

UNIVERSITÉ DE LIÈGE - UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

# Numerical modelling of the climate control on hillslope erosion

Model development and application to the Last  
Glacial-Interglacial Cycle in NW Europe

Thèse réalisée par

**BENOÎT BOVY**

sous la direction de

ALAIN DEMOULIN (Université de Liège, UGPQ)

et

JEAN BRAUN (Université de Grenoble, ISTerre)

pour l'obtention du titre de

*Docteur en sciences de l'Université de Liège*

et

*Docteur de l'Université de Grenoble*

(spécialité : Terre, Univers, Environnement)

Jury composé de :

M. Niels HOVIUS (Lecturer, University of Cambridge, Rapporteur),

M. Arjun HEIMSATH (Associate Professor, Arizona State University, Rapporteur),

M. Louis FRANÇOIS (Chargé de cours, Université de Liège, Président),

M. Stéphane BONNET (Professeur, Université de Toulouse 3, Examineur),

M. Yves CORNET (Chargé de cours, Université de Liège, Examineur),

M. Jean BRAUN (Professeur, Université de Grenoble, Co-directeur de thèse),

M. Alain DEMOULIN (Maître de recherches FNRS, Université de Liège, Co-directeur de thèse)



## Résumé

### **Modélisation numérique du contrôle climatique sur l'érosion des versants. Développement d'un nouveau modèle et application au dernier cycle glaciaire-interglaciaire dans le Nord-Ouest de l'Europe.**

L'évolution des versants est le résultat de l'action combinée des processus d'altération et de transport sédimentaire. Même si il est généralement admis que l'efficacité de ces processus varie en fonction du climat, la quantification de l'influence climatique sur l'érosion des versants reste encore peu développée aujourd'hui. S'inscrivant dans cette problématique, notre étude est consacrée au développement d'un nouveau modèle numérique d'érosion des versants, ayant pour objectif de mieux représenter, à différentes échelles de temps, les multiples aspects du contrôle climatique sur les processus de transport de sol. Ce modèle numérique permet de simuler l'évolution de l'épaisseur de sol et du relief à l'échelle d'un versant; il repose sur une paramétrisation simple de la production de sol couplée à une paramétrisation multi-processus du transport de sol, qui comprend plusieurs variables en étroite relation avec le climat (débit de ruissellement, épaisseur de couche active). Le calcul de ces variables est réalisé sur base de séries temporelles de précipitation et de température avec l'aide d'un modèle de transfert de chaleur et d'un modèle de bilan hydrologique. Le comportement du modèle a été étudié au travers de quelques exemples génériques et d'analyses de sensibilité. Les résultats obtenus montrent des différences significatives dans la façon dont se comporte chaque processus de transport sous conditions climatiques variables, et également dans la manière dont chaque processus affecte l'érosion globale des versants. Ces résultats mettent ainsi en lumière l'importance de la paramétrisation multi-processus du transport de sol dans la modélisation de la réponse des versants aux changements climatiques. Nous avons également développé une méthode associant le modèle d'érosion de versant à un algorithme d'inversion (Neighbourhood Algorithm). Cette méthode a permis de caractériser de manière quantitative l'évolution des versants ardennais (NE Belgique) lors du dernier cycle glaciaire-interglaciaire, sur base d'un scénario climatique simple et de nombreuses données topographiques et d'épaisseurs de sol. Les résultats de l'inversion produisent des prédictions en accord avec certaines observations sur la morphologie des versants ardennais ainsi qu'avec des taux d'érosion estimés indépendamment sur base de concentrations en isotopes cosmogéniques, même si on montre que la distribution actuelle des épaisseurs de sol ne renferme pas assez d'information pour déterminer entièrement les taux de production et de transport de sol lors des périodes froides et tempérées du dernier cycle climatique. Les résultats de l'inversion suggèrent des taux de transport de sol bien plus élevés lors de la période froide que lors de la période tempérée, produisant une succession de systèmes limités par la production de sol d'une part (période froide), et par le transport de sol d'autre part (période tempérée). Un pic de transport de sol est prédit lors des transitions entre ces périodes. Les résultats laissent également suggérer qu'un équilibre dynamique en terme d'épaisseur de sol a été récemment atteint dans les parties convexes des versants, alors que des sols peu épais observés dans les parties concaves pourraient correspondre à des traces de la distribution des épaisseurs de sol qui prévalait lors de la dernière glaciation.

## Abstract

Hillslope evolution results from the combined action of weathering and sediment transport processes, which are thought to be both influenced by climate. Yet, the strength and nature of the connection between climate and hillslope erosion remain poorly understood at a quantitative level. In this study, we present a new numerical model of soil production and transport, which aims to better represent, at different time scales, the climate control on soil transport. The numerical model operates at the scale of a single hill and predicts the rates of soil thickness and elevation change, by using a simple parametrization of soil production and a multi-process parametrization of soil transport which includes climate-dependent variables (overland flow discharge and active-layer depth). Simple ground heat transfer and water balance models are used for calculating these variables from time-series of precipitation and temperature. The behaviour of the model has been studied through a few simulation examples and sensitivity analysis. The results highlight the importance of considering multi-process parameterization of soil transport when modelling the response of the hillslope system to climate variations, as these results display significant differences on how each transport process behaves under various climatic conditions and on how each process affect the evolution of the system. Our numerical model has also been combined with an inversion scheme (Neighbourhood Algorithm) to extract quantitative information on the evolution of hillslopes in the Ardenne (Belgium, NW Europe) during the Last Glacial-Interglacial Cycle, using a simple climatic scenario and a unique set of topographic and soil thickness data. Model predictions based on inversion results are consistent with independent observations on hillslope morphology and cosmogenic nuclide-derived erosion rates, although the inversion results show that soil production and transport rates under both the cold and warm phases of the last climatic cycle cannot be fully constrained by the present-day soil thickness distribution. The inversion results suggest that soil transport is by far more efficient during the cold climatic phase than during the warm phase, resulting in the succession of weathering-limited (cold phase) and transport-limited (warm phase) systems. Maximum soil transport rates are predicted during the transitions between the cold-warm phases. The results also suggest that a soil thickness dynamic equilibrium has been recently reached on convex regions of the hillslopes, while shallow soils found in convergent areas may be the relics of the soil thickness distribution that formed during the cold phase.

# Contents

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 The CLimate Control on Hillslope Erosion (CLICHE) model: Description and basic applications</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction . . . . .	6
1.2 Background . . . . .	6
1.2.1 Surface processes models . . . . .	6
1.2.2 Soil production functions . . . . .	7
1.2.3 Modelling soil transport and hillslope erosion . . . . .	8
1.3 CLICHE model overview and main assumptions . . . . .	10
1.3.1 Continuity of mass: soil thickness and elevation change . . . . .	11
1.4 Parameterization of soil production and transport . . . . .	12
1.4.1 Soil production function . . . . .	12
1.4.2 Soil transport laws . . . . .	12
1.5 Spatial framework . . . . .	15
1.5.1 Irregular mesh: Delaunay triangulation and Voronoi diagram . . . . .	15
1.5.2 Application of the finite-volume approach . . . . .	17
1.6 Temporal framework . . . . .	18
1.7 Adjustment of the soil transport fluxes . . . . .	19
1.8 Soil temperature profiles and ‘active layer’ depth . . . . .	21
1.9 Modelling hillslope hydrology . . . . .	24
1.9.1 Stochastic generation of precipitation . . . . .	24
1.9.2 Runoff generation (using a lumped hydrological ‘bucket’ model) . . . . .	25
1.9.3 Flow routing and overland flow discharge . . . . .	28
1.10 Implementing and testing the numerical model . . . . .	30

1.10.1	A simple diffusion problem . . . . .	32
1.10.2	Efficiency of solifluction . . . . .	34
1.10.3	Testing the influence of the cycle elongation factor . . . . .	36
1.11	A brief discussion on CLICHE’s potential applications and limitations . . . . .	39
1.12	Concluding remarks . . . . .	41
1.13	Symbols . . . . .	42
<b>2</b>	<b>A CLICHE generic application: Climate, steady-state and hillslope response time</b>	<b>45</b>
2.1	Introduction . . . . .	46
2.2	Model setup . . . . .	47
2.3	Transient behaviour and steady-state . . . . .	50
2.4	Hillslope response time as a function of hill geometry and transport coefficients .	53
2.5	Hillslope response time to climatic variations . . . . .	55
2.6	Discussion and concluding remarks . . . . .	59
<b>3</b>	<b>Soil production and transport in mid-latitudes during the last glacial-interglacial cycle: A combined data and modelling approach</b>	<b>61</b>
3.1	Introduction . . . . .	62
3.2	Study area and observational constraints . . . . .	63
3.2.1	Surface derivatives vs. soil thickness in the Ardenne Massif . . . . .	65
3.3	Simulation of soil production and soil transport on a synthetic hill using the CLICHE model . . . . .	69
3.3.1	A simplified scenario of climate in NW Europe for the last glacial-interglacial cycle . . . . .	70
3.3.2	Calibrating hydrological and thermal parameters . . . . .	73
3.3.3	Setting the shape of the synthetic hill . . . . .	74
3.4	Model inversion: comparison between observations and simulation outputs . . . .	75
3.4.1	Simulated surface derivatives vs. soil thickness . . . . .	78
3.4.2	Application of the Kolmogorov-Smirnov statistic . . . . .	79
3.4.3	Dealing with observational errors . . . . .	79
3.4.4	The misfit function . . . . .	84
3.5	Inversion results . . . . .	85
3.6	Discussion . . . . .	93
3.6.1	Transport-limited vs. weathering-limited landscape, and weathering mechanisms . . . . .	93

## CONTENTS

3.6.2	Inherited soil thickness distribution, inherited hillslope morphology and the landscape equilibrium . . . . .	97
3.6.3	Efficiency and spatial segregation of soil transport processes . . . . .	101
3.6.4	Climate control on denudation rates and sediment supply . . . . .	101
3.6.5	Scale dependence and influence of the physics of soil production and transport processes on the data fit . . . . .	103
3.7	Conclusions and perspectives . . . . .	104
3.8	Supplement: simulation results for models S2, S3 and S4 . . . . .	106
	<b>Conclusion</b>	<b>115</b>
	<b>References</b>	<b>119</b>