

L'IMPACT DU CLIMAT SUR LES DYNAMIQUES MORPHOLOGIQUES EN TOSCANE (ITALIE CENTRALE)

GIACCONE E.⁽¹⁾, VERGARI F.⁽²⁾, DEL MONTE M.⁽²⁾, FRATIANNI S.^(1,3)

(1) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, via Valperga Caluso 35 - 10125 Torino, Italie [elisa.giaccone@gmail.com ; simona.fratianni@unito.it]

(2) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", piazzale Aldo Moro 5 - 00185 Rome, Italie [francesca.vergari@uniroma1.it ; maurizio.delmonte@uniroma1.it]

(3) Centro di Ricerca sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare (NatRisk), via Leonardo da Vinci 4 - 10095 Grugliasco, Italie

Résumé – Les données de précipitations et températures de la station météorologique Radicofani (Toscane, Italie centrale) ont été analysées pour comprendre les tendances climatiques actuelles et pour chercher une explication aux phénomènes d'érosion qui touchent cette zone d'étude, caractérisée par la présence de calanques et « biancane » (paysage à badlands). Les données sur les taux d'érosion ont été obtenues grâce à un monitoring ponctuel (piquets en fer) et à une analyse numérique de la photogrammétrie.

Mots-clés : changement climatique, précipitations, érosion, badlands italiens.

Abstract – *Climate impact on morphological dynamics in Tuscany (Central Italy)*. Precipitation and temperature data from Radicofani weather station (Tuscany, Central Italy) were analysed to understand the current climate trends and to seek an explanation to erosion affecting this study area, characterized by the presence of "calanchi" and "biancane" (badlands). The erosion rates data were obtained with field monitoring (iron pins) and multi-temporal digital photogrammetric analysis.

Keywords : climate change, rainfall, erosion, Italian badlands.

Introduction

L'Italie centrale est affectée par des phénomènes d'érosion accélérée, provoqués par le ruissellement superficiel et la gravité. La dénudation des surfaces agit surtout sur les affleurements d'argile du Quaternaire, plus facilement érodables (Buccolini *et al.*, 2010). Ces processus érosifs conduisent au développement d'un environnement à *badlands*, composés de calanques, avec des bords nets, et « biancane », avec une forme ronde.

L'haute vallée d'Orcia (Toscane Méridionale, Italie Centrale) est un site clef pour la compréhension des phénomènes érosifs. Dans cette région, un programme de monitoring *in situ*, débuté à peu près il y a 20 ans, a permis de quantifier l'influence du ruissellement sur le taux de dénudation au niveau du bassin et d'évaluer les effets *in situ* de l'érosion de l'eau (Della Seta *et al.*, 2009 ; Vergari *et al.*, 2013a).

Les taux d'érosion sont fortement liés non seulement à la géologie, à l'utilisation du sol (déforestation, pâturage et agriculture) et aux relations avec les facteurs biotiques (plantes et graines) mais aussi aux conditions climatiques (précipitations et températures). Toutefois, une analyse climatique profonde et complète de la vallée d'Orcia n'a jamais été effectuée.

Cette étude a donc pour but d'évaluer l'impact du climat sur les dynamiques morphologiques du bassin d'étude et de quantifier sa contribution à l'évolution du paysage, dans un cadre qui vise à l'évaluation des réponses du système morfo-climatique aux changements climatiques. Cette étude se base sur une analyse climatique des données de la station météorologique de Radicofani. Les résultats ont été mis en relation avec les taux d'érosion obtenus par le monitoring ponctuel sur le terrain et l'analyse numérique de la photogrammétrie.

1. Zone d'étude

La zone d'étude est localisée dans la Toscane Méridionale (province de Siena) ; elle correspond au bassin hydrographique de l'haute vallée de la rivière Orcia, principal affluent de la rivière Ombrone (Fig. 1a). De nombreux phénomènes d'érosion accélérée ont été documentés dans certaines zones (Della Seta *et al.*, 2009 ; Vergari *et al.*, 2013a, 2013b). En

effet, les affleurements des dépôts marins du Plio-Pléistocène, soulevés pendant le Quaternaire par la suite de l'activité volcanique de Radicofani et du Monte Amiata (1 731 m d'altitude) (Acocella et Rossetti, 2002), sont très sensibles à l'érosion.

La structure géologique et le contraste saisonnier humide-sèche, typique de l'environnement méditerranéen, sont les facteurs idéals pour la création de formes d'érosion, comme les calanques, les « biancane » et différentes typologies de glissements de terrain (Fig. 1b et Fig. 1c). Ce site d'étude a aussi un intérêt culturel, naturaliste et touristique très important. En effet la zone de l'haute vallée d'Orcia / Crêtes Siennoises a été reconnue Patrimoine mondial de l'humanité par l'UNESCO.

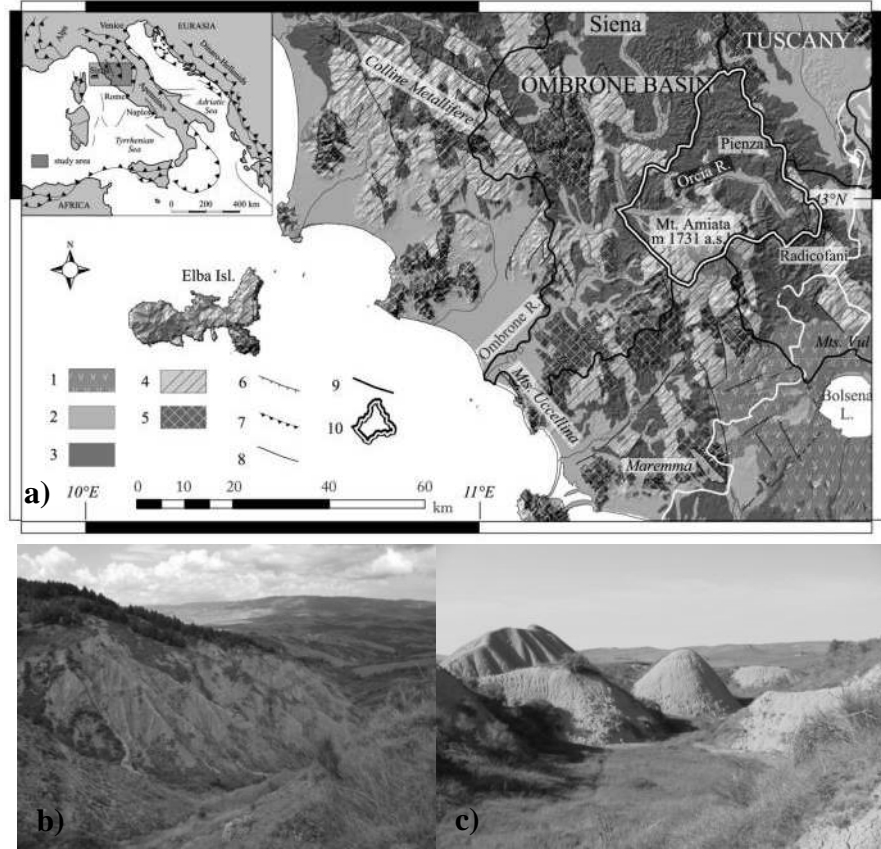


Figure 1. a) Localisation de la zone d'étude et croquis géologique : 1) rochers volcaniques quaternaires ; 2) dépôts continentaux quaternaires ; 3) dépôts marins terrigènes plio-pléistocènes ; 4) unités sédimentaires et métamorphiques des nappes Ligure et sous-Ligure (Trias jusqu'au Crétacé inférieur) ; 5) unités sédimentaires et métamorphiques de la nappe Toscane ; 6) faille normale ; 7) chevauchement et faille inverse ; 8) faille indéterminée ; 9) ligne de partage des eaux ; 10) bassin de la rivière Orcia ; **b)** calanques ; **c)** « biancane » dans la haute vallée d'Orcia.

2. Méthodologie

2.1. Climat

L'enregistrement de la station météorologique Radicofani a été utilisé sur la période 1965-2013. Elle est située à 816 m d'altitude et elle fait partie du service météorologique de l'Aeronautica Militare Italiana. Les données journalières de température et précipitation ont subi un contrôle de qualité avec RCLIMDEX (Zhang et Yang, 2007). Ensuite, elles ont été homogénéisées avec la méthode HOMER (Caussinus et Mestre, 2004 ; Venema *et al.*, 2012). D'ici les valeurs mensuelles obtenues ont été analysées pour caractériser d'un point de vue climatique la zone d'étude et pour définir les tendances des principaux paramètres climatiques (températures maximales et minimales, précipitation, journées pluvieuses – précipitation > 1 mm –, CDD *Consecutive Dry Days* avec précipitation journalière <1 mm, CWD *Consecutive Wet Days* avec précipitation journalière >1 mm, R10 et R20, numéro de journées avec précipitations supérieures à 10 et 20 mm respectivement). Nous avons appliqué le test non paramétrique de Mann-Kendall pour vérifier la signification statistique des tendances placée au seuil de 0,05 (Sneyers, 1990).

Pour relier la pluviométrie avec les taux d'érosion des alentours de Radicofani, l'indice de Fournier (Fournier, 1960), modifié par Arnoldus (1980), a été calculé chaque année pour obtenir une donnée moyenne avec la formule (1) :

$$\sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{\bar{P}} \quad (1)$$

où P_i est la pluviosité moyenne de chacun des 12 mois de l'année et \bar{P} la pluviosité moyenne annuelle.

Ce numéro a été classifié selon la méthodologie CORINE Erosion (EEA, 1994) (Tabl. 1).

Tableau 1. Classification de l'érosion selon CORINE Erosion (EEA, 1994).

Classe	Description	Range
1	Très bas	< 60
2	Bas	60 – 90
3	Modéré	90 – 120
4	Haut	120 – 160
5	Très haut	> 160

En outre, le paramètre R de la méthode RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation – EURPT Équation universelle révisée des pertes en terre*) (Renard *et al.*, 1997), qui correspond au facteur de pluie et de ruissellement par secteur géographique (exprimé en $\text{MJ mm h}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$), a été calculé chaque année selon la méthodologie proposé par Arnoldus (1980) (formule 2) :

$$R = (4,17 * F) - 152 \quad (2)$$

où F est l'indice de Fournier.

2.2. Érosion

Pour quantifier le matériel emporté par l'action érosive de l'eau unie à la gravité, deux techniques ont été utilisées :

a) un monitoring ponctuel a été effectué dès 1993 (Del Monte, 2003) grâce à des piquets en fer (80 cm de longueur et 1 cm de section) placés dans le terrain sur calanques et « biancane » pour observer les changements du niveau du sol provoqués par l'érosion. En particulier :

- 60 piquets environ, certains mis en place dès 2004, sont situés dans le fond de la vallée de la rivière Formone (un affluent de l'Orcia), où un *badlands* à « biancane » résiduelles survit entouré d'un grand champ labouré ;
- une dizaine de piquets a été placée dans la réserve naturelle Lucciolabella, où le paysage à « biancane » de l'haute vallée d'Orcia est protégé (sous-bassin Miglia) ;
- 15 piquets environ sont situés le long de la ligne de partage des eaux Formone-haute Orcia, entre calanques et « biancane ».

Les données relatives à l'érosion des années 2006 et 2007, pour lesquelles le plus grand nombre de mesures effectuées en champ existe, ont été mises en relation avec les précipitations journalières cumulées entre deux périodes de mesure. Le coefficient de corrélation a été calculé pour les sites ayant une base de données relative à l'érosion cohérente afin d'évaluer comment les précipitations influencent l'activité érosive.

b) une analyse numérique de la photogrammétrie a permis d'évaluer l'évolution des versants en raison de l'érosion accélérée de l'eau. Les photos aériennes disponibles, intégrées à des enquêtes de terrain, ont été interprétées. L'analyse a été réalisée sur quatre séries de photographies aériennes en noir et blanc datant de 1954 (échelle 1: 36.000 ; pas utilisées pour

l'estimation de l'érosion à cause de leurs basse résolution), 1976 (échelle 1: 17.000), 1994 (échelle 1: 34.000) et 2003 (échelle 1: 30.000) (Aucelli *et al.*, 2014). Les séries ont également été utilisées pour la reconstruction de la couverture végétale de la zone d'étude et ses variations dans le temps. Les estimations volumétriques des taux d'érosion obtenus par cette analyse ont été validées grâce aux résultats du monitoring ponctuel par piquets commencé il y a 20 années.

3. Résultats

3.1. Analyse climatique

La température moyenne annuelle de Radicofani est 11,8°C. Le mois le plus froid est décembre avec une température minimale moyenne de -1,5°C ; le mois le plus chaud est juillet avec une température maximale moyenne de 26°C. Sur la période 1965-2013, les températures maximales ont une augmentation statistiquement significative de $0,039 \pm 0,006^\circ\text{C}/\text{an}$, les minimales de $0,009 \pm 0,006^\circ\text{C}/\text{an}$ (Fig. 2a).

La précipitation moyenne annuelle est 920 mm. Novembre est le mois le plus pluvieux avec 131,7 mm en moyenne ; juillet le plus sec avec 41,8 mm. Le régime pluviométrique est de type sous-côtier (Pinna et Vittorini, 1985), avec un maximum principal en automne, maximum secondaire en printemps et minimum principal en hiver. La tendance des précipitations sur la période 1965-2012 est en augmentation non statistiquement significative ($1,077 \pm 2,31 \text{ mm}/\text{an}$) (Fig. 2b).

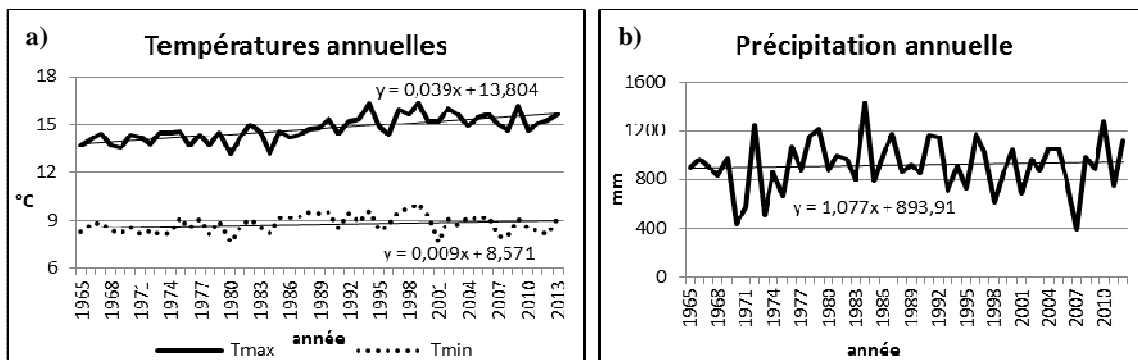


Figure 2. a) Tendances des températures (1965-2013) ; b) Tendance de la pluie (1965-2012).

Le nombre moyen annuel de journées pluvieuses est de 85 jours. Avril, novembre et décembre sont les mois avec le plus grande nombre de journées pluvieuses (9 en moyenne), juillet avec le minimum de jours (4). Ce paramètre a une tendance négative non statistiquement significative de $-0,07 \pm 0,16$ jours/an dans la période 1965-2012. Les CDD moyens annuels sont 33 et ils montrent une augmentation non significative de $0,04 \pm 0,13$ jours/an. Les CWD moyens annuels sont 7 et ils montrent la même tendance ($0,02 \pm 0,02$ jours/an). Les valeurs moyennes annuelles de R10 et R20 sont respectivement 24 et 10. Elles augmentent de manière significative de $0,43 \pm 0,08$ jours/an pour R10 et de $0,26 \pm 0,05$ jours/an pour R20.

L'indice moyen de Fournier est 113, ce qui correspond à la classe 3 selon la méthodologie Corine (valeurs comprises entre 90 et 120). Pendant la période 1965-2012, il augmente de manière non statistiquement significative de $0,56 \pm 0,37$ par année. Le paramètre R de la méthode RUSLE est $319 \text{ MJ mm h}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (valeur annuelle moyenne) et il augmente de manière non significative de $2,31 \pm 1,54 \text{ MJ mm h}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ par année (période 1965-2012).

3.2. Analyse sur l'érosion

Le monitoring sur les *badlands* effectué pendant les dernières 20 années montre que les valeurs moyennes de dénudation varient entre 1 et 2,5 cm/an ; néanmoins il y a une forte variabilité spatiale et temporelle. Dans les « biancane » le taux d'érosion dû au ruissellement superficiel est plus fort par rapport aux calanques : il atteint la valeur moyenne de 2,4-2,6 cm/an. En outre les « biancane » dans une phase initiale de développement, comme dans la réserve naturelle Lucciolabella, ont un taux d'érosion maximale (>4 cm/an). Tout le matériel érodé va s'accumuler au pédiment, indiquant une rapide retraite des « biancane ».

Les calanques enregistrent des taux d'érosion dû au ruissellement plus faible, entre 1 et 2 cm/an. La présence d'une couche plus résistante de roche diminue les glissements de terrain, qui continuent d'être fréquents pendant le printemps à cause des pluies qui saturent les dépôts argileux (Vergari *et al.*, 2013a, 2013b).

Le coefficient de corrélation, calculé entre les données relatives à l'érosion des années 2006-2007 et les précipitations journalières cumulées entre deux périodes de mesures, montre une relation très variable entre les sites choisis. Une bonne corrélation est présente dans les sites de la réserve de Lucciolabella et dans le fond de la vallée Formone. Ici, à une augmentation des précipitations correspond une augmentation de l'activité érosive et vice versa (Fig. 3).

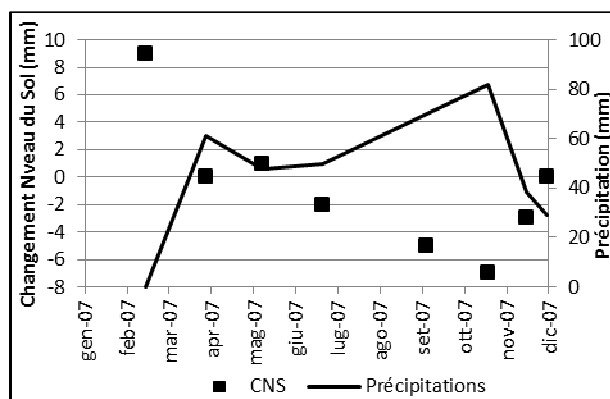


Figure 3 : Exemple de corrélation entre érosion et précipitation dans un des sites de la vallée Formone (coefficient de corrélation -0,88).

L'analyse numérique photogrammétrique a confirmé que les taux d'érosion élevés sont un problème environnemental persistant pour la vallée d'Orcia, pas encore résolu malgré les diverses mesures prises de conservation des terres. Les résultats obtenus montrent un taux total moyen d'érosion de 1,2 cm/an dans la période 1976-2003 ; le taux est plus élevé pour la période 1976-1994 (en moyen 2,6 cm/an) que pour la période 1994-2003 (1,1 cm/an). Dans les zones à calanques, les processus érosifs ont été plus intenses (en moyen 6,2 cm/an, période 1976-2003), surtout à cause d'une augmentation de la fréquence des glissements de terrain. En règle générale, au cours des 60 dernières années, la légère diminution du taux d'érosion hydrique est liée à une réduction de terres nues et, en conséquence, de l'efficacité de l'érosion, bien que les glissements de terrain y soient plus fréquents. Ces tendances sont probablement liées aux changements d'occupation du sol puisque pendant les dernières décennies les surfaces forestières et buissonnées ont grandi ainsi comme les exploitations agricoles ont augmenté sur les pentes (Aucelli *et al.*, 2014).

Conclusion

Le taux d'érosion obtenu avec les deux techniques montre une tendance similaire même si une légère diminution dans les phénomènes érosifs est présente (érosion annuelle moyenne 1-2,6 cm/an). La différence dans les résultats relatifs aux calanques et « biancane » est due aux différents processus qui se produisent. Pendant que sur les « biancane » les effets érosifs du ruissellement sont plus marqués, sur les calanques les glissements de terrain produisent la plus grande perte de sol. Cela est clairement mis en évidence avec l'analyse photogrammétrique même si elle a une résolution spatiale et temporelle inférieure, tandis que les piquets sont très utiles pour mesurer la différence entre les taux d'érosion hydrique mais ils sont emportés par les éboulements. L'utilisation des deux méthodes complémentaire est donc conseillée.

Même si la tendance relative aux précipitations est en augmentation et ainsi que la quantité de pluies intenses (facteurs induisant une augmentation des glissements de terrain), leur potentiel érosif est très variable selon les sites et leur utilisation du sol. Donc on peut affirmer que le climat n'est pas le seul responsable de l'accélération de l'érosion, mais de nombreux autres facteurs interagissent de manière non linéaire. Les résultats illustrés ci-dessous seront approfondi afin d'explicitier plus complètement les relations entre précipitations et phénomènes érosifs sur les *badlands* de l'Italie centrale.

Remerciements

Cette recherche a été financée par le projet italien MIUR (PRIN 2010-11) : « Réponse de la dynamique des systèmes morphoclimatiques aux changements globaux et les risques géomorphologiques connexes » (coordinateur national C. Baroni).

Références bibliographiques

- Acocella V., Rossetti F., 2002 : The role of extensional tectonics at different crustal levels on granite ascent and emplacement: an example from Tuscany (Italy). *Tectonophysics*, **354**, 71-83.
- Arnoldus H.M.J., 1980 : An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In : De Boodt M., Gabriels D. (eds.), *Assessment of erosion*. John Wiley and Sons, 127-132 p.
- Aucelli P.P.C., Conforti M., Della Seta M., Del Monte M., D'uva L., Roszkopf C.M., Vergari F., 2014 : Multi-temporal digital photogrammetric analysis for quantitative assessment of soil erosion rates in the Landola catchment of the Upper Orcia Valley (Tuscany, Italy). *Land Development & Degradation*, published on line. DOI: 10.1002/ldr.2324
- Buccolini M., Gentili B., Materazzi M., Piacentini T., 2010 : Late Quaternary geomorphological evolution and erosion rates in the clayey peri-Adriatic belt (central Italy). *Geomorphology*, **116**, 145-161.
- Caussinus H., Mestre O., 2004 : Detection and correction of artificial shifts in climate series. *Applied Statistics*, **53**, part 3, 405-425.
- Del Monte M., 2003 : Caratteristiche morfometriche e morfodinamiche dell'alto bacino del Fiume Orcia (Toscana Meridionale). *Atti XXVIII Cong. Geogr. It., Roma, Italie, 1933-1975 p.*
- Della Seta M., Del Monte M., Fredi P., Lupia Palmieri E., 2009 : Space-time variability of denudation rates at the catchment and hillslope scales on the Tyrrhenian side of Central Italy. *Geomorphology*, **107**, 161-177.
- EEA, 1994 : *CORINE Soil erosion risk and important land resources - in the southern regions of the European Community*. <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-soil>
- Fournier F., 1960 : *Climat et érosion*. Presses Universitaires de France, 201 p.
- Pinna M. et Vittorini S., 1985 : Contributo alla determinazione dei regimi pluviometrici in Italia. In : Pinna M. (ed.), *Contributi di Climatologia. Mem. Soc. Geogr. Ital.*, **39**, 147-167 p.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesis G.A., McCool D.K., Yoder D.C., 1997 : *Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agric. Handbook 703. US Govt Print Office, Washington, DC, 404 p.
- Sneyers R., 1990 : *On statistical analysis of series of observations*. Technical note N° 143, World Meteorological Organization, 192 p.
- Venema V.K.C., Mestre O., Aguilar E., Auer I., Guijarro J.A., Domonkos P., Vertacnik G., Szentimrey T., Stèpànek P., Zahradnicek P., Viarre J., Müller-Westermeier G., Lakatos M., Williams C.N., Menne M.J., Lindau R., Rasol D., Rustemeier E., Kolokythas K., Marinova T., Andresen L., Acquotta F., Fratianni S., Cheval S., Klancar M., Brunetti M., Gruber C., Prohom Duran M., Likso T., Esteban P., Brandsma T., 2012 : Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Clim. Past.*, **8**, 89-115.
- Vergari F., Della Seta M., Del Monte M., Barbieri M., 2013b : Badlands denudation "hot spots": the role of parent material properties on geomorphic processes in 20-years monitored sites of Southern Tuscany (Italy). *Catena*, **106**, 31-41.
- Vergari F., Della Seta M., Del Monte M., Fredi P., Lupia Palmieri E., 2013a : Long- and short-term evolution of several Mediterranean denudation hot spots: The role of rainfall variations and human impact. *Geomorphology*, **183**, 14-27.
- Zhang X., Yang F., 2007 : *RclimDex (1.0). User manual*. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario, Canada, 23 p.