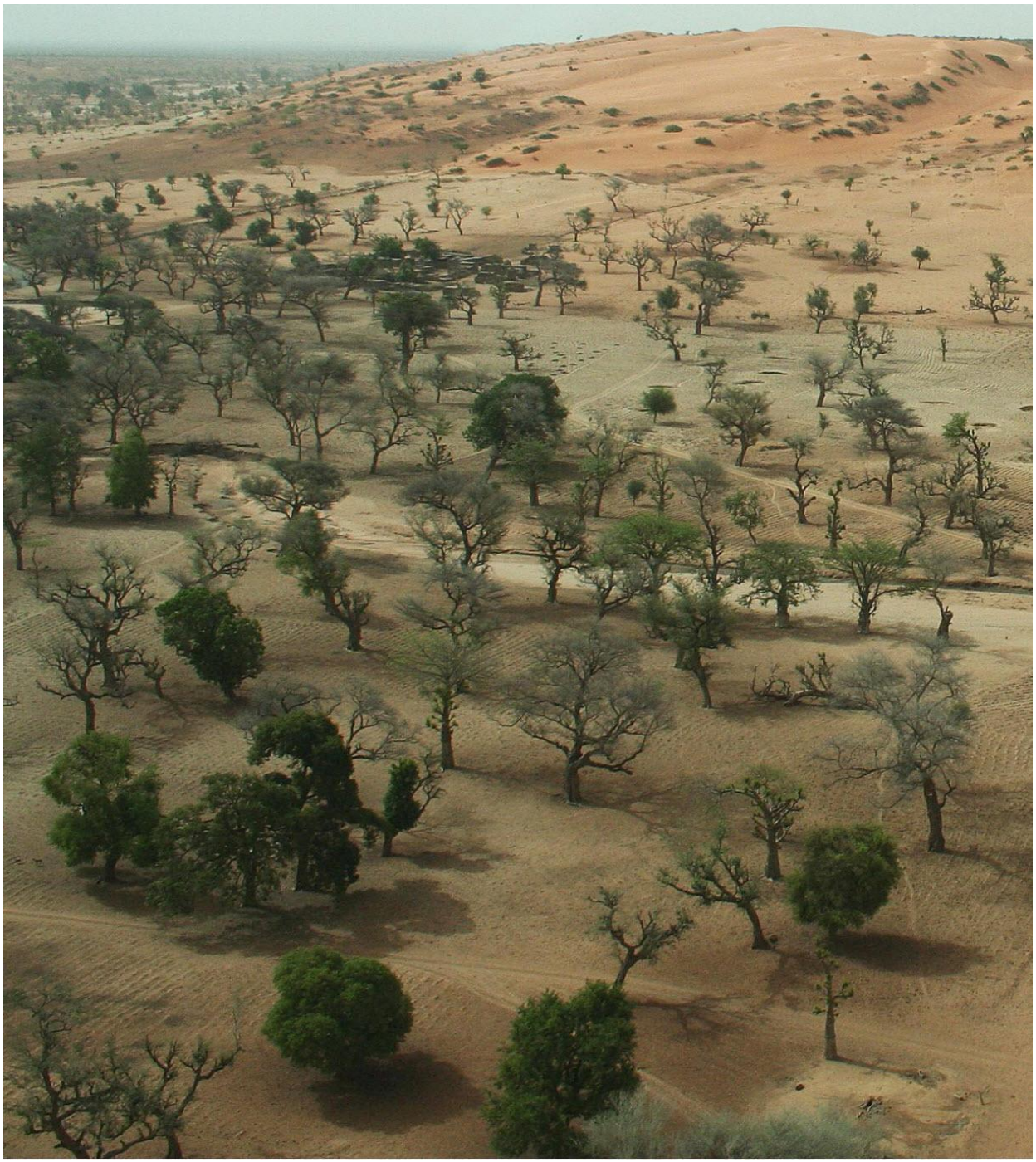
Atlas de la vallée du Sourou (Mali)

Partie 1



care

Altenburg & Wymenga CONSEILLERS ÉCOLOGIQUES

Colofon

Zwarts, L., M. Bekkema & J. van der Kamp 2019. Atlas de la vallée du Sourou (Mali).
A&W-rapport 2543 – partie 1.
Altenburg & Wymenga, Feanwâlden / Care International Mali, Bamako.
Photo de couverture : Richard Julia

Care International au Mali
BP 1766, Bamako, Mali
(223) 2024 22 62

Consultant
Altenburg & Wymenga conseillers écologiques
Suderwei 2, 9269 TZ Feanwâlden, Pays Bas
(31) 511 474764

© Altenburg & Wymenga bv / Care International Mali

Atlas de la vallée du Sourou (Mali)

Partie 1

Une photo montrant l'essentiel du paysage actuel dans la vallée du Sourou : de l'agriculture partout, mais avec des arbres dispersés (dont beaucoup *Faidherbia* (= *Acacia*) *albida*), et la savane sur les sols qui sont moins propices à l'agriculture. Photo: Richard Julia

1. La vallée du Sourou, un région en mutation

La plus grande partie de la moitié sud du Mali se situe dans le bassin du fleuve Niger et, pour une partie beaucoup plus petite, dans le bassin du Sénégal. Une très petite partie du Mali, située entre les falaises de Bandiagara et la frontière avec le Burkina Faso, appartient au bassin de la Volta (Fig. 1). Cette région est connue sous le nom de Vallée du Sourou.

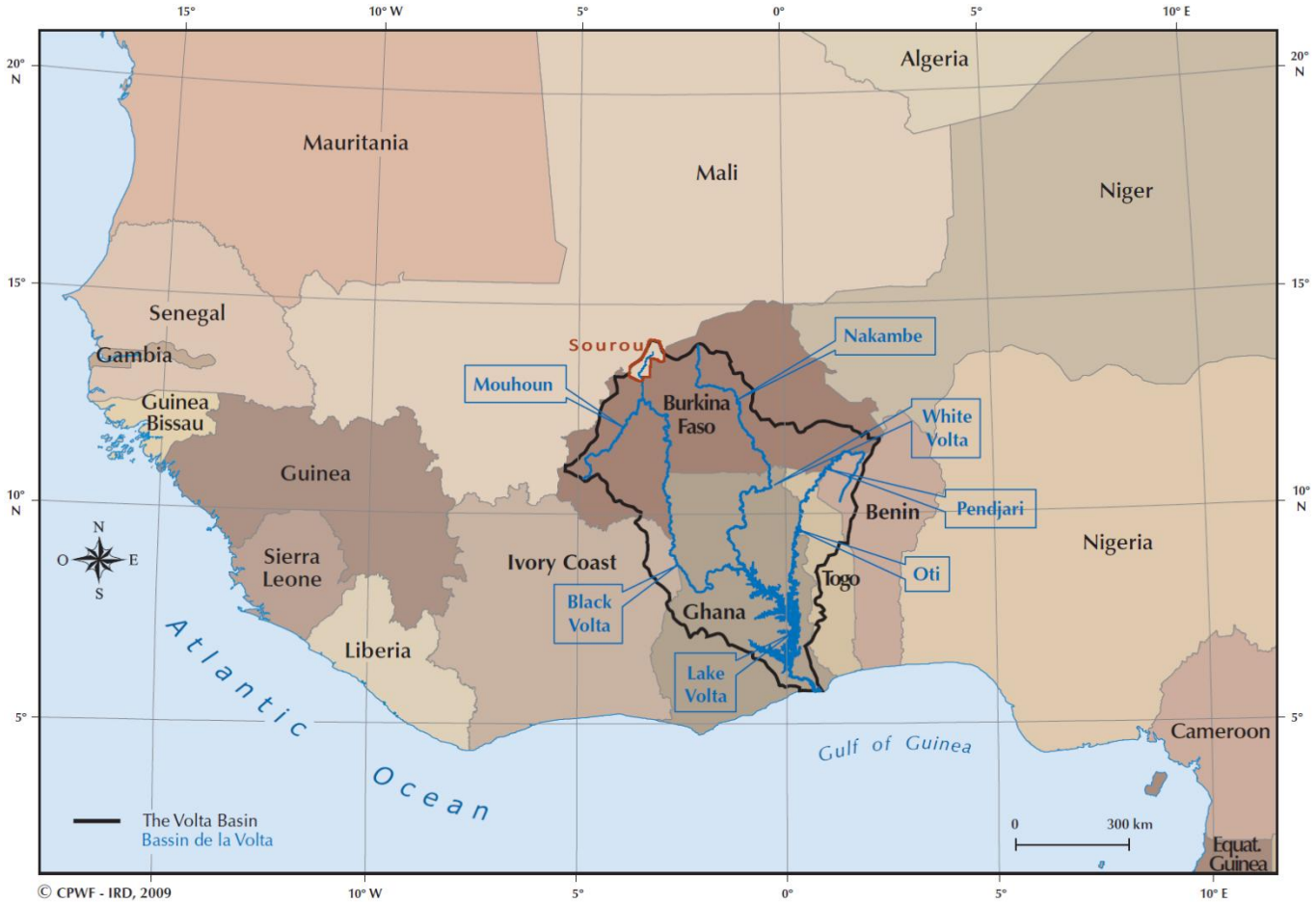


Fig. 1. Le bassin de la Volta en Afrique de l'Ouest (394.000 km^2) est partagé par six pays. La part malienne appartenant au bassin du Volta (4800 km^2) est connue comme la vallée du Sourou et couvre moins que 1% du Mali. Source (modifiée) : Lemoalle & De Conpadda (2009).

La vallée du Sourou est une région spéciale à plusieurs égards. La vallée abrite l'une des dernières zones humides du Mali qui comporte encore d'importantes ressources naturelles et de biodiversité (site RAMSAR, connue sous le nom Baye, qui compris la zone d'inondation le long du Sourou (565 km^2)). Depuis au moins la première moitié du siècle dernier, l'agriculture est bien développée dans la vallée. Aujourd'hui, la vallée du Sourou est une zone agricole importante, tant au Mali qu'au Burkina Faso, pour l'approvisionnement en céréales, légumes, pêche, élevage etc. Aussi, la vallée constitue une zone d'échanges transfrontaliers. En outre, la zone devient de plus en plus un refuge pour des migrants du centre et du nord du Mali, où les ressources naturelles sont souvent épuisées et où l'insécurité s'enracine.

Dans le contexte du développement durable, la bonne gestion des ressources naturelles de la vallée du Sourou est une nécessité et un défi en même temps. Ceci est avalisé par les différents ministères et services au Mali et soutenu par l'Ambassade des Pays-Bas. L'Ambassade finance depuis septembre 2013 un programme dit « PADIN II » dans la zone du Sourou. La poursuite de ce financement nécessite des cadres de planification des ressources stratégiques liées à une vision plus large de développement et la gestion des eaux du Sourou. Actuellement, ces cadres ne sont pas disponibles et les acteurs dans la zone ne perçoivent pas de façon explicite les besoins. En même temps l'Ambassade des Pays-Bas appuie, via le programme PCA-GIRE, le processus d'élaboration d'une SAGE (Schéma d'Aménagement et Gestion des Eaux) pour le Sourou.

2. Etude cartographique

Les différents programmes de développement pour le Sourou[1] ont besoin d'un aperçu facilement accessible pour des programmes de développements ruraux en matière d'utilisation des sols et de développement démographique. Dans ce cadre, le but de l'étude actuelle était formulé dans le TDR comme suit : 'Au Mali en général et dans la région de Mopti en particulier, dans le but de mieux asseoir les différents programmes de développement, il est devenu nécessaire d'élaborer « un support cartographique des paysages et de l'utilisation des terres dans la partie malienne du sous-bassin du Sourou ». Plus précisément formulé : Elaborer un support cartographique - Atlas - de la portion malienne du bassin du Sourou en définissant les zones agro-écologiques (paysages) et l'usage de leurs ressources naturelles, notamment les terres dans le temps et l'espace avec un point focal sur leurs possibilités et contraintes.

L'Atlas est composé de trois parties :

Partie 1. . La première partie comprend les cartes globales de la zone entière et à titre d'exemple des cartes détaillées pour montrer les changements.

Partie 2. Du fait que, dans les cartes globales, de nombreux détails ne peuvent pas être rendus visibles, dans la partie 2 la zone est divisée en 34 sous-zones, pour lesquelles cinq cartes différentes sont données :

- la carte topographique de l'IGN (années 1950s),
- une carte composite en vraies couleurs standard d'une image satellite récente
- une carte de végétation (NDVI ; novembre 2017),
- une carte infrarouge en fausses couleurs (novembre 2017),
- une carte avec les parties couvertes d'eau (novembre 2017).

Partie 3. La troisième partie montre comment l'inondation de la rivière Sourou au Mali a varié d'une année à l'autre et dans quelle mesure elle est liée au débit et au niveau d'eau de la rivière et aux précipitations annuelles locales.

2.1. Partie 1 : structure

Partie 1 est structurée comme suit:

- Figure 2 : une carte des hauteurs permettant de déterminer le contour de la vallée de Sourou.
- Figure 3 : carte générale avec les routes, les villes et les grands villages.
- Figures 4 et 5 : aperçu des cartes et images satellite utilisées.
- Figures 6 et 7 : densité de population et augmentation de la population dans les 26 communes.
- Figures 8 et 9 : précipitations moyennes et annuelles.
- Figure 10 : carte des sols.
- Figures 11-15 : utilisation des sols basée sur l'interprétation d'images satellitaires (1992 et 2016).
- Figure 16 : couvert forestier en 2010.
- Figure 17 : carte de la végétation en 1990, basée sur l'interprétation d'images satellitaires.
- Figure 18 : superficie agricole sur les cartes topographiques des années 50 par rapport aux interprétations satellitaires depuis les années 1990s.
- Figure 19 : comparaison de la superficie agricole sur des photos satellites de 1967 avec des cartes topographiques des années 1950 et des images satellites de 2016.
- Figure 20 : carte avec les villages qui existaient déjà dans les années 1950s et qui ont été fondés après.
- Figures 21-23 : anciens et nouveaux villages (voir Fig. 20) avec une carte montrant les parties couvertes par l'eau, de la végétation (NDVI) et d'une fausse couleur (tous les trois basés sur des images satellite Sentinel de novembre 2017).
- Figure 24 : Cercles avec ou sans zones humides et mares permanentes

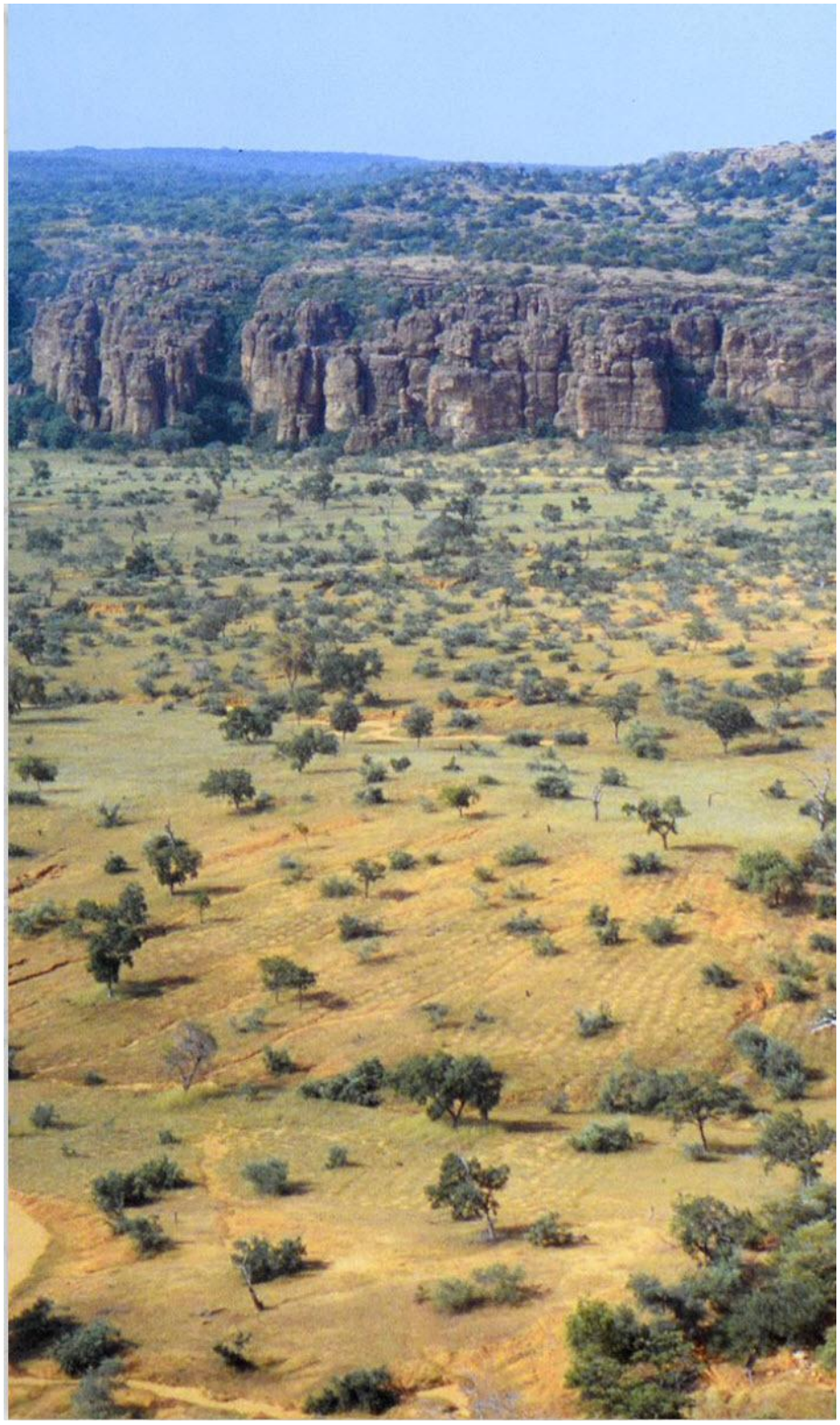
[1] Schéma d'Aménagement et de Gestion des Ressources en Eau (SAGE), Schéma Régionale d'Aménagement de la Région de Mopti (SRAT), Programme de Développement Intégré et Durable du Sourou et son Evaluation Environnementale Stratégique (PDIDS/EES)

- Figures 25-34 : une sélection de 9 sites pour montrer comment le paysage a changé entre 1967 et 2017.

2.2. Explication des cartes

Les cartes donnent le contour de la vallée de Sourou (ligne violet) et des 26 communes du PDIDS (ligne blanc ou gris).

Avec toutes les cartes, l'orientation est pivotée de 26 degrés vers l'ouest afin d'afficher la carte aussi grande que possible dans le miroir de la feuille.



La vallée du Sourou et les falaises de Bandiagara en arrière-plan. Photo : Gray Tappan

3. Les cartes

Un modèle d'élévation détaillé (ASTER) a été utilisé pour délimiter le bassin de Sourou au Mali (Fig. 2). La démarcation à l'ouest et au nord est déterminée par le relief et au sud par la frontière avec le Burkina Faso (ligne violet dans Fig. 2 et toutes les figures suivantes).

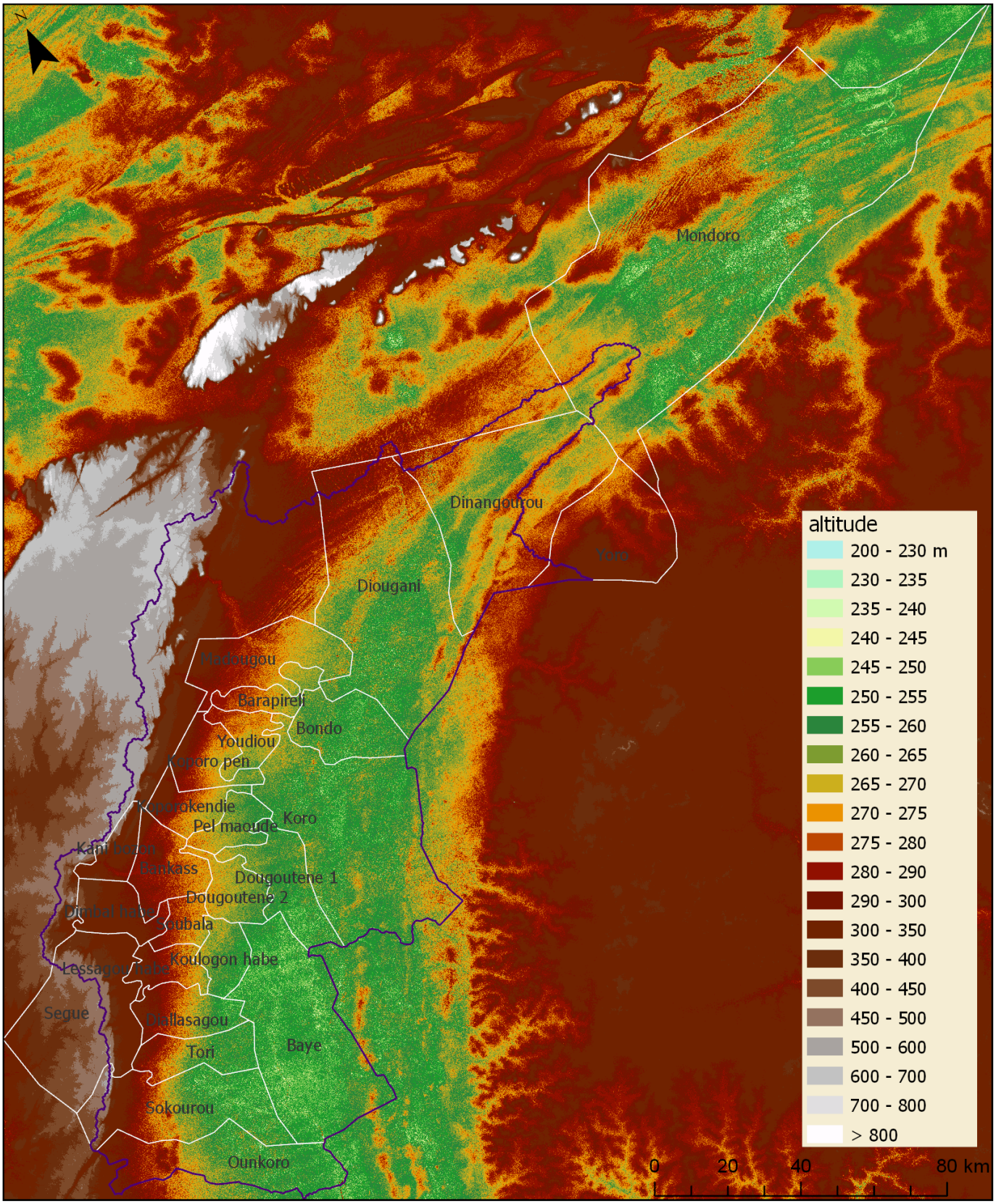


Fig. 2. Le modèle numérique d'élévation est utilisé pour délimiter la partie malienne du bassin du Sourou. Source : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Elle a été téléchargée à partir du Web (https://asterweb.jpl.nasa.gov/). La ligne violette entoure la partie malienne de la vallée du Sourou, définie à l'ouest et au nord par la pente et à l'est et au sud par l'emplacement de la frontière avec le Burkina Faso.

Figure 3 fournit une carte générale avec les routes, les villes et les grands villages.

L'atlas est basé sur diverses sources. Les sources les plus anciennes et les plus détaillées sont les photos satellite prises par la CIA (photos CORONA) et les cartes topographiques (1/200 000) de l'IGN (Fig. 4).

La situation actuelle peut être décrite en utilisant des données satellitaires disponibles plusieurs fois par ois, par exemple Landsat depuis 1982 (résolution 30 m). Nous utilisons ici des images d'un satellite Sentinel 2B de l'ESA (résolution 10 m) datées des 9 et 11 novembre 2017 (Fig. 5).

Fig. 3. Vallée du Sourou en Mali (ligne violette) et ses environs avec les routes principales et les plus grands villages et villes. Source : OpenStreepMap.

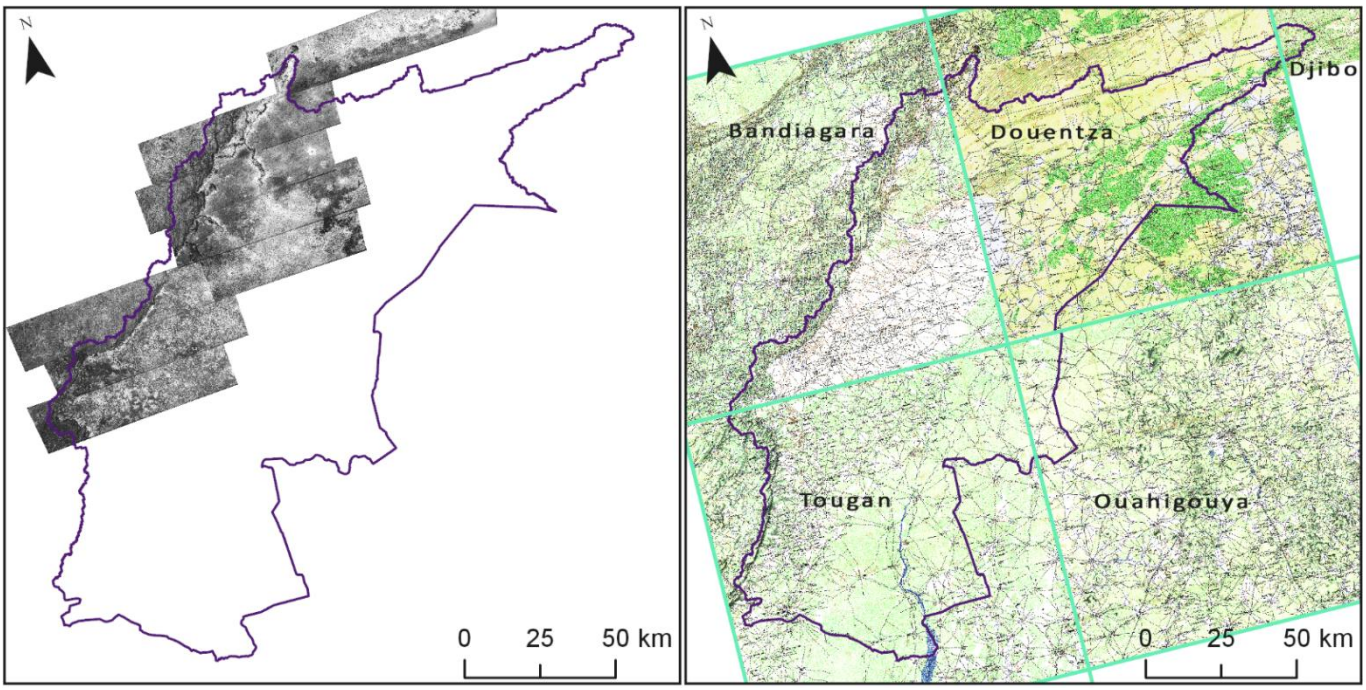


Fig. 4. Huit photos satellites (CORONA, 10 décembre 1967) (à gauche) et 5 cartes topographiques de l'IGN (d'après des photos aériennes de 1952 à 1956) (à droite). Ces données ont été géoréférencées et constituent la base des figures 18 et 19.

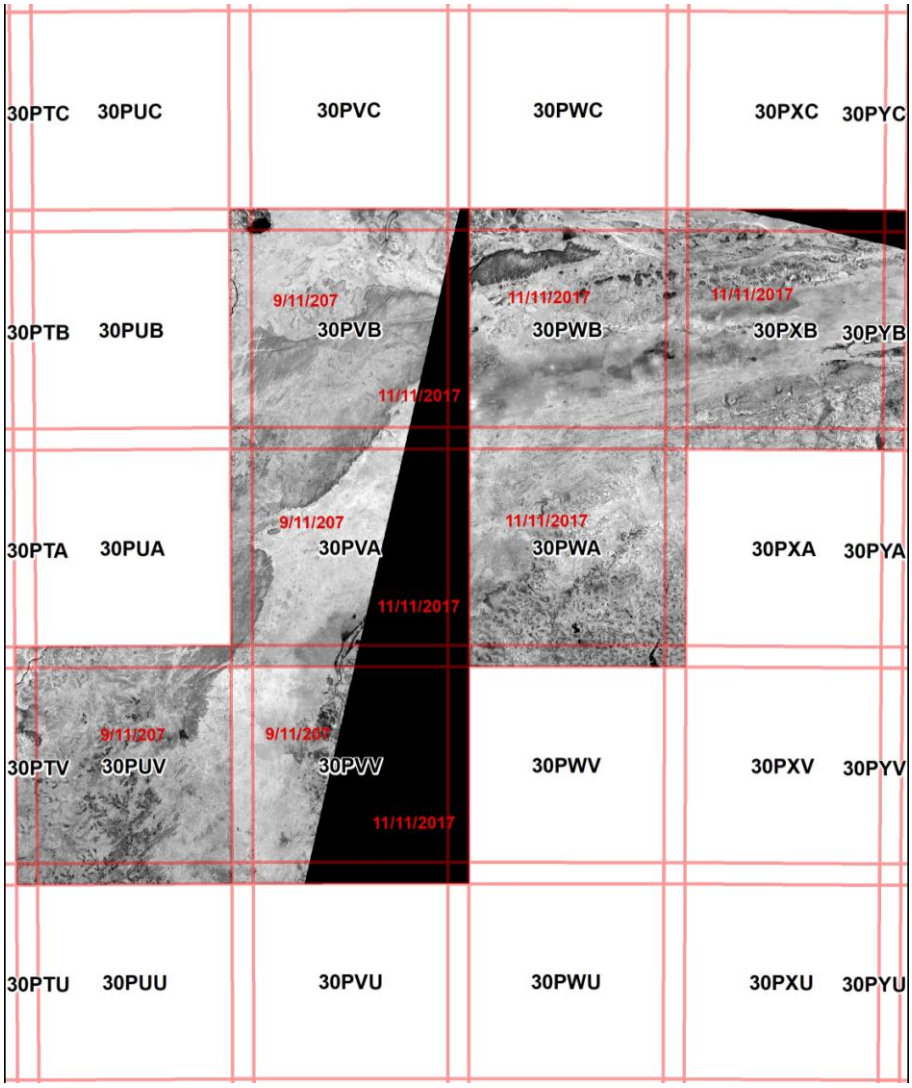


Fig. 5. Nous avons utilisé sept images satellites du Sentinel 2B, datées des 9 et 11 novembre 2017. Ces données constituent la base des figures 21 – 23 et partie 2 de cet Atlas.

3.1. *Population humaine*

La vallée du Sourou fait partie de 26 communes, dont cing en (petite) partie (Fig. 6). La densité de population est élevée dans la partie centrale de la vallée (Fig. 6), mais aussi dans la falaise adjacente.

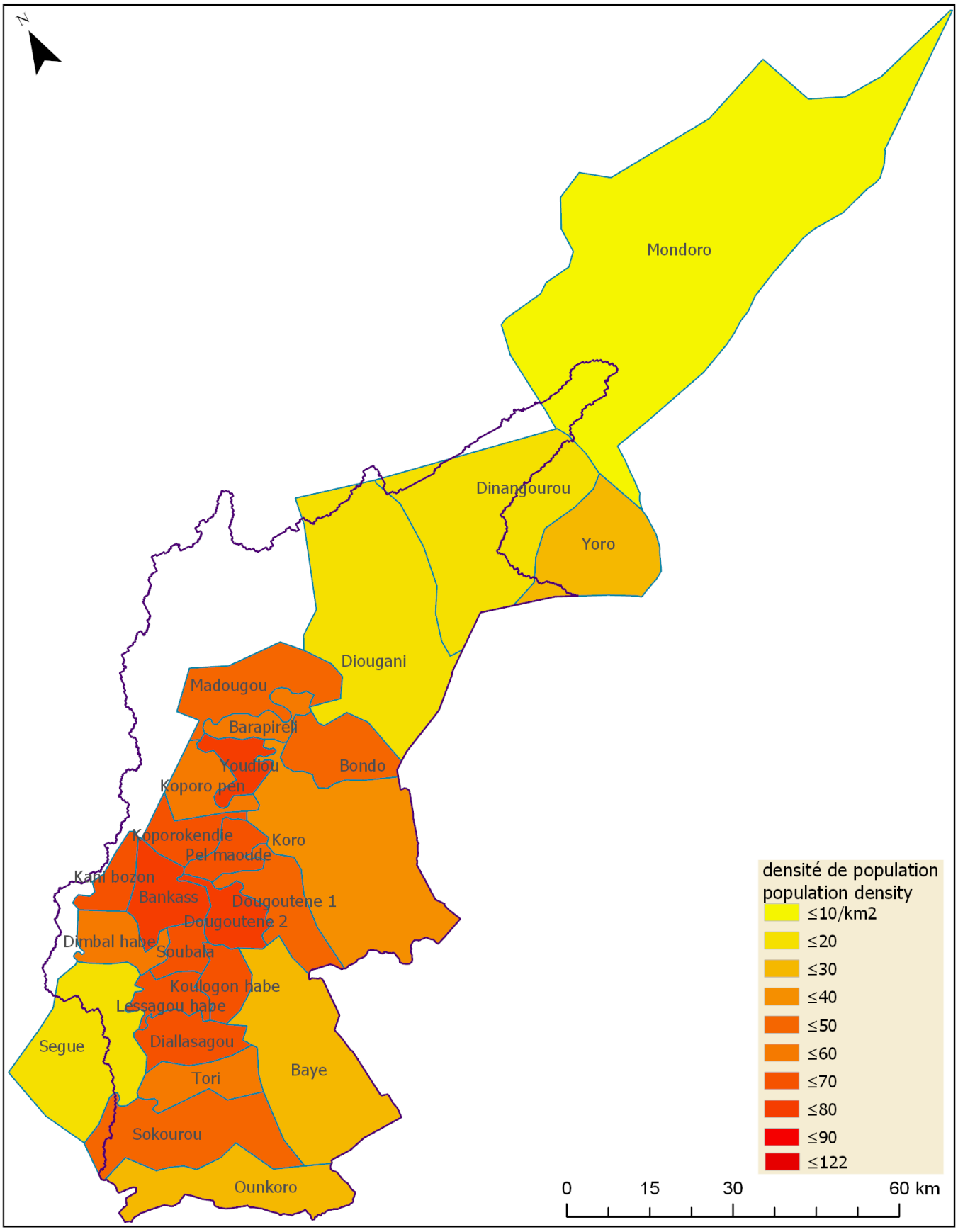


Fig. 6. Les 26 communes maliennes situées (en partie) dans le Sourou. La densité de population en 2009 est indiquée avec des couleurs différentes. Source : INSTAT (2013).

Une comparaison entre les recensements de 1998 et 2009 montre l'augmentation de la population (Fig. 7). Cette augmentation s'est produite dans les communes où la densité était déjà élevée (Fig. 6) mais était plus élevée dans le nord-est et le sud-est où la densité de population était plus faible.

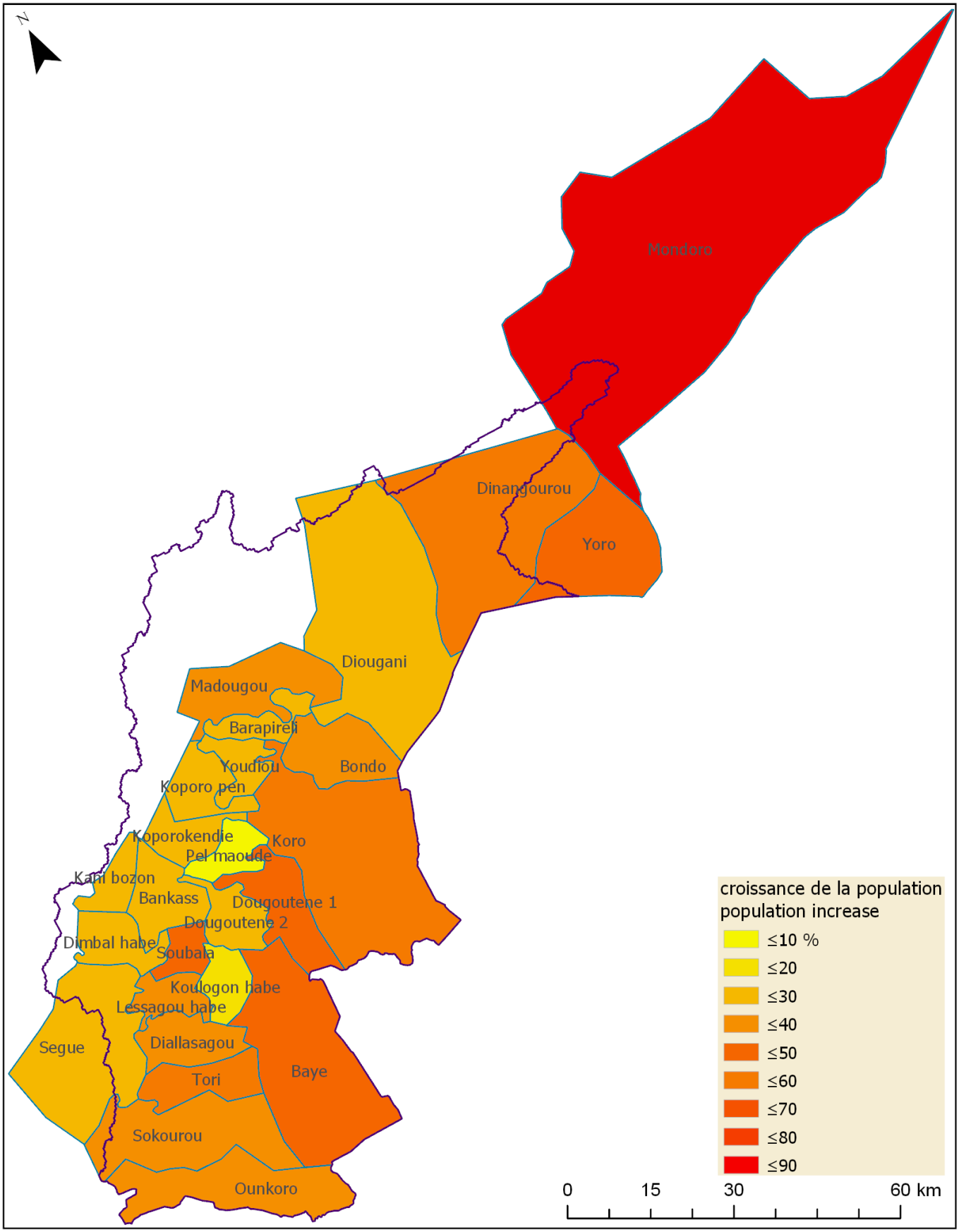


Fig. 7. Augmentation de la population (%) dans 26 communes entre 1998 et 2009. Source : INSTAT (2002, 2013).

3.2. Précipitations annuelles

Les précipitations annuelles dans la vallée du Sourou vont de moins de 400 mm au nord-est à plus de 700 mm au sud, en moyenne (Fig. 8). La variation annuelle est cependant très grande (Fig. 9).

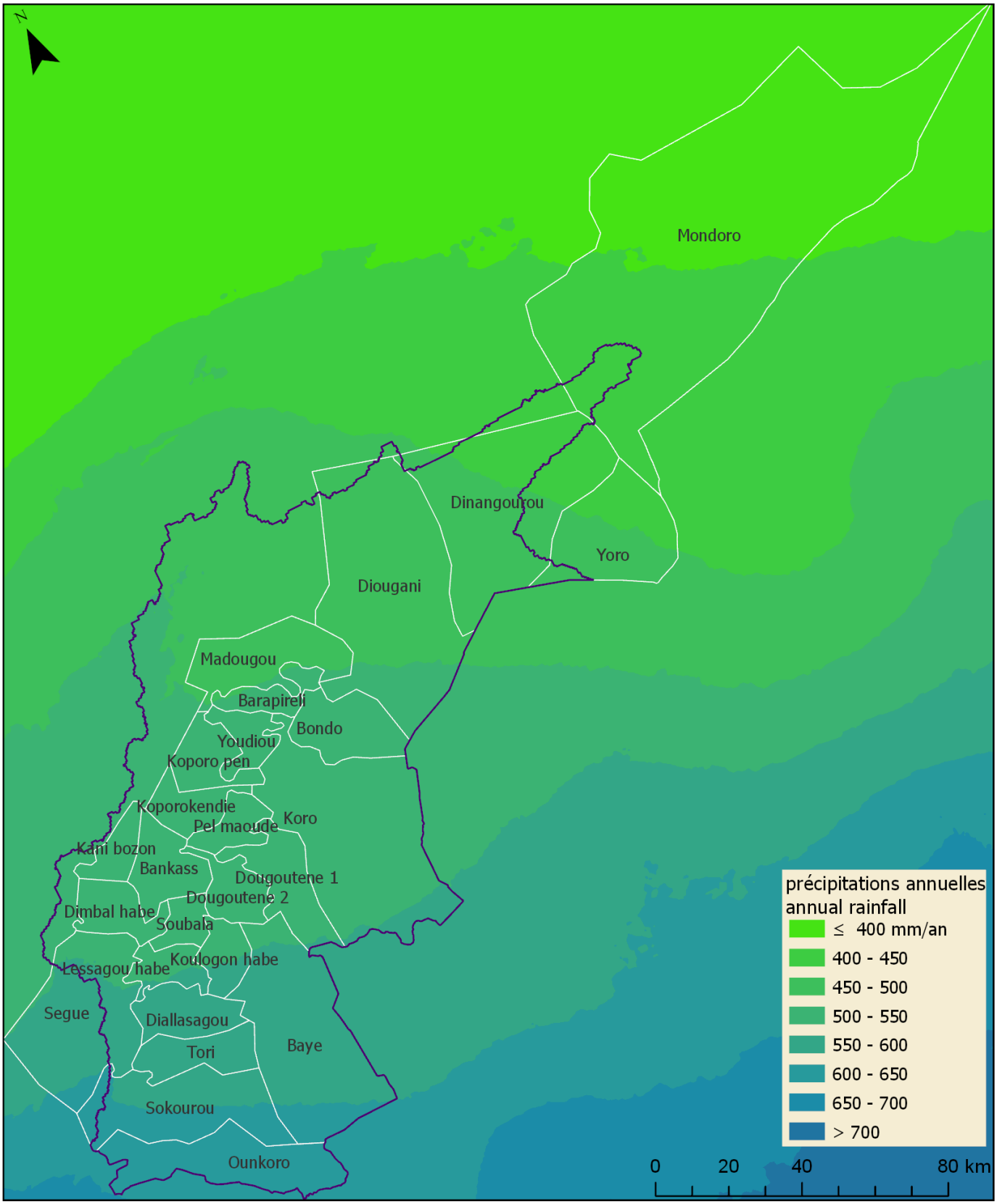
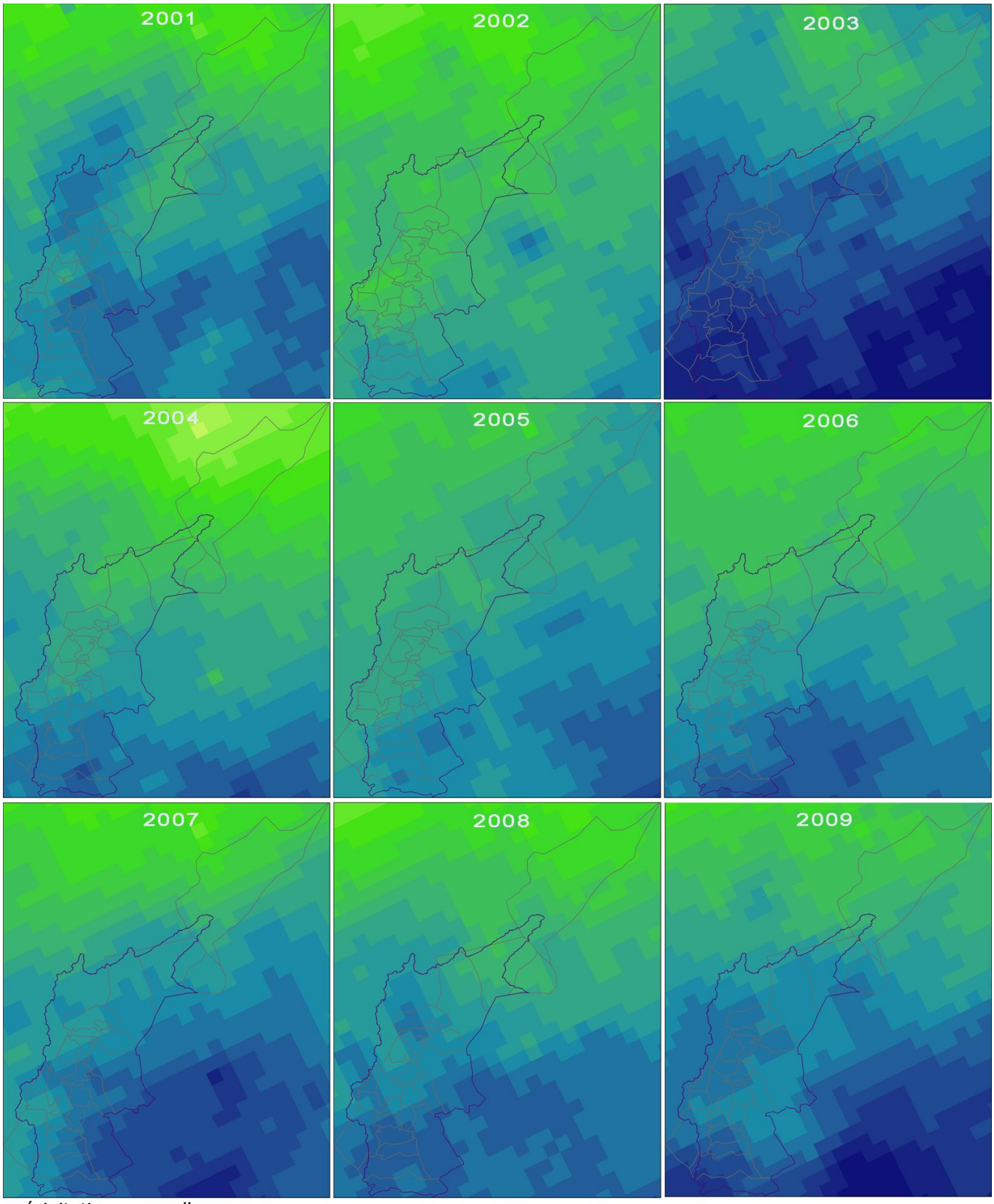


Fig. 8. Précipitations moyennes par an, calculées pour la période 1960-1990. Source : Hijmans *et al.* (2005).



précipitations annuelles
annual rainfall

0 - 50	500 - 550
50 - 100	550 - 600
100 - 150	600 - 650
150 - 200	650 - 700
200 - 250	700 - 750
250 - 300	750 - 800
300 - 350	800 - 850
350 - 400	850 - 900
400 - 450	900 - 950
450 - 500	950 -1200

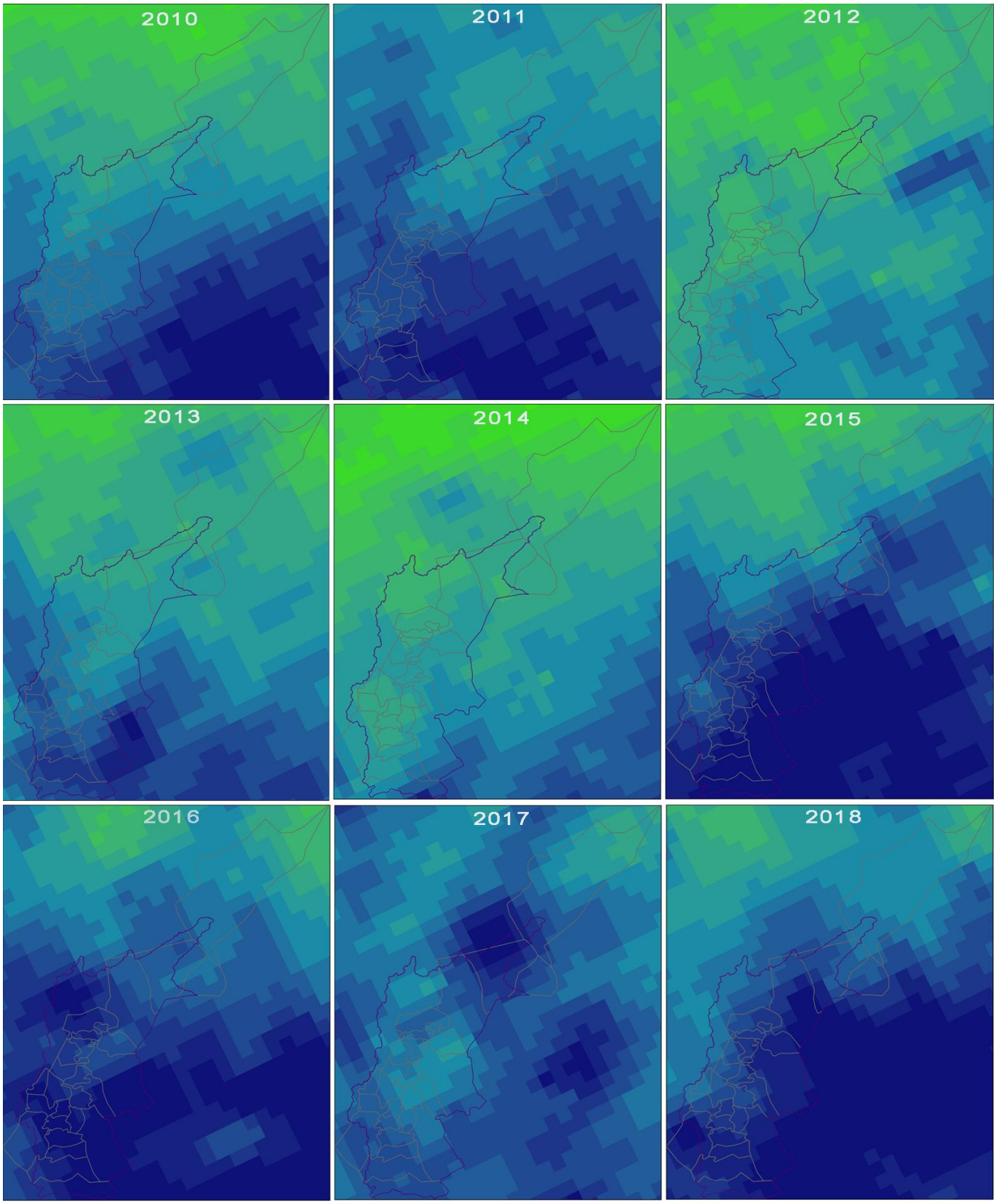


Fig. 9. Les précipitations annuelles (mm) en 2001-2018, estimées pour des zones de 117 km^2 (les carrés de 10,8 x 10,8 km sur les cartes) à partir d'observations satellitaires quotidiennes (RFE2 ; voir site Web de CPC / NCEP / NCEPO /NOAA).

Tableau 1. Les précipitations annuelles (2001-2018) ; même données que Fig. 9). Les précipitations annuelles moyennes, minimales et maximales sont calculées pour la vallée du Sourou, délimitées par la ligne violette. (Figures 8, 9).

	pluviosités annuelles, mm		
	moyenne	min.	max.
2001	665	514	772
2002	520	412	661
2003	816	576	940
2004	615	412	809
2005	605	524	725
2006	626	465	811
2007	693	542	849
2008	680	500	789
2009	708	522	887
2010	722	580	914
2011	592	481	700
2012	809	616	1041
2013	715	556	940
2014	614	513	848
2015	868	625	1088
2016	904	727	1026
2017	764	639	1017
2018	874	695	1036

3.3. Utilisation et la couverture des sols

L'utilisation et la couverture des sols sont principalement déterminées par les précipitations et les conditions du sol. Figures 8 et 9 donnent les précipitations et Fig. 10 les sols.

La carte d'utilisation et de couverture des sols en Afrique donnée par White (1983) était basée sur consultation d'experts et compilation d'informations locales. White (1983). Elle a distinguée vingt types de terrains, dont deux dans le Sourou: un type sahélien dans la partie la plus au nord-est («prairies boisées d'acacia + arbustes à feuilles persistantes ») et un type soudanien dans le reste de la région («forêt sèche + culture semi-permanente + arbustes»).

Depuis 1990, plusieurs tentatives ont été faites pour catégoriser l'utilisation et la couverture des sols avec des données satellitaires. Les cartes (Figures 11-15) montrent le résultat pour la vallée du Sourou. Les cartes ne sont pas faciles à comparer.

(1) Les cinq cartes utilisent différentes catégories d'utilisation et de couverture des sols.
(2) La résolution est différente : Fig. 11-12: 1000 m, Fig. 13: 300 m, Fig. 14: 100 m, Fig. 15: 20 m. Ceci explique, par exemple, pourquoi le fleuve Sourou avec sa vaste zone d'inondation n'est pas indiquée sur la Fig. 11 et 12 (résolution de 1000 m) et que des bâtiments, même de petits villages, ne sont que visibles dans la Fig. 15 (résolution 20 m).
(3) Le problème principal est qu'à base de l'interprétation des données satellitaires, les différentes catégories d'utilisation des sols dans la vallée du Sourou ne peuvent pas être distinguées. La distinction peut être faite au moyen des données satellitaires pour des types de terrain homogènes: forêts fermées, grandes plaines d'eau, plaines de sable nues, etc. Cependant, la plaine du Sourou est une mosaïque d'éléments paysagers fins, qui manque avec une résolution de plus de 100 m. De plus, une savane arborée ouverte diffère à peine d'un camp arboré, surtout si elle est en jachère.

Le troisième problème mentionné peut être résolu en ne distinguant pas les catégories, mais en mesurant pour chaque sous-zone quelle partie appartient à différents types (arbustes, arbres, sol nu, eau, etc.). Hansen (2013) a utilisé les satellites Landsat (résolution 30 m) pour estimer le pourcentage de terrain recouvert de forêt. Avec ses données, la coupe à blanc peut être clairement indiquée dans les forêts fermées, mais les arbres séparés dans un paysage de savane ou une terre agricole ne sont pas détectés avec la résolution de 30 m utilisée. Ses données (Fig. 16) montrent qu'il n'y a que des forêts dans le sud-est de la vallée du Sourou.

Les analyses satellitaires (Fig. 11-15) diffèrent grandement en termes de superficie agricole. Compte tenu de l'augmentation de la population (Fig. 7), il fallait s'attendre à une augmentation progressive. L'agriculture serait peu pratiquée en 1992 ou en 2000 (Figures 11-12), mais il n'y a pratiquement pas d'accord entre les deux cartes concernant la localisation des zones agricoles. La plus récente image satellite (Fig. 16) indique que presque toute la vallée est constituée de zones agricoles, mais une autre analyse récente (Fig. 15) en fait voir beaucoup moins.

Les problèmes d'interprétation mentionnés ci-dessus lors de la distinction de divers types d'utilisation des terres ne jouent pas un rôle lorsque l'analyse par télédétection se concentre sur un aspect: où se trouve la forêt (Fig. 16). Cependant, il y a un autre problème ici: la forêt est bien reconnue, mais pas les arbres isolés. La vallée du Sourou apparaît donc à la Fig. 16 sans arbres, alors qu'il y a des arbres en vrac partout, à la fois dans la savane et sur les terres agricoles.

Les problèmes d'interprétation susmentionnés peuvent également être résolus en modifiant le résultat de la télédétection sur la base d'autres sources d'informations. C'est arrivé avec la production de la carte de la végétation (Fig. 17) basée sur l'analyse d'images Spot-1 (1987-89) mais aussi sur d'inventaires sur le terrain, combinée à des cartes topographiques IGN des années 1950.

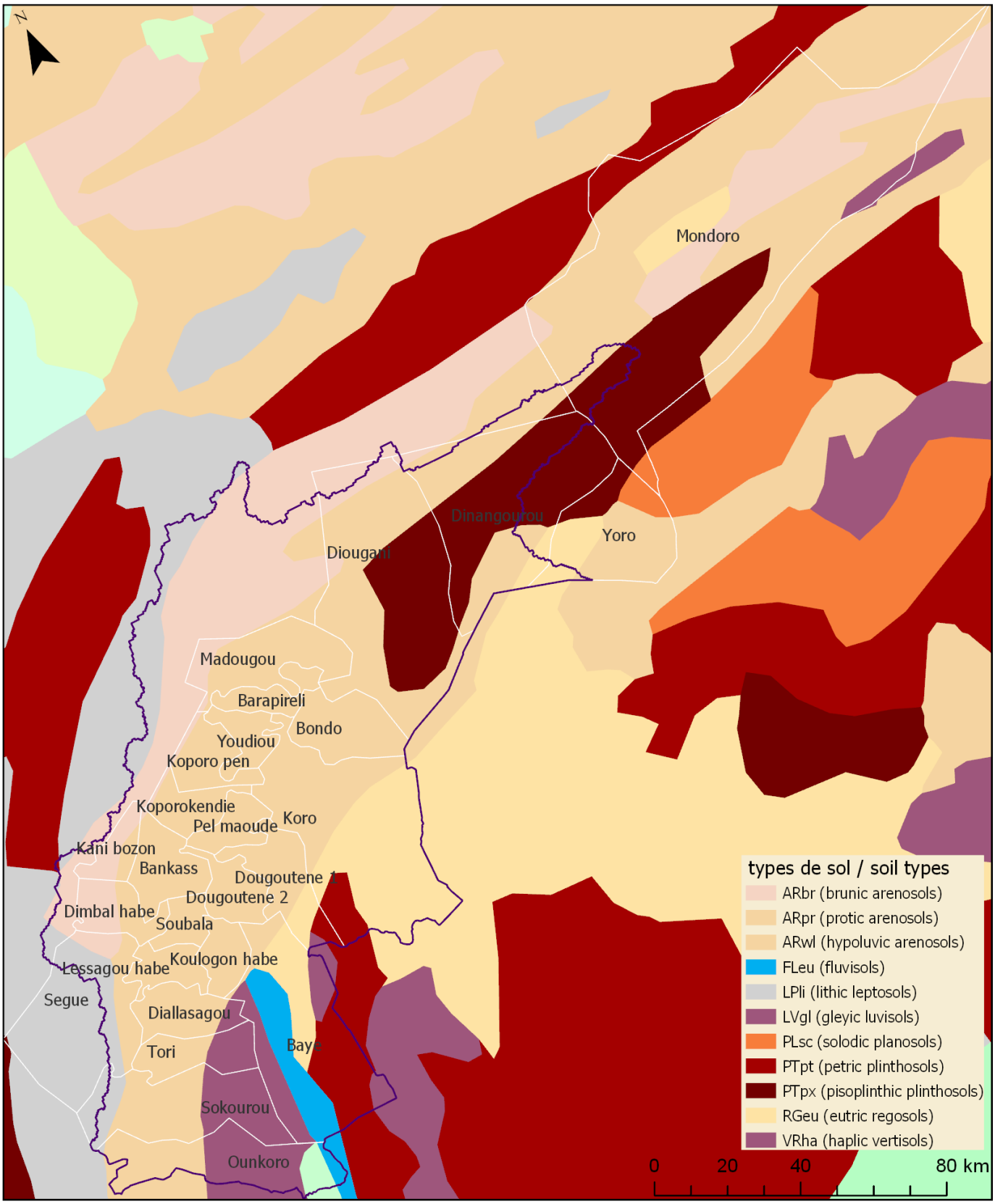


Fig. 10. Types de sol à travers le monde selon le système de classification et de corrélation WRB (World Reference Base for Soil Resources). Source : Jones *et al*. (2013). Le sol dans la vallée est principalement constitué d'arénosols, sols sableux faciles à travailler et donc très recherchés par les agriculteurs, mais ils ne retiennent qu'une petite quantité de matière organique (nutriments) et d'eau. Les sols argileux (fluvisols, luvisols, vertisols) conviennent aussi à l'agriculture, contrairement aux leptisols (roches), plintosols (pierre de fer) et regosols.

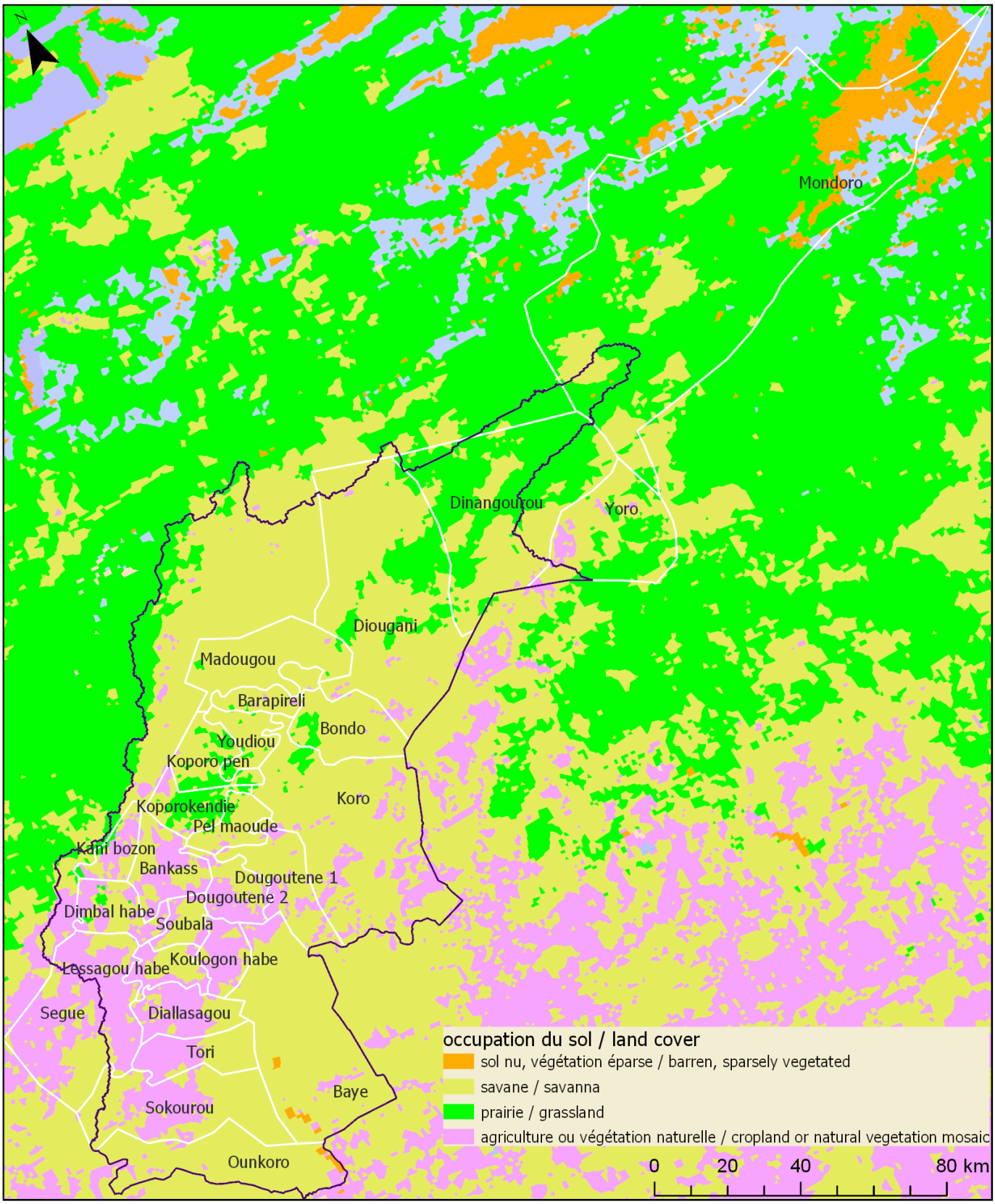


Fig. 11. Utilisation et couverture des sols, sur la base de données de télédétection de 1992-1993 (IGBP-DISCover basée sur données d'AVHRR ; Loveland *et al*. 2000). Résolution : 1000 m.

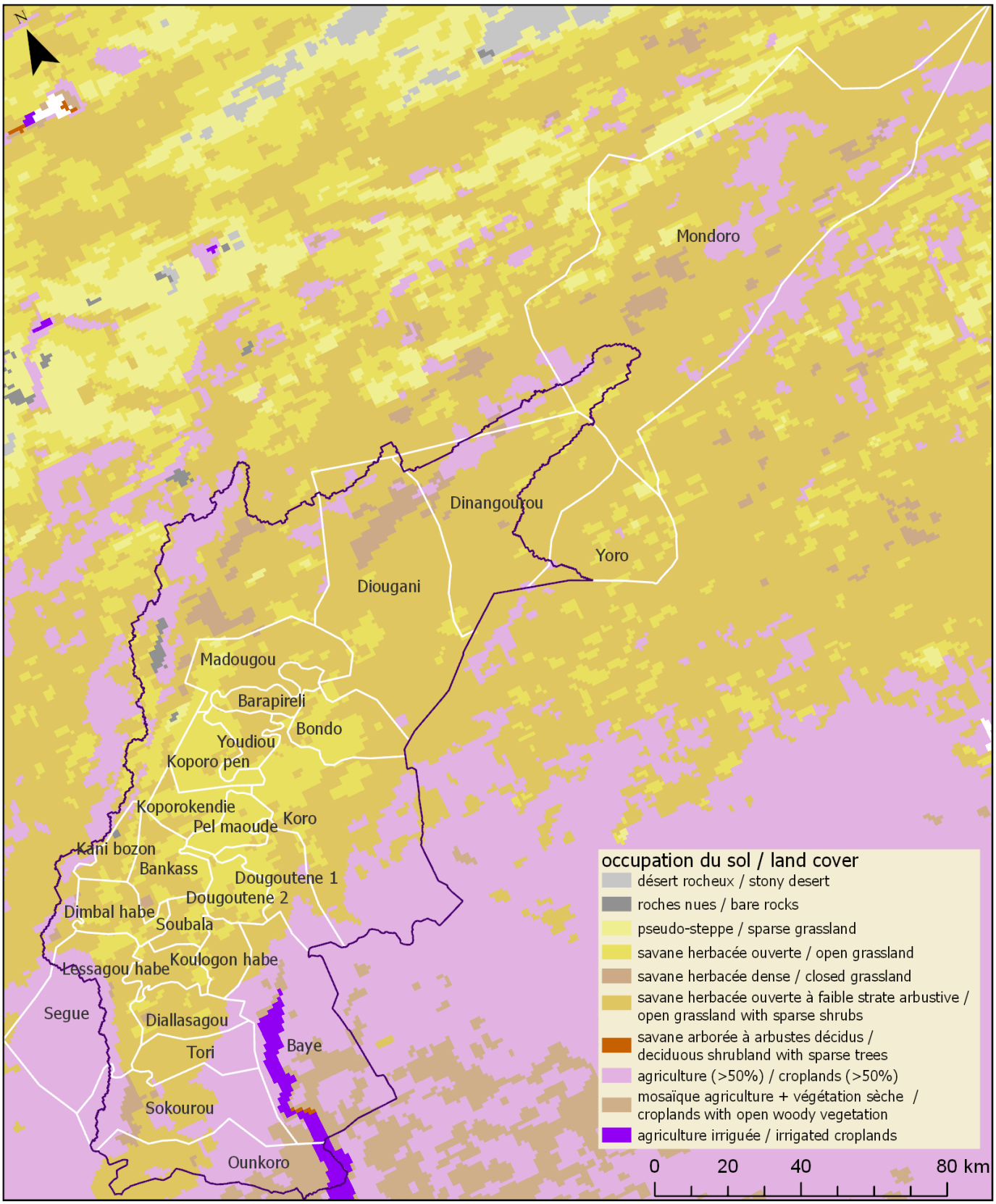


Fig. 12. Utilisation et couverture des sols, sur la base de données de télédétection de 2000. Source : Mayaux *et al*. 2004. Les données ont été acquises sur une base quotidienne tout au long de l'année 2000 par le capteur VEGETATION à bord du SPOT-4 satellite ; résolution : 1000 m.

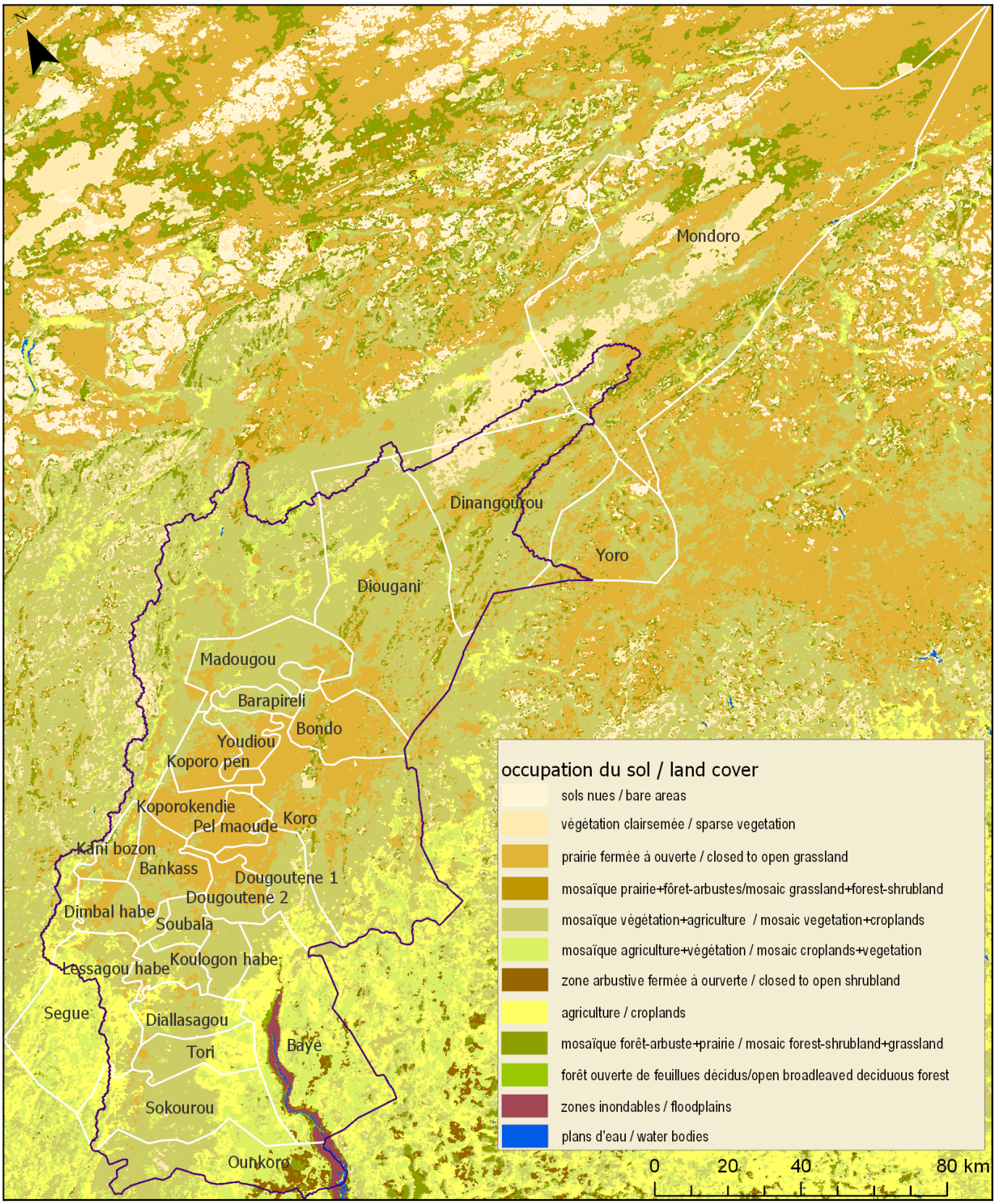


Fig. 13. Utilisation et couverture des sols, sur la base de données de télédétection de 2009. Source : ESA 2010 et UCLouvain (Globcover project utilisant capteur MERIS à bord de la mission satellite ENVISAT ; résolution : 300 m.

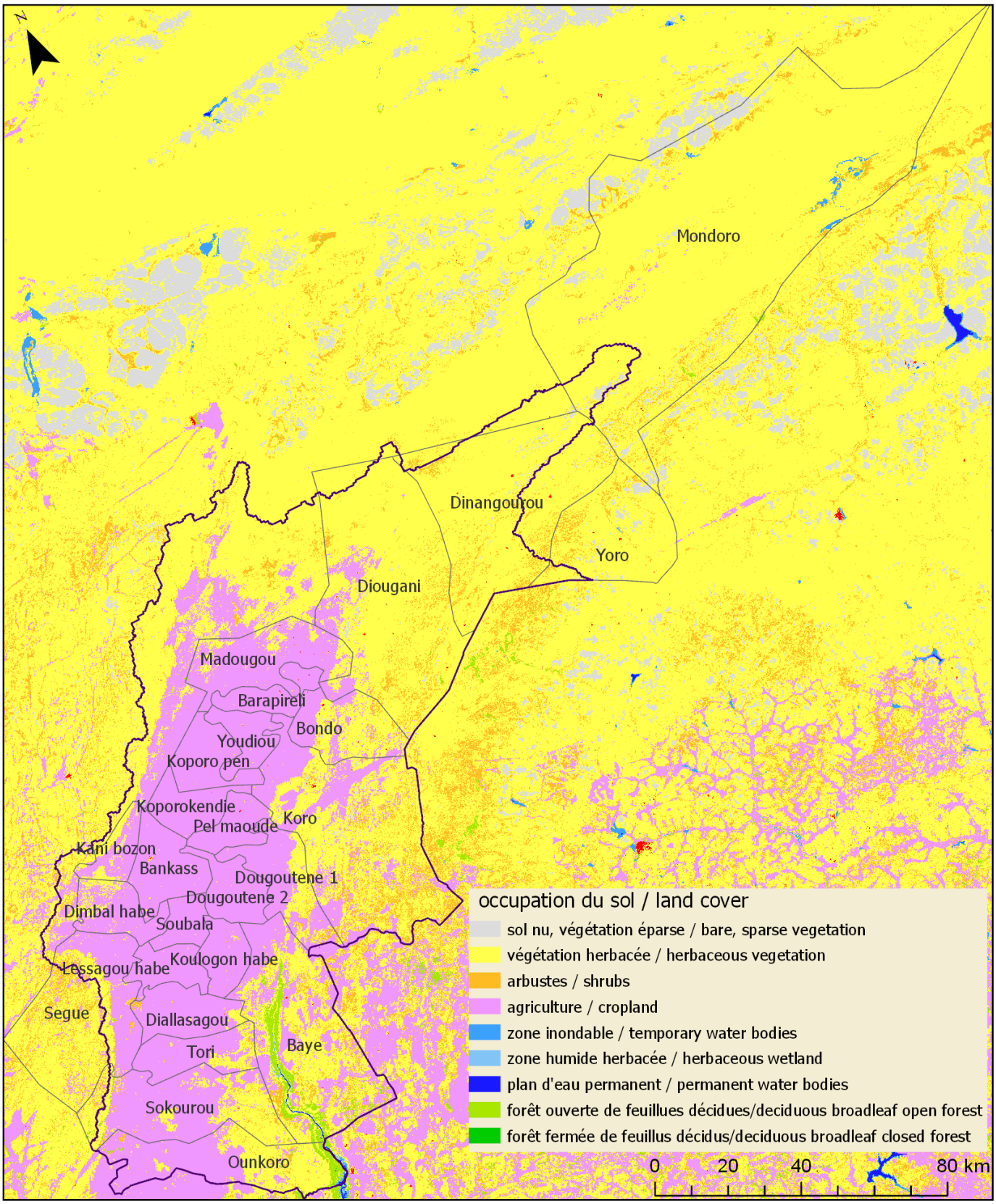


Fig. 14. Utilisation et couverture des sols, sur la base de données de télédétection de 2015. Source: Copernicus Global Land Service (CGLS), VITO, IIASA, WUR. Résolution : 100 m.

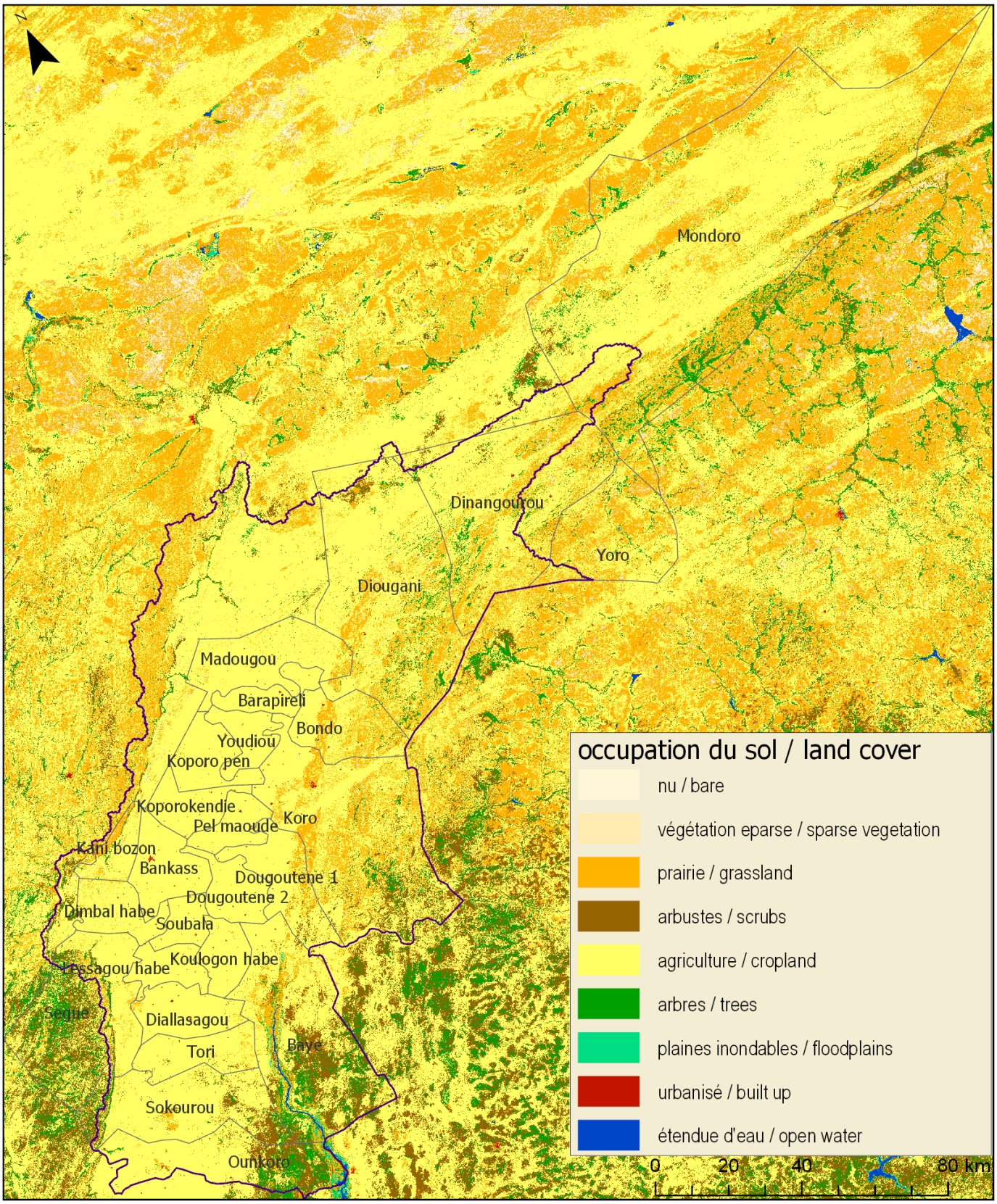


Fig. 15. Utilisation et couverture des sols, sur la base de données de télédétection de 2016. Source : ESA (Sentinel ; JRC/EC, DLR, Africover et SERVIR-RMCD). Résolution : 20 m.

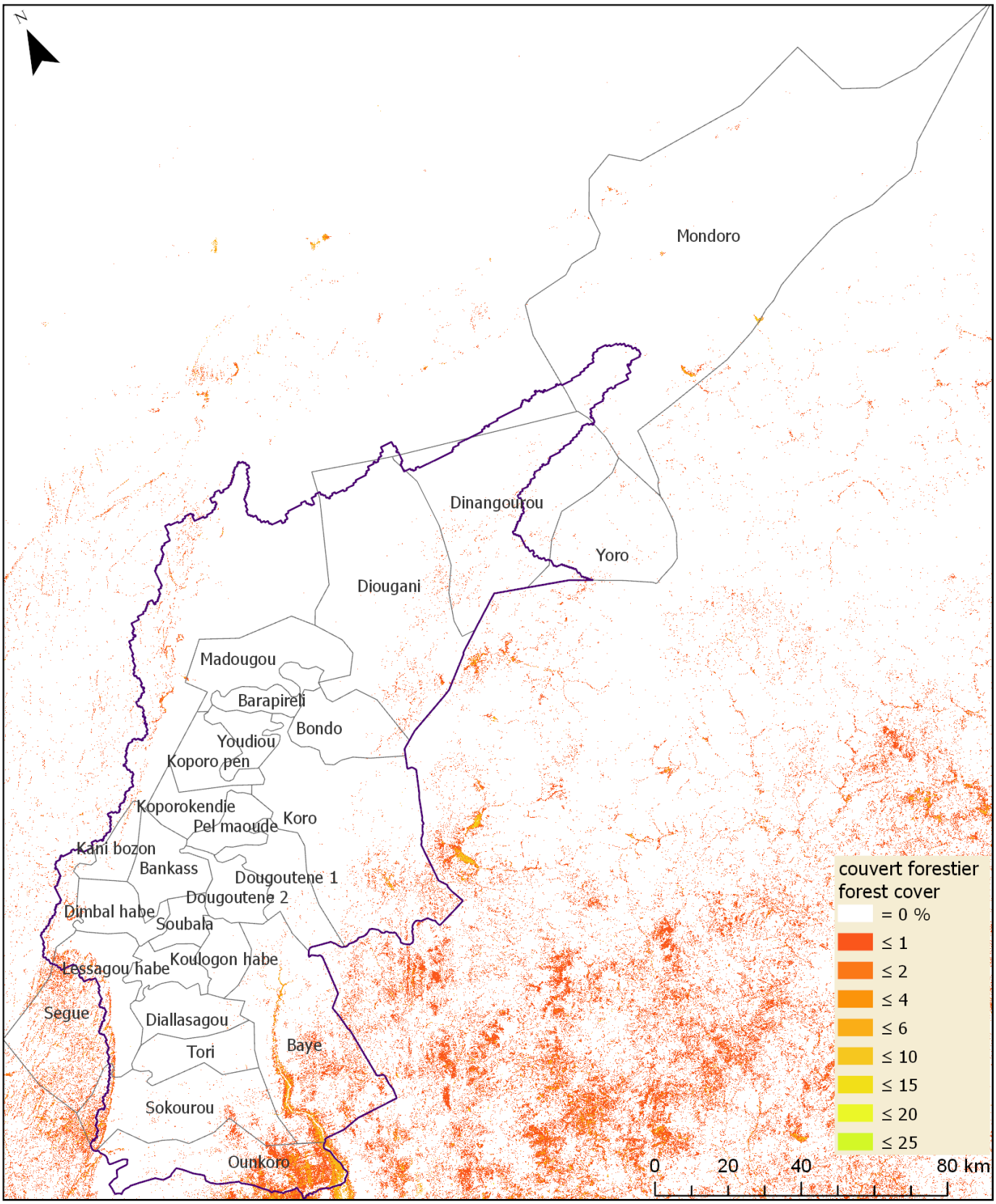


Fig. 16. Couvert forestier, où la forêt est définie comme «ayant au moins 25% de couverture pour les arbres d'au moins 5 m de hauteur» (Hansen *et al*. 2013). Résolution : 30 m.

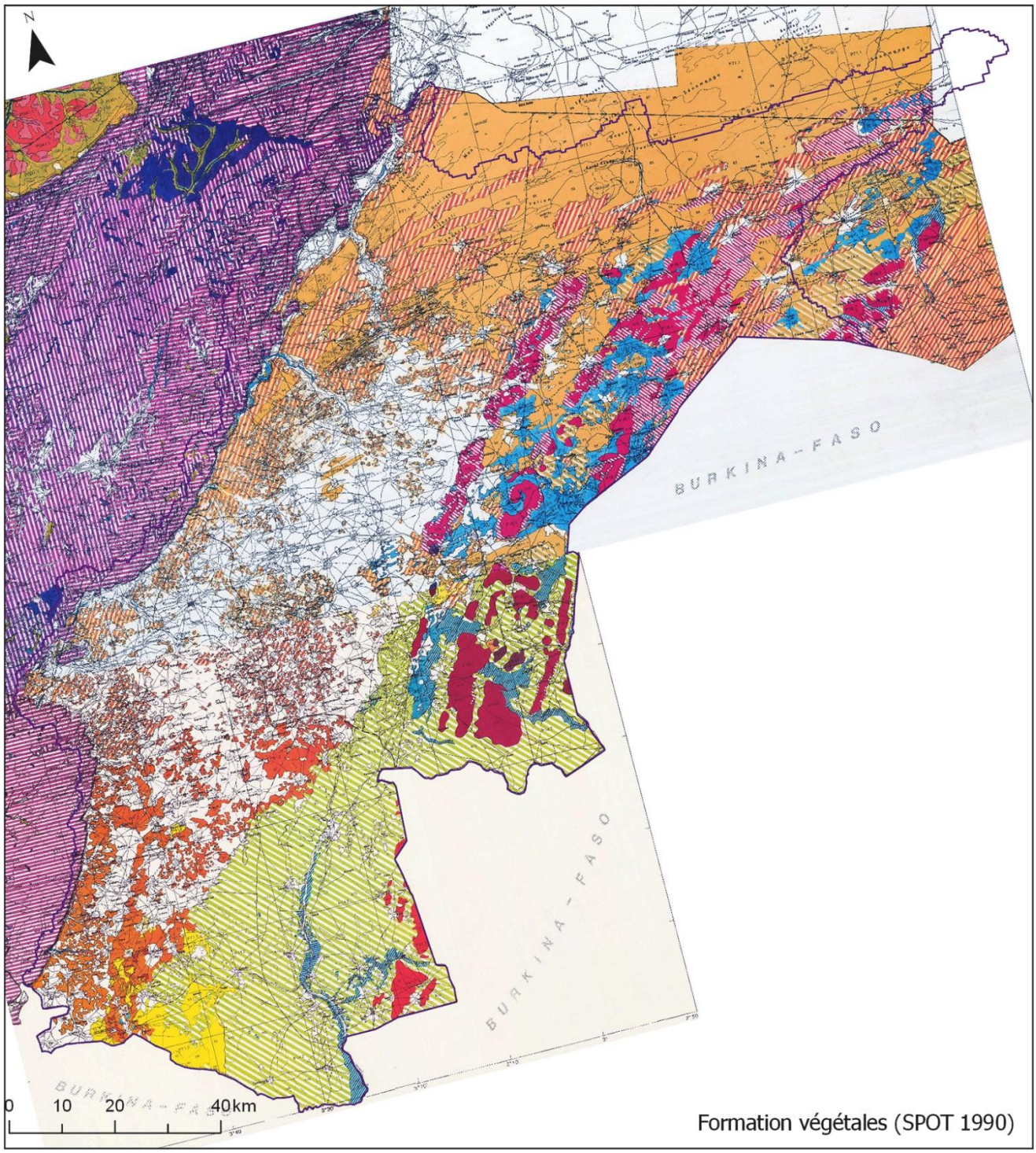


Fig. 17. Carte de végétation basée sur des images satellites (Spot 1 ; date d'acquisition des images : Octobre – Décembre 1987 – 1989) combinée à des travaux sur le terrain et à des cartes topographiques IGN. Différents types de savanes arborées et arbustives sont indiqués avec différentes couleurs (qui diffèrent entre les coupures méridionale (nr 13) et septentrionale (nr 18) et au coupure 18 pour l'ouest (Bandiagara) et l'est (Douentza). Les cultures et jachères récentes sont indiquées en blanc sur les deux coupures. Source : SYSAME, BDPA SCET AGRI, CTFT. Résolution d'images SPOT : 10 m.

4. Une comparaison des cartes

Les cartes topographiques sont basées sur des photos aériennes de 1952 à 1956, complétées par des visites sur le terrain dans les années suivantes. Les cartes indiquent les zones agricoles en détail (voir partie 2 de cette Atlas). Les champs pourraient donc être facilement dessinés à la main sur les cartes numérisées et géoréférencées (Fig. 18). Figure 18 compare la superficie agricole des années 1950 aux estimations récentes fondées sur des analyses par satellite (voir Fig. 13-16).

Il y a 60 ans, et encore aujourd'hui, il y avait peu ou pas d'agriculture dans le nord de notre zone d'étude (commune de Mondoro) et dans le sud-ouest (commune de la Segue). Par conséquent, l'analyse est limitée à la vallée du Sourou (Fig. 2 ; le contour violet indiqué). Pour cette raison, les cartes (Figures 18 à 23) concernent une zone plus petite que celle des 26 communes.

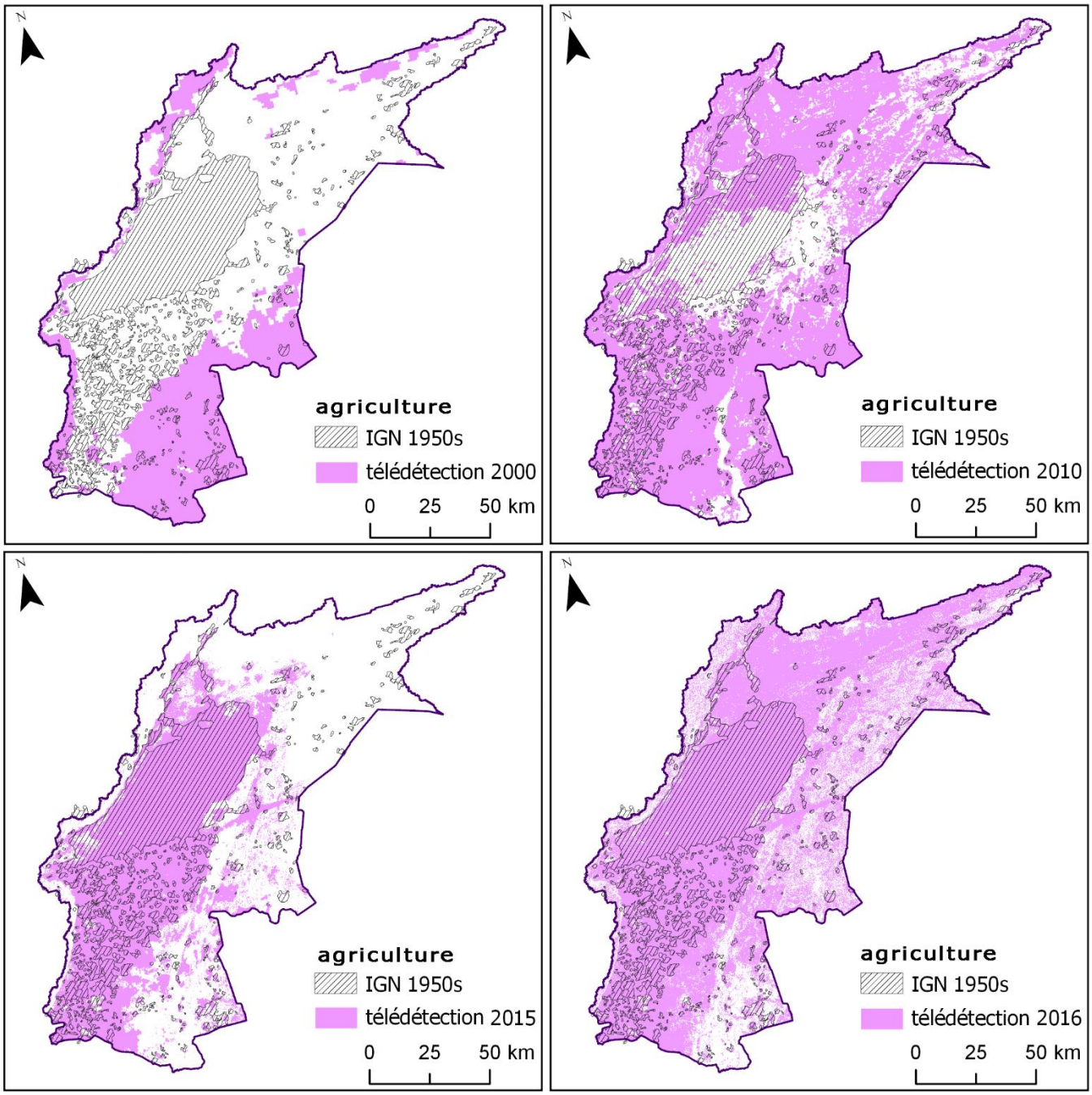


Fig. 18. La zone agricole selon l'interprétation de la télédétection de 1992, 2000, 2015 et 2016 (Fig. 13-16) et telle que tracée sur les cartes topographiques IGN des années 1950.

Nous nous attendions à ce que les champs qui étaient utilisés dans les années 50 soient toujours utilisés tels quels et qu'au cours des 60 dernières années, l'expansion de la surface agricole se fasse au détriment de la savane (au nord) et de la forêt (au sud). Globalement, cela semble être le cas lorsque l'agriculture sur la carte IGN est comparée à l'image satellite de 2015, mais pas pour les trois autres images satellites (Fig. 18).

La zone agricole sur la carte de végétation de 1990 (Fig. 17) correspond bien à celle indiquée sur la carte topographique 40 ans auparavant (Fig. 18), mais comme la carte de végétation est en partie basée sur les informations données sur la carte topographique, nous ne savons pas si la superficie agricole en 1990 (Fig. 17) est vraiment exacte.

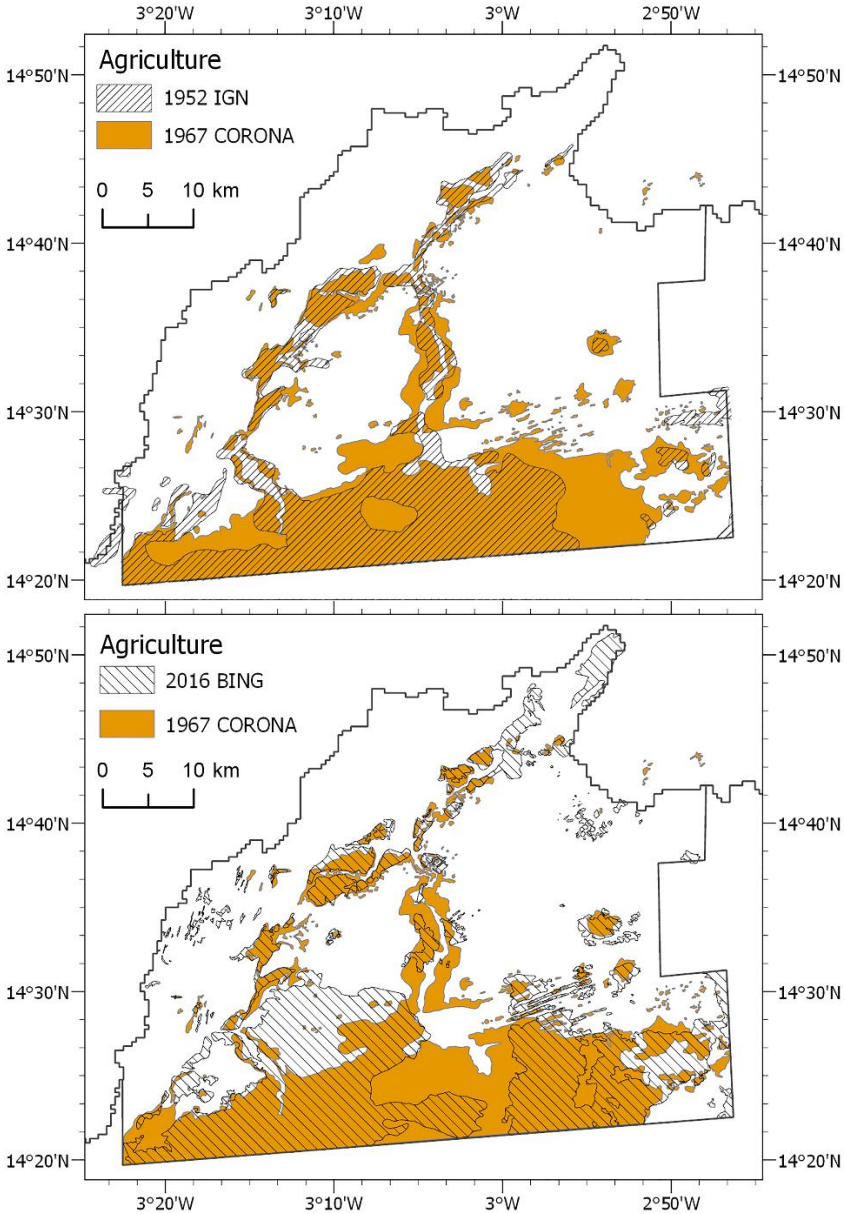


Fig. 19. La zone agricole dans la partie nord de la vallée du Sourou telle qu'elle peut être lue sur les photos satellite de CORONA de décembre 1967 (noir et blanc, résolution 1,5 m) par rapport à des champs tels que nous avons dessinés sur une carte topographique IGN (en haut) et une image satellite haute résolution récente (BING ; en bas).

Les champs peuvent être clairement vus sur les photos Corona. Nous avons dessiné ces champs à la main, mais comme il s'agissait de beaucoup de travail, cela n'a été fait que pour le nord de la vallée. Figure 19 (en haut) montre que la zone agricole sur la carte IGN est pareille aux photos de Corona dix ans plus tard, mais s'est aussi étendue davantage.

Les images satellite récentes avec une résolution de 0,5 m sont si précises que les parcelles agricoles sont parfaitement visibles. Pour la même zone que dans la Fig. 16, la zone agricole est dessinée à la main. Figure 19 (en bas) montre que la superficie agricole a encore augmenté au cours des 50 dernières années.

En conclusion: la télédétection ne fournit pas encore de résultats fiables pour Sourou à tous égards en terme d'utilisation et de couverture des sols. L'analyse de l'ESA 2015 (Fig. 13) semble correspondre le plus à la réalité. Étant donné que les interprétations satellite les plus anciennes sont incorrectes, le changement de paysage ne peut pas être indiqué. Néanmoins, cela peut être fait en comparant les cartes topographiques et les photos CORONA d'il y a 60 et 50 ans avec les plus récentes images satellite à haute résolution (résolution 0,5 à 12 m).

4.1. Expansion de la surface agricole

On peut constater l'expansion de la superficie agricole de la partie nord-ouest du Sourou en comparant "1952 IGN" et "2016 BING" (Figure 19). Le même type d'analyse peut être réalisé pour l'ensemble de la vallée, mais comme l'enregistrement de tous les champs sur l'image satellite récente prend beaucoup de temps, cela ne se produit pas (encore). C'est la raison pour laquelle nous avons effectué une analyse qui prend moins de temps: dans le cas d'une expansion de la superficie agricole, de nouveaux villages devraient apparaître. Afin d'étudier cela, tous les villages ont été dessinés sur la carte topographique, au total 1830 (dans lesquels les villages en décomposition sont comptés séparément dans différents quartiers distincts). De même, les villages ont été dessinés sur la plus récente image satellite disponible par BING Maps (https://www.bing.com/maps/) et ESRI's World Imagagery (https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer). Au total, neuf villages figurant sur les cartes IGN n'ont pas été retrouvés. Dans tous les cas, c'étaient de très petits villages. Il s'est avéré que 60 années plus tard, 1403 villages existaient, et dans presque tous les cas (considérablement) plus grands. Ensuite, au cours des 60 dernières années 418 nouveaux villages ont été fondés. La carte (Fig. 20) montre les existants (anciens) villages et villes (noir) et les nouveaux villages (rouge).

La Vallée du Sourou, pas loin de Bandiagara ; janvier 2016.

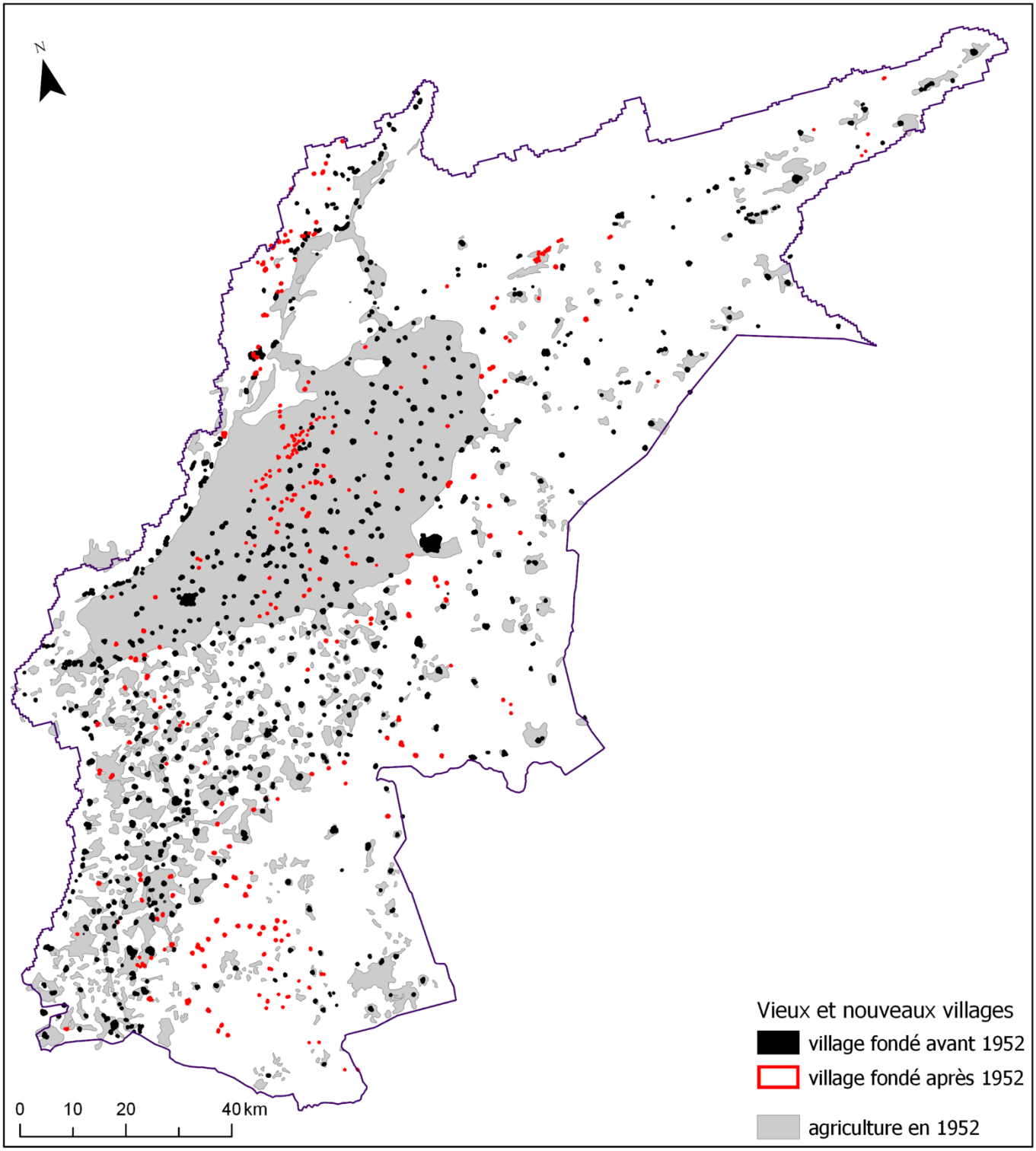


Fig. 20. Nouveaux et anciens villages et localisation des champs sur la carte topographique de l'IGN et / ou sur la plus récente image satellite disponible (BING, ESRI's World Imagagery).

Tableau 2. Nombre de villages et localisation des champs existant en 1952 (« ancien ») et fondé après 1952 (« nouveau ») dans la vallée de Sourou (voir Fig. 20), donnée pour 26 communes. Les villages situés dans la vallée du Sourou mais pas dans les 26 communes sont regroupés dans une catégorie « en dehors des 26 communes ». Sur ces 26 communes, deux communes sont dans le cercle de Koro (Haire, Dallah), trois dans le cercle de Bankass (Diankabou, Bamba, Kassa) et huit dans le cercle de Bandiagara (Metoumou, Ongoubou, Sengue ire, Wadouba, Sangha, Pelou, Dourou, Doucoumbo, Bara Sara).

	Nombre de villages et location des champs			
	ancien	nouveau	total	% nouveau
BANKASS	**716**	**190**	**906**	**21.0**
Bankass	41	5	46	10.9
Baye	66	23	89	25.8
Diallasagou	91	7	98	7.1
Dimbal habe	56	23	79	29.1
Kani bozon	42	3	45	6.7
Koulogon habe	68	1	69	1.4
Lessagou habe	62	7	69	10.1
Ounkoro	69	21	90	23.3
Segue	58	18	76	23.7
Sokourou	90	57	147	38.8
Soubala	11	3	14	21.4
Tori	62	22	84	26.2
DOUENTZA	**9**		**9**	**0.0**
Mondoro	9		9	0.0
KORO	**503**	**184**	**687**	**26.8**
Barapireli	17	1	18	5.6
Bondo	23	4	27	14.8
Dinangourou	54	4	58	6.9
Diougani	90	31	121	25.6
Dougoutene 1	36	14	50	28.0
Dougoutene 2	22	2	24	8.3
Koporo pen	23	66	89	74.2
Koporokendie	38	5	43	11.6
Koro	130	22	152	14.5
Madougou	36	9	45	20.0
Pel maoude	14	17	31	54.8
Yoro	7	0	7	0.0
Youdiou	13	9	22	40.9
En dehors des 26 communes	**175**	**44**	**219**	**20.1**
Total de vallée de Sourou	**1403**	**418**	**1821**	**23.0**

Le tableau 2 montre que 23% des villages actuels de la vallée du Sourou ont été fondés après 1952. Il y a relativement peu de nouveaux villages au nord et au nord-est, mais au sud de la vallée du Sourou, dans les communes de Baye, Ounkoro, Segue, Sokourou, Soubala et Tori, 21 à 38% des villages ont été fondés après 1952 (Fig. 20). La plupart des nouveaux villages (41-74%) se situent toutefois dans les communes de Koporo Pen, Pel maoude et Youdiou, dans la partie centre-ouest de la vallée du Sourou, où l'agriculture était déjà pratiquée à très grande échelle avant 1952 (Fig. 20).

5. Situation actuelle, analysée avec satellite Sentinel 2B

Les scènes satellitaires deviennent de plus en plus précises . Les images Sentinel qui sont disponibles tous les cinq jours nous permettent de combiner des scènes de différentes saisons et années pour suivre les changements du paysage. Nous montrons ici, à titre d'exemple, les mêmes scènes de Sentinel pour 7 et 9 novembre 2017 de trois manières différentes: une carte avec les parties couvertes d'eau (Fig. 21), une carte de la végétation (NDVI; Fig. 22) et une carte composite de fausse couleur (Fig. 23).

La carte avec les parties par des eaux montre que la vallée est principalement sèche début novembre (Fig. 21), mais lorsque la même carte est étudiée plus en détail, il semble y avoir encore de nombreux petits plans d'eau. La rivière Sourou, au sud-est de la vallée, est la seule grande zone d'eau avec de vastes plaines inondables couvertes de végétation.

Le NDVI est l'indice de végétation le plus connu et le plus utilisé. C'est un moyen simple, mais efficace pour quantifier la végétation verte. Le NDVI normalise la diffusion des feuilles vertes dans la longueur d'onde proche infrarouge et l'absorption de la chlorophylle dans la longueur d'onde rouge. Sur la carte (Fig. 22), les zones sans végétation (sable nu ou fond rocheux, eau libre) sont blanches. La zone agricole sans arbres et arbustes avec un sol nu en novembre est également blanche. Les zones avec une végétation verte sont vert foncé; ce sont aussi les zones humides (voir Fig. 21). Là où il y a plus d'arbres et d'arbustes, la carte est vert clair.

Beaucoup d'informations sont perdues lorsque les cartes sont réduites au format A4 (Fig. 21-23) et ils sont donc donnés dans la partie 2 de cet atlas à une échelle beaucoup plus grande pour 35 sous-zones.

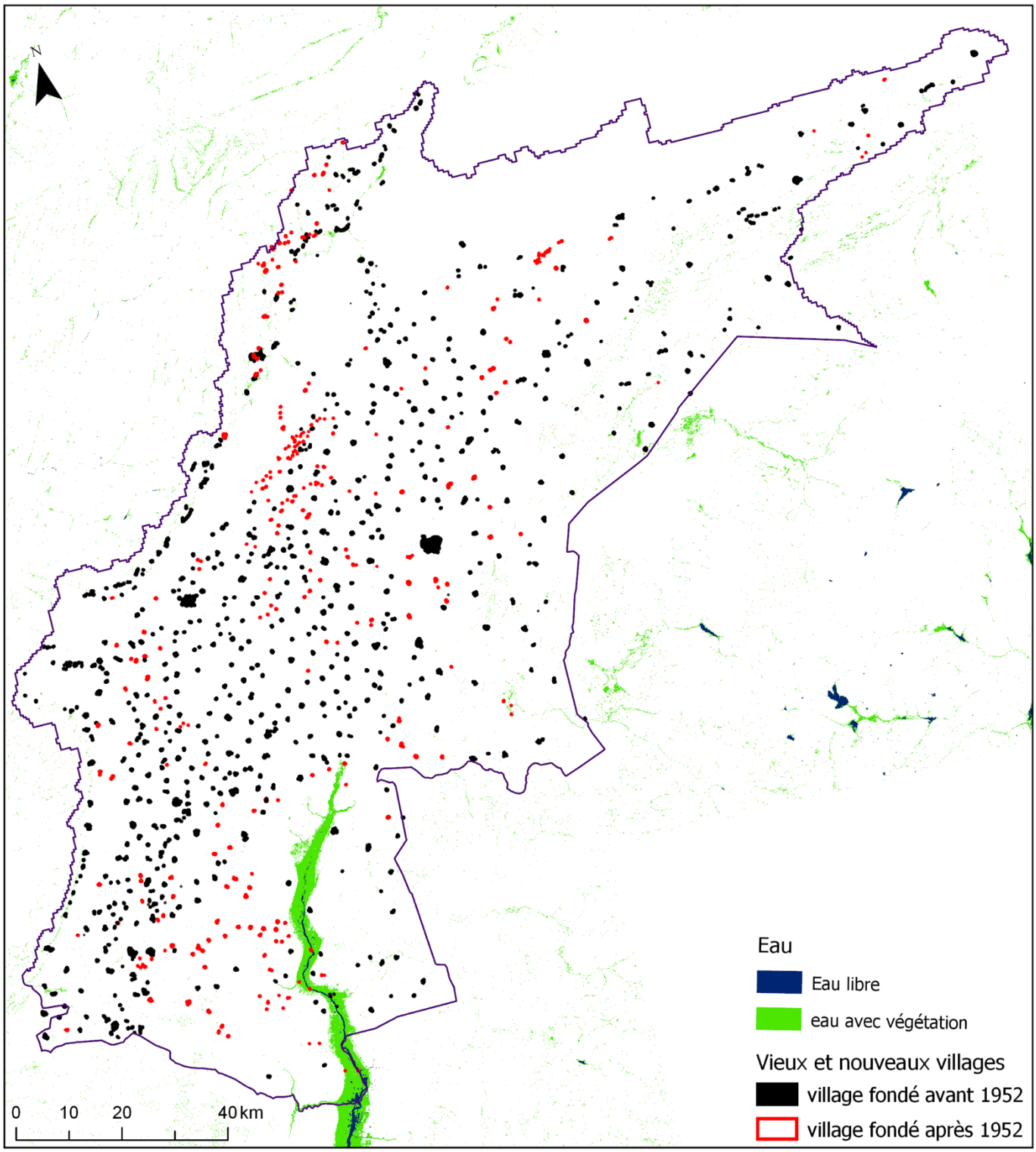


Fig. 21. Nouveaux et anciens villages et localisation des zones humides (couvertes ou non de plantes aquatiques) en novembre (d'après une analyse des images Sentinel des 7 et 9 novembre 2017).

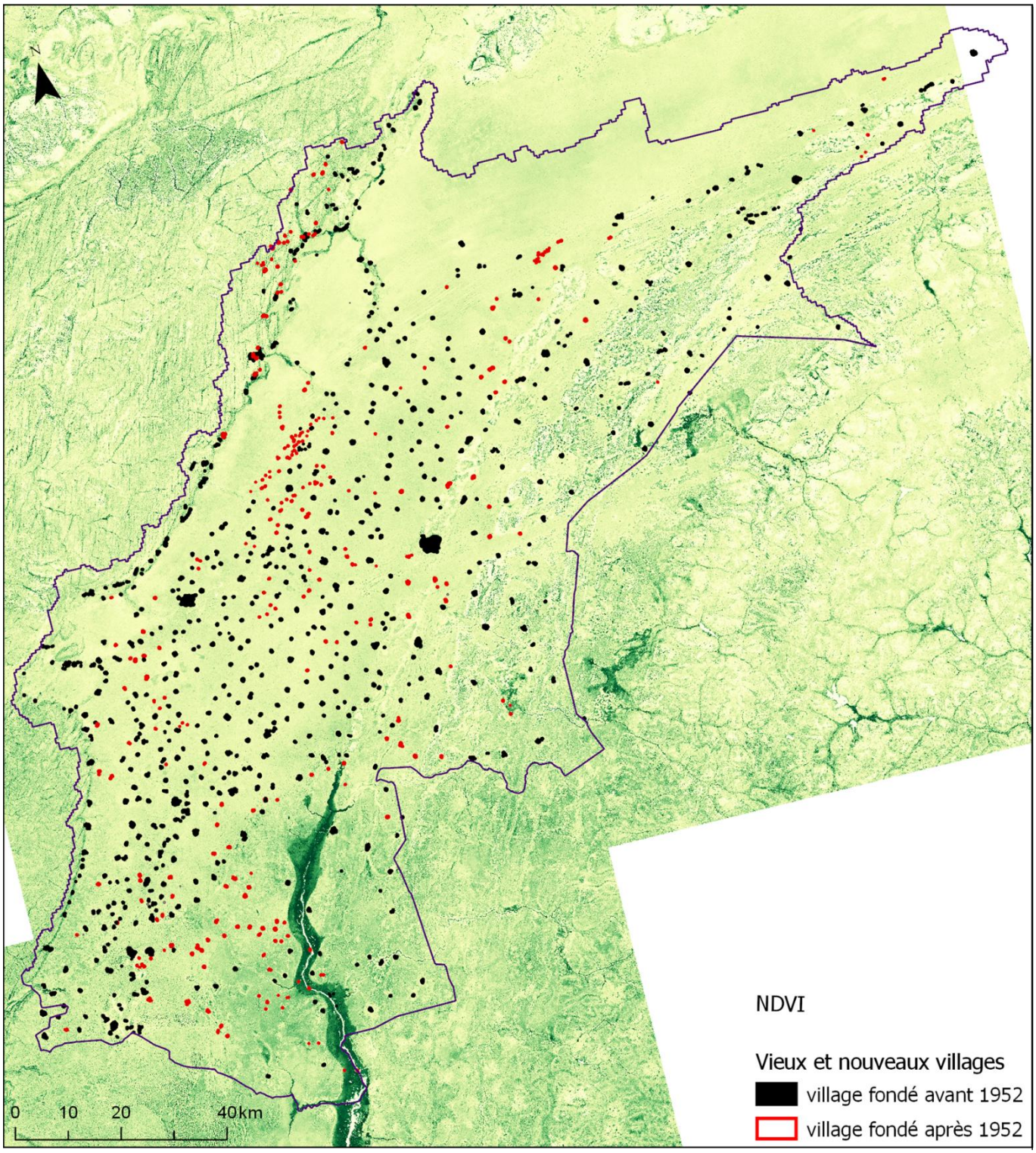


Fig. 22. Les villages anciens et les nouveaux villages ainsi que la végétation de novembre sont affichés en tant que valeur NDVI (d'après une analyse des images Sentinel des 7 et 9 novembre 2017). La végétation verte est vert foncé, aucune végétation n'est blanc, avec un gradient de blanc à vert (via jaune et vert clair) pour les valeurs intermédiaires.

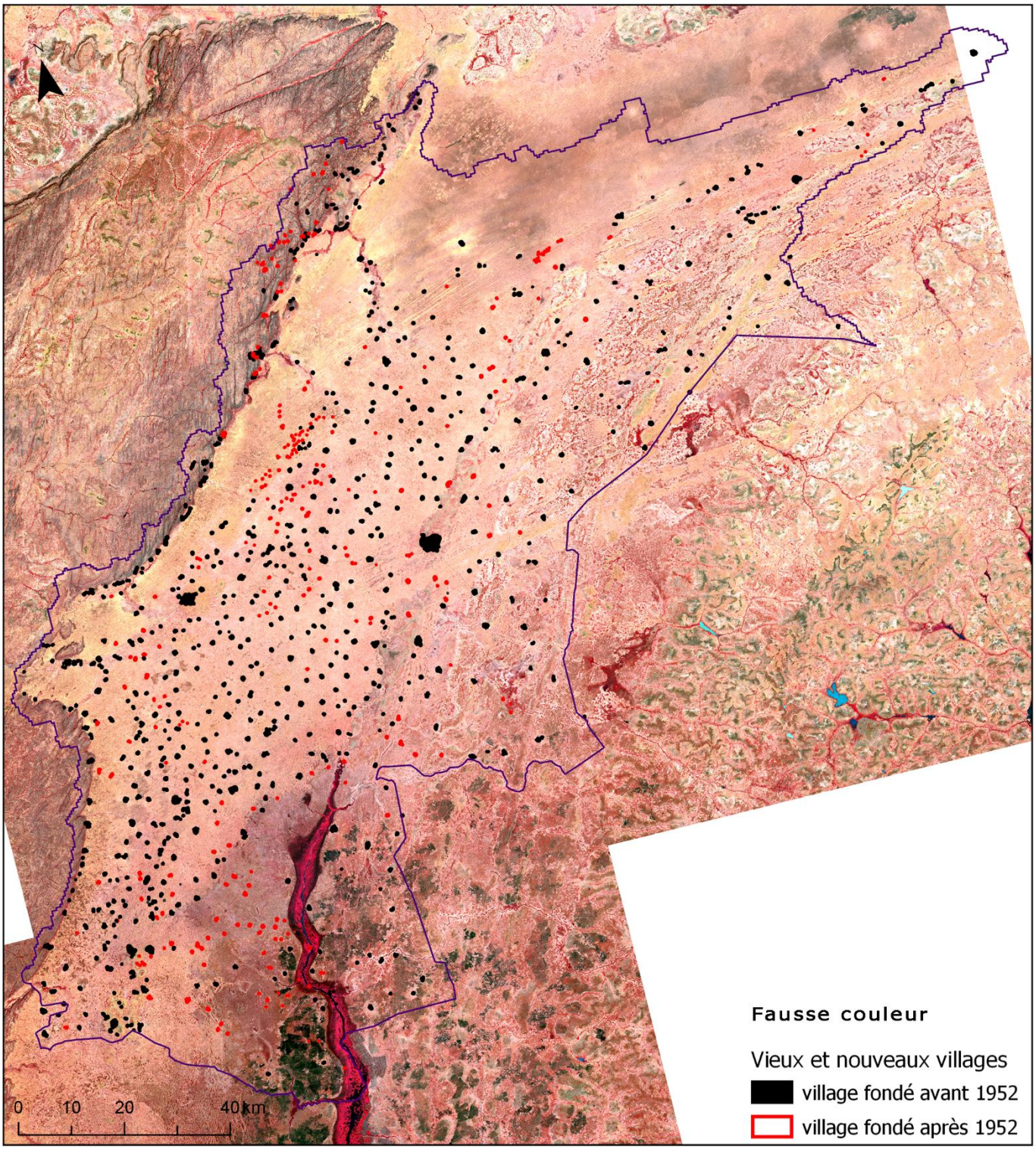


Fig. 23. Nouveaux et anciens villages et une image en fausses couleurs en novembre (d'après une analyse des images de Sentinel des 7 et 9 novembre 2017).
Pour créer un composite de fausses couleurs, la bande 3 est affichée en bleu, la bande 4 en vert et la bande 8 en rouge. Cette interprétation semble plutôt étrange - la végétation apparaît comme un rouge vif, car la végétation verte reflète facilement l'énergie de la lumière infrarouge! Cela ressemble aux images prises depuis un avion lors de l'utilisation d'un film infrarouge; très utile pour étudier la végétation. Un schéma composite en fausses couleurs permet de détecter facilement la végétation dans l'image. Dans ce type d'images composites en fausses couleurs, la végétation apparaît dans différentes nuances de rouge, selon les types. Sur la carte, les zones rocheuses et la vallée sablonneuse sont très bien distinguées. La zone agricole est rose pâle et la plaine inondable est rouge vif. La forêt ouverte et plus fermée est visible en vert clair et vert foncé.

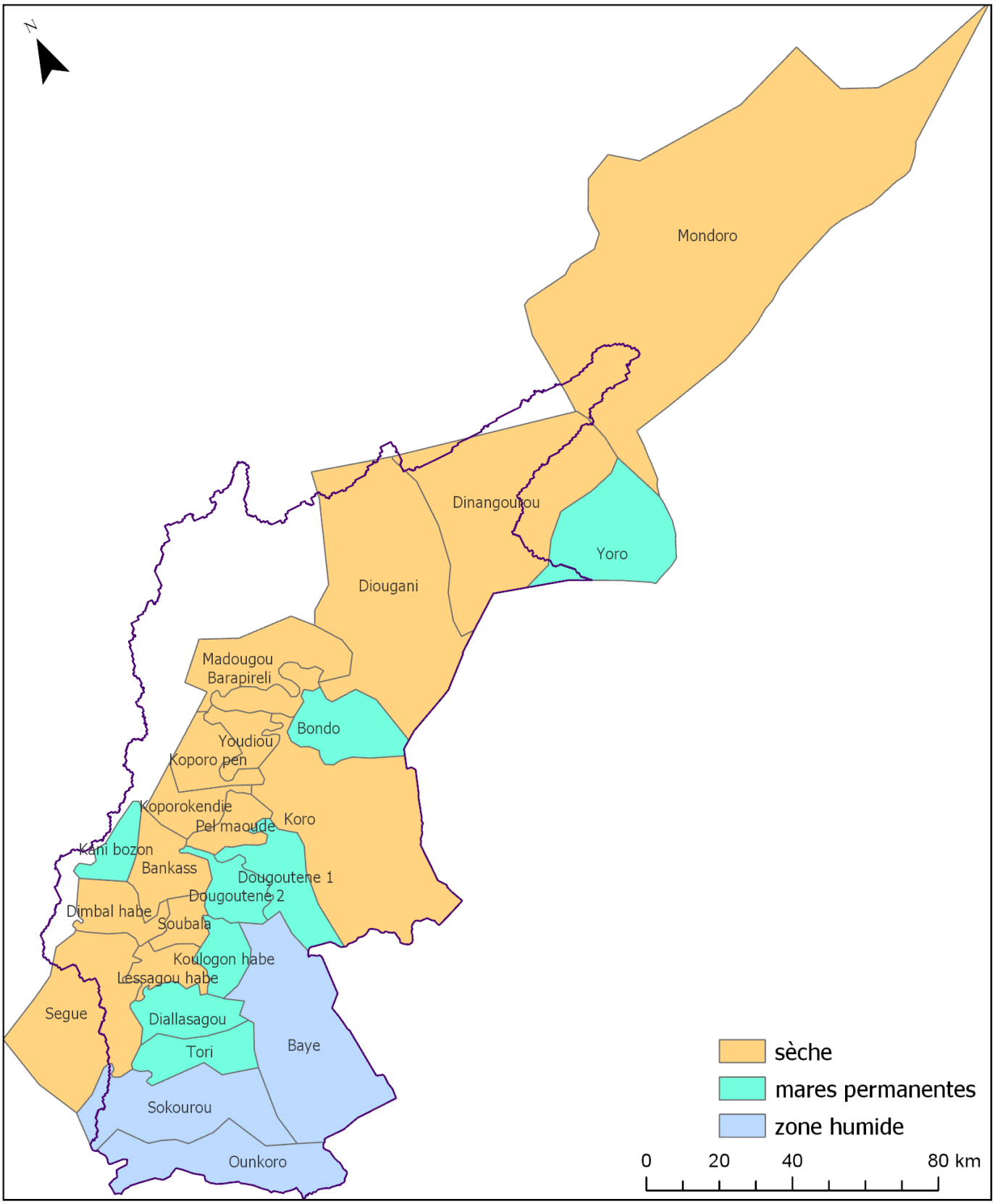


Fig. 24. Les programmes actuels de développement pour le Sourou divisent les 26 cercles en trois groupes: trois avec des zones humides, huit avec des mares permanentes et quinze sans eau de surface pendant la saison sèche. Cela correspond bien à ce que cet Atlas montre (voir la Fig. 21 et les cartes des eaux dans la partie 2 de cet atlas).

6. Comparaison des photos CORONA de 1967 avec des images satellitaires haute résolution récentes

Les figures 25-34 montrent à quel niveau de détail les changements dans le paysage peuvent être démontrés en effectuant un zoom avant au niveau du village et des champs environnants.

Une comparaison des photos CORONA de 1967 avec des images satellitaires haute résolution récentes montre très clairement comment le paysage de la vallée du Sourou a changé au cours des 50 dernières années. Ce changement ne peut être constaté que si nous effectuons un zoom avant au 1/25 000 et de préférence encore moins. Nous donnons ici pour huit zones une photo CORONA et une image Google Earth récente, numérotées de 1 à 8 (pour l'emplacement, voir Fig. 25).

Les degrés sont exprimés en unités décimales en Figures 24-33, donc 14°30’ est 14,5

En conclusion : Il serait très intéressant de procéder à une analyse détaillée des photographies de la CORONA par rapport aux images satellitaires haute résolution récentes, et d'effectuer le même type d'analyse pour la conversion de forêts en terres agricoles dans la partie sud de la vallée du Sourou et les modifications de la zone d'inondation le long de la rivière Sourou

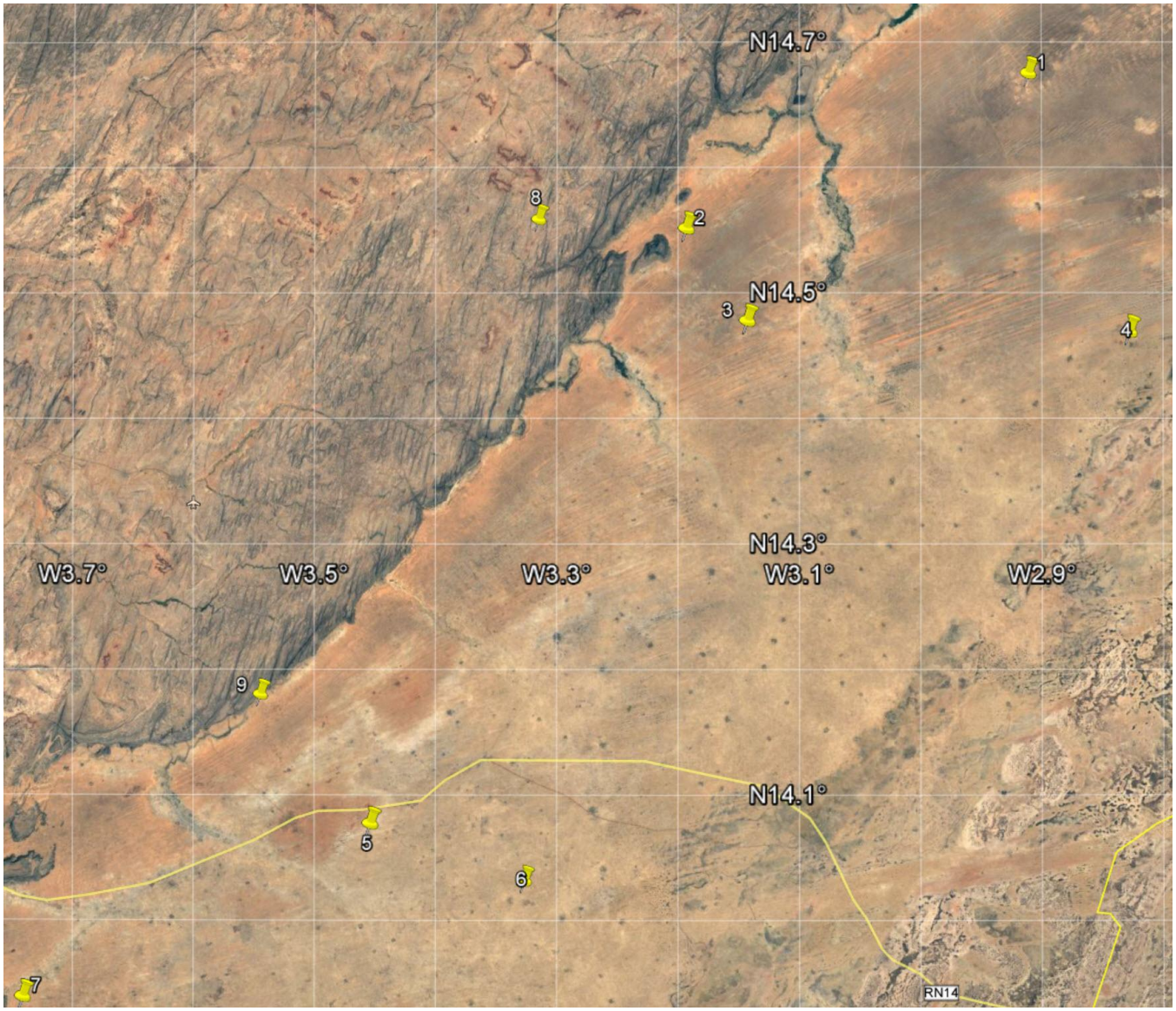


Fig. 25. Neuf sites au milieu de la vallée de Sourou où les photos CORONA et images satellitaires à haute résolution sont comparés (voir Figures 26-34).

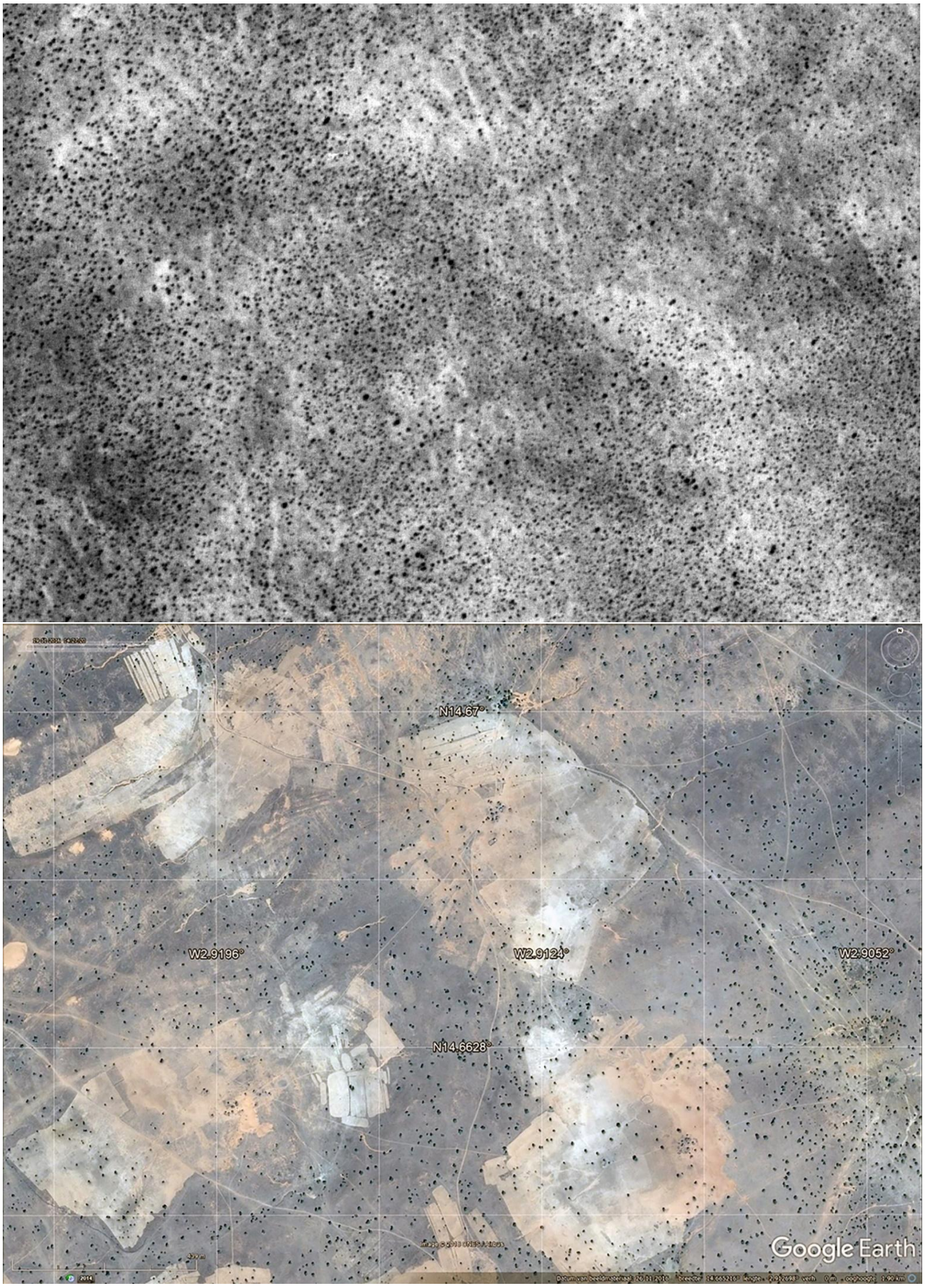


Fig. 26. Site 1 (2178 x 1519 m),14,663°Nord et 2,915°Ouest; 10-12-1967 (CORONA, haut) et 26-21-2016 (Google Earth, bas). En 1967, c'était une savane intacte composée de nombreux arbres et arbustes. En 2016, deux petits villages sont venus et les agriculteurs ont converti la savane arborée en terres agricoles, où il y a encore des arbres, mais avec une densité beaucoup plus faible. La densité des arbres dans la savane non encore exploitée est plus élevée que sur les terres agricoles, mais beaucoup plus basse qu'il y a un demi-siècle. De nombreux arbres sont probablement morts lors de la grande sécheresse (1969-1992).

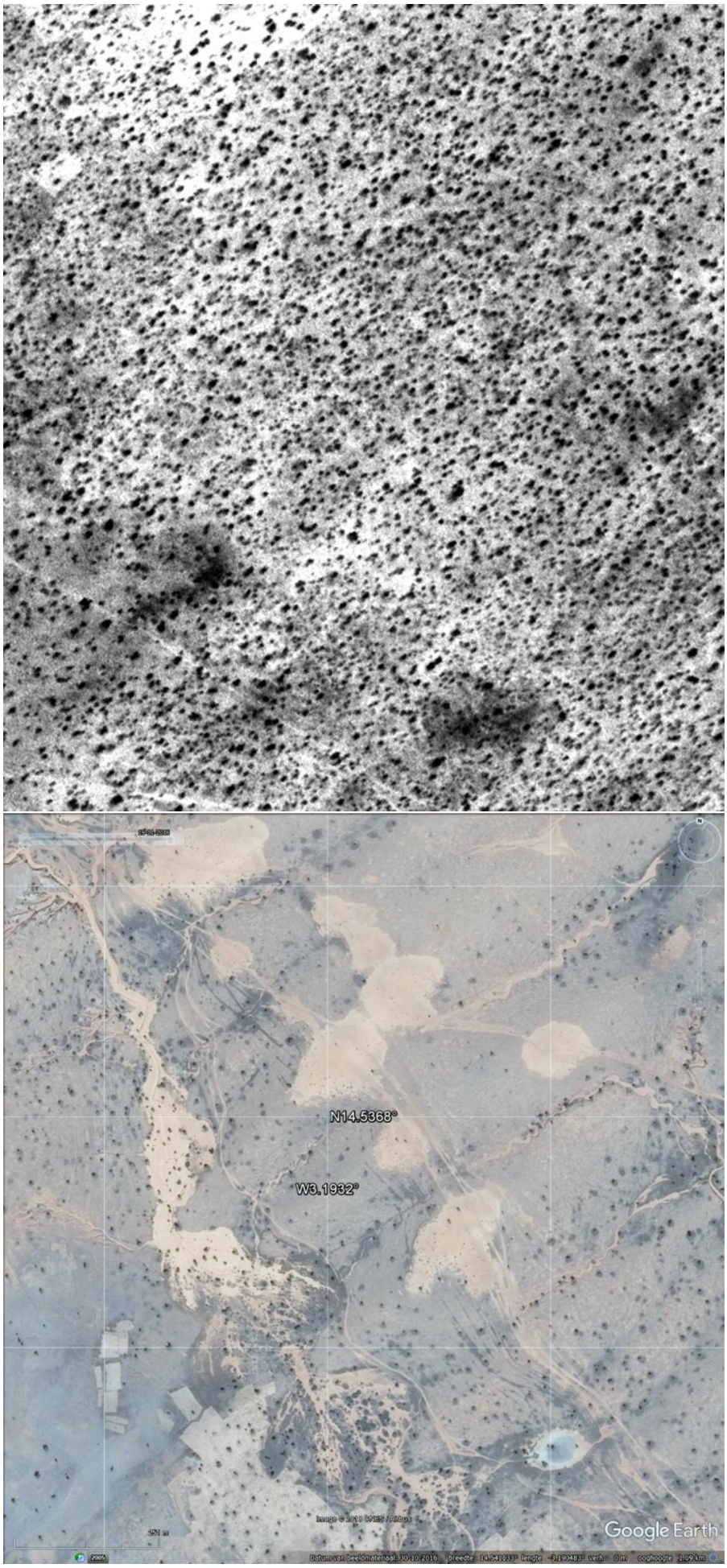


Fig. 27. Site 2 (1241 x 1269 m). 14,536°Nord et 3,193°Ouest. 10-12-1967 (en haut) et 20-10-2016 (en bas). Tout comme le site 1, le site 2 était une savane arborée vierge. Un demi-siècle plus tard, il y a quelques parcelles agricoles dans le sud-ouest du site, mais presque tous les arbres ont disparu. Sur le site, du nord au sud, s'étend une piste où des dunes à la dérive nue en mouvement. Il y a maintenant des canaux d'érosion à gauche et à droite de cette piste. Ce sont des développements inquiétants.

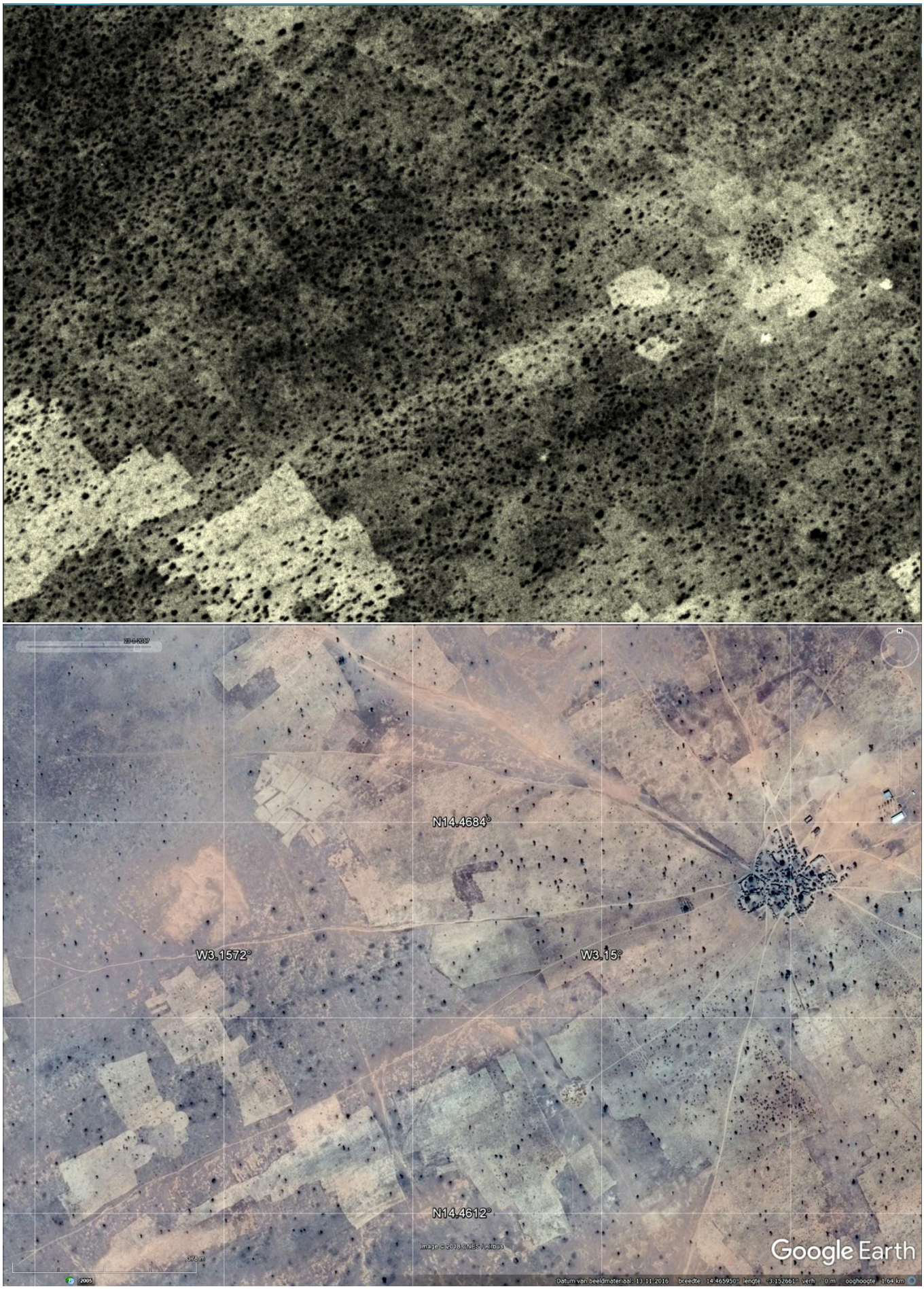


Fig. 28. Site 3 (1875 x 1328 m). 14,465°Nord et 3,153°Ouest. 10-12-1967 (en haut) et 13-11-2016 (en bas). Il y avait déjà un village avec des champs en 1967. Cinquante ans plus tard, la population y habite de plus en plus et la quasi-totalité de la savane est convertie en terres agricoles. Ici aussi, la plupart des arbres ont disparu, avec seulement quelques arbres et arbustes sur les terres agricoles et la savane restante.

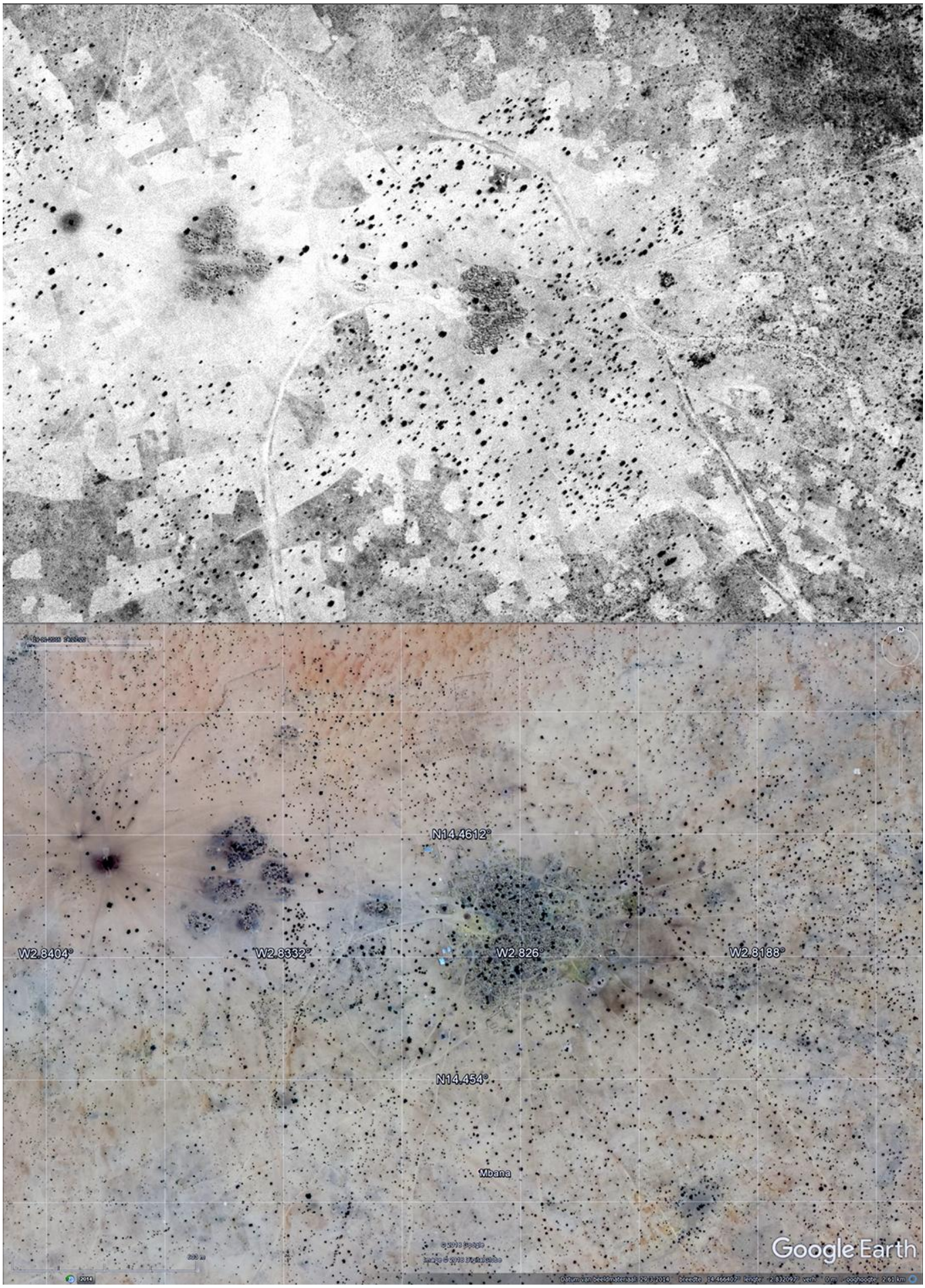


Fig. 29. Site 4 (1020 x 714 m). 14,453°Nord et 2,830°Ouest. 10-12-1967 (en haut) et 29-3-2014 (en bas). Il y avait déjà un village en 1967 (et aussi un puits pour le bétail (à gauche)). Le peu de savane d'arbres qui existait encore en 1967 a ensuite été miné. En 1967, la densité des arbres était déjà assez faible et ne fut plus réduite, mais même augmentée.

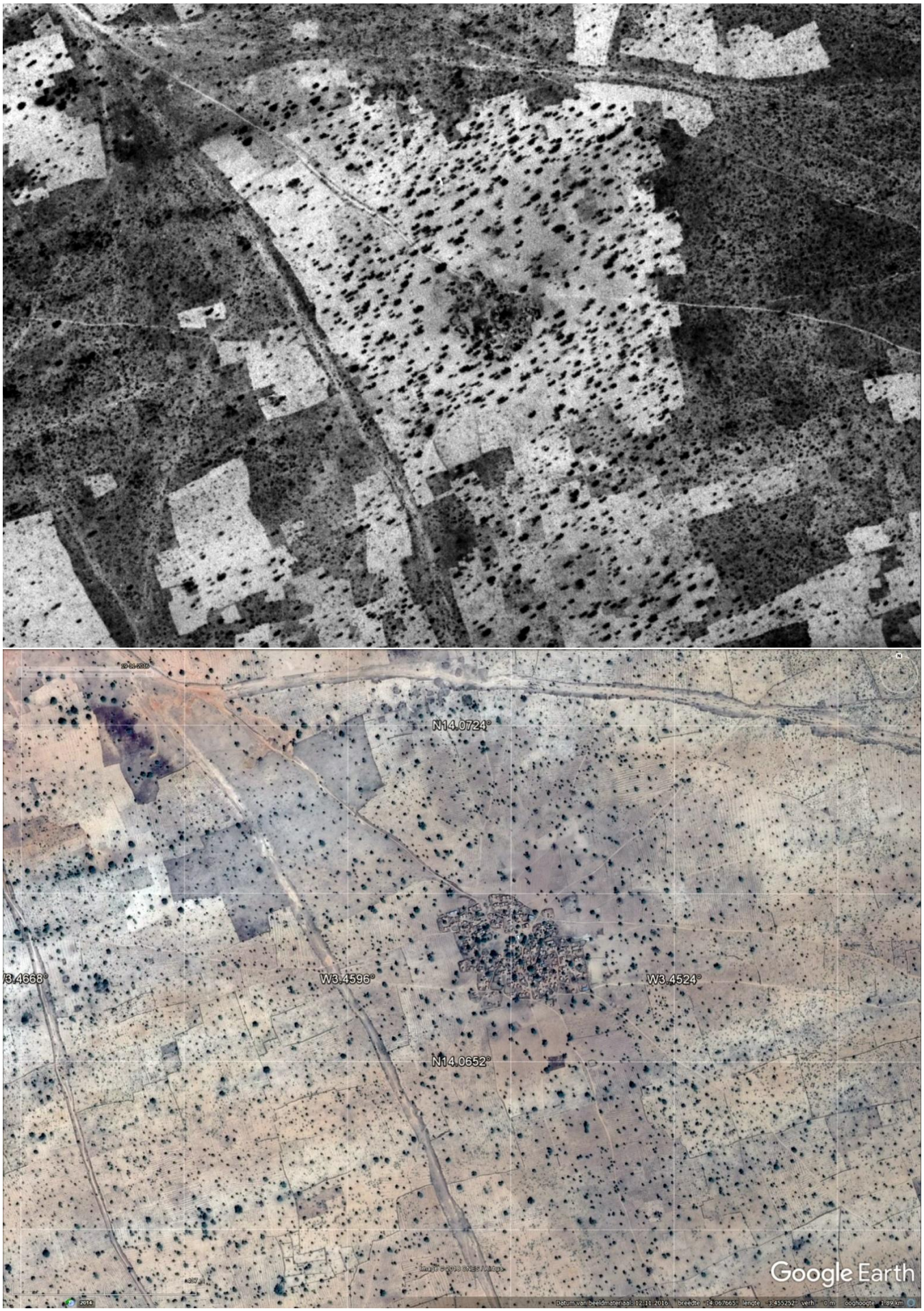


Fig. 30. Site 5 (2168 x 1523 m). 14.065°Nord et 3.456°Ouest. 10-12-1967 (en haut) et 12-11-2016 (en bas).Le site 5 possédait déjà une zone agricole autour du village en 1967 avec de nombreux et de grands arbres sur les terres agricoles. En 2016, toutes les savanes ont disparu et il y a encore beaucoup d'arbres sur les terres agricoles, mais moins qu'en 1967.

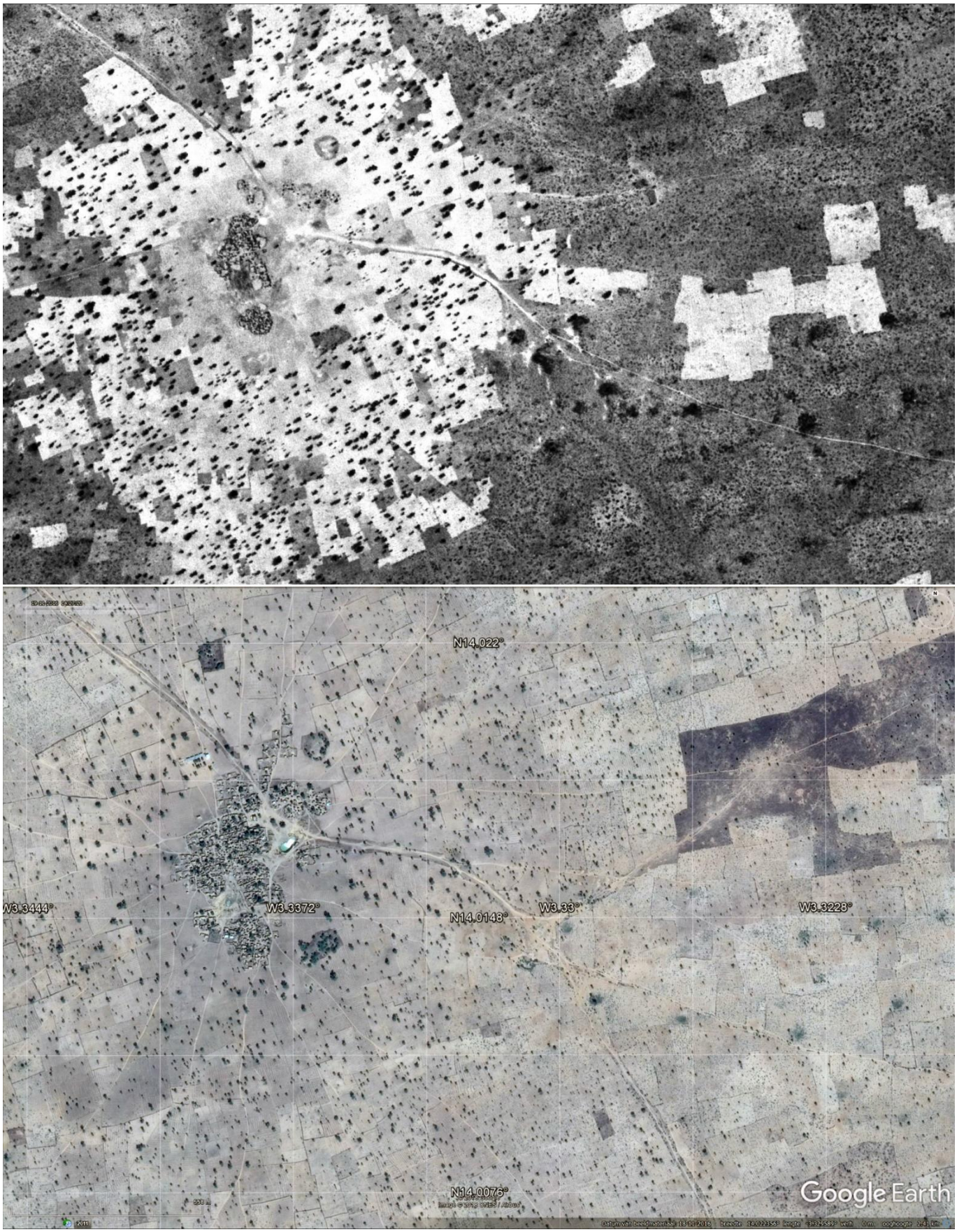


Fig. 31. Site 6 (2759 x 1811 m). 14,015°Nord et 3.334°Ouest. 10-12-1967 (en haut) et 18-11-2016 (en bas). Pour le site 6, il en est presque de même que pour le site 5 (voir Fig. 30) : le village est devenu plus grand, les terres agricoles s'étendent sur une plus grande superficie et il reste encore un petit morceau qui n'a pas encore été exploité. La densité des arbres sur les terres agricoles n’est pas beaucoup plus basse, mais les arbres sont beaucoup plus petits.

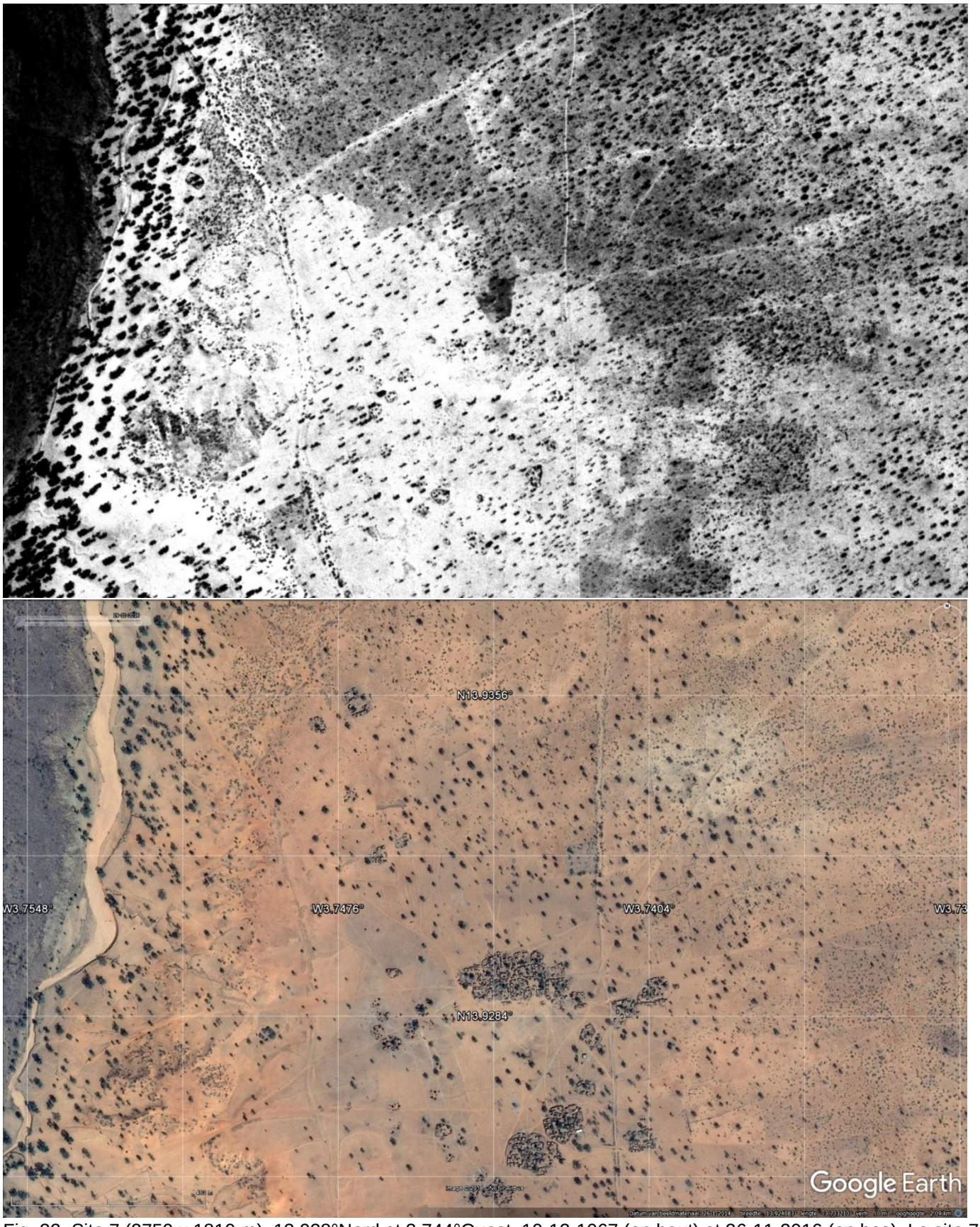


Fig. 32. Site 7 (2759 x 1810 m). 13,928°Nord et 3.744°Ouest. 10-12-1967 (en haut) et 26-11-2016 (en bas). Le site 7 se trouve au pied de la pente rocheuse (à gauche). En 1967, il y avait des arbres remarquablement grands dans une densité élevée. 50 ans plus tard, ils ont disparu et ont été en partie remplacés par de plus petits arbres. Comme dans le site 2 (voir Fig. 27), une tranchée a été créée, avec ici aussi le risque d'érosion. En 2016, sur les terres agricoles autour du village, il y a toujours autant d'arbres, mais aussi de grande taille, comme en 1967. La savane arboricole (à droite) est toujours là, mais les plus gros arbres ont disparu. C'est maintenant devenu une savane où dominent les petits arbustes.

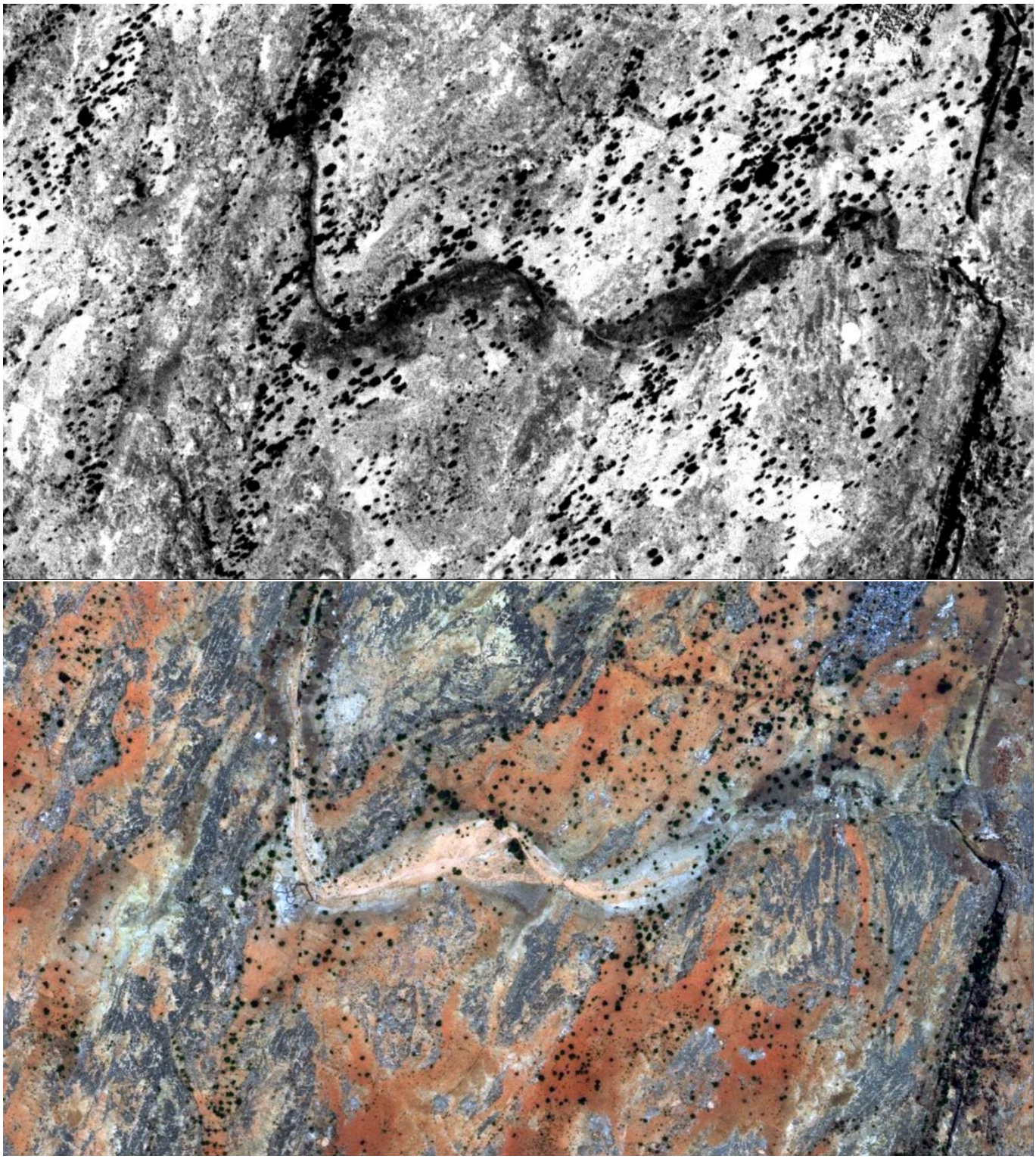


Fig. 33. Site 8 (2143 x 1175 m). 14,549°Nord et 3,3148°Ouest. 10-12-1967 (en haut) et 22-6-2015 (BING ; en bas). Le site 8 est le seul site que nous montrons pour les montagnes, mais il illustre les développements que l'on peut observer ailleurs dans cette région montagneuse. L'agriculture n'est pas possible sur les rochers, mais dans les vallées et elles sont utilisées de manière intensive par les agriculteurs. Dans de nombreux endroits, il y a aussi de l'eau pendant la saison sèche, également parce que l'eau est recueillie par de petits barrages. Le site 8 montre qu'en 1967, de nombreux grands arbres ont poussé, en particulier dans les vallées. Les quelques champs étaient dans les mêmes vallées. En 2016, la plupart des arbres avaient disparu des vallées, où il n'y avait plus de champs. La tache blanche au milieu du site 8 est devenue un endroit dénudé avec probablement du sable grossier où l'agriculture n'est plus possible. Les champs sont maintenant plus éloignés du canal. Il y a encore des arbres dans les champs et les arbres sont également plus petits.

7. Comparaison des images satellitaires haute résolution récentes

Il serait également intéressant de voir quand les changements ont eu lieu entre 1967 et maintenant. Google Earth offre une option pour afficher les images satellites de différentes dates. Malheureusement, les images satellites avant 2002 ne sont pas suffisamment précises, mais il est en tout cas possible d'étudier les changements intervenus dans le paysage au cours des 16 dernières années. Des images haute résolution plus anciennes sont également disponibles pour la vallée du Sourou, mais pas pour l'ensemble de la zone (par exemple, pas pour la partie sud-est).

Le site 9 (Fig. 34) donne un exemple de ce qui a changé, mais surtout de ce qui n'a pas changé pendant 14 années (voir la Fig. 25 pour la situation). Google Earth offre la possibilité à tous de suivre les évolutions de la région.

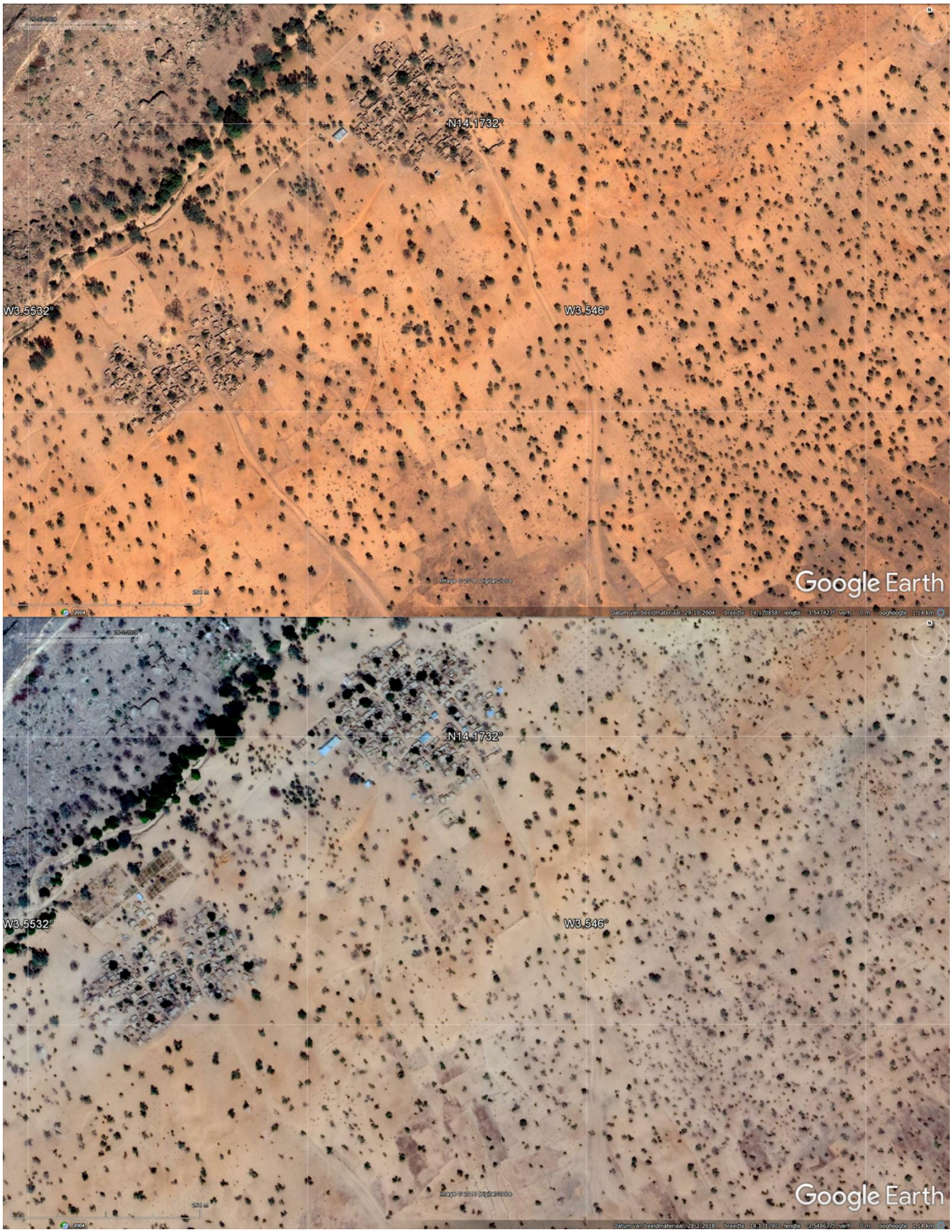


Fig. 34. Site 9 (1320 x 832 m). 14,171°Nord et 3,547°Ouest. 29-4-2004 (en haut) et 28-2-2018 (en bas) ; (2x Google Earth).

8. Références

Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher , M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R. 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science 342 (6160): 850-853.

INSTAT 2002. 3ème recensement général de la population et de l'habitat du Mali (RGPH). Institut National de la Statistique, Bureau central du Recensement. Bamako.

INSTAT 2013. 4ème recensement général de la population et de l'habitat du Mali (RGPH). Institut National de la Statistique, Bureau central du Recensement. Bamako.

Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. and Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Int. J. Climatol. 25: 1965–1978

Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers,J., Dewitte, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R., Kilasara, M., Le Roux,P., Micheli, E., Montanarella, L., Spaargaren, O., Thiombiano, L., Van Ranst, E., Yemefack, M. , Zougmoré R., (eds.), 2013. Soil Atlas of Africa. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 176 pp.

Lemoalle J., de Conpadda D. 2009. Water atlas of the Volta Basin - Atlas de l'eau dans le bassin de la Volta. Challenge Program on Water and Food and Institut de Recherche pour le Développement, Colombo, Marseille, 96 p.

Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L. and Merchant, J. W. 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. Int. J. Remote Sens. 21: 1303–1330.

Mayaux, P., Bartholomé, E., Fritz, S., Belward, A. 2004. A new land-cover map of Africa for the year 2000. J. Biogeogr. 31: 861–877.

White, F. 1983. The vegetation of Africa. Unesco, Paris. 357 pp.