



Congrès de fondation de l'Association Internationale de Géographie  
Institut national d'Aménagement et d'Urbanisme de Rabat  
13-15 juin 2023



# ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DE L'ÉVOLUTION DU COUVERT VÉGÉTAL DÉTECTÉ PAR MODIS À L'ÉCHELLE DU SAHEL : VERDISSEMENT AU NORD, BRUNISSEMENT AU SUD ?

Romain Courault

Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR CNRS Laboratoire des Dynamiques Sociales et  
Recomposition des Espaces (LADYSS)



# CONTEXTE

- Dynamiques bioclimatiques au sud du Sahara dans contexte de changement global (climat, paysages, enjeux de développement)
- « Verdissement » [en région sahélienne]
- « Dégradation des terres » [en région sahélienne]
- Données MODIS 44B Vegetation Continuous Field : % couverture végétale par année / simplicité et « cohérence » de l'information géographique disponible

⇒ Evolution du couvert végétal : quelle hétérogénéité géographique ?

# ANALYSE DE LA BIBLIOGRAPHIE

Global: Contrasting ecosystem vegetation response in global drylands under drying and wetting conditions.

Global : Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series.

Global : Mapping gains and losses in woody vegetation across global tropical drylands.

Global à local : Global exacerbation of episodic local vegetation greenness decline since the 21.st century.

Sous-continentale : Trends in woody and herbaceous vegetation in the Savannas of West Africa

Sous-continentale : Environmental change in time series—An interdisciplinary study in the Sahel of Mali and Senegal.

Sous-continentale : Assessing woody vegetation trends in Sahelian drylands using MODIS based seasonal metrics.

Sous-continentale : Woody vegetation die off and regeneration in response to rainfall variability in the West African Sahel.

Sous-continentale : Changes in rainfall distribution promote woody foliage production in the Sahel.

Sous-continentale : Woody plant decline in the Sahel of western Niger (1996–2017): is it driven by climate or land use changes?.

Sous-continentale : A quantitative evaluation of the multiple narratives of the recent Sahelian regreening.

Régionale : Vegetation impoverishment despite greening: A case study from central Senegal.

Régionale : A study on the west Sahel rainfall variability: The role of the intertropical convergence zone (ITCZ).

Régionale : Revisiting the coupling between NDVI trends and cropland changes in the Sahel drylands: A case study in western Niger.

Régionale : The persistent decline of patterned woody vegetation: The tiger bush in the context of the regional Sahel greening trend.

# OBJECTIFS

Renseigner l'évolution multi-décennale du couvert végétal à échelle subcontinentale, détecté par satellite grand champ

⇒ Tendances temporelles à végétalisation? Dé-végétalisation?

⇒ Significatives? Relations fortes? Où?

Agréger spatialement les indicateurs: de la donnée continue à la donnée moyennée par unité territoriale (pays, région, dpt, communes etc)

⇒ Chaîne de traitement opérationnelle pour suivi à large échelle des dynamiques végétales?

⇒ Indicateurs agrégés par unités territoriales: cohérence scientifique de l'information?

# ACQUISITION DES DONNÉES [OPEN-ACCESS]

- Découpage de l'espace sahélien pour acquisition imagerie MODIS :

⇒ Pluvio annuelle moyenne 1991-2020 (CHELSA, couche BIO10)

⇒ Au total : 12 M de km<sup>2</sup> (avec péninsule arabique)



- Sélection des unités territoriales intersectant la bande sahélienne/sahélo-soudanienne

⇒ BD GADM / DIVAGIS (données vecteur ADMIN niveau 3 - communes)

GADM maps and data



- Sélection de l'imagerie MODIS 44B: extension, variables

⇒ 250 m de résolution spatiale, résolution temporelle annuelle (2000-2022)

⇒ Variables expriment, par pixel, une fraction (%) de :

- Couvert non végétalisé
- Couvert non arboré (herbacée et arbustif)
- Couvert arboré



# TRAITEMENTS GÉOSTATISTIQUES

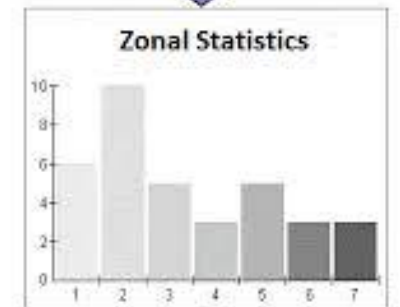
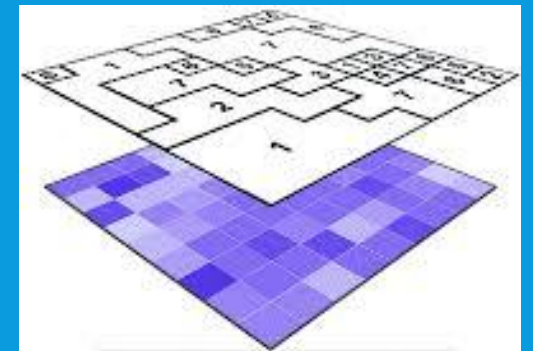
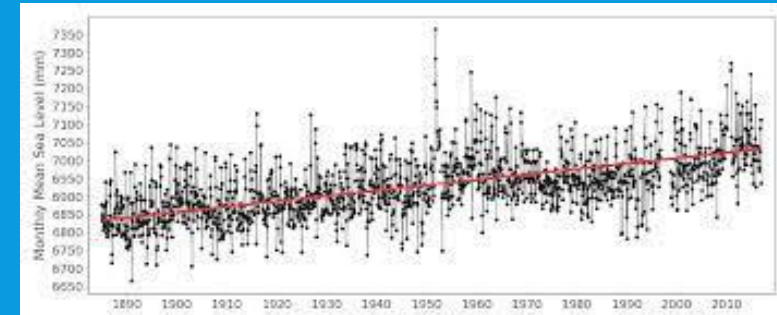


ropensci/**MODISTsp**

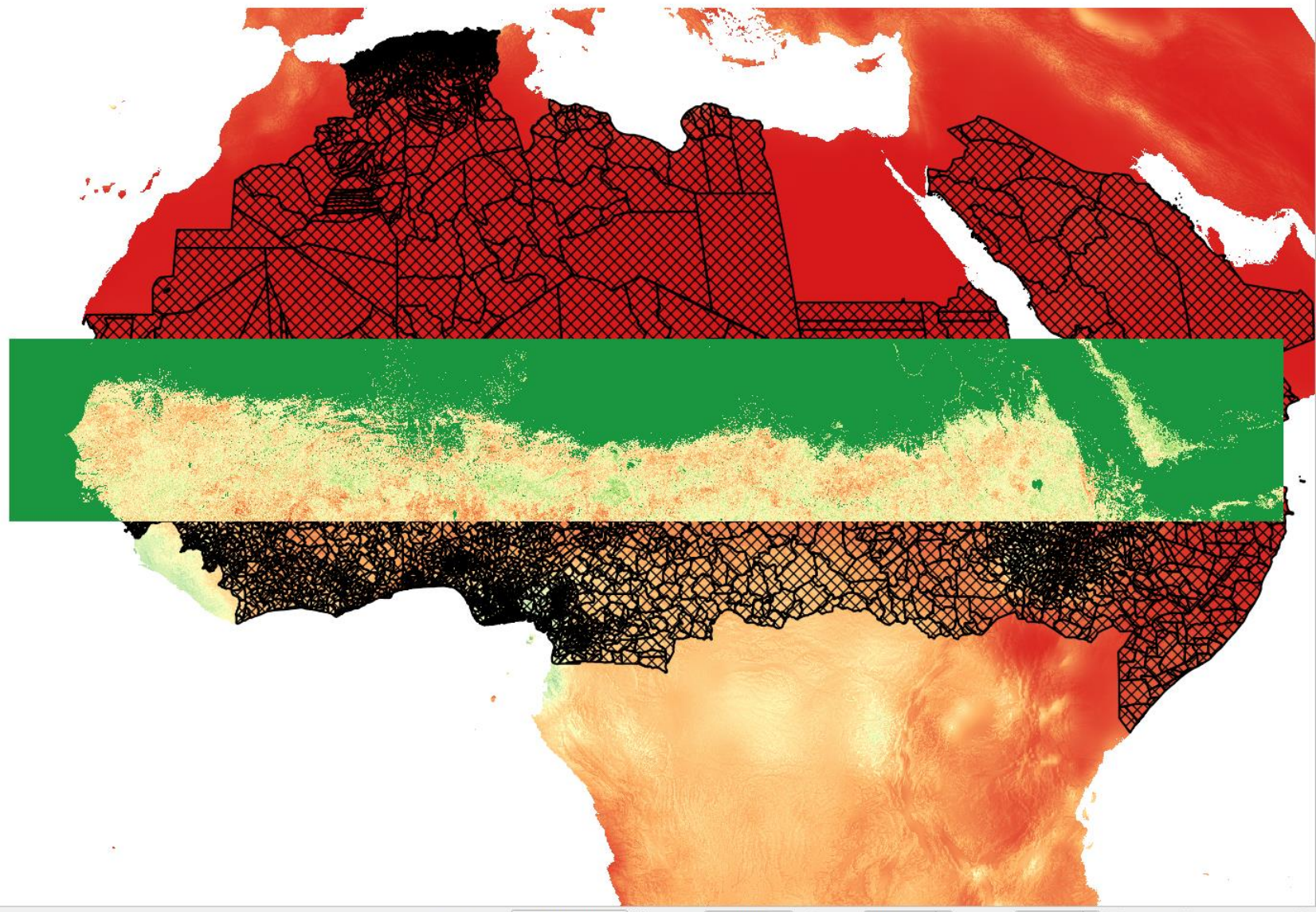
An 'R' package for automatic download and preprocessing of MODIS Land Products Time Series



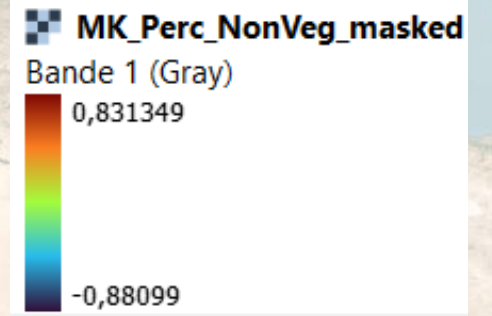
- Via R Studio :
  - package MODISTSP: acquisition série temporelle
  - package Kendall : calcul test de tendance
- Via Qgis:
- Calculatrice raster, sur sortie Pvalues (significativité):
  - Extraction des pixels significatifs ( $p < 0.05$ )
  - Découpage des valeurs de tendances (Tau de Mann-Kendall) par significativité
- Agrégation des pixels par unité territoriale (statistiques zonales, par commune GADM de la zone)
  - Moyenne, médiane, écart-type, min et max (par unité spatiale de niveau 3 – communes)
- Via Excel, récapitulation, par pays et par commune des valeurs médianes de test de tendance MK (suppression des communes hors Afrique + pixels avec  $N < 30$ )



- Couches
- MK\_Perc\_TreeCover
  - PV\_Perc\_TreeCover
  - admin
    - GHA\_adm2
    - tcd\_admbnda\_adm2\_ocha\_20170615
    - gadm41\_SSD\_3
    - YEM\_adm2
    - TGO\_adm2
    - MLI\_adm4
    - SOM\_adm2
    - SEN\_adm4
    - SDN\_adm3
    - SAU\_adm1
    - NGA\_adm2
    - NER\_adm3
    - MRT\_adm2
    - LBY\_adm1
    - GNB\_adm2
    - GMB\_adm2
    - GIN\_adm3
    - ETH\_adm3
    - ERI\_adm2
    - DZA\_adm2
    - DJI\_adm2
    - CMR\_adm3
    - CIV\_adm3
    - CAF\_adm2
    - BFA\_adm3
    - BEN\_adm2
  - PV\_Perc\_NonVeg
  - MK\_Perc\_NonVeg
  - PV\_Perc\_NonTree
  - MK\_Perc\_NonTree
  - CHELSA\_bio10\_12\_africa\_250to500
  - CHELSA\_bio10\_12\_africa\_150to250
    - Bande 1 (Gray)  
1  
0
  - CHELSA\_bio10\_12\_africa
  - ESRI\_Satellite (ArcGIS/World\_Imagery)



## Information continue (raster traité)



Bleu: Non-végétalisé diminue significativement entre 2000 et 2022

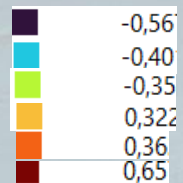
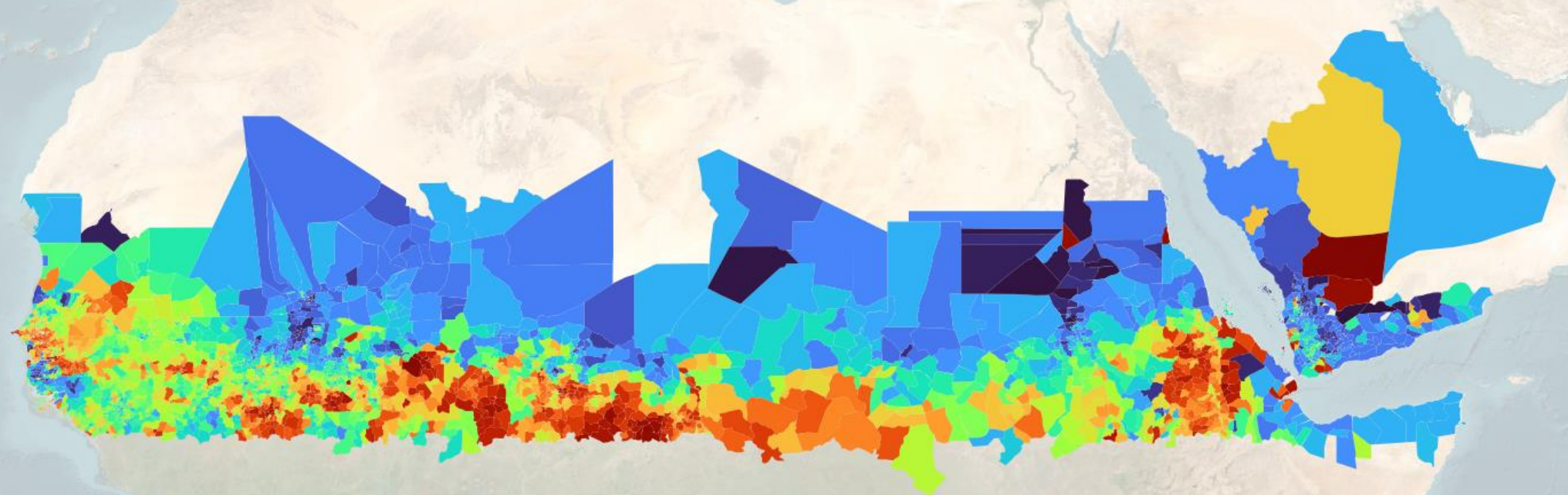
Brun: Non-végétalisé augmente significativement entre 2000 et 2022



## Information territorialisée (médiane pixels/unité territoriale)

Bleu: Non-végétalisé diminue significativement entre 2000 et 2022

Brun: Non-végétalisé augmente significativement entre 2000 et 2022



0 50 km

**integ MK Perc NonVegCover masked**

Bande 1 (Gray)

88 806 912



-90 758 712

Signal de tendance  
« marquée » ( $t > +0.2$ ) à la  
dé-végétalisation

Signal de tendance  
« marquée » ( $t > -0.2$ ) à  
la re-végétalisation

Pays	Médiane générale d'évolution de % Non Végétalisé
Central African Republic	0,351976693
Cameroon	0,223718042
Nigeria	0,110311599
Côte d'Ivoire	0,097685054
Ethiopia	0,090095505
Djibouti	0,067663097
Togo	-0,011837281
Gambia	-0,049743585
Senegal	-0,051874023
Benin	-0,085199401
Burkina Faso	-0,123800877
Tchad	-0,189804337
Mauritania	-0,21475525
Eritrea	-0,246718026
Ghana	-0,254088333
Niger	-0,258945101
Saudi Arabia	-0,268083306
Guinea-Bissau	-0,278917982
Mali	-0,283241823
Guinea	-0,310106116
Sudan	-0,340700279
Yemen	-0,367047994
Somalia	-0,406774537
Algeria	-0,408846021

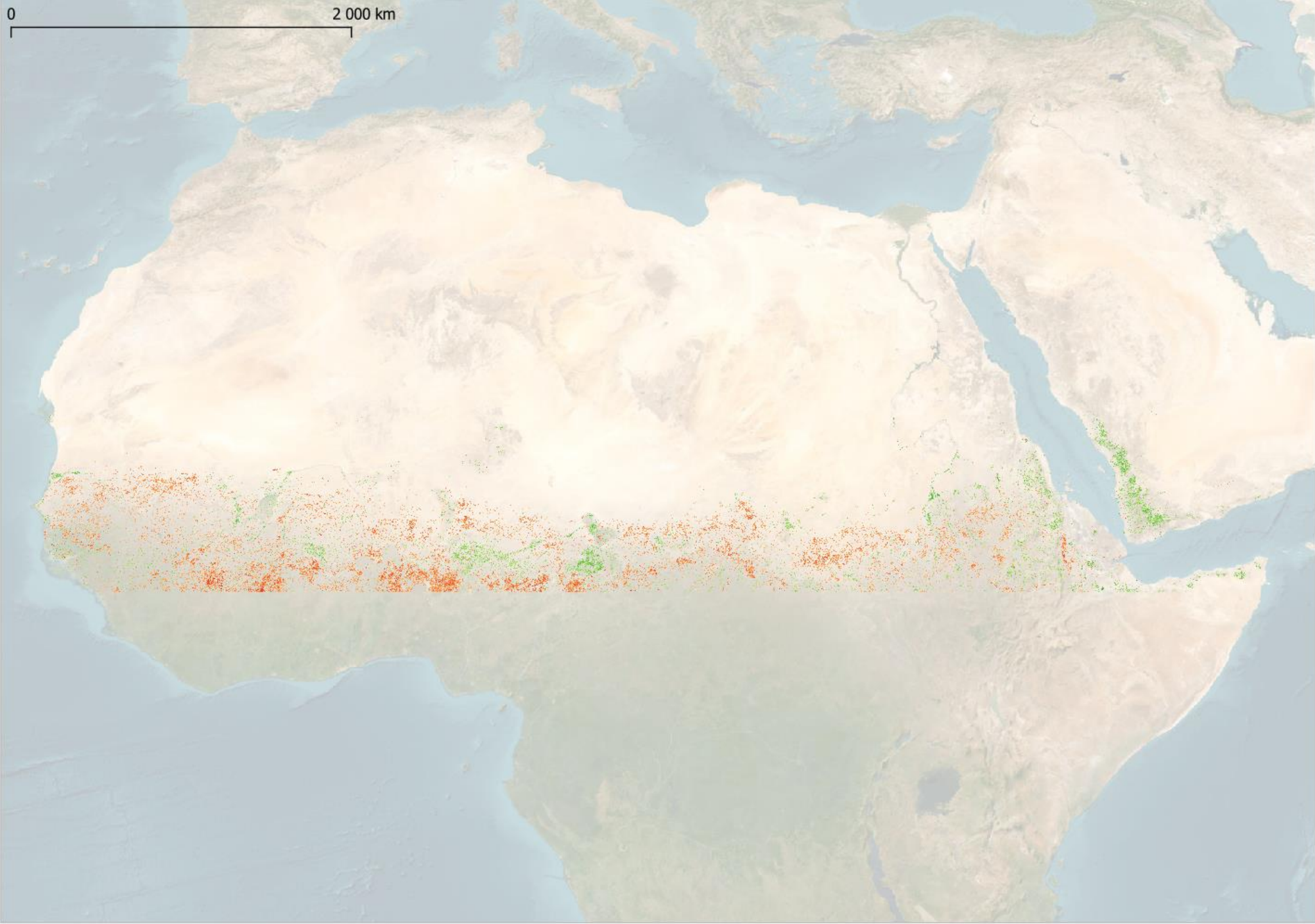
# RÉSULTATS À L'ÉCHELLE INFRA-RÉGIONALE, VARIABLE % NON VÉGÉTALISÉ (COMMUNES)

- 851 communes ont un  $t > -0.4$  (tendance à re-végétalisation), soit 26% du total des communes « sahéliennes » avec réponse significative et numériquement importante pour cette variable (N=3188)
- 162 communes ont un  $t > +0.4$  (tendance à dé-végétalisation), soit 5 % du total des communes « sahéliennes » avec réponse significative et numériquement importante pour cette variable (N=3188)

# RÉSULTATS À L'ÉCHELLE INFRARÉGIONALE (COMMUNES)

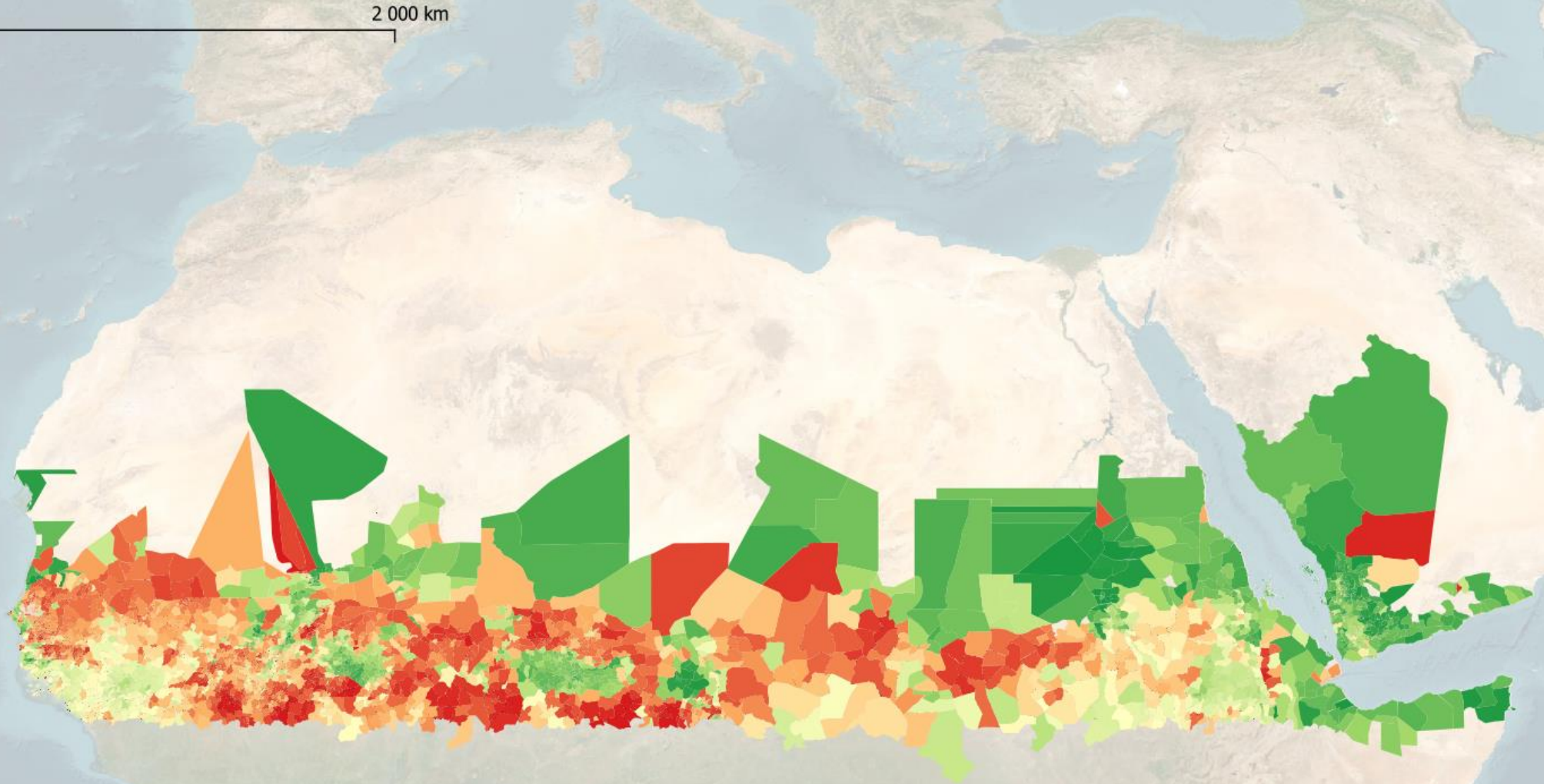
NAME_0	ID_1	NAME_1	ID_2	NAME_2	NAME_3	_median	NAME_0	ID_1	NAME_1	ID_2	NAME_2	NAME_3	_median		
Sudan	1	Al Jazirah		1	Al Kamlin	Es Sideira	-0,567192078	Burkina Faso	7	Centre		22	Kadiogo	Ouagadougou	0,463816822
Senegal	3	Fatick		8	Fatick	Fimela	-0,556980729	Sudan	11	Red Sea		49	Port Sudan	Sawakin Town	0,466147244
Sudan	10	Northern		44	Addabah	Ed Dabba	-0,543664694	Nigeria	20	Kano		394	Kumbotso	Kumbotso	0,47146228
Sudan	12	River Nile		55	Atbara	Ed Damar	-0,543260634	Nigeria	2	Adamawa		21	Girie	Girie	0,472281083
Sudan	12	River Nile		54	Al Matammah	Wad Hamed	-0,537694752	Niger	7	Tillabéry		27	Kollo	Namaro	0,474499285
Mali	9	Timbuktu		46	Diré	Danga	-0,529050291	Mali	1	Bamako		1	Bamako	Kalban-Coro	0,475325137
Tchad						TCHAD 55	-0,527798653	Niger	5	Niamey		18	Niamey	Lamorde	0,47584793
Sudan	12	River Nile		52	Abu Hamad	Abu Hamad	-0,525339305	Guinea-Bissau	3	Bissau		10	Bissau	Bissau	0,476480439
Sudan	7	Khartoum		32	South Khartoum	Jebel Aulia	-0,524286032	Ethiopia	3	Amhara		21	South Wollo	Kombolcha	0,481269971
Mali	9	Timbuktu		46	Diré	Diré	-0,52279526	Senegal	1	Dakar		1	Dakar	Almadies	0,481867343
Sudan	12	River Nile		56	Berber	Barbar	-0,521181166	Niger	7	Tillabéry		29	Say	Torodi	0,483142525
Sudan	10	Northern		45	Dongola	Argo	-0,520988107	Senegal	1	Dakar		1	Dakar	Grand Dakar	0,486790046
Sudan	10	Northern		46	Merawi	Marawi	-0,520910621	Senegal	1	Dakar		4	Rufisque	Rufisque	0,487351403
Sudan	7	Khartoum		31	Sharg En Nile	Alalafon	-0,520495653	Senegal	1	Dakar		2	Guédiawaye	Guediawaye	0,487824872
Senegal	3	Fatick		9	Foundiougne	Niodior	-0,518874526	Senegal	1	Dakar		4	Rufisque	Rufisque	0,488051683
Mali	9	Timbuktu		46	Diré	Diré	-0,514265358	Senegal	1	Dakar		1	Dakar	Almadies	0,492805392
Mali	6	Mopti		28	Koro	Madougou	-0,511071444	Ethiopia	3	Amhara		15	East Gojam	Debre Marqos	0,500934973
Mali	9	Timbuktu		46	Diré	Diré	-0,5096367	Mali	1	Bamako		1	Bamako	Kalban-Coro	0,504835457
Mali	9	Timbuktu		46	Diré	Diré	-0,508547604	Senegal	1	Dakar		4	Rufisque	Rufisque	0,505703866
Mauritania	1	Adrar		1	Aoujeft	Aoujeft	-0,502707779	Ethiopia	3	Amhara		21	South Wollo	Dessie	0,512131095
Sudan	10	Northern		45	Dongola	El Golid	-0,502707779	Nigeria	20	Kano		381	Fagge	Fagge	0,519254744
Mali	9	Timbuktu		46	Diré	Danga	-0,49979496	Ethiopia	3	Amhara		14	Bar Dar Sp. Zone	Bahir Dar	0,528757811
Mali	9	Timbuktu		50	Tombouctou	Tombouctou	-0,498531431	Ethiopia	3	Amhara		18	North Wollo	Weldiya	0,528870583
Nigeria	21	Katsina		423	Daura	Daura	-0,497860491	Nigeria	20	Kano		411	Ungogo	Ungogo	0,532387853
Senegal	10	Sédhiou		31	Goudomp	Djibanar	-0,497772992	Senegal	1	Dakar		1	Dakar	Parcelles Assaini	0,535912275
Mali	6	Mopti		27	Douentza	Bore	-0,496421546	Senegal	1	Dakar		3	Pikine	Thiaroye	0,543426335
Sudan	7	Khartoum		30	Omdurman	Omdurman Genc	-0,494627237	Nigeria	20	Kano		407	Tarauni	Tarauni	0,589433908
Nigeria	21	Katsina		446	Sandamu	Sandamu	-0,494066238	Senegal	1	Dakar		3	Pikine	Pikine Dagoudan	0,599096775
Sudan	12	River Nile		56	Berber	El Bauga	-0,492805392	Nigeria	20	Kano		376	Dala	Dala	0,605413854
Mali	9	Timbuktu		46	Diré	Diré	-0,492778093	Senegal	1	Dakar		3	Pikine	Pikine Dagoudan	0,610613644
Sudan	7	Khartoum		33	Um Badda	Omdurman Ghar	-0,490455404	Nigeria	20	Kano		387	Gwale	Gwale	0,624576032
Mali	6	Mopti		29	Mopti	Fatoma	-0,490407288	Nigeria	20	Kano		400	Nassaraw	Nassaraw	0,637622476
Ethiopia	2	Afar		9	Zone 2	Afdera	-0,490083575	Nigeria	20	Kano		390	Kano	Kano	0,652286083

0 2 000 km



0

2 000 km



Pays	Médiane générale d'évolution de % Non Végétalisé
Somalia	0,441209229
Yemen	0,40174115
Saudi Arabia	0,292151536
Eritrea	0,283863514
Ethiopia	0,156730411
Djibouti	0,09457453
Nigeria	0,055715759
Sudan	0,045977818
Guinea-Bissau	0,022230218
Guinea	-0,022813926
Burkina Faso	-0,087054686
Tchad	-0,100503746
Cameroon	-0,105256304
Mali	-0,148044782
Mauritania	-0,173505099
Senegal	-0,21397408
Gambia	-0,279469978
Niger	-0,294069949
Central African Republic	-0,376250118
Ghana	-0,389838899
Togo	-0,399031304
Benin	-0,422351821
Côte d'Ivoire	-0,434517152

Signal de tendance « marquée » ( $t > +0.2$ ) à la reforestation/ augmentation % arboré

Signal de tendance « marquée » ( $t > -0.2$ ) à la dé-forestation / diminution % arboré



# RÉSULTATS À L'ÉCHELLE INFRA-RÉGIONALE (COMMUNES), VARIABLE % TREE

- 600 communes ont un  $t > +0.4$  (tendance à re-végétalisation ARBRE), soit 21% du total des communes « sahéliennes » avec réponse significative et numériquement importante pour cette variable (N=2805)
- 1031 communes ont un  $t > -0.4$  (tendance à dé-végétalisation ARBRE), soit 36 % du total des communes « sahéliennes » avec réponse significative et numériquement importante pour cette variable (N=2805)

NAME_0	ID_1	NAME_1	ID_2	NAME_2	NAME_3	_median
Sudan	12	River Nile	54	Al Matammah	El Matammah	0,481286347
Senegal	14	Ziguinchor	43	Bignona	Tenghory	0,482377082
Sudan	10	Northern	46	Merawi	Karima	0,483483821
Senegal	11	Saint-Louis	34	Podor	Gamadji Sarre	0,487949997
Senegal	11	Saint-Louis	33	Dagana	Ndiaye Mberess	0,490766913
Sudan	9	North Kurdufan	42	Sowdari	Hamrat El Wiz	0,490869239
Nigeria	8	Borno	144	Bama		0,491192251
Sudan	10	Northern	45	Dongola	Argo	0,491235912
Mali	7	Ségou	35	Niono	Pogo	0,491371781
Sudan	28	Khartoum	28	Khartoum Bahri	Es Sileit	0,491371781
Senegal	11	Saint-Louis	33	Dagana	Ndiaye Mberess	0,492903978
Sudan	12	River Nile	57	Shendi	Shendi	0,493770689
Sudan	12	River Nile	54	Al Matammah	Wad Hamed	0,496929348
Somalia	4	Bari	14	Iskushuban		0,500440419
Somalia	4	Bari	12	Bosaaso		0,500732064
Sudan	7	Khartoum	31	Sharg En Nile	Umm Dounban	0,502096415
Sudan	18	White Nile	78	Al Gutaina	Hashab	0,502272844
Sudan	12	River Nile	55	Atbara	Ed Damar	0,50267452
Sudan	7	Khartoum	33	Um Badda	Omdurman Ghar	0,503309309
Mali	6	Mopti	26	Djenné	Konio	0,503976166
Sudan	10	Northern	46	Merawi	Marawi	0,505346954
Sudan	7	Khartoum	30	Omdurman	Omdurman Genc	0,506541938
Somalia	1	Awdal	3	Lughaya		0,507092535
Ethiopia	2	Afar	10	Zone 3	Bure Mudaytu	0,508991182
Mali	1	Bamako	1	Bamako	Kalban-Coro	0,510942191
Sudan	18	White Nile	78	Al Gutaina	Wad Jar En Nabi	0,51594305
Sudan	7	Khartoum	32	South Khartoum	Jebel Aulia	0,529702157
Sudan	7	Khartoum	31	Sharg En Nile	Alalafon	0,550646484
Sudan	10	Northern	44	Addabah	Ed Dabba	0,550646484
Sudan	12	River Nile	53	Ad Damer	Ez Zeidab	0,556179106
Sudan	1	Al Jazirah	1	Al Kamlin	Es Sideira	0,568831354
Mali	9	Timbuktu	50	Tombouctou	Tombouctou	0,569833636
Sudan	7	Khartoum	31	Sharg En Nile	Alaseilat	0,595293462

NAME_0	ID_1	NAME_1	ID_2	NAME_2	NAME_3	_median
Mali	8	Sikasso	39	Bougouni	Manakoro	-0,571768641
Burkina Faso	2	Cascades	7	Comoé	Niangoloko	-0,558604062
Nigeria	16	Gombe	285	Dukku		-0,53424561
Nigeria	5	Bauchi	91	Alkaleri		-0,527532399
Mali	6	Mopti	25	Bankass	Kani-Bonzon	-0,524631381
Nigeria	5	Bauchi	107	Tafawa-B		-0,523137331
Mali	9	Timbuktu	47	Goundam	Raz-El-Ma	-0,521749198
Nigeria	16	Gombe	282	Akko		-0,518832982
Burkina Faso	2	Cascades	7	Comoé	Tiéfora	-0,516100228
Burkina Faso	5	Centre-Ouest	17	Sissili	Bieha	-0,514344513
Nigeria	2	Adamawa	35	Song		-0,509293139
Mali	8	Sikasso	39	Bougouni	Manakoro	-0,502272844
Nigeria	2	Adamawa	24	Hong		-0,50190115
Mali	6	Mopti	24	Bandiagara	Dourou	-0,500043273
Nigeria	5	Bauchi	103	Kirfi		-0,494547009
Burkina Faso	5	Centre-Ouest	18	Ziro	Sapouy	-0,490151733
Mali	8	Sikasso	39	Bougouni	Garalo	-0,489342213
Niger	3	Dosso	11	Loga	Falwel	-0,488311321
Mali	6	Mopti	25	Bankass	Diallassagou	-0,487949997
Burkina Faso	5	Centre-Ouest	17	Sissili	Leo	-0,487818122
Nigeria	27	Niger	553	Mariga		-0,4872756
Mali	6	Mopti	28	Koro	Koporokeniena	-0,48719874
Mali	6	Mopti	25	Bankass	Kani-Bonzon	-0,48693943
Burkina Faso	9	Haut-Bassins	28	Houet	Peni	-0,486915648
Burkina Faso	2	Cascades	7	Comoé	Soubakaniédoug	-0,486192435
Nigeria	16	Gombe	289	Kwami		-0,484673798
Mali	8	Sikasso	39	Bougouni	Garalo	-0,484282762
Mali	8	Sikasso	41	Kolondiéba	Fakola	-0,484282762
Nigeria	16	Gombe	286	Funakaye		-0,483150721
Mali	8	Sikasso	39	Bougouni	Garalo	-0,483129501
Burkina Faso	9	Haut-Bassins	30	Tuy	Founzan	-0,48135668
Burkina Faso	6	Centre-Sud	20	Nahouri	Guiaro	-0,481166139
Nigeria	27	Niger	549	Kontogur		-0,481045932

# CONCLUSION

- Chaîne de traitement proposée en cours d'opérationnalisation (Toolbox Qgis)
- Verdissement en domaine saharo-sahélien? Oui, mais non...
  - Temporellement ici uniquement tendance 2000-2022, pas d'analyse de rupture et de segmentation
  - Spatialement: données MODIS pour suivi de savanes et de forêts-galeries (physionomie verticale et horizontale complexe)... attention!
  - Spectralement/variables: à consolider avec d'autres (LAI, dates de démarrage phénologique etc)
- Brunissement en domaine sahélo-soudanais? Oui mais pas uniquement...
  - Dé-végétalisation nette: perte en superficies arborées généralisée (nord, sud, est, ouest de la zone sahélienne)
  - Projet Muraille verte?
- Encore beaucoup à « dé-brouiller » pour comprendre observations par TLD, observations terrain & facteurs causaux / « forçages » (naturels & humains)

# BIBLIOGRAPHIE THÉMATIQUE

ABEL, Christin, ABDI, Abdulhakim M., TAGESSON, Torbern, et al. Contrasting ecosystem vegetation response in global drylands under drying and wetting conditions. *Global Change Biology*, 2023.

ADZHAR, Rahayu, KELLEY, Douglas I., DONG, Ning, et al. MODIS Vegetation Continuous Fields tree cover needs calibrating in tropical savannas. *Biogeosciences*, 2022, vol. 19, no 5, p. 1377-1394.

ANCHANG, Julius Y., PRIHODKO, Lara, KAPTUÉ, Armel T., et al. Trends in woody and herbaceous vegetation in the Savannas of West Africa. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no 5, p. 576.

BRANDT, Martin, ROMANKIEWICZ, Clemens, SPIEKERMANN, Raphael, et al. Environmental change in time series—An interdisciplinary study in the Sahel of Mali and Senegal. *Journal of Arid Environments*, 2014, vol. 105, p. 52-63.

BRANDT, Martin, HIERNAUX, Pierre, RASMUSSEN, Kjeld, et al. Assessing woody vegetation trends in Sahelian drylands using MODIS based seasonal metrics. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 183, p. 215-225.

BRANDT, Martin, TAPPAN, Gray, DIOUF, Abdoul Aziz, et al. Woody vegetation die off and regeneration in response to rainfall variability in the West African Sahel. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no 1, p. 39.

BRANDT, Martin, HIERNAUX, Pierre, RASMUSSEN, Kjeld, et al. Changes in rainfall distribution promote woody foliage production in the Sahel. *Communications biology*, 2019, vol. 2, no 1, p. 133.

DE JONG, Rogier, DE BRUIN, Sytze, DE WIT, Allard, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, no 2, p. 692-702.

DU, Ruohua, WU, Jianjun, YANG, Jianhua, et al. Global exacerbation of episodic local vegetation greenness decline since the 21st century. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 840, p. 156411.

HIERNAUX, Pierre, KALILOU, Amadou Adamou, KERGOAT, Laurent, et al. Woody plant decline in the Sahel of western Niger (1996–2017): is it driven by climate or land use changes?. *Journal of Arid Environments*, 2022, vol. 200, p. 104719.

HERRMANN, Stefanie M. et TAPPAN, G. Gray. Vegetation impoverishment despite greening: A case study from central Senegal. *Journal of Arid Environments*, 2013, vol. 90, p. 55-66.

LUCIO, P. S., MOLION, L. C. B., CONDE, F. C., et al. A study on the west Sahel rainfall variability: The role of the intertropical convergence zone (ITCZ). *African Journal of Agricultural Research*, 2012, vol. 7, no 14, p. 2096-2113.

STITH, Mimi, GIANNINI, Alessandra, DEL CORRAL, John, et al. A quantitative evaluation of the multiple narratives of the recent Sahelian greening. *Weather, Climate, and Society*, 2016, vol. 8, no 1, p. 67-83.

TIAN, Feng, BRANDT, Martin, LIU, Yi Y., et al. Mapping gains and losses in woody vegetation across global tropical drylands. *Global change biology*, 2017, vol. 23, no 4, p. 1748-1760.

TONG, Xiaoye, BRANDT, Martin, HIERNAUX, Pierre, et al. Revisiting the coupling between NDVI trends and cropland changes in the Sahel drylands: A case study in western Niger. *Remote Sensing of Environment*, 2017, vol. 191, p. 286-296.

TRICHON, Valérie, HIERNAUX, Pierre, WALCKER, Romain, et al. The persistent decline of patterned woody vegetation: The tiger bush in the context of the regional Sahel greening trend. *Global change biology*, 2018, vol. 24, no 6, p. 2633-2648.

# BIBLIOGRAPHIE/WEBOGRAPHIE MÉTHODOLOGIQUE

## *CHELSA PROJECT*

KARGER, Dirk Nikolaus et ZIMMERMANN, Niklaus E. Climatologies at high resolution for the earth land surface areas CHELSA V1. 2: Technical specification. Swiss Federal Research Institute WSL, Switzerland, 2019.

## *Global Administration GADM*

<https://gadm.org/license.html>

## *MODIS 44-B Vegetation Continuous Field*

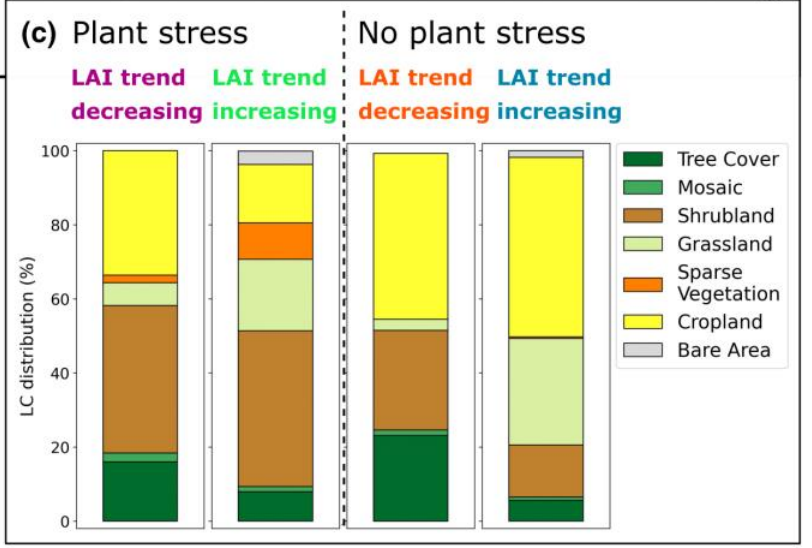
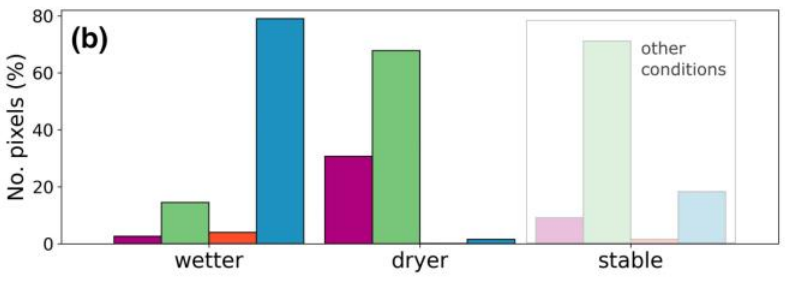
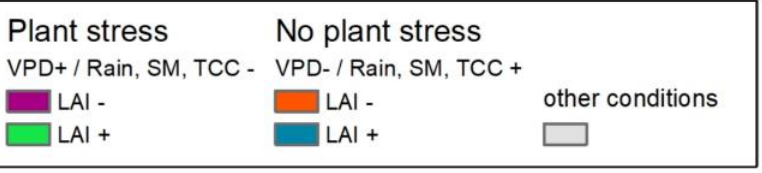
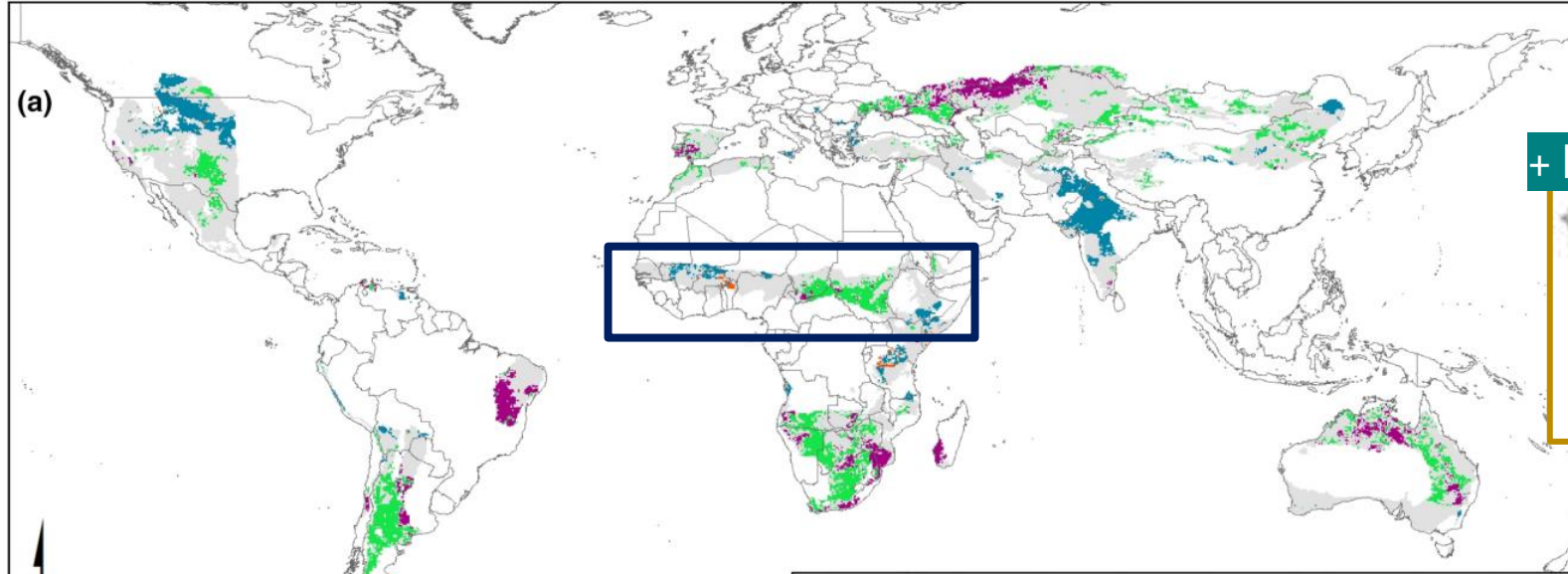
DiMiceli, C., M. Carroll, R. Sohlberg, D. Kim, M. Kelly, J. Townshend. MOD44B MODIS/Terra Vegetation Continuous Fields Yearly L3 Global 250m SIN Grid V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD44B.006>.

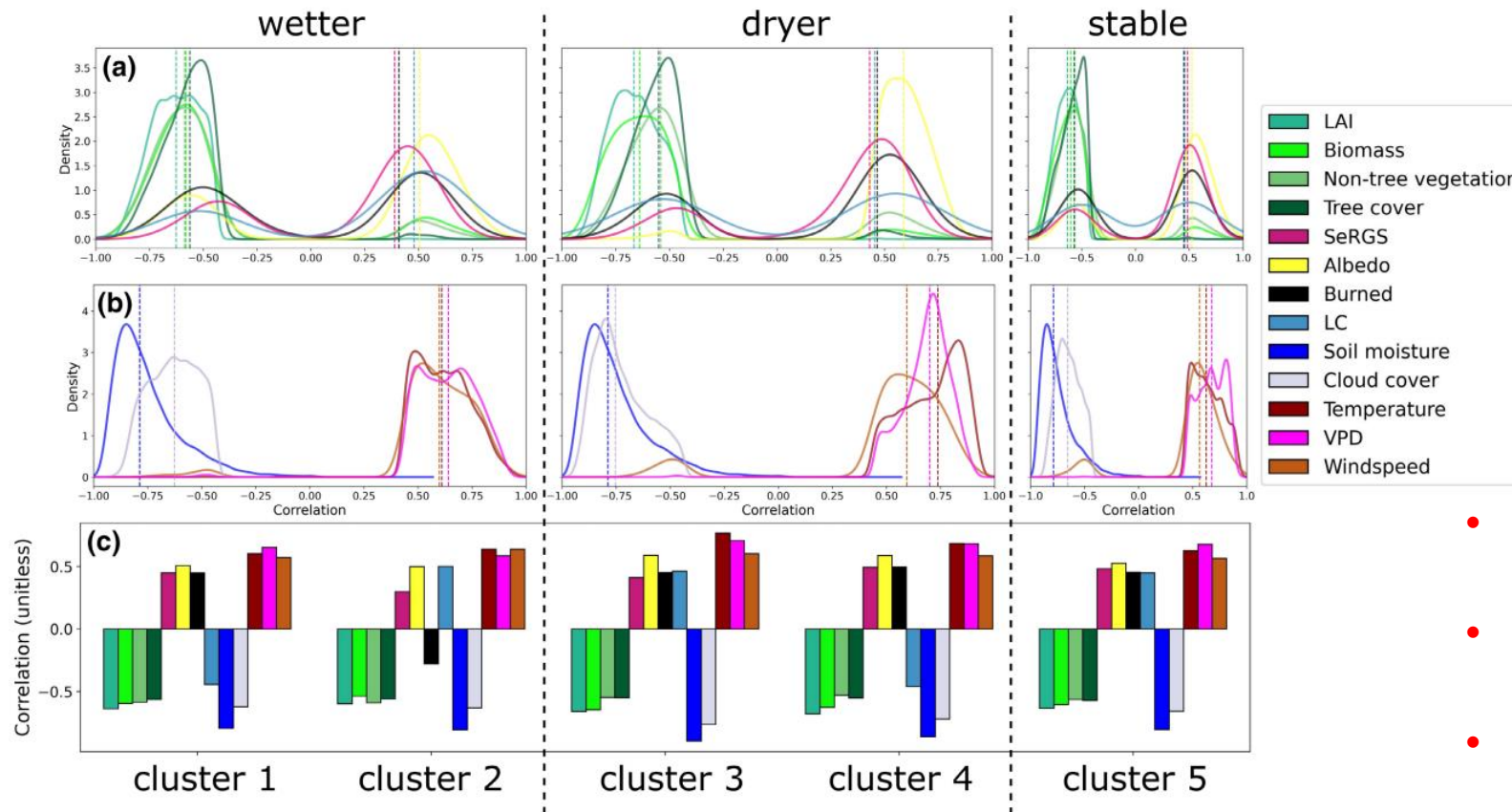
## *Sélection des séries temporelles, acquisition, prétraitement des données MODIS*

BUSETTO, Lorenzo et RANGHETTI, Luigi. MODISstsp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. Computers & geosciences, 2016, vol. 97, p. 40-48.

## *Application des tests de tendance temporelle de Mann-Kendall*

MCLEOD, A. Ian. Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test. R Package Kendall, 2005, vol. 602, p. 1-10.





**FIGURE 3** Correlation of the individual EVs to aridity per cluster. The histograms (a, b) show the distribution of the Pearson correlation coefficients for each land (a) and atmospheric (b) variable for wetting, drying, and stable clusters. Bars in (c) (as well as dotted vertical lines [a, b]) show the median correlation of each EV to aridity across all significant pixels.

- Peu importe le signal d'augmentation, de baisse de l'aridité:
- Pour ces Variables écosystémiques essentielles:
- Globalement : Cloud cover & humidité des sols: en diminution constante (valeurs de signe -) Réponse globalement continentale homogène (majorité pixels corrélés)

- Cluster: régionalisation de l'analyse circumpolaire in fine mais pas d'attache territoriale, uniquement réponse temporelle variables écosystémiques essentielles statistiq clusterisée