

ZONAGE PHÉNOCLIMATIQUE ET CARACTÉRISATION DES PARCOURS NATURELS DU SÉNÉGAL AVEC LES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE

DIOUF A. A.^(1,2), FAYE G.⁽²⁾, MINET J.⁽¹⁾, DJABY B.⁽³⁾, NDIONE J. A.⁽²⁾, TYCHON B.⁽¹⁾

(1) Unité Eau Environnement et Développement-Université de Liège, 185 Avenue de Longwy B-6700, Arlon, Belgique [abdoulaziz.diouf@doct.ulg.ac.be; julien.minet@ulg.ac.be; bernard.tychon@ulg.ac.be]

(2) Centre de Suivi Ecologique de Dakar, Rue Léon Gontran Damas, BP 15532, Dakar-Fann, Sénégal [aziz.diouf@cse.sn; gayane.faye@cse.sn; jacques-andre.ndione@cse.sn]

(3) Centre Régional AGRHYMET, BP 11011 Niamey - Niger [b.djaby@gmail.com]

Résumé - Les métriques phénologiques qui expriment certains événements du cycle de vie des plantes, tels que l'émergence, la croissance et la sénescence, principalement liées aux conditions météorologiques et au climat, ont été utilisées afin : (i) de déterminer, à travers les parcours naturels du Sénégal, des entités "phénoclimatiques" homogènes ou phénorégions par classification non-supervisée des images de la série temporelle (1999-2013); (ii) d'analyser l'homogénéité des phénorégions en comparant l'évolution interannuelle de l'indice et des quantités de précipitation et (iii) de donner leurs principales caractéristiques biophysiques. Les résultats obtenus montrent que le domaine pastoral sénégalais peut être subdivisé en trois phénorégions à partir de la grande intégrale du NDVI S10 qui donne les entités spatiales les plus homogènes dans lesquelles les paramètres biophysiques comportent une variation latitudinale caractéristique du Sahel.

Mots-clés: métriques phénologiques, phénorégion, NDVI, parcours, Sénégal.

Abstract - *Phenological zoning and characterization of natural Senegalese rangelands using remote sensing data.* Phenological metrics that express certain events in the life cycle of plants, such as the emergence, growth and senescence, mainly related to weather and climate, have been used: (i) to determine through natural Senegalese rangelands, "phenoclimatical" entities also called phenoregions applying an unsupervised classification technics on the phenological metrics from the NDVI S10 images time-series (1999-2013); (ii) to analyze homogeneity of the phenoregions by comparing the inter-annual evolution of NDVI and amounts of precipitation and (iii) to give the main biophysical characteristics of these phenoregions. The results show that the Senegalese rangelands can be divided into three phenoregions from the NDVI S10 time series. The large integral metric gives the most homogeneous spatial entities where biophysical parameters have a consistent latitudinal variation which is characteristic of the Sahel.

Keywords: phenological metrics, phenoregion, NDVI, rangeland, Senegal.

Introduction

L'étude des parcours naturels est devenue un point essentiel pour l'amélioration des connaissances et la gestion optimale des ressources pastorales. Elle contribue aussi à l'amélioration des méthodes d'estimation du fourrage disponible qui constitue une information capitale dans le suivi de la sécurité alimentaire. Au Sénégal, l'évaluation du stock de fourrage en fin de saison des pluies s'effectue depuis plus de deux décennies à partir d'un modèle obtenu par régression linéaire simple entre l'indice de végétation NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) et les données de biomasse collectées au niveau de 24 Sites de Contrôle au Sol (SCS) (Tucker *et al.*, 1983 ; Diallo *et al.*, 1991 ; Diouf *et al.*, 2014). Une telle approche, avec un modèle unique qui s'applique à l'ensemble du territoire national, peut s'avérer trop grossière compte tenu de la très forte variabilité spatiale des facteurs biophysiques tels que l'occupation des sols et la pluviométrie. D'autant plus que celle-ci est essentiellement responsable des fluctuations de la végétation dans le Sahel (Hickler *et al.*, 2005 ; Huber *et al.*, 2011 ; Anyamba *et al.*, 2014). Récemment, une étude réalisée en Chine a pu montrer que les estimations de la biomasse à grande échelle devraient tenir compte de la variabilité biophysique du territoire (Jin *et al.*, 2014).

Certains auteurs ont pu proposer des zonages climatiques et agro-climatiques du Sénégal sur la base d'informations principalement météorologiques recueillies au sol (Sagna, 2007 et Salack *et al.*, 2011). Mais ces zones n'offrent généralement pas une subdivision du domaine d'étude et un regroupement des 24 SCS permettant l'amélioration des modèles d'estimation de la biomasse. A cet égard, l'exploitation des métriques phénologiques calculées à partir du NDVI et qui traduisent l'apparition de certains événements du cycle de vie des plantes, tels que l'émergence, la croissance et la sénescence principalement liées aux conditions

météorologiques (Hanes *et al.*, 2013), pourrait constituer une bonne alternative pour l'obtention de zones homogènes sur le plan biophysique, et utilisables pour l'élaboration de meilleurs modèles de biomasse. Ainsi, l'objectif principal de cette étude est d'effectuer le zonage phénoclimatique du domaine pastoral sénégalais par classification automatique de métriques phénologiques calculées à partir des profils annuels du NDVI de type SPOT-VEGETATION entre 1999 et 2013.

1. Matériel et méthodes

1.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude correspond aux régions du Sénégal couvrant la majeure partie des terres de pâturages naturels. Il s'agit du domaine pastoral tel que défini par Stancioff *et al.*, (1984). Dans cette partie du pays, les parcours naturels sont régulièrement fréquentés, au cours de l'année, par le bétail en particulier de la transhumance. Du point de vue administratif, la zone d'étude est circonscrite à 15 départements des régions de Saint-Louis, Matam, Kaffrine, Louga et Tambacounda pour une superficie totale d'environ 125 000 km² (Fig. 1).

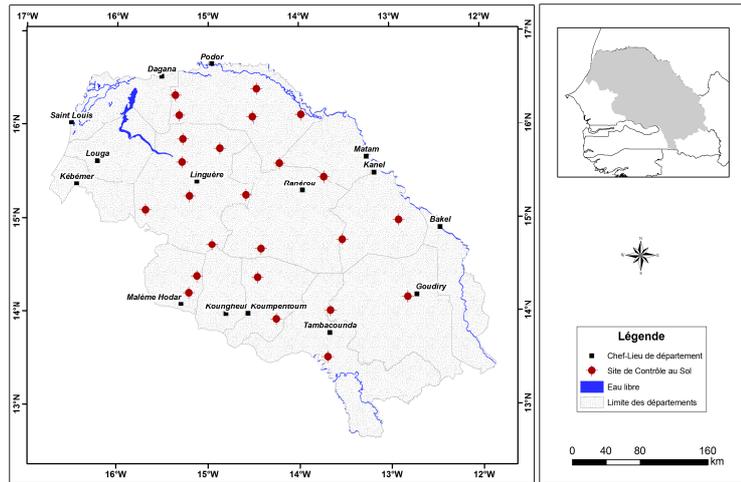


Figure 1. Localisation des Sites de Contrôle au Sol dans les départements de l'étude

1.2. Calcul des métriques phénologiques

Au nombre de quatre, les métriques phénologiques ont été calculées à l'aide du logiciel TIMESAT (Jönsson et Eklundh, 2004) à partir de la série temporelle (1999-2013) d'images NDVI S10 du Satellite SPOT-VEGETATION. Mais auparavant, les séries annuelles d'images décadaires ont été filtrées avec la méthode dite de Savitzky-Golay qui donne visuellement la courbe la plus proche de l'allure globale des données traitées comparé aux autres méthodes (Gaussian et Logistic) disponibles dans le même outil. Les métriques utilisées sont le début de saison (SoS), la fin de saison (EoS), la longueur de la saison (LoS) et la grande intégrale (Lintg) qui selon Jönsson et Eklundh (2004) représente la quantité totale de biomasse produite par le couvert végétal (Fig. 2). Le début et la fin de saison ont été estimés avec des proportions respectives de 20 et 50 % de l'amplitude saisonnière. Les métriques obtenues pour chaque année de la série sont sous forme d'images de type maillé.

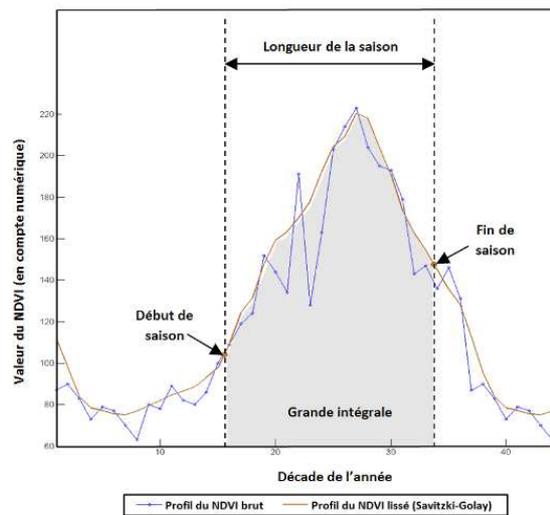


Figure 2. Profil du NDVI (bleu) et courbe de lissage avec la méthode Savitzky-Golay (brun)

1.3. Classification et analyse de séparabilité

La classification non-supervisée a été faite dans un espace à 15-dimensions puisqu'une image multicouche a été élaborée pour chacune des métriques en empilant les 15 images annuelles de 1999 à 2013. Le nombre de classes recherchées a été fixé à trois en se référant aux zonages agro-climatique et climatique du Sénégal proposés respectivement par Salack *et al.*, 2011 et Sagna, 2007. En fait, les zonages proposés par ces auteurs sur la base d'informations essentiellement météorologiques recueillies au sol, permettent de subdiviser la zone étudiée principalement en trois domaines disposés du nord au sud. L'évaluation de l'homogénéité des trois classes obtenues a été faite par analyse de la séparabilité des unes par rapport aux autres à travers leurs signatures spectrales. Le critère de séparabilité utilisé est la Divergence Transformée (DT) calculée à l'aide de l'outil ERDAS IMAGINE (Swain et Davis, 1978). Les valeurs de DT sont comprises entre 0 et 2000. En règle générale, deux classes *i* et *j* sont séparables lorsque les valeurs obtenues sont supérieures à 1900. La séparabilité étant relativement bonne entre 1700 et 1900 et mauvaise en dessous de 1700 (Jensen, 1996).

2. Résultats et discussion

Du point de vue spatial, chacune des métriques étudiées donne une disposition relativement différente des trois classes 1, 2 et 3 (Fig. 3). La grande intégrale (Lintg) est celle qui offre la disposition latitudinale la plus nette. Les trois autres métriques (SoS, LoS et EoS) montrent des classes moins homogènes avec une disposition latitudinale relativement mitigée où les classes 1 et 2 sont fortement imbriquées dans l'espace. Il faut noter que pour la métrique fin de saison (EoS), la classe 2 obtenue occupe la majeure partie du domaine étudié. Ce qui signifie que la fin de croissance végétale est un événement phénologique plus ou moins généralisé qui se produit presque simultanément dans l'ensemble du domaine pastoral.

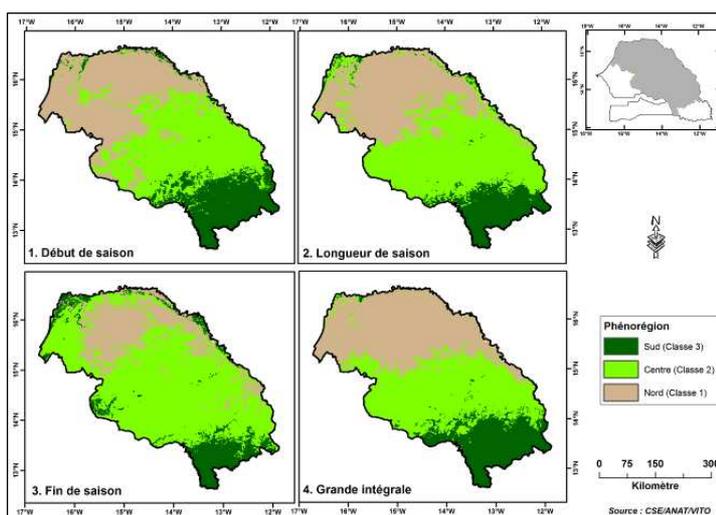


Figure 3. Classification automatique des métriques

Les classes obtenues avec les métriques Lintg et EoS présentent une bonne séparabilité entre elles avec des valeurs de DT supérieures à 1800. Pour la métrique SoS, la séparabilité est mauvaise entre les classes 2 et 3 d'une valeur de 1577. Lorsque l'on considère la valeur moyenne des DT de l'ensemble des trois paires de classes, on constate que la grande intégrale (Lintg) constitue la métrique qui offre le meilleur zonage puisqu'elle donne les classes les plus homogènes avec la valeur la plus élevée (1951), contre 1947 pour la fin de saison, 1887 pour la longueur (LoS) et 1854 pour la métrique début de saison (SoS).

Une analyse comparative de la grande intégrale avec les données de précipitation (RFE ou *Rainfall estimates* du *Famine early warning systems Network*) a été réalisée pour une meilleure appréciation de l'homogénéité des classes (ou phénorégions). Les résultats obtenus montrent un comportement plus ou moins similaire des profils interannuels de l'indice de végétation et de la pluviométrie avec une séparation nette des trois phénorégions disposées dans le sens nord-sud pour l'ensemble des deux paramètres (Fig. 4a et 4b). Les profils de

NDVI intégrés, sans se mêler, reflètent correctement la variation latitudinale des cumuls moyens annuels de précipitation qui augmentent de la Classe 1 à la Classe 3 soit du nord au sud. La similitude temporelle des deux types de profils s'explique par la très forte dépendance de la végétation sahélienne à la pluviométrie, déjà évoquée par Hickler *et al.*, (2005) ; Huber *et al.*, (2011) et Anyamba *et al.*, (2014).

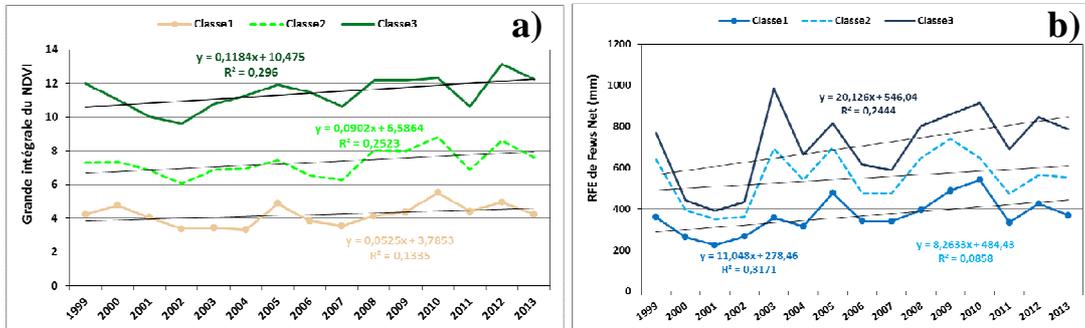


Figure 4. Evolution interannuelle de la grande intégrale (a) et de la pluviométrie (b) dans les trois classes

Cette forte liaison a été confirmée par la régression linéaire entre les anomalies de la grande intégrale du NDVI et celles de la pluviométrie dans les trois classes. Malgré les faibles valeurs du R^2 (Nord : 0,38 ; Centre : 0,33 et Sud : 0,49), les corrélations sont hautement significatives ($p \leq 0,01$) dans les trois phénorégions (Fig. 5). Lorsqu'on utilise les anomalies de l'ensemble de la zone d'étude, le coefficient de détermination devient sensiblement plus petit que celles des phénorégions Nord et Sud ($R^2=0,366$). Ce qui laisse apparaître que la subdivision réalisée donne globalement des zones plus homogènes où la végétation ressort bien le signal climatique induit par la pluviométrie.

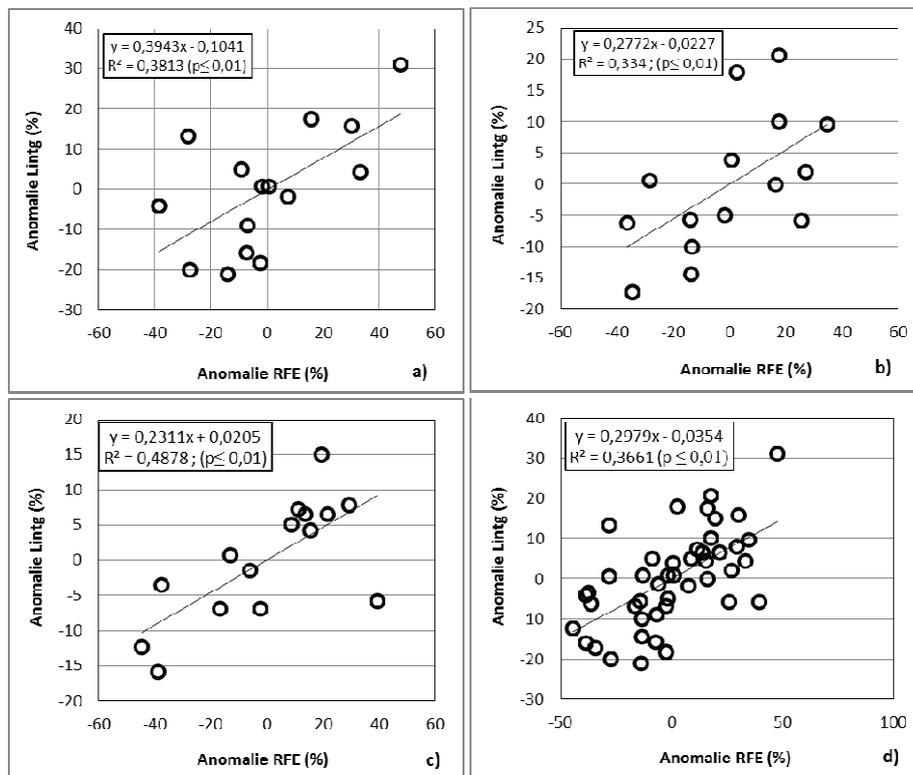


Figure 5. Relation entre les anomalies de la grande intégrale et celles de la pluviométrie dans les classes Nord (a), Centre (b), Sud (c) et pour l'ensemble de la zone d'étude (d)

Les phénorégions ainsi obtenues constituent des subdivisions homogènes du domaine pastoral sénégalais, dans lesquelles les paramètres biophysiques, présentées dans le tableau 1 ci-dessous, comportent une variation latitudinale caractéristique du Sahel. Concomitamment avec le déplacement de la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) qui a un effet important sur les précipitations, la saison de croissance commence plus tôt dans la phénorégion Sud, vers la première décade du mois de juin, et s'y termine un peu plus tard vers la fin du mois de novembre. Par conséquent, la saison y est plus longue avec 16 décades contre 11 et 9 décades respectivement dans les phénorégions Centre et Nord. Au niveau de celles-ci, la saison de croissance débute respectivement vers les décades 18 et 20 de l'année alors que la fin s'observe en moyenne à la fin du mois d'octobre. Par ailleurs, ce zonage phéno-climatique des parcours naturels sera utile à deux points de vue : i) d'abord pour l'amélioration des connaissances du milieu étudié ii) et ensuite pour l'élaboration de modèles de prévision de la production fourragère à l'intérieur de subdivisions à climat et phénologie végétale plus ou moins identiques. En effet, les modèles par zone devraient permettre de gagner en précision dans l'estimation de la production de fourrage par rapport aux modèles généralisés qui considèrent l'espace étudié comme une seule entité bioclimatique et donc ne prennent en compte que faiblement la très forte variabilité spatiale des facteurs biophysiques comme la pluviométrie et le type de végétation.

Tableau 1 : Principales caractéristiques biophysiques des phénorégions. La pluviométrie moyenne a été calculée à partir de la série annuelle d'images RFE de FewNet (<http://earlywarning.usgs.gov/fews/africa>) entre 1996 et 2013. Les pourcentages de couverture ligneuse ainsi que les espèces ligneuses caractéristiques des différentes phénorégions ont été synthétisées en considérant les SCS qui recoupent les trois phénorégions.

| Phénorégion [Superficie] | SoS-EoS-LoS (en décades) | Couverture ligneuse (en %) | Pluviométrie moyenne (en mm) | Type de paysage et quelques espèces ligneuses caractéristiques |
|---|--|----------------------------------|------------------------------------|---|
| Nord [53041 km ²] | 20 ^{ème} -30 ^{ème} -9 | 9 | 359 | Pseudo-steppe <i>Guiera senegalensis</i> ; <i>Boscia senegalensis</i> ; <i>Pterocarpus lucens</i> ; <i>Balanites aegyptiaca</i> ; <i>Calotropis procera</i> ; <i>Combretum glutinosum</i> ; <i>Grewia bicolor</i> ; <i>Sclerocarya birrea</i> |
| Centre [50782 km ²] | 18 ^{ème} -30 ^{ème} -11 | 18 | 541 | Savane arbustive et arborée <i>Combretum glutinosum</i> ; <i>G. senegalensis</i> ; <i>G.</i> <i>bicolor</i> ; <i>Acacia macrostachya</i> ; <i>B. senegalensis</i> ; <i>B. aegyptiaca</i> ; <i>Combretum micranthum</i> ; <i>Maytenus senegalensis</i> |
| Sud [21951 km ²] | 16 ^{ème} -32 ^{ème} -16 | 55 | 629 | Savane arborée à boisée <i>Strychnos spinosa</i> ; <i>C. glutinosum</i> ; <i>Crossopteryx</i> <i>febrifuga</i> ; <i>Terminalia avicennioides</i> ; <i>Hexalobus</i> <i>monopetalus</i> ; <i>Combretum nigricans</i> ; <i>Vitex</i> <i>doniana</i> ; <i>Cordyla pinnata</i> |

Conclusion

La grande intégrale (Lintg) constitue la métrique qui offre le meilleur zonage des parcours naturels sénégalais puisqu'elle donne les classes les plus nettes du point de vue spatial et au sens de la statistique DT (Divergence Transformée). Les classes phénologiques ressortent bien le signal climatique donné par la pluviométrie dans la mesure où les profils de NDVI intégré obtenus reflètent correctement la variation latitudinale des cumuls moyens annuels de précipitation qui augmentent du nord au sud. Les phénorégions ainsi obtenues constituent des subdivisions homogènes du domaine pastoral sénégalais dans lesquelles les paramètres biophysiques y comportent une variation latitudinale caractéristique du Sahel. Ces phénorégions qui prennent en compte la forte variabilité spatiale des facteurs biophysiques

comme la pluviométrie et le type de végétation, devraient permettre d'améliorer la qualité de l'estimation de la production fourragère en construisant des modèles par phénorégion.

Remerciements

Ils vont à l'endroit de la Direction du Centre de Suivi Écologique (CSE) de Dakar, de l'Unité Eau Environnement et Développement du Campus Environnement de l'ULg et des coordonnateurs du Projet AGRICAB pour leur appui financier dans l'exécution de ces travaux.

Références

- Anyamba A., Small J., Tucker C., & Pak E., 2014 : Thirty-two Years of Sahelian Zone Growing Season Non-Stationary NDVI3g Patterns and Trends. *Remote Sensing*, **6**, 3101-3122.
- Diallo O., Diouf A., Hanan N.P., Ndiaye A., & Prévost Y., 1991. AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 1259-1279.
- Diouf A.A., Djaby B., Diop M.B., Wele A., Ndione J.-A., & Tychon B., 2014. Fonctions d'ajustement pour l'estimation de la production fourragère herbacée des parcours naturels du Sénégal à partir du NDVI s10 de SPOT-vegetation. XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 284-289.
- Hanes J.M., Richardson A.D., & Klostermann S., 2013 : Mesic temperate deciduous forest phenology. In: Schwartz MD (ed) Phenology: an integrative environmental science, 2nd edn. Springer, New York.
- Hickler T., Eklundh L., Seaquist J.W., Smith B., Ardö J., Olsson L., Sykes M.T., & Sjöström M., 2005. Precipitation controls Sahel greening trend. *Geophysical Research Letters*, **32**, L21415.
- Huber S., Fensholt R., & Rasmussen K., 2011 : Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and Planetary Change*, **76**, 186-195.
- Jensen J.R., 1996 : Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 2d ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. In: ERDAS Field Guide, Volume two, august 2008.
- Jin Y., Yang X., Qiu J., Li J., Gao T., Wu Q., Zhao F., Ma H., Yu H., & Xu B., 2014 : Remote Sensing-Based Biomass Estimation and Its Spatio-Temporal Variations in Temperate Grassland, Northern China. *Remote Sensing*, **6**, 1496-1513.
- Jönsson P., & Eklundh L., 2004 : TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, **30**, 833-845.
- Sagna, P. (2007). Caractéristiques climatiques. In : Atlas de l'Afrique. Editions Jeune-Afrique, Sénégal, pp. 66-69
- Salack S., Muller B., & Gaye A.T., 2011 : Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I: integration of local to sub-regional trends and variability. *Theoretical and Applied Climatology*, **106**, 1-22.
- Stancioff A., Staljanssens M., & Tappan G., 1986 : Mapping and Remote Sensing of the Resources of the Republic of Senegal: A study of the geology, hydrology, soils, vegetation and land use potential. In, SDSU, Remote Sensing Institute, SDSU-RSI-86-01 (p. 655pp).
- Swain P.H., & Davis S.M., 1978 : Remote Sensing: The Quantitative Approach. New York: McGraw Hill Book Company. In ERDAS Field Guide (2008). Volume Two August 2008, 370 pages.
- Tucker C.J., Vanpraet C., Boerwinkel E., Gaston A., 1983 : Satellite remote sensing of total dry matter production in the Senegalese Sahel, *Remote Sensing of Environment*, **13**(6), 461-474.