

Modélisation par approche globale de la dynamique du blé pluvial observée par télédétection spatiale en zone semi-aride

Sylvain Mangiarotti¹, Laurent Drapeau¹, Raphael Coudret¹, & Lionel Jarlan^{1,2}

¹ CESBIO, UMR 5126 — UPS/CNRS/CNES/IRD, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse, France

² Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

sylvain.mangiarotti@cesbio.cnes.fr

Résumé. Les mesures de télédétection spatiale basse résolution, qui offrent une bonne couverture temporelle pour l'étude des couverts végétaux à développement annuel en zones semi-arides sont utilisées ici pour tenter une modélisation de la dynamique du blé pluvial par approche globale. Un modèle tridimensionnel obtenu par cette approche est présenté et analysé.

Abstract. Remote sensing is a powerful tool for monitoring vegetation in semi-arid region. Low resolution data from satellite remote sensor, that offer a long time span, is used in the present work to model the dynamics of rainfed wheat with a global approach. A three-dimensional model obtained by this approach is presented and analysed.

1 Introduction

Comme sur l'ensemble du pourtour Sud de la Méditerranée, la production céréalière du Maroc est très largement issue de l'agriculture pluviale. La plupart des modèles utilisés à ce jour pour en modéliser la dynamique font appel à un forçage météorologique limitant toute utilisation en mode prévisionnel au regard de la faible qualité des prévisions climatiques saisonnières. Les travaux de Balaghi *et al* [2] ont montré qu'il était possible, par des approches multi-régresseurs, d'obtenir des estimations de rendements en cours de saison, en se basant à la fois sur des mesures météorologiques locales (température, précipitation) et sur une estimation spatialisée de la vigueur du couvert végétal à travers l'indice de végétation NDVI mesuré par satellite.

Plus récemment, les travaux de Jarlan *et al* [4] ont montré que l'ajout d'une information sur la dynamique atmosphérique et océanique à grande échelle tel que l'indice climatique NAO (Oscillation Nord Atlantique) qui procure une information au cours du temps sur l'état du système climatique régional, pourrait permettre une prévision plus précoce de l'activité du couvert végétal. Parallèlement, l'analyse nonlinéaire de dynamique de la végétation en zone semi-aride sahélienne a révélé des dynamiques de petite dimension [5]. Bien qu'appliqué à un contexte climatique différent, ce travail encourage l'exploration de la piste déterministe des systèmes dynamiques instables de petites dimensions. Contrairement aux approches mécanistes, l'approche globale ne vise pas à modéliser les différentes composantes du système et leurs interactions, mais à obtenir un modèle du comportement du système dans sa globalité. Cette approche a été appliquée avec succès à un certain nombre de cas synthétiques et expérimentaux [6].

Son applicabilité n'a toutefois rien de systématique et dépend en particulier de la dynamique du milieu à l'étude qui doit présenter une composante déterministe et de l'observabilité du système au travers de la variable mesurée. A ce jour, la modélisation globale n'a pu être appliquée qu'à peu de milieux naturels ou environnementaux, tels le cycle des taches solaires [7], ou la population de Lynx du Canada [8].

Nous proposons dans ce travail d'explorer la piste déterministe des systèmes dynamiques instables de petites dimensions pour l'analyse de la dynamique du blé pluvial sur la province de Settat au Maroc

2 Données et prétraitements

Les indices de la végétation issus de la télédétection spatiale tirent parti du contraste de réflectance des surfaces terrestres naturelles dans le rouge et l'infrarouge, pour nous renseigner sur l'activité pho-

tosynthétique. Ils constituent une information unique pour le suivi du cycle de la végétation en zone semi-aride et sont utilisés ici comme variable d'observation du blé pluvial sur la province de Settat (Maroc) afin de remonter à la dynamique du couvert végétal.

Les indices de végétation NDVI utilisés pour cette étude proviennent du jeu de données GIMMS (Global Inventory Modelling and Mapping Study [9]). Ces données ont une couverture globale sur une période allant de 1982 à nos jours avec une résolution initiale de $8 \times 8 \text{ km}^2$. Les données sont synthétisées sur 10 jours par sélection des valeurs maximales afin de réduire les effets de perturbation atmosphérique et d'angle de visée. D'autres corrections sont également appliquées (prise en compte de la dégradation des capteurs et de perturbations associées aux aérosols).

La présente étude concerne la province de Settat au Maroc où le blé pluvial est la culture dominante. Une série temporelle d'indice de la végétation a été produite sur l'ensemble de la province par un simple calcul de moyenne, après avoir sélectionné les zones emblavées grâce à une carte d'occupation du sol (GLC2000 [3]). Une série temporelle unique représentant une surface de 9750 km^2 est ainsi obtenue. Le niveau d'erreur associé à ces données peut être estimé entre 10% et 15%. Un filtrage de type Savitzky-Golay a été appliqué avec une fenêtre de 9 décades ainsi qu'un ré-échantillonnage journalier, afin de faciliter la mise en place d'un modèle global [6]. La série temporelle résultant de ce prétraitement montre un cycle saisonnier très marqué associé à la croissance et à la sénescence du blé Fig. 1.

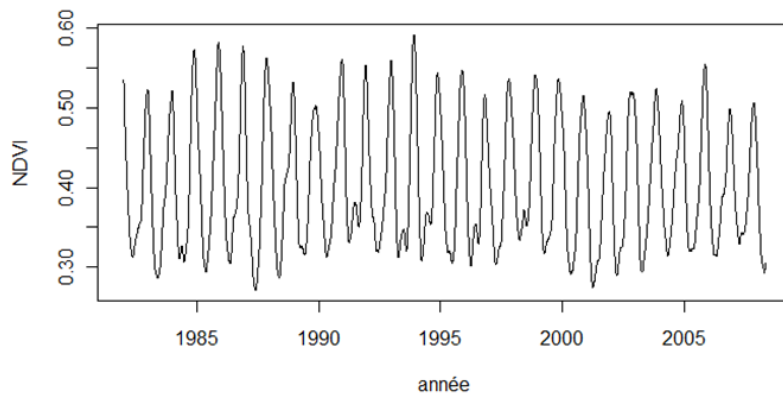


FIG. 1. Série temporelle $x(t)$ d'indice de la végétation NDVI agrégé (province de Settat, Maroc).

3 Modélisation globale : approche, outils et démarche

L'objet du présent travail est d'obtenir un jeu d'équation différentielle ordinaire capable de reproduire la dynamique du blé pluvial, telle qu'observée par télédétection spatiale, via les indices de la végétation NDVI. La formulation du modèle est tirée de Gouesbet [10] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = X_3 \\ \dots \\ \dot{X}_n = P(x_1, X_2, \dots, X_n) \end{cases} \quad (1)$$

dans sa formulation polynomiale. $P(x_1, X_2, \dots, X_n)$ est donc un polynôme à identifier, x_1 est la série temporelle initiale des indices NDVI agrégés, et $X_2 \dots X_n$ sont les dérivées successives de x_1 .

D'un point de vue pratique, le problème tient à l'identification de la structure et du paramétrage de ce polynôme. Deux algorithmes complémentaires, PoMoS & GloMo, ont été développés à cet effet. PoMoS

(pour Polynomial Model Search) est un module d'identification de termes par une méthode d'optimisation où les critères d'optimalité utilisés sont de type AIC [1], visant à concilier parcimonie du modèle (minimisation du nombre de paramètres) et adéquation entre simulation et observation (minimisation de l'erreur). Le second module, GloMo (pour Global Modelling) est destiné à identifier le paramétrage du polynôme. L'approche utilisée est basée sur une procédure de type Gramm-Schmidt, de bonne robustesse en contexte bruité [11]. Chacun des algorithmes a fait l'objet d'un dépôt [12] au Comprehensive R Archive Network.

4 Résultats et discussions

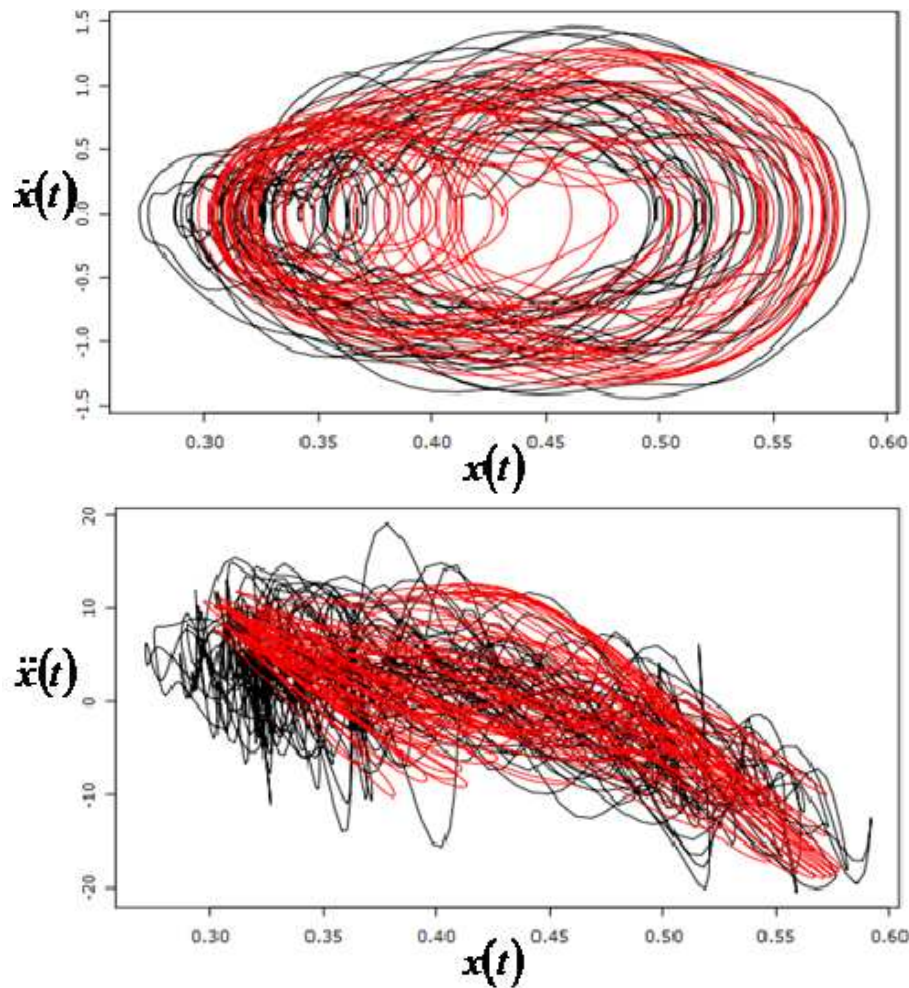


FIG. 2. Projections des portraits de phase tirés des données (noir) et du modèle (rouge).

Un modèle tridimensionnel non trivial a pu être obtenu avec un polynôme de degré 3. Son portrait de phase (Fig. 2) est en bonne cohérence avec le portrait issu des données. Il présente une densité non nulle sur l'intérieur de la trajectoire obtenue à partir des données observées. Ce modèle permet d'atteindre efficacement les valeurs extrêmes de NDVI observées avant récolte (les pics annuels, cf Fig. 1). Pour caractériser le régime du modèle, les exposants de Lyapunov ont été estimés en utilisant les approches de Wolf *et al* [13] et de Grond *et al* [14], donnant un premier exposant nettement positif (respectivement 5,3 et 2,5), caractéristique d'un régime chaotique.

L'application de premier retour du modèle (Fig. 3) présente trois branches : (a) une branche dense et très régulière et (b) et (c) deux branches concurrentes fortement bruitées. La branche (a) correspond aux valeurs fortes de NDVI qu'elle tend à réduire tout en conservant sur cette même branche lorsque les valeurs sont supérieures à 0,53 ; ou à les transporter sur les branches (b) ou (c) en deçà. Aucune structure claire n'apparaît pour privilégier le passage vers (b) plutôt que vers (c), si ce n'est une densité plus forte de la branche (c). Le passage par la branche (c) conduit alors systématiquement à un retour à la branche (a). Au contraire, un passage à la branche (b) conduit à maintenir l'indétermination entre branches (b) et (c).

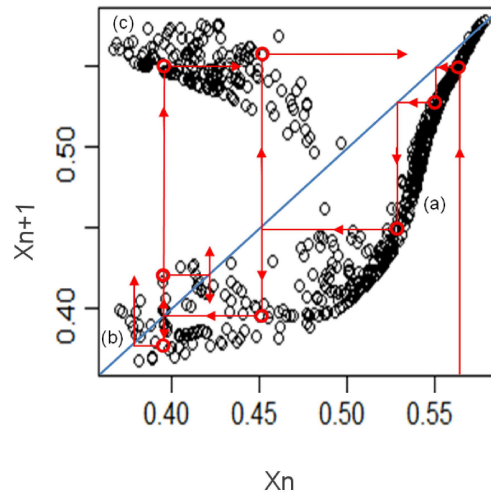


FIG. 3. Application de premier retour tirée du modèle global ; les flèches indiquent le comportement circulaire.

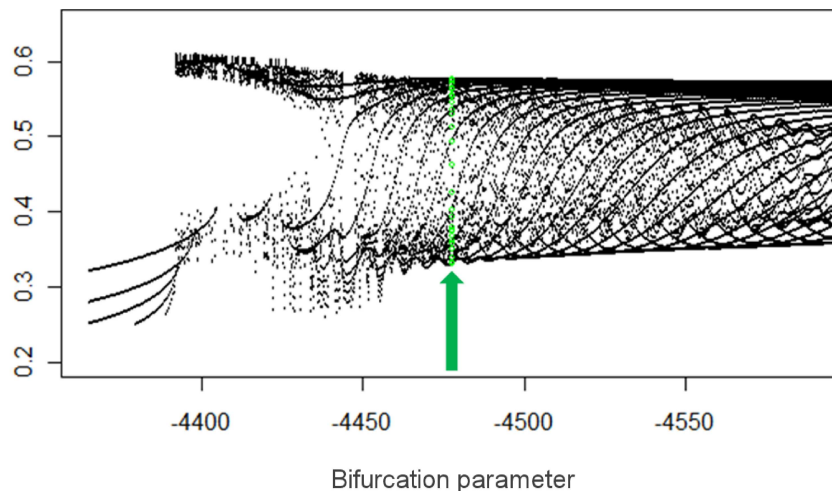


FIG. 4. Diagramme de bifurcations obtenu à partir du coefficient correspondant au terme polynomial X_2 .

Un diagramme de bifurcation a été reconstruit en faisant varier de $\pm 2,5\%$, le coefficient correspondant au terme X_2 (Fig. 4). Ce diagramme fait apparaître des comportements complexes. Le régime correspondant au signal observé montre une densité des valeurs maximales réparties sur une zone étale sans

structure apparente forte, avec des régimes environnants ne présentant pas de différence forte (pas de bifurcation immédiatement à proximité, niveau des valeurs extrémales invariantes). Des non-stationnarités dynamiques pourraient toutefois conduire à une certaine variabilité concernant la distribution des maximums annuels. Pour approfondir cette question, il serait nécessaire d'identifier l'intervalle paramétrique qui pourrait être concerné par de telles non-stationnarités, et d'analyser les distributions de façons quantitatives.

5 Discussion et conclusion

La modélisation de la dynamique du blé pluvial en zone semi-aride par approche globale, à partir d'indices de la végétation obtenus par télédétection spatiale permet d'obtenir un modèle chaotique tridimensionnel. C'est un argument fort du comportement déterministe et chaotique sous-jacent. L'étude de l'application de premier retour permet d'autre part de mettre en évidence un cycle bien identifiable (bien que faiblement prévisible). L'obtention d'un diagramme de bifurcation doit également permettre d'envisager l'analyse d'éventuelles non stationnarités.

Remerciements

Ce travail de recherche est financé par l'Institut de Recherche pour le Développement. Nous tenons à remercier C. Letellier pour ses conseils encourageants.

Références

1. AKAIKE H, A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **16** (6), 716-723 (1974).
2. R. BALAGHI, B. TYCHON, H. EERENS & M. JLIBENE, Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **10** (4), 438-452 (2008).
3. *Global Land Cover 2000 database* (GLC2000, 2000), European Commission, Joint Research Centre, <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/> (2003).
4. L. JARLAN, F. DRIOUECH, Y.M. TOURRE, B. DUCHEMIN, J. ABAOUI, M. LE PAGE, H. KHARROU, A. OULDBBA, A. MOKSSIT & G. CHEHBOUNI, Seasonal and interannual vegetation dynamics over Morocco through the NDVI/AVHRR from 1982 to 2008 : linkages with climate signals and potential for seasonal prediction, *soumis*.
5. S. MANGIAROTTI, P. MAZZEGA, E. MOUGIN, & P. HIERNAUX, The vegetation cycle in West Africa from AVHRR-NDVI data : Horizons of predictability *versus* spatial scales, *Remote Sensing of Environment*, **114** (9), 2036-2047 (2010).
6. C. LETELLIER, L.A. AGUIRRE & U.S. FREITAS, Frequently asked questions about global modeling, *Chaos*, **19**, 023103 (2009).
7. C. LETELLIER, L.A. AGUIRRE, J. MAQUET & R. GILMORE, Evidence for low dimensional chaos in the sunspot cycles, *Astronomy & Astrophysics*, **449** (1), 379-387 (2006).
8. J. MAQUET, C. LETELLIER & L. A. AGUIRRE, Global models from the Canadian Lynx cycles as a first evidence for chaos in real ecosystems, *Journal of Mathematical Biology*, **55** (1), 21-39 (2007).
9. C. J. TUCKER, J. E. PINZON, M. E. BROWN, D. A. SLAYBACK, E. W. PAK, R. MAHONEY, E. F. VERMOTE & N. E. SALEOUS, An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data, *International Journal of Remote Sensing*, **26** (20), 4485-4498 (2005).
10. G. GOUESBET, Reconstruction of the vector fields of continuous dynamical systems from numerical scalar time series, *Physical Review A*, **43** (10), 5321-5331 (1991).
11. G. GOUESBET & C. LETELLIER, Global vector-field reconstruction by using a multivariate polynomial L_2 approximation on nets, *Physical Review E*, **49** (6), 4955-4972 (1994).
12. S. MANGIAROTTI, R. COUDRET & L. DRAPEAU, Package 'PoMoS', <http://www.cesbio.ups-tlse.fr> ou <http://cran.r-project.org> (2010).
13. A. WOLF, J. B. SWIFT, H. L. SWINNEY & J. A. VASTANO, Determining Lyapunov exponents from a time series, *Physica D*, **16**, 285-317 (1985).
14. F. GROND, H. H. DIEBNER, S. SAHLE, A. MATHIAS, S. FISCHER & O. E. RÖSSLER, A robust, locally interpretable algorithm for Lyapunov exponents, *Chaos, Solitons & Fractals*, **16**, 841-852 (2003).