que d'innombrables affluents, marigots et bolons¹. Cette densité du réseau hydrographique est rendue possible par un relief dont les altitudes maximales ne dépassent pas les 60 mètres. Parmi la très grande diversité d'espèces ligneuses composant les paysages végétaux de Ségambie, on retiendra l'anacardier, le baobab, le caicedrat, le fromager, le madd, le néré, le palmier à huile, le palmier rônier et le tamarinier. Les principales cultures de terre ferme qui y sont pratiquées sont la riziculture, l'arachide et la culture de céréales telles que le sorgo, et le mil.

Trois terroirs villageois représentatifs de cette région ont été choisis pour cette étude (fig.1).

Il s'agit de :

- Sifoe situé au sud de Serrekunda dans la province occidentale de la Gambie,
- Suel, chef-lieu de commune, situé au nord de Ziguinchor,
- Kandiadiou situé au nord-est de Ziguinchor, à proximité de la frontière sénégalogambienne.

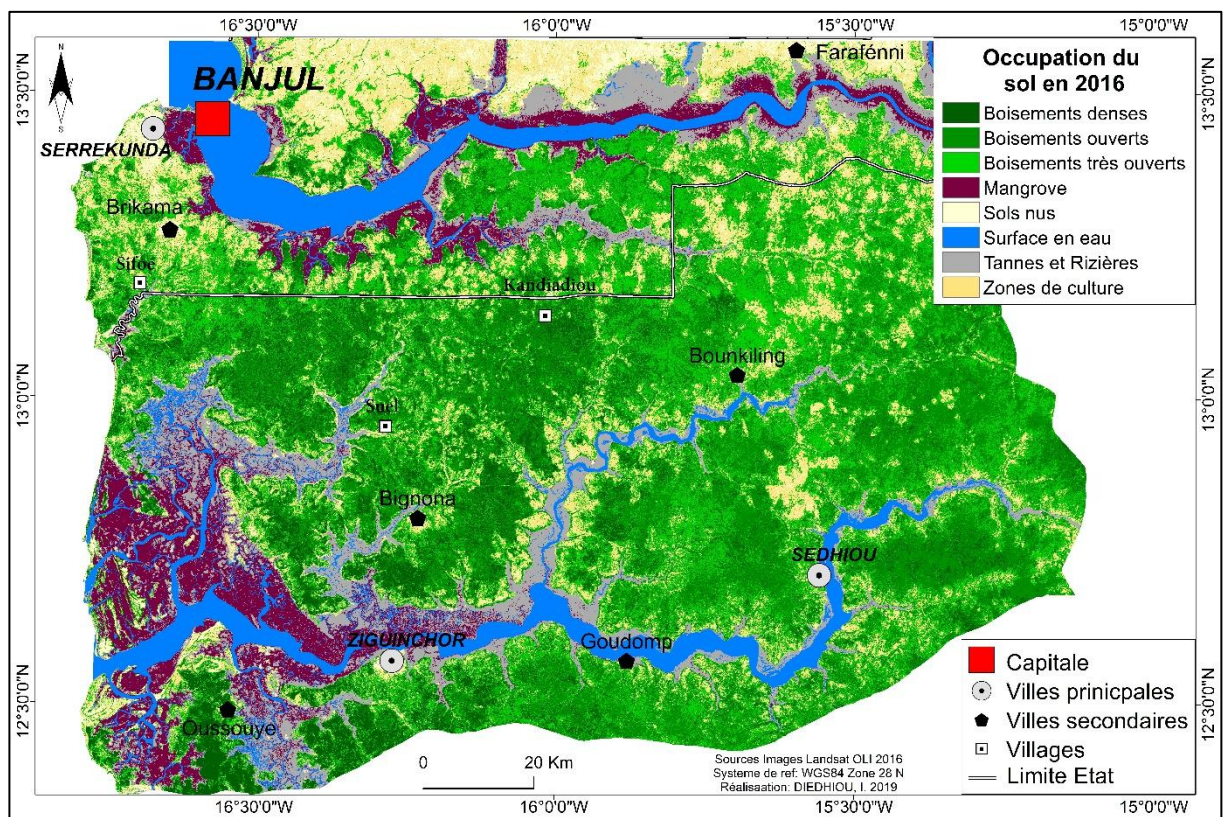


Figure 1: Localisation des terroirs villageois au sein de la Ségambie méridionale sur la carte d'occupation du sol de 2016

¹Chenal d'eau ou petit affluent salé et généralement bordé de mangroves, caractéristique des estuaires du Sénégal et de la Gambie.

2. Données et méthodes

2.1 Données

L'ensemble des données utilisées provient de Google Earth pro. En plus d'être gratuites et facilement accessibles, ces données permettent de s'affranchir des limites de la résolution spatiale des images satellites à accès libre, et de la trop faible précision spatiale des jeux de données portant sur l'occupation et l'utilisation du sol accessibles à ce jour (Pfeifer et al., 2012 ; Jacobson et al., 2015). Pour ces raisons, les images Google Earth ont été utilisées pour connaître dans le détail les modes d'occupation du sol en complément des données de terrain ou pour être comparées avec les photographies aériennes (Boardman, 2016).

Dans le cas présent, ces images sont utilisées pour étudier l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans la partie continentale de la Sénégal méridionale. Or, pour décrire et comprendre une dynamique spatiale, il est indispensable de définir un référentiel qui sans prétendre représenter un état initial absolu est le point de départ des observations, devant permettre d'expliquer les processus à l'origine des changements (Baro et al., 2014, Mathian et al., 2015). De ce point de vue, les images Google Earth ne sont pas différentes des images satellites puisqu'il est désormais possible d'obtenir à partir de la plateforme Google Earth, des images à différentes dates au cours d'une période d'une vingtaine d'années. Les images utilisées ici ont été acquises pour l'essentiel entre 2004 et 2017.

Outre la temporalité, le second paramètre à prendre compte est la qualité des images qui peut être très différente d'un endroit à un autre, d'une entreprise propriétaire des images à une autre. Cette qualité dépend de la distance au sol, qui détermine non seulement l'étendue couverte par la scène mais aussi le niveau de détail détectable au sol. Dans le cas qui nous occupe ici, nous chercherons à détecter les arbres isolés et à les différencier des groupements d'arbres. Une distance trop importante entre l'instrument de détection et le sol ne permettra pas de procéder à une telle identification. De la même manière, une distance trop faible entraînera une diminution de la surface couverte par l'image ce qui peut ne pas correspondre à la dimension d'un terroir villageois. Avec une distance au sol comprise entre 2650m et 2655 m (Tableau 1), des objets tels que les couronnes des arbres sont clairement identifiables par un simple examen visuel de l'image.

Terroirs villageois	Date d'acquisition	Distance au sol	Capteurs
Kandiadiou	10/02/2005	2655 m	CNES-Airbus
	12/07/2017	2655 m	CNES-Airbus
Sifoe	23/12/2004	2655 m	Landsat Copernic NASA

	27/02/2017	2655 m	Landsat Copernic NASA
Suel	11/04/2004	2650 m	Digital Globe
	12/07/2017	2650 m	Digital Globe

Tableau 1: Données utilisées, extraites de Google Earth Pro

Pour Dusseux (2014), les images les mieux adaptées à l'étude des parcelles agricoles dont la superficie moyenne est inférieure à 1 ha sont celles ayant une résolution spatiale comprise entre 5 et 10 m. En effet, avec cette résolution, il est possible de distinguer les arbres isolés, les groupements d'arbres les plantations arboricoles, les espaces cultivés et les sols nus. Dans le cas que nous traitons, la résolution des images est de 10 m ce qui est suffisant pour distinguer les arbres isolés des groupements d'arbres.

2.2 Méthode de cartographie de l'occupation et des usages à l'échelle locale

La méthode élaborée repose sur l'utilisation combinée de plusieurs opérateurs morphologiques avec pour objectif d'extraire toutes les informations utiles à la cartographie de l'occupation et des usages du sol au sein de terroirs agricoles. L'identification des objets et la cartographie passe par des séquences d'analyse d'images visant deux objectifs complémentaires : le premier a été de distinguer les groupements de ligneux selon leur taille et le second a été d'obtenir une segmentation de l'image basée sur la teinte des sols. Chacune de ces séquences repose sur un enchaînement de sous étapes schématisées sur la figure 2, et a été réalisée à l'aide de différents logiciels de traitement d'image : Aphéion 4.3, Idrisi Selva et ArcMap.

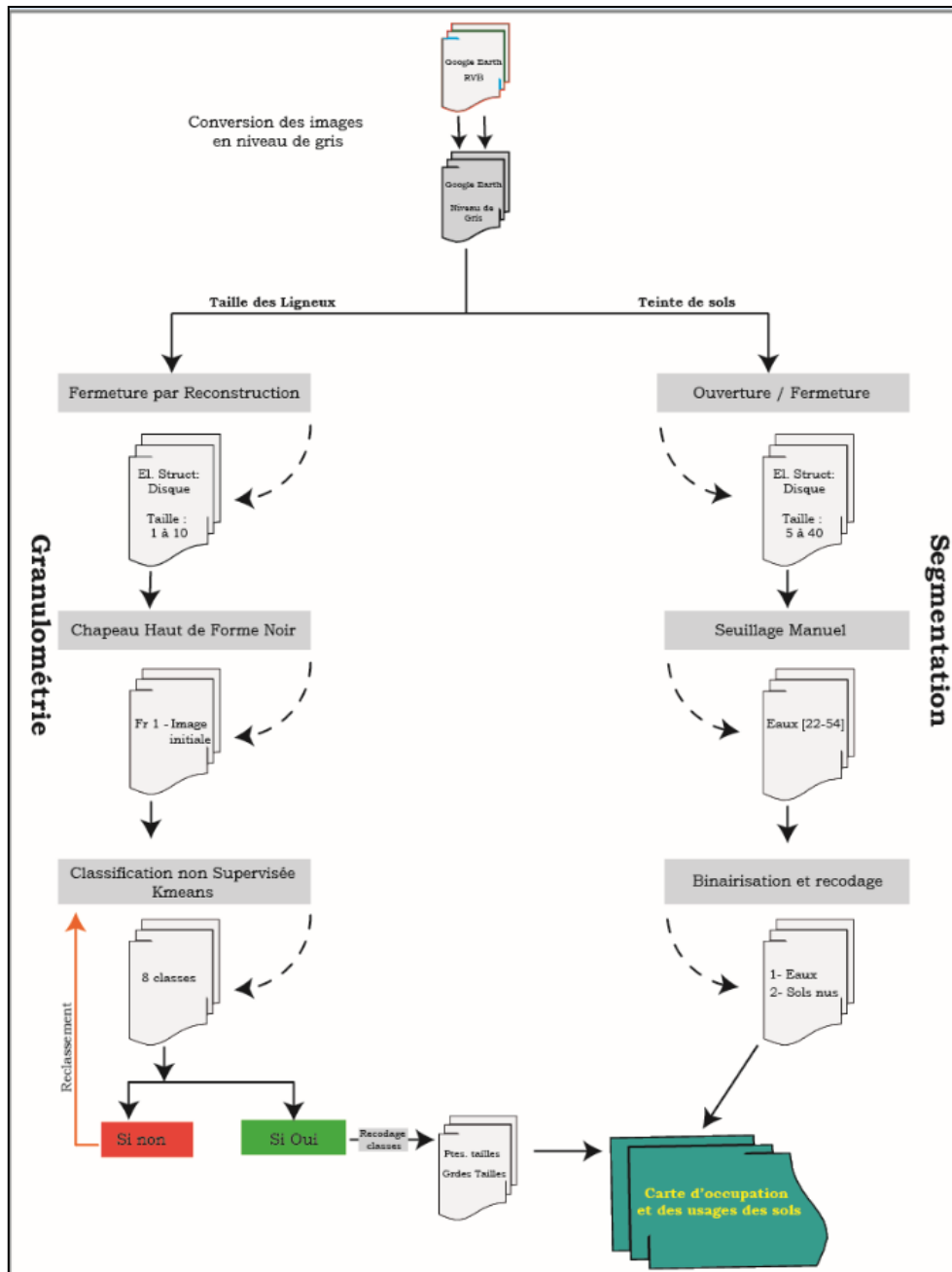


Figure 2: Séquence méthodologique

A. Prétraitements

Les images fournies par Google Earth pro offrent à l'utilisateur plusieurs formats de téléchargement : Couleur, Désaturée et Niveaux de gris. Cependant, lorsque l'on sélectionne l'option « Niveaux de gris », on constate que l'image intègre les trois canaux RGB. Or, les traitements d'images que nous utiliserons s'appliquent exclusivement à des images en niveaux de gris. Aussi avons-nous opéré un premier traitement qui a consisté à transformer l'image RGB (Figure 3) en un seul canal avec une intensité lumineuse allant du noir au blanc. (Figure 4).



Figure 3: Image Google Earth du terroir de Suel en 2017 en couleur RGB



Figure 4 : Image Google Earth du terroir de Suel en 2017 en niveaux de gris

B. Détection des ensembles ligneux selon leur taille

Cette étape repose sur l'analyse granulométrique de l'image, opération qui a pour but de décrire la distribution des objets d'une image en niveaux de gris selon leur taille. L'objectif ici est d'extraire et de regrouper dans des classes bien distinctes, la composante arborée selon le

diamètre des groupements de ligneux. Ces objets correspondent à des taches sombres et de taille variable sur les images (San Emeterio et Mering, 2016).

- L'analyse granulométrique par fermeture

Elle consiste à calculer les *densités granulométriques* d'une image en teintes de gris à partir des différences arithmétiques entre deux images résultant chacune d'une *fermeture par reconstruction* (Mering et al., 2008) à l'aide d'un élément structurant² de taille croissante. En pratique, nous avons réalisé des séries de *fermetures par reconstruction* successives sur l'image initiale à l'aide d'un disque dont le rayon variait de 1 (Figure 5) à 10(Figure 6).



Figure 5 ; Résultat de l'opération de fermeture par reconstruction avec un disque de taille 1 sur l'image GE du terroir villageois de Suel en 2017

²Ici l'élément structurant est de forme circulaire de façon à décrire au mieux l'apparence des houppiers des arbres vus d'en haut.



Figure 6: Résultat de l'opération de fermeture par reconstruction avec un disque de taille 10 sur l'image GE du terroir villageois de Suel en 2017

À chaque rayon λ de l'élément structurant, on fait correspondre une *densité granulométrique* $g_c(\lambda)$ (cf eq. 1)

$$g_c(\lambda) = \frac{(V(f^{B(\lambda+1)}) - V(f^{B(\lambda)}))}{V(f)} \quad (1)$$

Où :

f : est la fonction en teintes de gris de l'image

$V(f)$: est le volume sous le graphe de f

$B(\lambda)$: est un disque de taille λ

$f^{B(\lambda)}$: est la fermeture par reconstruction de f par l'élément structurant $B(\lambda)$

La densité granulométrique $g_c(\lambda)$ correspond donc à l'image en niveau de gris qui résulte de la différence arithmétique entre deux *fermetures par reconstruction* par des disques de taille λ et $\lambda + 1$ (figures 7 et 8).

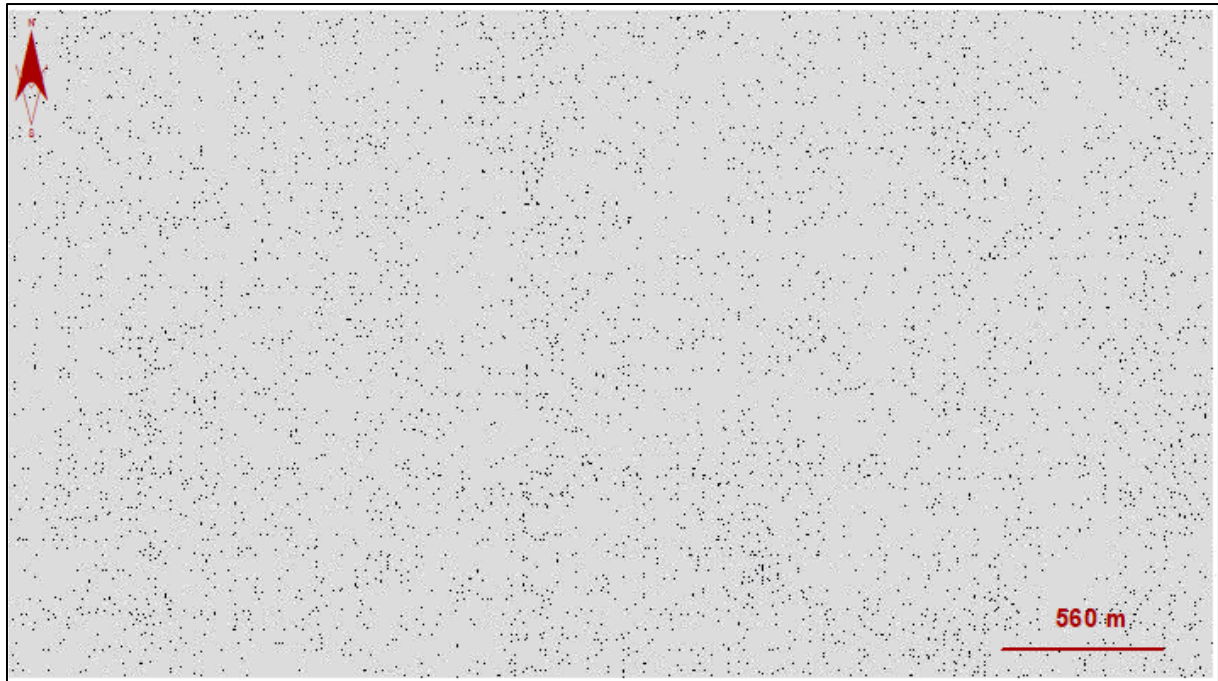


Figure 7: Seuillage de l'image résultant du calcul de la densité granulométrique de taille 1 (soustraction entre la fermeture par reconstruction de taille 1 et l'image GE de Suel 2017)

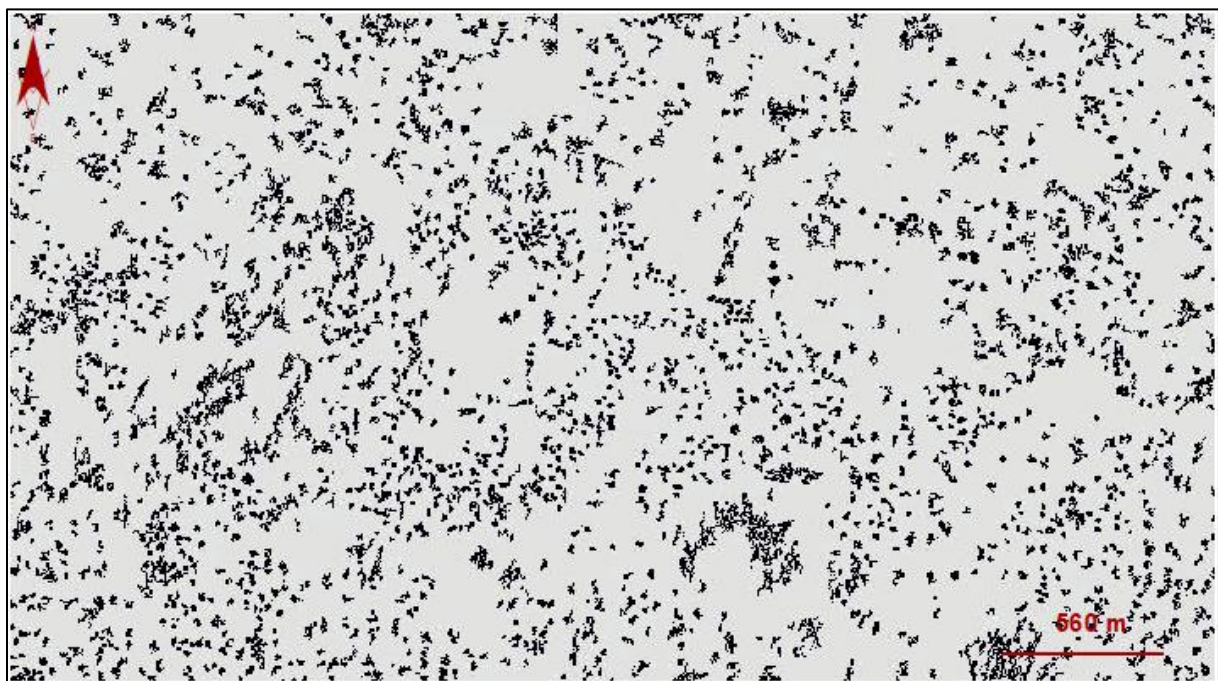


Figure 8 : Seuillage de l'image résultant du calcul de la densité granulométrique de taille 10 à partir

de l'image GE de Suel en 2017 (soustraction entre la fermeture par reconstruction de taille 10 et la fermeture par reconstruction de taille 9)

Cependant, après seuillage des images de densité granulométrique obtenues avec des disques de grande taille, on constate la présence simultanée d'objets de taille différente sur l'image binaire.

Face à la difficulté d'isoler de manière précise les groupements de ligneux selon leur taille à partir d'un simple seuillage des densités granulométriques, une classification automatique de l'ensemble des images en teintes de gris correspondant chacune à une densité granulométrique $g_c(\lambda)$ a été effectuée

- La classification des images de densité granulométrique

Dans ce qui suit, les variables quantitatives G_i caractérisant chaque pixel x de l'image en teintes de gris sont définies par l'équation (2) :

$$\boxed{G_i(x) = gc(i)[x]} \quad (2)$$

Où

$g_c(i)[x]$ est la valeur du pixel x à l'étape i de la séquence des fermetures par reconstruction de l'image.

Si l'on se réfère à l'équation (2), $G_i(x)$ peut être considéré comme la *signature granulométrique* du pixel x .

La seconde étape a consisté à classer les pixels de l'image par la méthode des k -Moyennes. Le résultat est une image classée en k classes où chaque classe regroupe des pixels ayant une signature granulométrique similaire. L'analyse des classes produites par les k -moyennes en fonction des pics granulométriques de chacune des classes a permis d'identifier les groupements de ligneux en fonction de leur taille. C'est dans cette logique que nous avons

réalisé une première classification en 11 classes (fig.9) dont l'identification et la catégorisation repose sur l'analyse des signatures granulométriques (fig. 10).

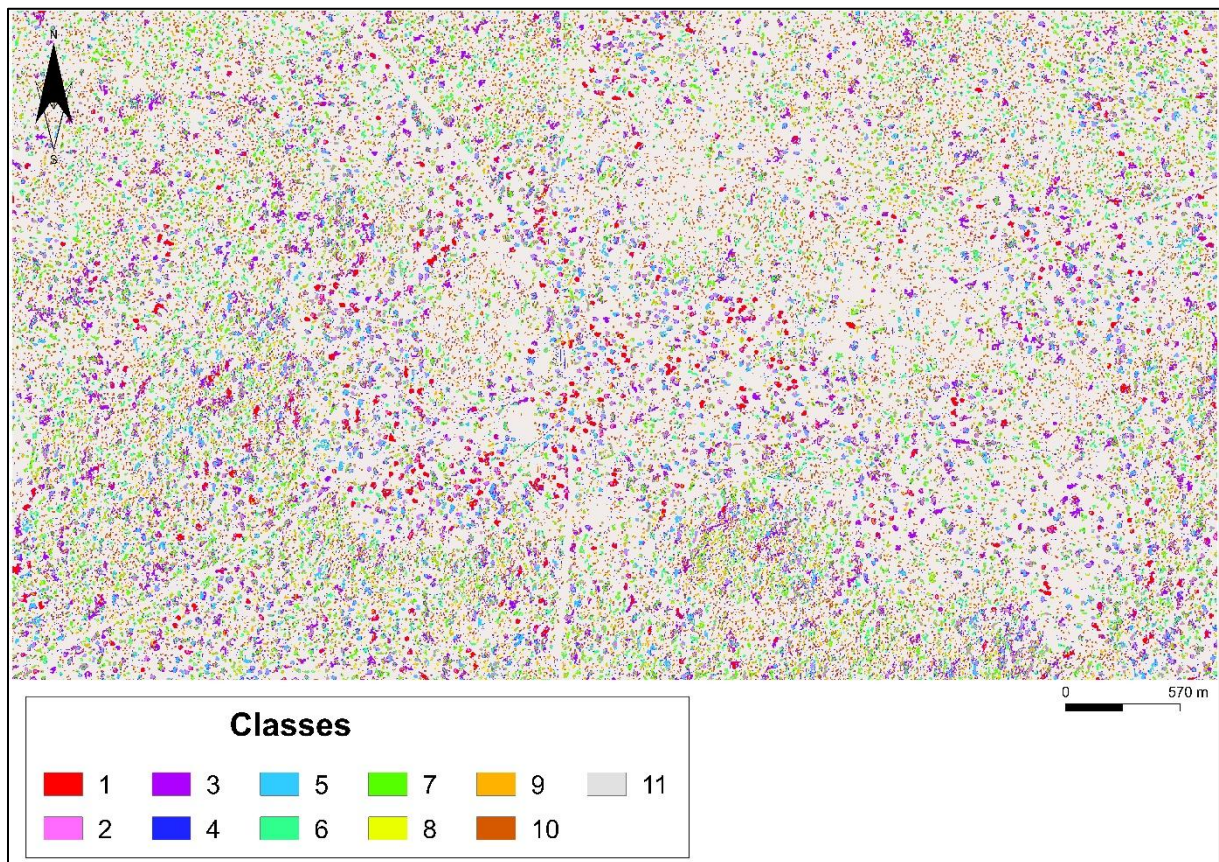


Figure 9 : Classification automatique des images de densité granulométrique

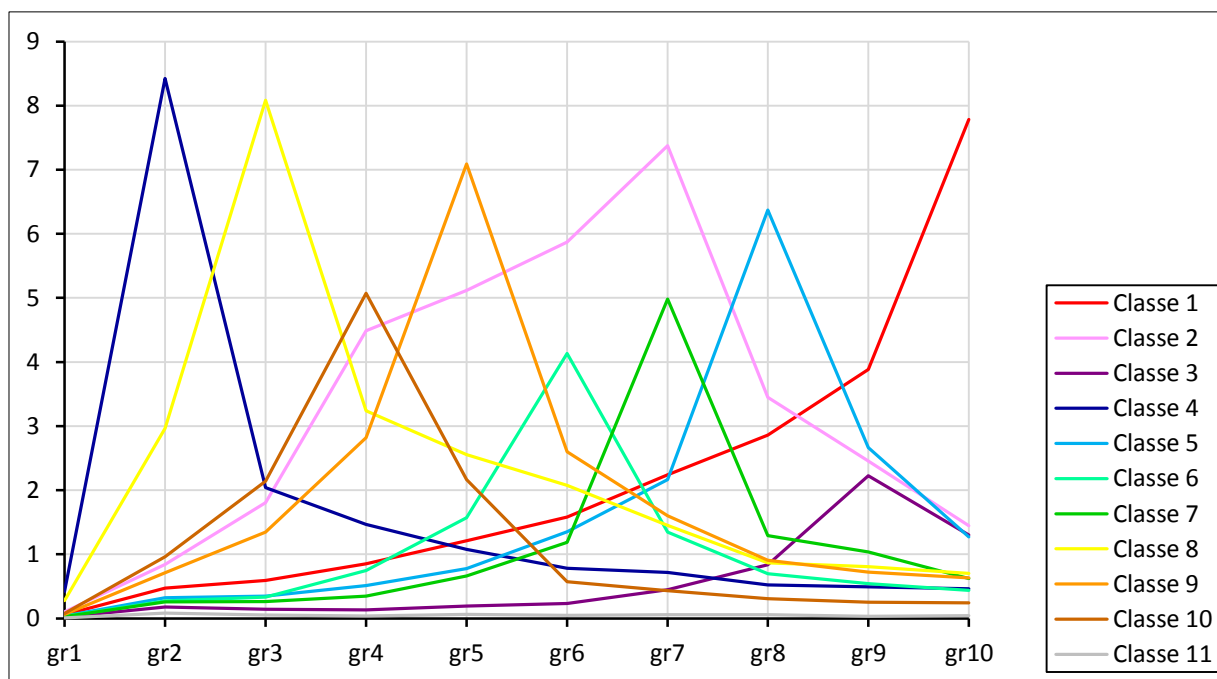


Figure 10 : Signatures granulométriques extraites de la classification automatique des densités granulométriques.

Le principe de l'analyse des signatures granulométrique est simple : un pic indique une taille statistiquement majoritaire des éléments de la classe. Sur la figure 10, en abscisse sont représentées l'amplitude des pics et en ordonnée le rayon de l'élément structurant qui varie de 1 à 10. On remarquera aussi que la classe 11 correspond au fond de l'image plutôt qu'à des objets distincts.

Dans certains cas, il arrive que la signature granulométrique d'une classe soit caractérisée par plus d'un pic. Par exemple dans le cas présent, la signature de la classe 1 comporte quatre pics correspondant à des tailles différentes, l'un de taille 4, de taille 5, de taille 6 et l'autre de taille 7 (fig. 10). Dans ce cas de figure, pour améliorer l'identification de la taille dominante, nous avons isolé la classe correspondante afin de la reclasser à l'aide de la méthode des k-Moyennes

Une fois, les différentes classes clairement identifiées en fonction de leur taille, nous avons fusionné les classes dont la taille de référence était supérieure ou égale à 5 et inférieure à 10, pour former une classe que nous avons associée à la présence de groupements de ligneux, et les classes issues de transformations par des disques de rayon inférieur à 5 à des arbres isolés (fig. 11).

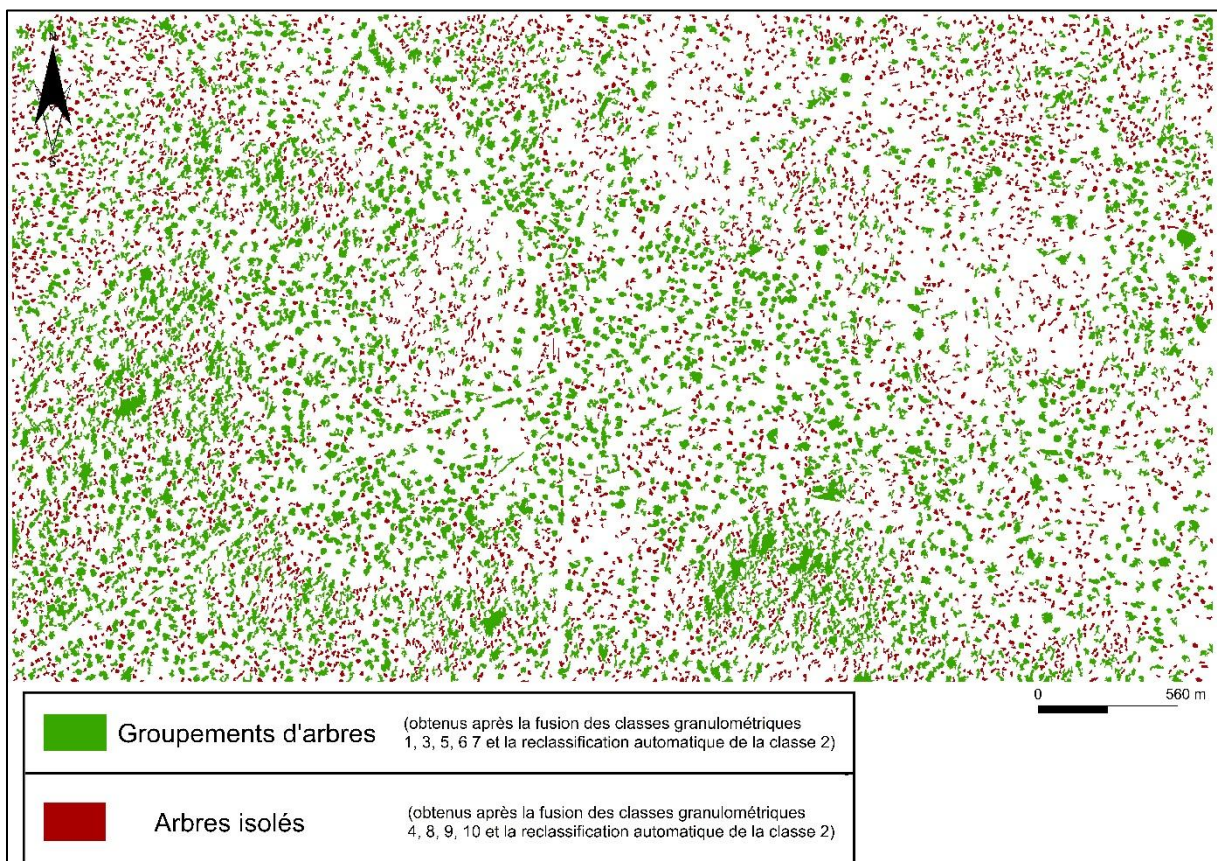


Figure 11: Résultat de la fusion des classes granulométriques en deux classes

La dernière étape du traitement granulométrique consiste à représenter simultanément les arbres isolés et les groupements de ligneux sur un même fond d'image en teinte de gris (fig. 12).

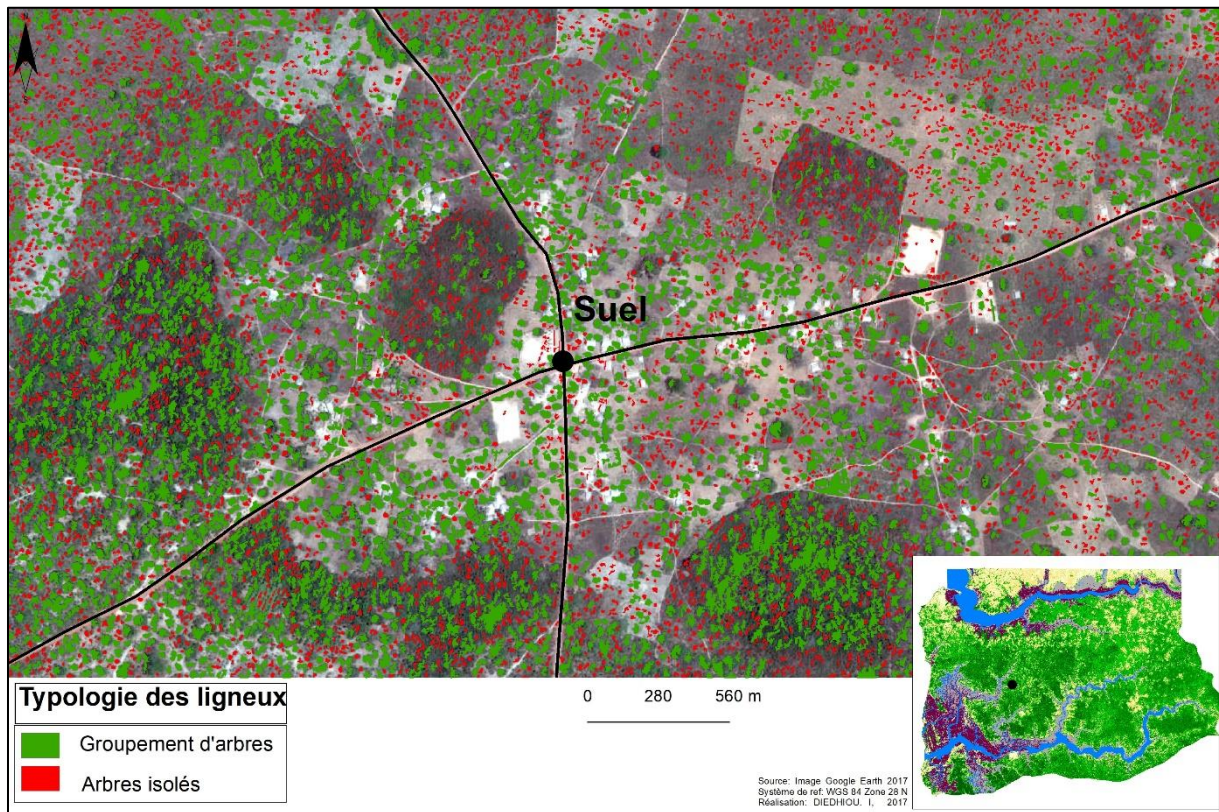


Figure 11 : carte obtenue par superposition de des classes arbres isolés et groupements d'arbres sur l'image GE du terroir de Suel en 2017

C. Identification des usages du sol

Ici le niveau de gris a été choisi comme critère-image pour caractériser les usages du sol. Ce choix repose sur l'idée selon laquelle à chaque teinte de gris correspond un usage du sol bien défini : les sols sombres correspondent aux espaces recouverts de ligneux ou ayant récemment subi des brûlis, les sols gris foncé aux surfaces en jachères ou ayant subi des brûlis dans un passé récent, les sols gris clair aux espaces cultivés et les sols très clairs aux sols nus et au bâti.

La seule information à extraire ici au détriment de toutes les autres informations contenues dans l'image est donc la teinte du sol. Dans la pratique, les détails de l'image Google Earth doivent être gommés de manière à obtenir des surfaces à texture lisse et donc à teinte uniforme. Pour cette opération de lissage il a été fait appel à des filtres morphologiques appelés *Filtres Alternés Séquentiels par Reconstruction (FASR)* qui correspondent à des

séquences où alternent fermetures et ouvertures par reconstruction au moyen d'éléments structurants de taille croissante (Mering et al., 2008).

Les *FASR* lissent l'image en supprimant progressivement les détails de l'image, qu'ils soient sombres ou clairs, au fur et à mesure que la taille du disque augmente : l'ouverture par reconstruction, va gommer les « maximas » c'est-à-dire les détails les plus clairs tout en préservant les minimas, correspondant aux détails les plus sombres qui seront, eux, gommés par la fermeture par reconstruction. A chaque étape, on fait croître la taille de l'élément structurant qui est un disque dont le rayon varie de 5 (figure 13) à 45 (figure 14).

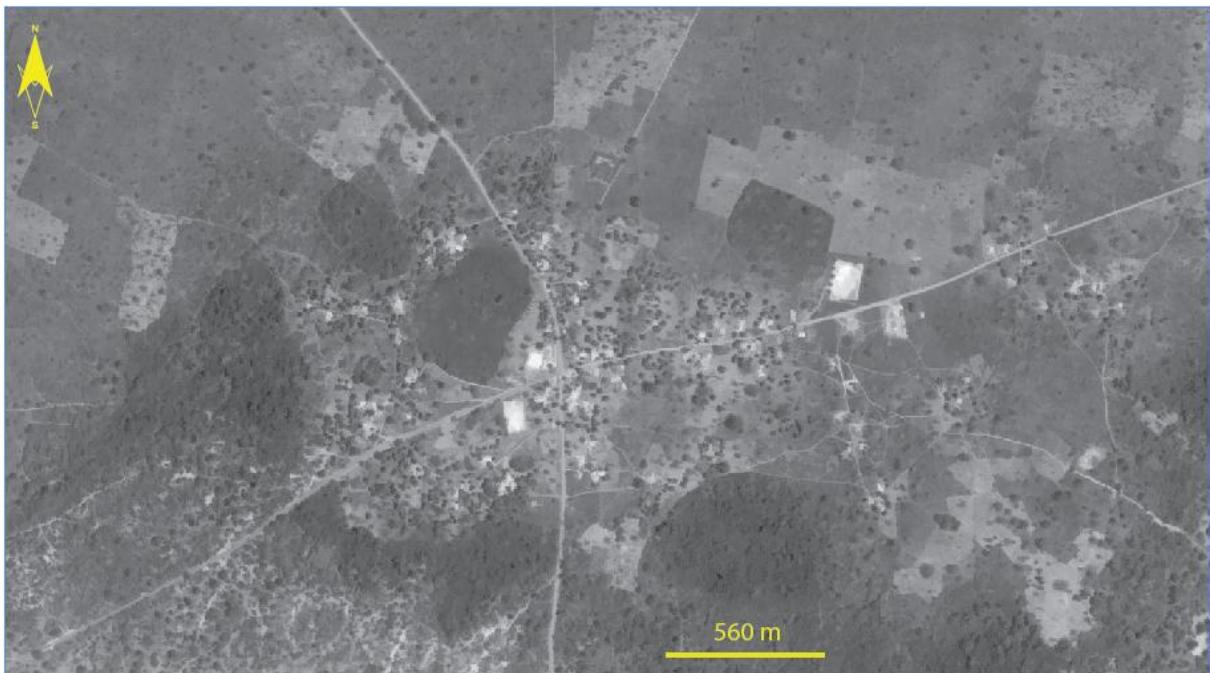


Figure 12 : Résultat de l'ASF par Reconstruction avec un disque de rayon 5 sur l'image GE de Suel en 2017

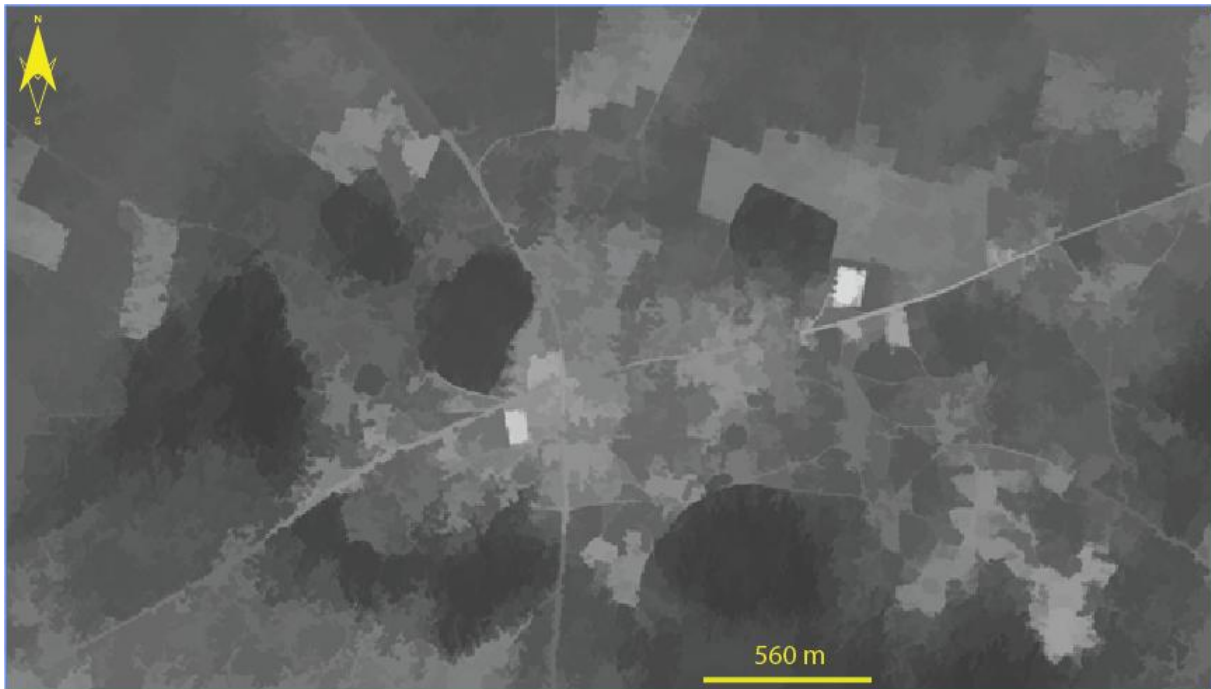


Figure 13 : Résultat de l'ASF par Reconstruction avec un disque de rayon 45 à partir de l'image GE de Suel en 2017

- Segmentation de l'image par seuillage des niveaux de gris

Pour identifier les usages du sol, nous avons adopté un seuillage manuel des niveaux de gris des images visant à obtenir des classes d'usage des sols telles qu'elles ont été définies précédemment.: les sols très sombres, les sols sombres, les sols intermédiaires, les sols clairs et les sols très clairs(cf tableau2).

Suel 2004		Suel 2017	
Classes	Plages de Valeurs des pixels	Classes	Plages de Valeurs des pixels
Sols très sombres	[50 86]	Sols très sombres	[5974]
Sols sombres	[87109]	Sols sombres	[7594]
Sols intermédiaires	[110 128]	Sols intermédiaires	[95 101]
Sols clairs	[129 165]	Sols clairs	[102 144]
Sols très clairs	[166193]	Sols très clairs	[145 216]

Tableau 1: Classes de seuillage sur l'image GE de Suel en 2017

Pour chaque classe, on définit manuellement un intervalle fermé de valeurs minimales et maximales. Avec cette méthode de discrétisation, les pixels sont codés numériquement et associés à une classe dès que la valeur est à la fois, supérieure à Val 1 et inférieure à Val 2. Dans le cas contraire on lui attribue la valeur 0. L'objectif n'est pas de créer des classes

d'amplitude égales mais plutôt des classes de teintes de gris qui pourront être associées aux différents usages du sol rencontrés au sein des terroirs.

Dans une dernière étape, nous avons additionné l'ensemble des images binaires résultant des seuillages opérés précédemment pour obtenir la carte des teintes du sol (fig. 15).

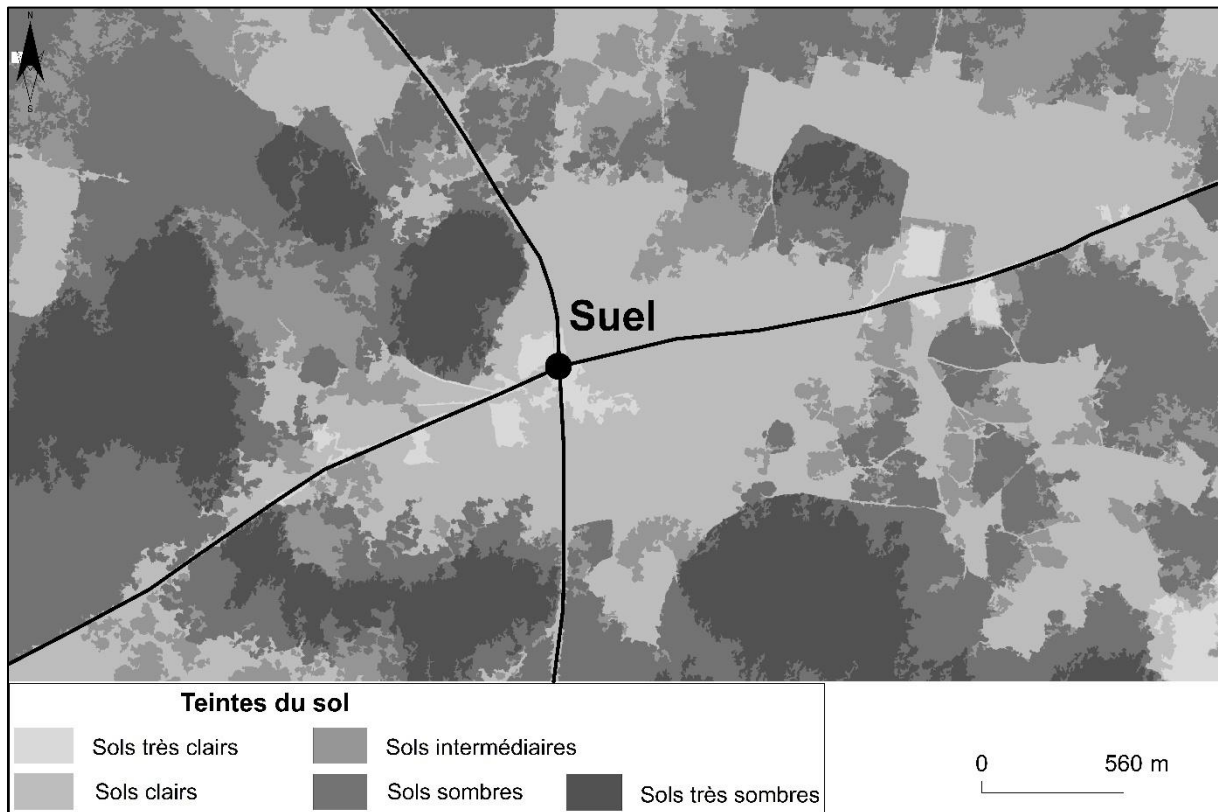


Figure 14 : Carte des teintes du sol réalisée à partir de l'image GE de Suel en 2017

- Comment passer de la teinte aux usages des sols ?

La réponse à cette question se trouve dans l'hypothèse selon laquelle chaque teinte de gris correspond à un usage du sol. Ainsi, les sols très clairs sont associés aux sols nus ou au bâti. En effet, ces sols sont plus clairs que ceux mis en culture où le résidu agricole d'après récolte ou l'humus rendent ces sols plus foncés que les sols totalement dénudés. Les sols d'un gris intermédiaire correspondent aux jachères où l'arrêt temporaire de la pratique agricole a permis le développement d'un tapis herbacé et arbustif, ce qui a pour effet de rendre ces sols plus sombres que ceux qui sont défrichés et cultivés en permanence. De façon générale, la tonalité des sols dépend en grande partie de l'importance de la couverture végétale. Ainsi c'est au sein des espaces forestiers que les teintes de gris sont les plus sombres en raison de la densité de la couverture végétale qui recouvre les sols (tableau 3).

Teintes de gris		Usages du sol
Sols très clairs	→	Sols nus,-bâti
Sols clairs	→	Zones de cultures
Sols intermédiaires	→	Jachères
Sols sombres	→	Savanes/ brousses
Sols très sombres	→	Espaces forestiers

Tableau 2: Correspondance entre teintes de gris et usages du sol

Une fois la carte des usages réalisée (fig. 16), nous l'avons superposée à celle de l'organisation spatiale des ligneux (fig. 12) au sein d'un Système d'Information Géographique pour produire une première carte d'occupation du sol (fig. 17).

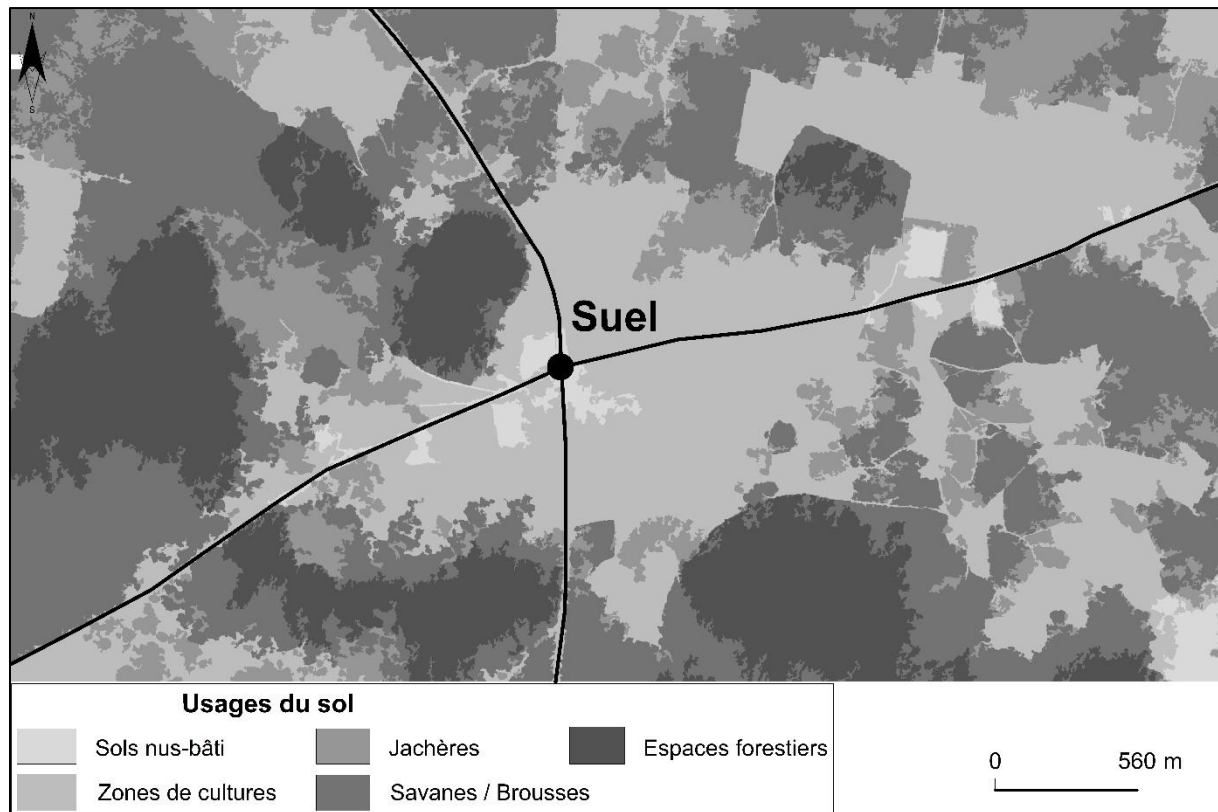


Figure 15: Carte des usages du sol, Suel 2017

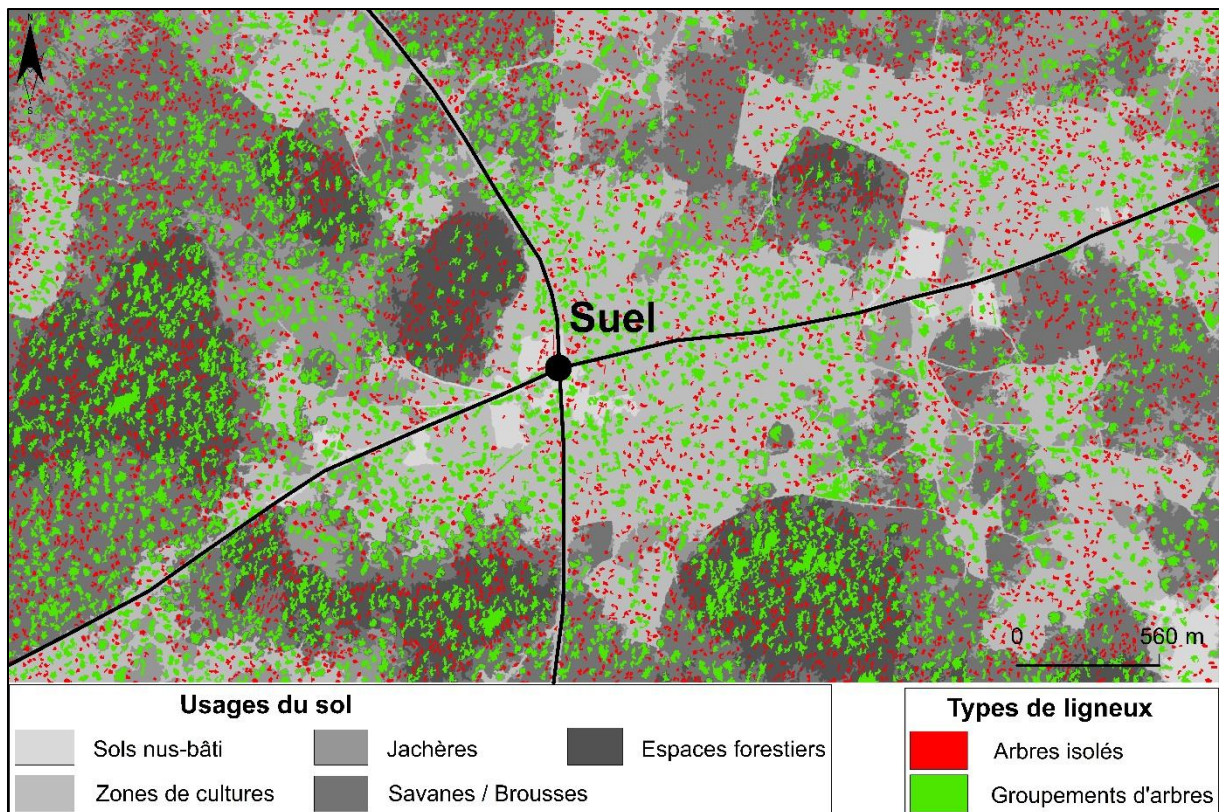


Figure 16 : Représentation graphique de l'occupation et des usages du sol, Suel 2017

Si elle constitue un premier aperçu de l'occupation sol au sein du terroir étudié, l'image présentée en figure 17 ne permet cependant pas de générer des statistiques indispensables à la quantification des surfaces d'occupation du sol. Or une telle quantification est indispensable non seulement pour comprendre la dynamique d'évolution des terroirs villageois mais aussi l'organisation spatiale des arbres au sein des différentes catégories d'occupation du sol. Pour y parvenir, nous avons procédé à une opération visant à croiser les informations contenues dans les images produites aux étapes précédentes

- *D. Organisation spatiale des ligneux en fonction de l'usage des sols*

Cette étape est obtenue par croisement numérique de l'image des usages du sol (cf.fig. 16) avec celle des classes d'organisation spatiale des ligneux (cf.fig. 11). En pratique, nous avons multiplié l'image des usages du sol (qui comporte 5 classes) par 10 avant de l'additionner à celle de l'organisation spatiale des ligneux (qui comporte 2 classes).

Carte des usages du sol		Carte des ligneux	
1	Sols nus	1	Arbres isolés
2	Zones de cultures		
3	Jachères		
4	Savanes/ brousses	2	Groupements d'arbres
5	Espaces forestiers		

Tableau 3: Système de codage de l'image des usages du sol et de celle de l'organisation spatiale des ligneux

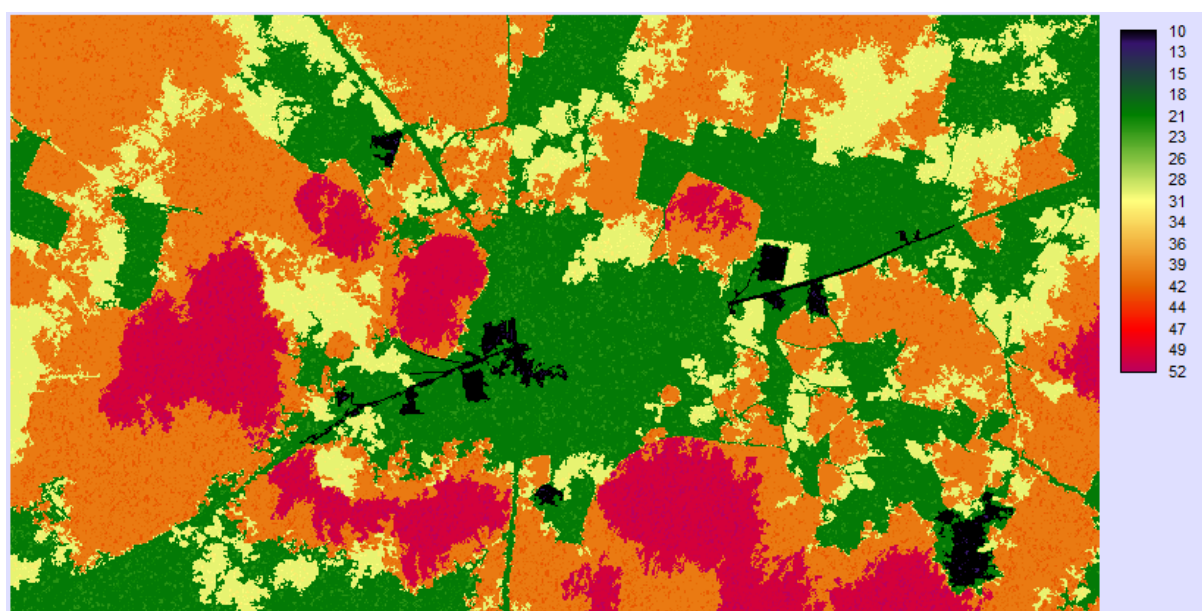


Figure 17: Image résultant du croisement numérique entre l'image des usages du sol et l'image de l'organisation spatiale des ligneux. Suel 2017

Sur la figure 18, les couleurs permettent seulement d'identifier les classes d'occupation du sol, mais les valeurs des pixels indiquent également les classes du couvert ligneux. Compte tenu du système de de codage adopté, (tableau 4) les valeurs numériques des pixels de l'image résultante (de 10 à 52, cf fig. 18)) sont à lire comme suit : le chiffre des dizaines indique la classe de l'usage des sols (de 1 à 5) et celui des unités indique la catégorie de l'organisation spatiale des ligneux (de 0 à 2) imbriquée spatialement dans la classe d'usage du sol correspondante.

À titre d'exemple, (tableau 5), la valeur 10 correspond à la classe des sols nus sans arbres tandis que les classes 11 et 12 renvoient à la présence d'arbres isolés (resp. de groupements d'arbres) au sein de la classe des sols nus.

L'histogramme numérique des valeurs de l'image résultant de cette opération (cf tableau 5) permet non seulement d'identifier les combinaisons existantes entre les deux partitions (usage du sol et organisation spatiale des ligneux) mais également de quantifier les surfaces associées à chaque catégorie issue du croisement.

Code classe	Occurrence de la classe	Interprétation
10	304448	Sols nus
11	8418	Arbres isolés sur sols nus
12	3562	Groupements d'arbres sur sols nus
20	5652980	Zones de culture
21	258257	Arbres isolés sur zones de culture
22	357433	Groupements d'arbres sur zones de culture
30	2923516	Jachères
31	169059	Arbres isolés sur jachères
32	195957	Groupements d'arbres sur jachères
40	6588247	Savanes et brousses
41	505575	Arbres isolés sur savanes et brousses
42	538879	Groupements d'arbres sur savanes et brousses
50	1943068	Espaces boisés
51	254900	Arbres isolés sur espaces boisés
52	245701	Groupements d'arbres sur espaces boisés

Tableau 5: Histogramme des valeurs de l'image résultant du croisement entre la carte d'usages des sols et celle de l'organisation spatiale des ligneux et interprétation thématique des codes numériques

3. Résultats

3.1 Evolution de l'occupation du sol entre 2004 et 2017 au sein de trois terroirs villageois de Sénégal

- *Le cas de Suel (Sénégal)*

En 2017 à Suel, les espaces boisés dominent les paysages ruraux avec 612 hectares soit 48 % des terres rurales et ce malgré leur apparence fragmentée, comme c'est le cas dans la partie nord est et ouest du terroir. Ce type d'espaces côtoie par endroits les zones de cultures, dispersées mais désormais plus étendues au sein du terroir avec des superficies qui sont passées de 348 hectares à 474 hectares soit une hausse de +10% (Planche 1). Les jachères sont la catégorie d'occupation du sol qui a le plus régressé avec un recul de l'ordre de -7% comme on peut le constater en particulier dans la partie nord-ouest et nord du terroir (Tableau 6).

Catégorie d'occupation du sol	2004		2017		Évolution	Typologie	2004		2017		Évolution
	Ha	%	Ha	%			Abs.	%	Abs.	%	
Zones de cultures et sols nus	348	27	474	37	10	Arbres isolés	1498	18	2582	31	13
						Groupements d'arbres	1534	19	1337	16	-3
Jachères	279	22	197	15	-7	Arbres isolés	1014	12	1108	13	1
						Groupements d'arbres	772	9	658	8	-1
Brousses, Savanes, Forêts	656	51	612	48	-3	Arbres isolés	2116	26	1594	19	-7
						Groupements d'arbres	1325	19	1038	12	-7

Total	1283	100	1283	100
-------	------	-----	------	-----

8259	100	8317	100
------	-----	------	-----

Tableau 6: Evolution de l'occupation du sol à Suel entre 2004 et 2017

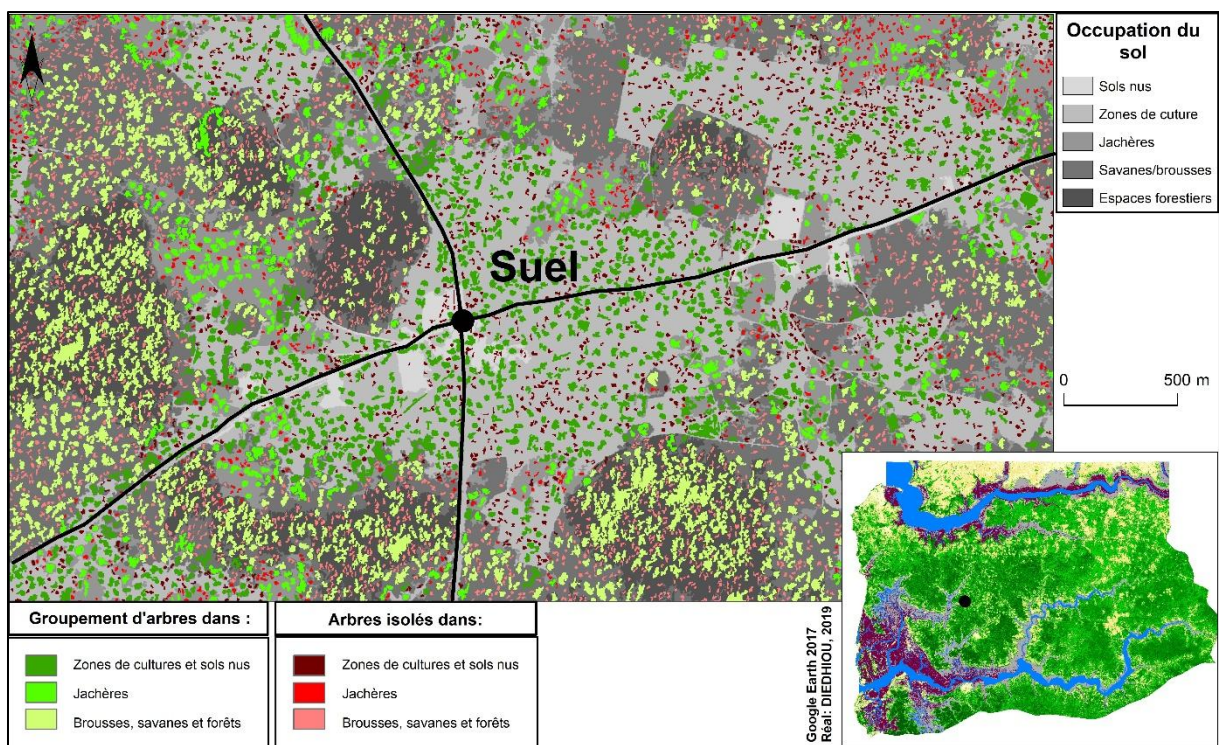
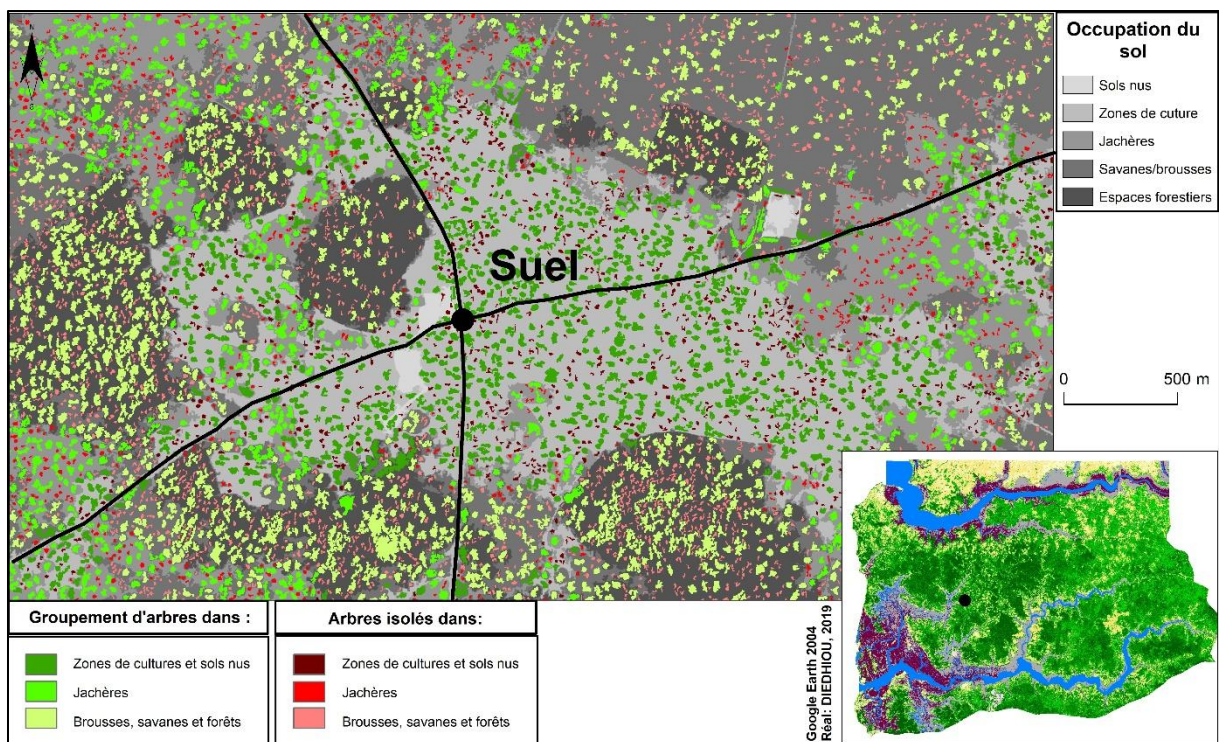


Planche 1: Évolution de l'occupation du sol à Suel entre 2004 (carte d'en haut) et 2017 (carte d'en bas)

- Le cas de Kandiadiou (Sénégal)

En dépit d'une perte de surface (-4%), les espaces boisés dominent toujours en 2017 au sein du terroir. Comme en 2004, ces espaces couvrent presque tout le terroir villageois à l'exception du sud-ouest, du centre et du nord est qui sont davantage occupés par les zones de

cultures, les sols nus et les jachères (Planche 2). Sur les 462 hectares que couvrent ces deux catégories d'occupation du sol, environ 317 hectares sont constitués de zones de cultures et de sols nus soit une progression d'environ +7 % alors que dans le même temps les surfaces des zones en jachère ont reculé de -3%. Si l'activité agricole semble prendre de l'ampleur comme le montre l'augmentation des surfaces emblavées, on retrouve davantage d'arbres isolés que de groupements d'arbres aussi bien au sein des champs que dans les jachères avec respectivement 13% et 8 % de taux de couverture (Tableau 7).

Catégorie d'occupation du sol	2005		2017		Évolution	Typologie	2005		2017		Évolution
	Ha	%	Ha	%			Abs.	%	Abs.	%	
Zones de cultures et les sols nus	235	18	317	25	7	Arbres isolés	619	8	815	13	5
						Groupements d'arbres	514	6	568	9	3
Jachères	181	14	145	11	-3	Arbres isolés	932	12	504	8	-4
						Groupements d'arbres	731	9	344	6	-3
Brousses, Savanes, Forêts	869	68	823	64	-4	Arbres isolés	3259	40	2389	39	-1
						Groupements d'arbres	2005	25	1534	25	0

Total	1285	100	1285	100
-------	------	-----	------	-----

8060	100	6154	100
------	-----	------	-----

Tableau 7: Statistiques d'évolution de l'occupation sol à Kandiadiou entre 2005 et 2017

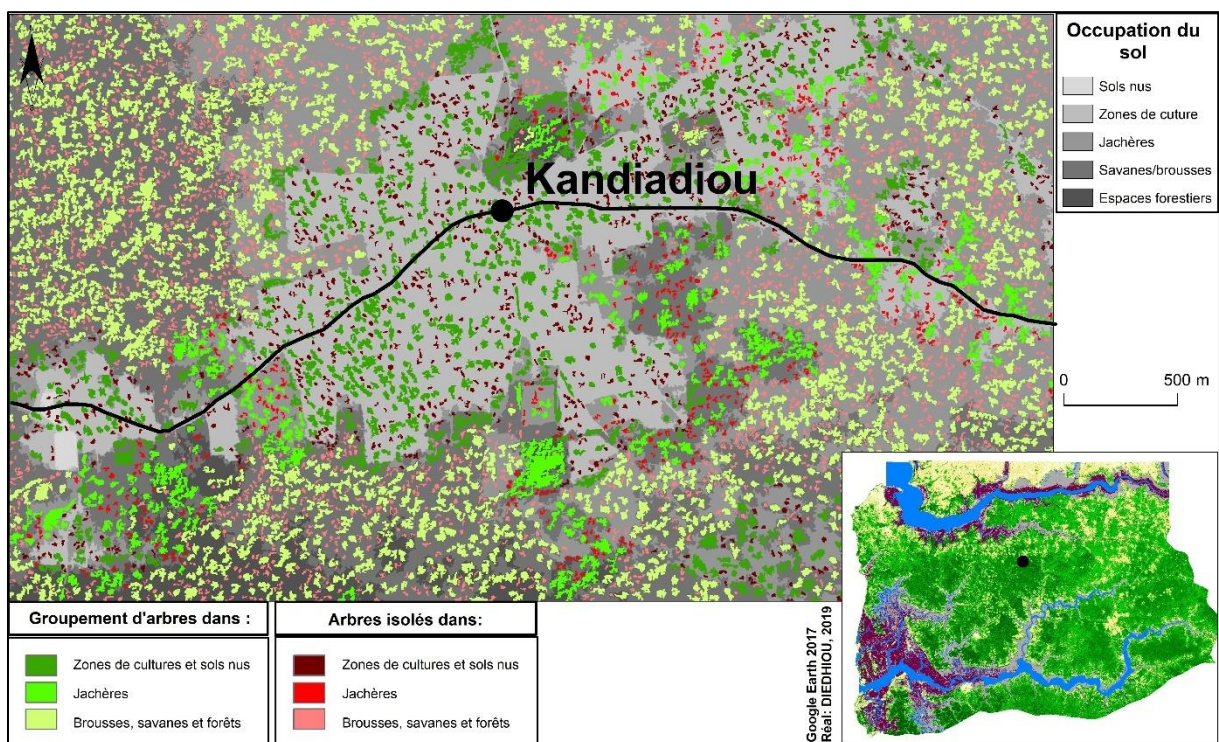
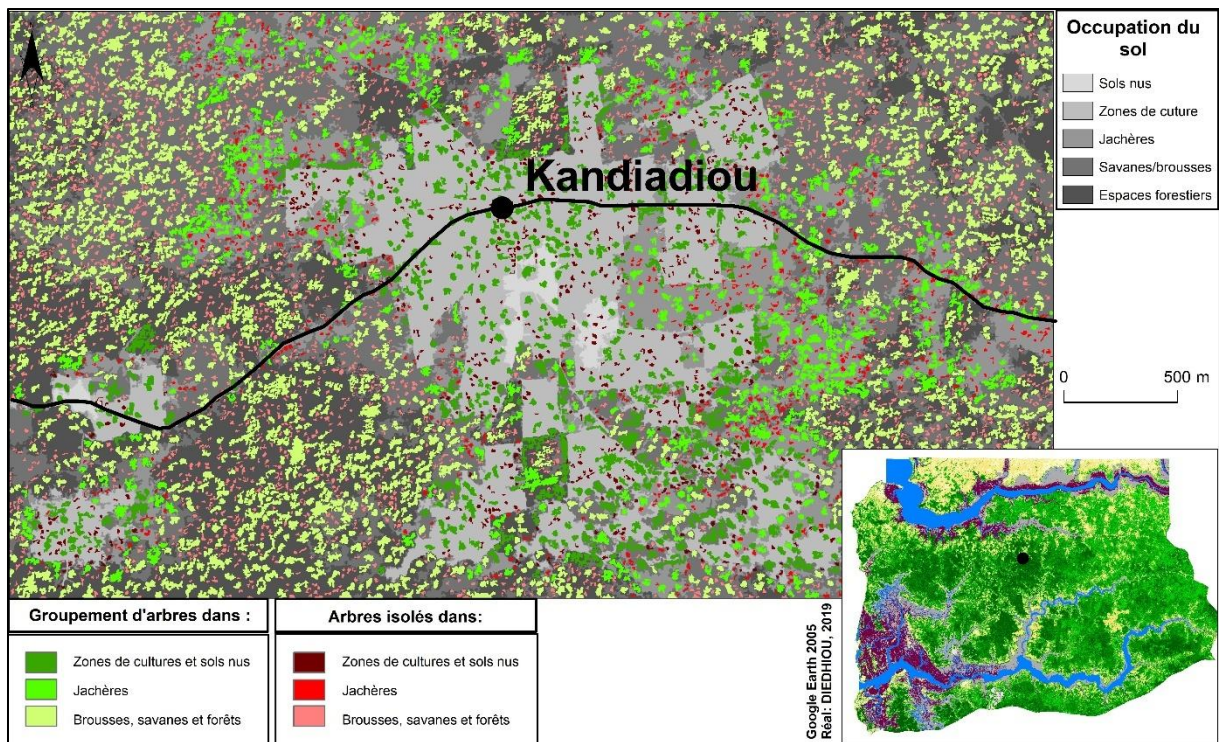


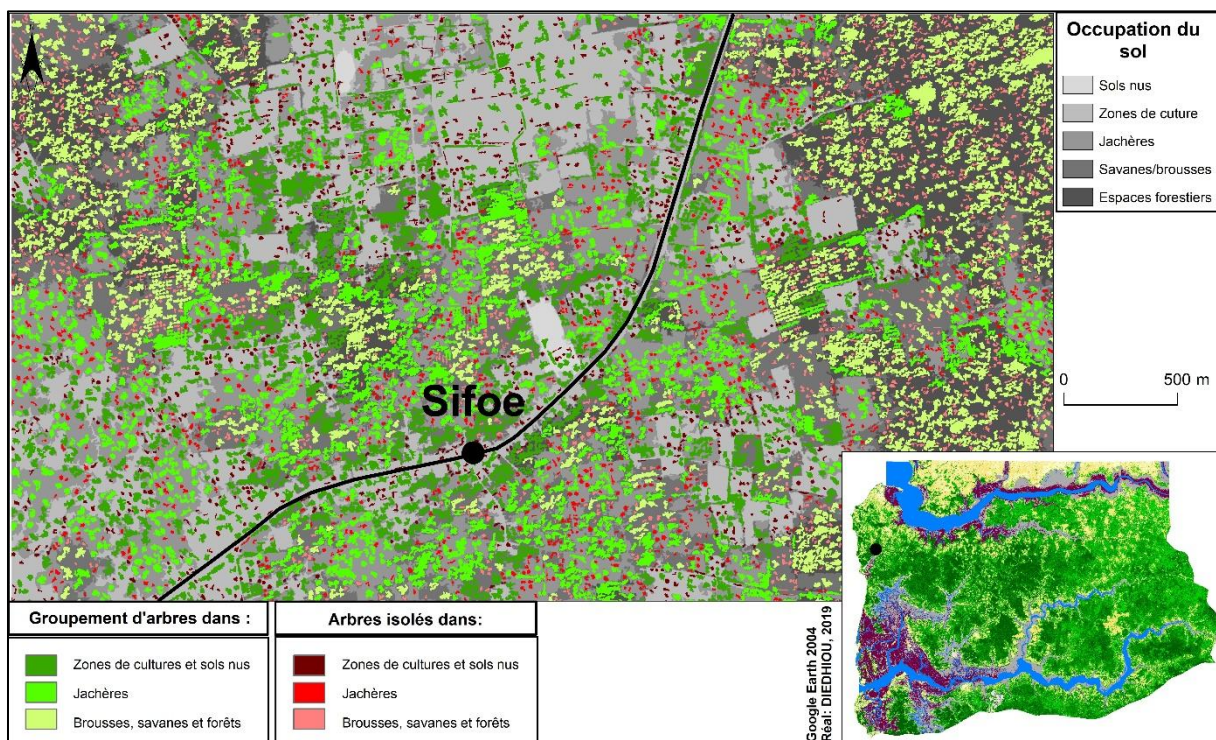
Planche 2: Évolution de l'occupation du sol à Kandiadiou entre 2005 (carte du haut) et 2017 (carte du bas)

- *Le cas de Sifoe (Gambie)*

En 2017, l'occupation du sol à Sifoe reste dominée par les espaces boisés qui couvrent désormais 548 hectares ce qui correspond à un recul d'environ -9 % par rapport à 2004 (Tableau 8). Cette perte de surface s'est traduite par la fragmentation des boisements compacts jadis prédominants dans le nord et le sud-est à l'intérieur desquels on observe aujourd'hui quelques zones de culture (Planche 3). Entre 2004 et 2017, les espaces cultivés ont vu leurs surfaces augmenter de façon importante en passant de 21 % à 35 %, si bien qu'ils sont devenus la deuxième composante des paysages ruraux de Sifoe.

Catégorie d'occupation du sol	2004		2017		Évolution	Typologie	2004		2017		Évolution
	Ha	%	Ha	%			Abs.	%	Abs.	%	
Zones de cultures les sols nus	271	21	445	35	14	Arbres isolés	576	9	1349	17	8
						Groupements d'arbres	407	6	1145	14	8
Jachères	340	27	289	22	-5	Arbres isolés	1136	18	1194	15	-3
						Groupements d'arbres	1068	17	1241	15	-2
Brousses, Savanes, Forêts	671	52	548	43	-9	Arbres isolés	1806	28	1922	24	4
						Groupements d'arbres	1436	22	1247	15	-7
Total	1282	100	1282	100				6429	100	8098	100

Tableau 8: Statistiques d'évolution de l'occupation du sol à Sifoe entre 2004 et 2017



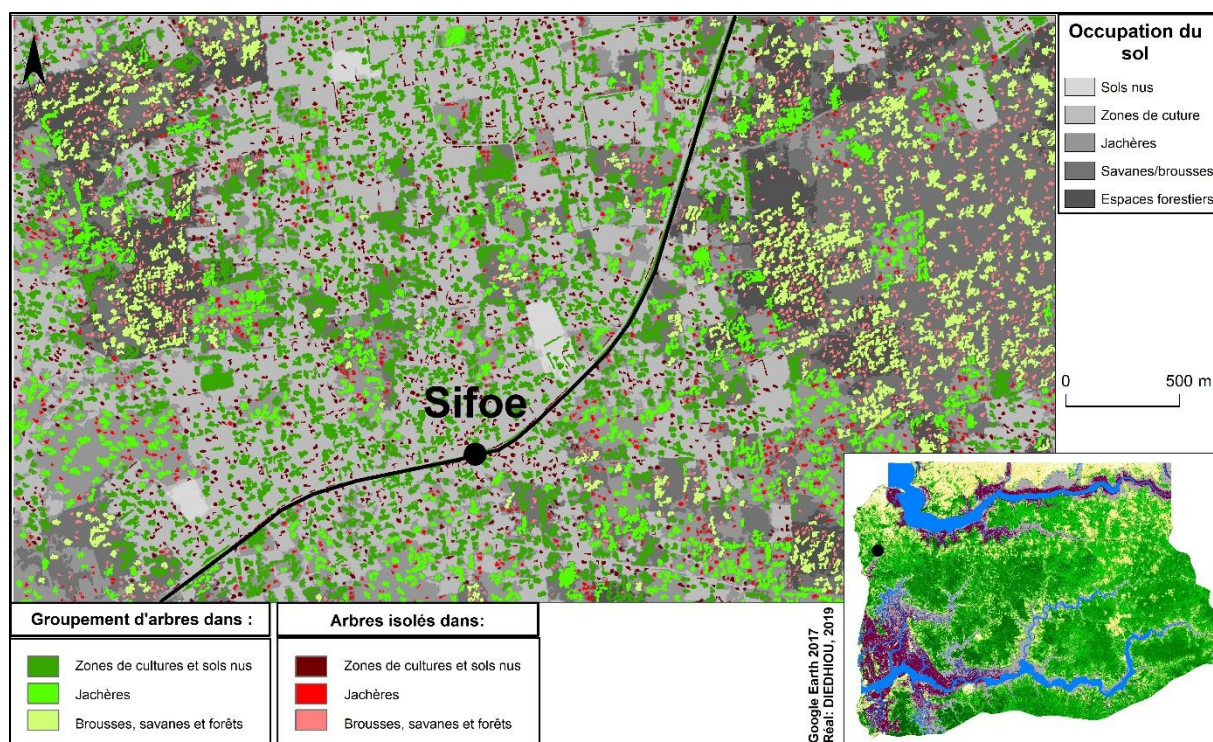


Planche 3: Évolution de l'occupation du sol à Sifoe entre 2004 (carte du haut) et 2017 (carte du bas)

On constate une véritable amélioration de la couverture ligneuse surtout dans les zones de cultures et de sols nus où les pourcentages d'arbres isolés et de groupements d'arbres sont presque passés du simple au double entre 2004 et 2017 avec respectivement 9 et 6 % à 17 et 14 % en 2017.

3. 2. Evolution de la densité du couvert ligneux au sein des espaces agricoles

Le recours aux fonctionnalités d'analyse spatiale d'un Système d'Information Géographique au sein duquel les cartes obtenues par croisement des cartes d'usages des sols et d'organisation spatiale de la couverture ligneuse ont été intégrées, nous a permis d'évaluer la densité de la couverture ligneuse au sein des espaces dédiés à l'agriculture dans chacun des terroirs. Cette approche permet d'analyser plus finement l'évolution spatio-temporelle des pratiques arboricoles au sein des terroirs.

Le cas de Suel (Sénégal)

Au sein des jachères, la densité des groupements d'arbres a augmenté entre 2004 et 2017 en passant de 2,8arbres/ha à 3,3 arbres/ha (Tableau 9). Une telle augmentation de la densité des arbres isolés dans les espaces de culture au moment où celle des groupements d'arbres régresse peut-être attribuée à la percée de l'activité arboricole qui, au même titre que

l'agriculture, se pratique au sein d'espaces ouverts. Par ailleurs, une telle progression dans les jachères peut indiquer qu'il s'agit de jachères très récentes.

Terroir	Années	Zones de cultures et sols nus		Jachères	
		Arbres isolés	Group. Arbres	Arbres isolés	Group. arbres
Suel	2004	4,3	4,4	3,6	2,8
	2017	5,4	2,8	5,6	3,3

Tableau 9: Densités ligneuses dans les zones agricoles et dans les jachères à Suel entre 2004 et 2017

Le cas de Kandiadiou (Sénégal)

Dans le terroir villageois de Kandiadiou, si la densité des arbres isolés au sein des espaces agricoles est restée relativement stable, celle des groupements d'arbres a sensiblement baissé (2,2 arbres/ha en 2005 contre 1,8 en 2017) (Tableau 10). Par ailleurs, si cette apparente stabilité de la densité des arbres isolés ne nous permet pas de savoir si les nouvelles pratiques agricoles ont eu ou pas une influence sur la densité ligneuse au sein des zones de culture, la diminution des groupements d'arbres laisse penser qu'il s'agit plutôt d'espaces agricoles ouverts ou faiblement peuplés de groupements d'arbres. Au sein des jachères, la diminution de la densité d'arbres isolés et de groupements d'arbres laisse penser que ces zones sont sujettes aux prélèvements de bois.

Terroir	Années	Zones de cultures et sols nus		Jachères	
		Arbres isolés	Group. Arbres	Arbres isolés	Group. Arbres
Kandiadiou	2005	2,6	2,2	5,1	4,0
	2017	2,6	1,8	3,5	2,4

Tableau10: Densités ligneuses dans les zones agricoles et dans les jachères à Kandiadiou entre 2005 et 2017

Le cas de Sifoe (Gambie)

À Sifoe, c'est au sein des jachères que la densité des ligneux, en particulier celle des groupements d'arbres, est légèrement plus élevée en 2017 avec 4,3 arbres/ha. Au sein de cette catégorie d'occupation du sol, le nombre d'arbres à l'hectare est passé de 3,1 à 4,3 contre successivement 3,3 et 4,1 pour les arbres isolés. En revanche, c'est au niveau des zones de cultures, où les arbres isolés dominent, que les différences de densités entre les arbres isolés et les groupements sont les plus frappantes. Elles sont respectivement passées pour le premier

type de 2,1 arbres/ha à 3 arbres/ha et de 1,6 arbres à 2,6 arbres/ha pour les groupements d'arbres (Tableau 11).

Terroirs	Années	Zones de cultures		Jachères	
		Arbres isolés	Group. arbres	Arbres isolés	Group. arbres
Sifoe	2004	2,1	1,5	3,3	3,1
	2017	3,0	2,6	4,1	4,3

Tableau 11: Densités ligneuses dans les zones agricoles et dans les jachères à Sifoe entre 2004 et 2017

La prédominance de la densité d'arbres isolés combinée à l'augmentation de celle des groupements d'arbres, en particulier dans les zones de cultures, montre d'une part que la plupart des espaces agricoles sont ouverts et de l'autre que l'arboriculture y est de plus en plus présente.

En analysant la densité de la couverture ligneuse au sein des espaces agricoles et son évolution récente, on constate que chaque terroir villageois a connu une trajectoire bien spécifique ce qui a été schématisé sur la figure 19.

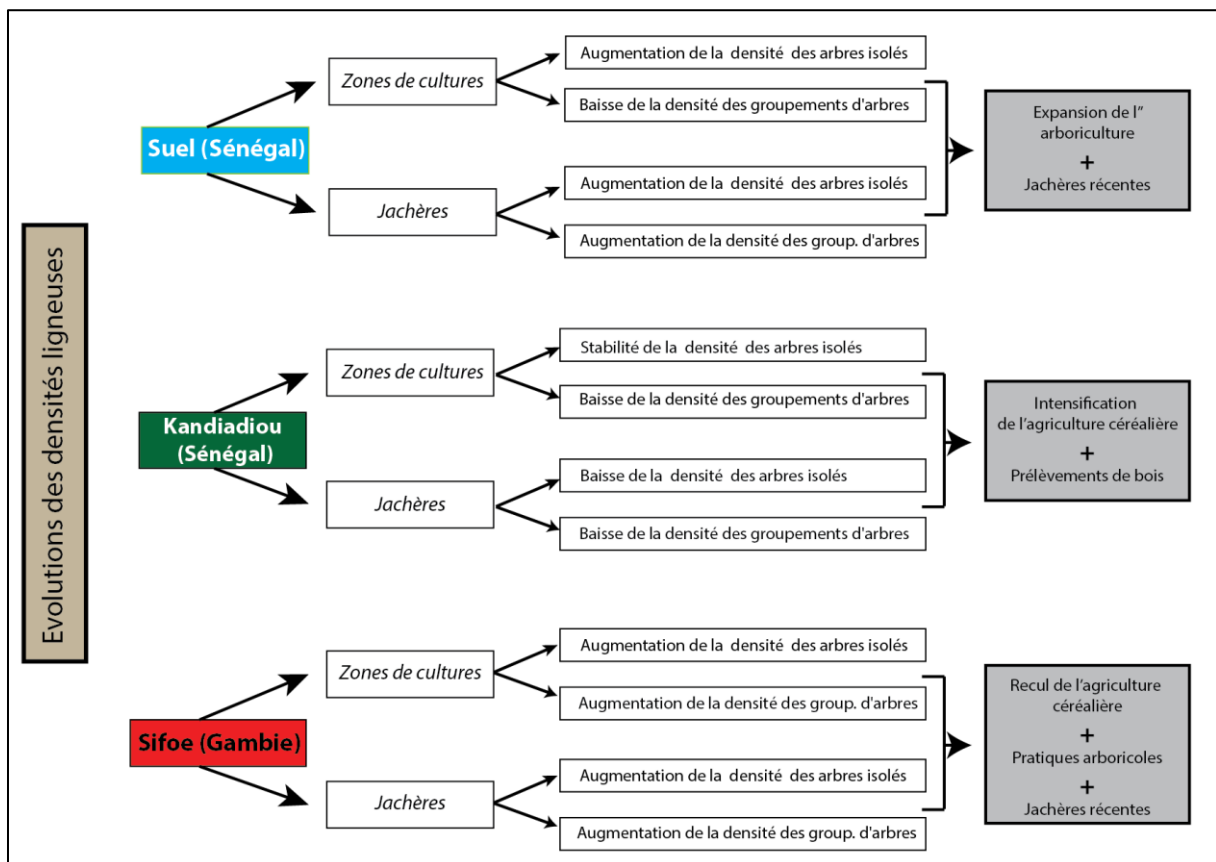


Figure 18: Types d'évolution des densités ligneuses au sein des terroirs sénégalais

À Sifoe, la dynamique d'évolution se caractérise par une augmentation des densités de ligneux, qu'il s'agisse d'arbres isolés ou de groupements d'arbres à la fois dans les zones de

cultures et dans les jachères. Cette dynamique illustre à la fois le recul de l'agriculture céréalière au profit de l'arboriculture et le caractère récent des jachères.

Le terroir de Kandiadiou se caractérise quant à lui par une stabilité de la densité des arbres isolés et par une diminution des groupements d'arbres dans les zones de culture. Ce type de dynamique des densités ligneuses illustre l'ampleur du phénomène de déboisement aussi bien dans les jachères qu'au niveau des espaces agricoles où les groupements d'arbres ne cessent de disparaître du fait de l'agriculture céréalière.

À Suel, les jachères connaissent la même évolution qu'à Sifoe tandis qu'au sein des espaces cultivés, l'augmentation de la densité d'arbres isolés contraste fortement avec la diminution des groupements d'arbres. Ce type de dynamique illustre à la fois la progression de la pratique arboricole dans les zones de cultures et le caractère récent des jachères.

Conclusion

La méthode de cartographie de l'occupation et des usages du sol présentée ici qui s'appuie sur des séquences d'analyse d'images reproductibles a permis d'identifier les usages du sol et la présence de ligneux isolés ou groupés, mais aussi de mesurer les superficies dédiées aux différents usages et la densité de la couverture ligneuse au sein de chaque catégorie d'espace agricole. Elle a ainsi révélé le « visage » jusque-là peu connu des terroirs villageois sénégalais dans le sens elle a mis en évidence les modes d'exploitation du milieu, les pratiques agricoles et certaines logiques d'occupation et d'usages des espaces ruraux. L'analyse des différentes cartes d'occupation du sol des trois terroirs villageois a révélé que les récentes mutations du milieu rural, résultat de nombreux facteurs environnementaux, ont contraint les systèmes de production sénégalais à évoluer. Dans un contexte marqué par une forte variabilité pluviométrique, la diversification des activités et pratiques agricoles apparaît comme une stratégie de maintien des systèmes de production locaux durement affectés par les bouleversements climatiques de ces dernières décennies. Parmi les activités agricoles récemment adoptées, l'arboriculture constitue sans doute la plus pratiquée. Ce phénomène a été mis en évidence, de façon différenciée selon les terroirs, grâce à l'étude combinée de la dynamique d'occupation du sol et des densités ligneuses au sein des espaces cultivés et des jachères. Il a été constaté qu'au sein des terroirs étudiés comme à Suel, lorsque

les surfaces agricoles augmentent, le nombre d'arbres isolés au sein de ces espaces augmente également, avec pour corollaire une diminution de l'emprise spatiale des espaces boisés et des jachères

Au-delà de l'originalité de cette approche qui consiste à calculer la densité des ligneux dans les espaces agricoles et dans les jachères, cette étude des densités permet, outre la mise en évidence de l'évolution de la couverture ligneuse, de pénétrer encore au cœur des paysages ruraux afin de mieux saisir les processus en cours. Cette analyse comparative montre que la dynamique d'évolution des densités ligneuses est relativement différente de celle de l'occupation du sol. Ce type d'étude a permis de mettre en évidence de façon plus explicite le phénomène de déprise rurale qui se caractérise ici par le recul de l'agriculture céréalière et par la progression de pratiques comme l'arboriculture ou le déboisement, aussi bien des espaces cultivés en permanence que des jachères.

Bibliographie

Baro J., Mering C., Vachier C. (2014). Peut-on cartographier des taches urbaines à partir d'images Google Earth ? *Cybergeogéographie : Revue Européenne de Géographie*, Dossier Images et Villes URL : <http://journals.openedition.org/cybergeogeo/26401> ; DOI : [10.4000/cybergeogeo.26401](https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.26401)

Boardman J. (2016). The value of Google Earth™ for erosion mapping. In: *Catena*, Vol. 143, p.123-127

Boulangier. P. (2011). Renseignement géographique et culture militaire, *Hérodote*, Vol. 140, N° 1, p. 47-63.

Challéat S., Larceneux A. (2014). Intelligence stratégique et dissimulation dans les outils de géovisualisation en ligne. *M@ppemonde*, [hal-00931469](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00931469)

Diallo M. M. (2015). Mobilités socio-spatiales et production territoriale en Sénégal, *EchoGéo*, Vol. 34 URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/14411> ; DOI : [10.4000/echogeo.14411](https://doi.org/10.4000/echogeo.14411)

Dias E., Da Silva Horta, J. (2007). La Sénégal : un concept historique et socioculturel et un objet d'étude réévalué. *Mande Studies*, Vol. 9, p.9-19.

Dusseux P. (2014). Exploitation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole. *Géographie*. Université Rennes 2, France. [〈NNT : 2014REN20031〉](https://nnt.sciencedirect.com/urn:nnt:2014REN20031) . [〈tel-01131770〉](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01131770)

E-Geopolis : <http://e-geopolis.org/institut/>

Genevois S., Jouneau-Sion C. (2008). Utiliser les « globes virtuels » pour enseigner la géographie de la France, *L'Information géographique*, Vol. 72, N°3, p. 81-93.

<http://mappemonde.mgm.fr/num40/articles/art13404.html>.

Hudak A. T., Wessman C. A. (2001). Textural analysis of high-resolution imagery to quantify bush encroachment in Madikwe Game Reserve, South Africa, 1955-1996 *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, Issue 14, p.2731-2740

Jacobson. A., Dhanota. J., Godfrey. J., Jacobson. H., Rossman. Z., Stanish. A., Walker. H., Riggio. J. (2015). A novel approach to mapping land conversion using Google Earth with an application to East Africa. *Environmental Modelling and Software*, Vol. 72, p.1-9

Liasis G., Stavrou S. (2016): Satellite images analysis for shadow detection and building height estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 119, p.437-450

Malarvizhi. K., Vasantha Kumar S., Porchelvan P. (2016). Use of high-resolution Google Earth Satellite Imagery in land use map preparation for urban related applications. *ProcediaTechnology*, Vol. 24, p.1835-1842

Mathian. H., Sanders L. (2015). Temporalités et objets géographiques. *L'information géographique*, Vol. 79, n°2, p.55-66

Mering C., André G. et Guilande R., (2008) Analyse et cartographie des formations superficielles à partir d'images optiques et radar, In *Les Formations Superficielles*, coord. Y. Dewolf, Ed Ellipses (Paris), 380.p

Munyati. C., Shaker P., Phasha M. (2011). Using remotely sensed imagery to monitor savanna rangeland deterioration through woody plant proliferation: a case study from communal and biodiversity conservation rangeland sites in Mokopane, South Africa. *Environment Monitoring Assessment*, Vol. 176, Issue 1-4, p.293-311

Ozer, P. (2014). Catastrophes naturelles et aménagement du territoire : de l'intérêt des images Google Earth dans les pays en développement. *Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, Vol 38, p.209-220

Pfeifer M., Disney M., Quaife T., Marchant R. (2012). Terrestrial ecosystems from space: a review of earth observation products for macroecology applications *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 21, Issue 6, p.603-624

Puissant. A., Weber. C. (2003). Les images à très haute résolution, une source d'information géographique en milieu urbain ? État des lieux et perspectives, *L'Espace géographique*, Tome 32, n°4, p.345-356.

Qi. F., Zhai. J. Z., Dang. G. (2016). Building height estimation using Google Earth. *Energy and Buildings*, Vol. 118, p.123-132

San Emeterio J. L., Mering C. (2016). Granulometric Analysis on Remote Sensing Images: Application to Mapping Retrospective Changes in the Sahelian Ligneous Cover, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **2016**, 5(10), 192; doi:[10.3390/ijgi5100192](https://doi.org/10.3390/ijgi5100192)

Symeonakis E., Higginbottom T. (2014). Bush encroachment monitoring using multi-temporal Landsat data and random forests. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-2, p.29-35