

Document public

# **Modélisation de l'évolution du paysage - état de l'art**

Rapport final

**BRGM/RP-52410-FR**  
juin 2003

# **Modélisation de l'évolution du paysage - état de l'art**

Rapport final

**BRGM/RP-52410-FR**  
juin 2003

Étude réalisée dans le cadre du projet de  
recherche RISR11-RISK NAT

**B. Poisson**

Mots clés : Géomorphologie, Processus de surface, Érosion, Contrôle climatique et tectonique, Modélisation numérique, Dynamique du paysage, État de l'art.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Poisson B. (2003) - Modélisation de l'évolution du paysage - état de l'art. BRGM/RP-52410-FR, 76 p., 15 fig., 1 ann.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

**D**ans le cadre du projet de recherche « Risque naturel transverse » (RISR11-RISK NAT), ce rapport présente un état de l'art en matière de modélisation de la dynamique géomorphologique.

De nombreux modèles d'évolution du paysage ont en effet été développés depuis une dizaine d'années. La question principale qui motive cet essor est l'aspiration à comprendre quels processus façonnent les formes du paysage, à quelle vitesse et avec quelle ampleur. On cherche à établir des simulations plausibles du comportement géomorphologique, afin de tester l'influence de contraintes externes (tectonique, climat) ou internes (modifications des processus, des paramètres internes au système) sur la dynamique du paysage.

Ce rapport fait le point sur :

- la définition des processus de surface en cause dans l'évolution géomorphologique (mécanismes d'érosion et de transport), et leur formalisation ;
- l'implémentation des équations décrivant ces processus dans des modèles d'évolution géomorphologique de systèmes d'échelle spatio-temporelle moyenne, soit  $10^0$ – $10^5$  années sur  $10^0$ – $10^3$  km<sup>2</sup>;
- les principaux programmes et projets de recherche en cours traitant de l'érosion de manière plus ou moins explicite, en particulier les tentatives de modélisation.

La formalisation des processus de surface se base sur des études menées pour la plupart depuis plusieurs dizaines d'années. Peu d'équations reposent sur des fondements analytiques clairs, la plupart découlant au contraire de l'observation quantifiée de systèmes naturels ou expérimentaux. Les hypothèses d'utilisation de ces lois empiriques ne sont pas toujours bien définies, et leur intégration dans les modèles d'évolution géomorphologique suppose souvent un transfert d'échelle (de temps et/ou d'espace) non vérifiés. L'acquisition et l'analyse de données de terrain ou de laboratoire sont des moyens essentiels de calibrer les équations décrivant les processus et de valider les modèles élaborés. Le problème délicat de la quantification du paysage ne doit donc pas être négligé en complément de la modélisation proprement dite.

La revue des actions actuelles menées sur le plan international quant à la modélisation de l'évolution du paysage met en évidence une lacune certaine de ce domaine de recherche au niveau européen. Les projets en rapport avec l'érosion existent, mais leurs objectifs sont généralement appliqués (ingénierie hydraulique et agricole) et concernent le très court terme (prévention des « catastrophes naturelles » : crues, inondations, mouvements de terrain... à l'échelle humaine). Les modèles de plus grande échelle sont plutôt élaborés aux Etats-Unis, en Australie et en Grande-Bretagne, où cette recherche vise plus ouvertement la compréhension des mécanismes de l'évolution géomorphologique, sans pour autant négliger les applications directes comme l'étude de l'impact des changements climatiques sur l'environnement.

En France, la géomorphologie quantitative est surtout représentée par le laboratoire Géosciences Rennes, sous des aspects de modélisation (numérique et analogique) et d'analyse de systèmes naturels. Cette équipe s'intéresse essentiellement aux mécanismes élémentaires de l'érosion et à la dynamique des systèmes, inscrivant ainsi ses travaux sous le signe de la recherche fondamentale (programmes INSU).

Le BRGM s'intéresse encore peu à la modélisation géomorphologique, qui est pour l'instant essentiellement abordée comme outil d'étude de la tectonique active. Cette thématique gagnerait certainement à être développée dans un dessein plus vaste, notamment dans le cadre général de ce sujet très en vogue qu'est l'étude de l'impact des changements climatiques.

# Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	9
<b>2. Modélisation</b> .....	11
2.1. Processus érosifs .....	11
2.1.1. Définition et aspects qualitatifs de l'érosion.....	11
2.1.2. L'érosion des versants.....	14
2.1.3. L'érosion fluviale.....	17
2.2. Formalisation .....	18
2.2.1. Principaux paramètres.....	18
2.2.2. Lois géomorphologiques .....	19
2.2.3. Limitations dans la formalisation des processus .....	28
2.3. Réflexions : qu'est-ce qu'un « bon » modèle ?.....	30
2.3.1. Rigueur .....	30
2.3.2. Validation.....	30
2.3.3. Complexité.....	31
2.3.4. Limitations dans la modélisation.....	32
2.4. Modèles existants .....	33
2.4.1. Différences .....	34
2.4.2. Modèles d'évolution géomorphologique .....	35
2.4.3. Notes sur les modèles appliqués d'érosion de petite échelle.....	45
2.5. Conclusion sur la modélisation .....	45
<b>3. Données</b> .....	47
3.1. Topographie.....	47
3.2. Géochronologie .....	48
3.3. Autres grandeurs géomorphologiques.....	49
3.3.1. Flux.....	49
3.3.2. Bases de données.....	52
<b>4. Projets récents et organismes impliqués</b> .....	53
4.1. Sur le plan national .....	53

4.1.1. Programmes nationaux .....	53
4.1.2. Organismes nationaux.....	55
4.1.3. Projets nationaux.....	57
4.2. Sur le plan européen .....	58
4.3. Sur le plan international .....	59
4.3.1. Programmes internationaux .....	59
4.3.2. Organismes étrangers .....	60
<b>5. Conclusions et perspectives .....</b>	<b>63</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>65</b>

## Liste des illustrations

Fig. 1 - Diagramme de Hjulström : critère d'entraînement du sédiment en fonction de la taille des grains et de la vitesse d'écoulement. ....	13
Fig. 2 - Exemple de versants développés le long d'une faille (Mongolie).....	14
Fig. 3 - Exemple de glissement de terrain de type coulée de débris (La Conchita, Californie, 1995 - photo du National Geophysical Data Center 0).....	16
Fig. 4 - Exemple d'éboulis rocheux (Castle Valley, Utah, 1986 - photo de la « Castle Rock Collaboration »).....	17
Fig. 5 - Exemples de : (A) rivière alluviale (Mongolie) ; (B) rivière à lit rocheux (Utah, photo de T. Dewez). ....	17
Fig. 6 - Diagramme de Shields : critère d'entraînement du sédiment en fonction du nombre de Reynolds et du paramètre de Shields $\theta$ . ....	26
Fig. 7 - Relations entre les échelles de temps et d'espace des études de terrain (boîtes grisées) et des interprétations géomorphologiques (d'après Kirkby, 1996). ....	33
Fig. 8 - Exemple de paysage simulé par le modèle SIBERIA de G. Willgoose (1991). ....	36
Fig. 9 - Exemple de paysage simulé par le modèle de A. Howard (1994) ; les limites latérales sont périodiques, c'est-à-dire que la topographie est continue de gauche à droite de la grille.....	37
Fig. 10 - Exemple de paysage simulé par le modèle GOLEM de G. Tucker, en tenant compte des glissements de terrain suivant le critère de pression de pore de Montgomery et Dietrich (1994). Une pression de pore élevée autour des points de convergence des écoulements entraîne la formation de creux par glissements de terrain. ....	38
Fig. 11 - Simulation du développement de la vallée et du lit majeur d'une rivière par le modèle CHILD, illustrant l'intérêt du maillage à résolution variable (Tucker <i>et al.</i> , 2001). ....	38
Fig. 12 - Vue d'ensemble du modèle CHILD (Tucker <i>et al.</i> , 2001). ....	39

Fig. 13 - Exemple de paysage simulé par le modèle CHILD, dans des conditions de soulèvement tectonique stationnaire et de tempêtes de durée et d'intensité variables. ....	40
Fig. 14 - Exemple de dynamique du réseau hydrographique simulée par le modèle CAESAR de T. Coulthard, pour un contexte existant en Angleterre ; en jaune la rivière d'origine, en bleu la nouvelle après un siècle d'évolution. ...	42
Fig. 15 - Exemple de retrait d'escarpement à long terme (plusieurs Ma) simulé par le modèle CASCADE de J. Braun. ....	43
Ann. 1 - Liste des sites internet.....	71



# 1. Introduction

L'évolution dynamique du paysage se trouve plus que jamais au centre de l'actualité. Les caprices du climat vont en effet jusqu'à perturber brutalement les paysages de pays dits tempérés comme la France, d'ordinaire plutôt calme. Des questions essentielles émergent quant à l'avenir proche de notre environnement :

- **de la réponse aux contraintes externes** : quelle est la sensibilité du paysage aux événements climatiques ? en particulier, comment réagissent les rivières aux changements du climat ? peut-on prévoir la dynamique des crues, et par là même ces inondations qui causent tant de dégâts ? peut-on évaluer les risques de glissements de terrain, en fonction de scénarii climatiques possibles ?
- **de la dynamique** : à quelle vitesse réagit le paysage ? quelle est l'importance des effets de seuil dans son évolution ? quelles sont les parts respectives des influences à long terme et à court terme auxquelles il est soumis ? la topographie peut-elle atteindre un état d'équilibre, et à quelles conditions ?
- **de la physique** : quels sont les processus dominant l'évolution du paysage ? peut-on mesurer et décrire cette évolution à l'aide de quelques paramètres-clefs, ou le système doit-il impérativement être considéré dans toute sa complexité ?
- **des quantités** : quelle est l'ampleur des phénomènes géomorphologiques ? en d'autres termes, quelles sont les quantités et les flux de matière en jeu dans l'évolution du paysage ?

La modélisation quantitative de l'évolution du paysage s'inscrit donc parfaitement dans le cadre de l'étude des risques naturels, comme un moyen parmi d'autres de tenter de répondre à ces interrogations.

L'élaboration de modèles géomorphologiques numériques connaît un essor particulièrement important depuis les années 1990 du fait du développement considérable des moyens de calculs. Ceux-ci permettent désormais d'aborder le paysage dans ses trois dimensions, et plus seulement en coupe ou par l'intermédiaire de profils topographiques.

La modélisation du fonctionnement d'un bassin versant est un sujet touchant à plusieurs domaines de sciences de la Terre, car elle présente des applications non seulement en géomorphologie, mais aussi en hydrologie ou dans d'autres secteurs de la géologie (étude de l'exhumation, de la stratigraphie, de la tectonique, etc).

Le thème de l'érosion apparaît ainsi fréquemment dans des programmes et projets de recherche en hydrologie, étroitement lié aux problèmes de ruissellement et de gestion des ressources en eau. C'est également un sujet aux nombreuses applications « agricoles », dans la mesure où l'évolution à court terme du paysage actuel interagit fortement avec les pratiques anthropiques, notamment l'agriculture. On aimerait prévoir l'impact morphologique du climat sur la culture des terres, et réciproquement, l'influence de l'aménagement du territoire sur l'évolution du paysage (exemple du projet européen FLOODGEN, coordonné par le BRGM).

Ce rapport laisse volontairement de côté ces aspects, dont il sera seulement fait mention. On s'intéresse au contraire plus particulièrement aux « modèles d'évolution du paysage » (ainsi couramment dénommés dans la littérature anglo-saxonne, « *Landscape Evolution Models* »), dont l'objectif est d'étudier les interactions entre un paysage standard (sans spécification anthropique notable) et les agents qui le façonnent, principalement le climat, et accessoirement la tectonique. L'échelle temporelle visée va de quelques années à quelques centaines de milliers d'années, tandis que l'échelle spatiale va de quelques km<sup>2</sup> à quelques milliers de km<sup>2</sup>. Typiquement, on cherche à simuler l'évolution d'un bassin versant sur des échelles de temps de l'ordre du quaternaire qui est une période riche en données (exemple du modèle APERO, développé par F. Lucazeau de l'IPGP et S. Carretier du BRGM).

La première partie de ce document se focalise sur la description et la formalisation des processus de surface, puis leur intégration dans les modèles d'évolution du paysage existants. La seconde partie aborde rapidement le problème des données nécessaires à la calibration et à la validation de ces modèles. Enfin, la troisième partie présente une liste non-exhaustive des actions scientifiques en cours sur le sujet de l'érosion, sur le plan national, européen et international.

## 2. Modélisation

La modélisation numérique de l'évolution d'un paysage comporte les étapes suivantes :

- définir et décrire aussi précisément que possible les processus qui participent à cette évolution ;
- formaliser ces processus en les exprimant sous forme d'équations mathématiques ;
- combiner ces équations en un modèle global d'évolution que l'on paramètre à partir de données existantes ;
- tester les résultats du modèle pour éprouver ses performances et ses limites, en le confrontant aux données, de terrain ou expérimentales.

### 2.1. PROCESSUS ÉROSIFS

#### 2.1.1. Définition et aspects qualitatifs de l'érosion

Selon le Trésor de la Langue Française (dictionnaire des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles), la définition générale de l'érosion est la suivante : « Action d'un agent, d'une substance qui ronge, use progressivement; résultat de cette action. » En géologie, le terme désigne plus précisément l'« altération de l'écorce terrestre par les agents atmosphériques, hydrologiques, ou par l'action de l'homme. ». En pratique, la signification du mot est souvent étendue jusqu'à recouvrir l'ensemble des phénomènes qui façonnent les formes du relief terrestre.

Nous nous limitons ici à la considération des processus impliquant l'unique agent d'érosion qu'est l'eau liquide, avec seulement une brève mention de l'érosion glaciaire. L'érosion éolienne, si elle n'est pas abordée, n'en constitue pas moins un sujet entier, qui exigerait d'être traité à part.

En réalité, le façonnement du relief comporte généralement plusieurs phases : le détachement, l'entraînement et le transport – suivis à plus ou moins longue échéance du dépôt de la matière érodée.

#### *a) Détachement*

L'érosion commence avec le détachement d'une particule de son environnement. Pour que cette ablation se produise, il est parfois nécessaire de briser les liens plus ou moins solides qui soudent les particules entre elles. Des liens très solides existent par exemple entre les particules constituant une roche ignée, générés par la croissance des minéraux survenue lors du refroidissement de la roche (liens cristallins). Dans les roches sédimentaires, les liens sont moins solides et résultent de l'effet de cimentation par précipitation de composés tels des oxydes de silice, de calcium ou de fer, dans les espaces intergranulaires. Dans les sols, les effets de cohésion de l'eau et les liaisons électro-chimiques existant dans les argiles et la matière organique engendrent des liens relativement fragiles. L'altération physique, chimique ou biologique des roches ou du sol affaiblit ces liens entre particules et rend la matière altérée plus sensible aux

forces de détachement. Celles-ci s'exercent par les mécanismes suivants (liste non exhaustive) :

- l'**abrasion** se produit par frottement des matériaux transportés par l'agent érosif (eau, glace, vent...); ce mécanisme est dominant lorsque la surface rocheuse affleurante est plutôt lisse ;
- l'**arrachement mécanique** (*plucking*) intervient par impact des cailloux anguleux contenus dans la charge de fond transportée par une rivière ou par un glacier ; ce mécanisme est d'autant plus important que la surface rocheuse affleurante comporte des fractures ou des joints de stratification apparents. Le terme *plucking* se limite parfois au contexte glaciaire (où il est parfois désigné sous le terme *quarrying*) dans lequel il désigne l'arrachement par l'eau qui gèle dans les interstices de la roche (fractures et joints) ;
- l'**impact des gouttes** sur le sol (*rainsplash erosion*) suffit à rompre certains liens peu solides entre les particules ;
- la **cavitation** est due à l'implosion de bulles d'air dans des rapides ou des chutes d'eau ; lors de l'implosion, un micro-jet d'eau très rapide vient exercer une très forte pression sur une petite surface, ce qui conduit éventuellement au détachement des particules percutées. Ce mécanisme est suspecté de ne pas être exclusivement réservé aux rapides et aux chutes d'eau, mais de s'appliquer aussi dans tous les contextes d'écoulements turbulents, où il interviendrait particulièrement dans les figures de courant (cannelures, trous d'érosion) ;
- l'**érosion chimique** consiste essentiellement en la dissolution de la matière par l'eau (les autres processus chimiques participent en général de l'altération, mais pas de l'érosion proprement dite) ; elle est souvent considérée comme secondaire dans les zones où le réseau hydrographique est suffisamment développé mais peut être favorisée dans certaines conditions particulières, par exemple en régime climatique chaud et humide, ainsi que par le développement de la végétation ;
- l'**érosion glaciaire** procède en réalité de plusieurs processus déjà cités : altération chimique, érosion fluviale sub-glaciaire, abrasion par l'entraînement de matériel rocheux et détachement mécanique du substratum ; on parle en outre d'érosion « thermique » à propos de l'érosion accélérée qui survient l'été en domaine périglaciaire lors de la débâcle causée par la fonte des neiges et des glaces.

### ***b) Entraînement***

Une fois détachées de la surface, les particules sont entraînées par la force de traînée du fluide (liée à sa vitesse et à sa masse). Il est cependant souvent difficile de faire la différence entre détachement et entraînement. La poussée du fluide sur la particule doit dépasser la résistance au frottement et les liens de cohésion avec l'environnement pour entraîner la particule horizontalement. La turbulence crée en même temps une aspiration vers le haut. Une fois que la particule est soulevée, elle ne résiste plus au transport que par la gravité.

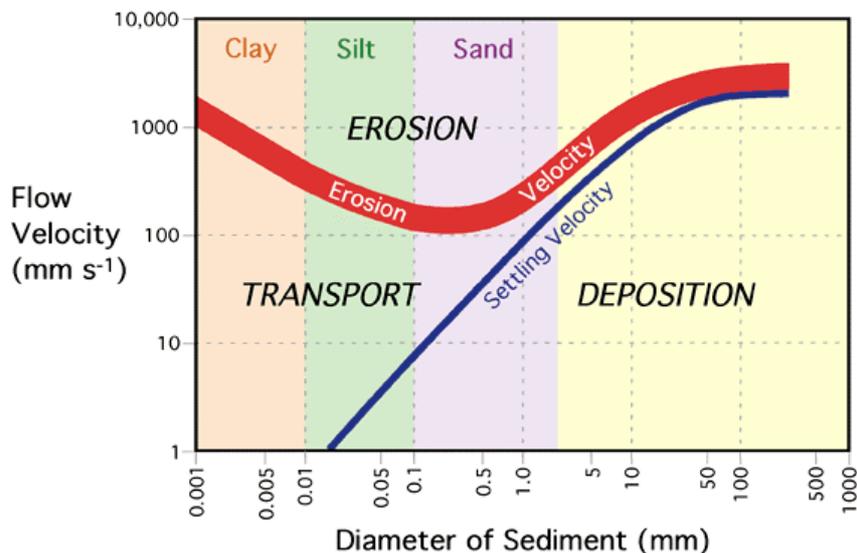
### **Existence d'un seuil**

Il est communément admis qu'une vitesse minimale du fluide est nécessaire à l'entraînement des particules. Le diagramme de Hjulström est un vieux critère d'entraînement des sédiments par l'eau en fonction de leur taille de grain et de la vitesse du courant (fig. 1).

Cette courbe, qui synthétise un ensemble de données expérimentales, est discutable mais illustre bien la notion de seuil d'entraînement. Elle met en évidence plusieurs points importants :

- une plus grande vitesse est nécessaire à l'entraînement qu'au transport ;
- seules les petites particules peuvent être transportées sur de longues distances sans être déposées ;
- les particules les plus faciles à entraîner sont celles de taille moyenne (les gros sont plus lourds, et les petits ont tendance à s'agréger entre eux).

La théorie de Shields, sur laquelle nous reviendrons (§ 2.2.2.i, p. 25) établit un critère d'entraînement en fonction des forces s'appliquant au sédiment. L'érosion ne dépend plus d'une *vitesse critique* comme avec Hjulström, mais d'une *contrainte critique*.



**Fig. 1 - Diagramme de Hjulström : critère d'entraînement du sédiment en fonction de la taille des grains et de la vitesse d'écoulement.**

### c) Transport

Une fois mises en mouvement, les particules sont transportées par l'agent érosif d'une des manières suivantes :

- par **saltation** : les particules bougent rapidement entre la surface d'érosion et le milieu de transport en cycles continûment répétés (eau, air ou glace) ;
- par **traction** : les particules roulent ou glissent le long de la surface d'érosion ;
- par **suspension** : les particules sont transportées par le milieu sans toucher la surface d'érosion ;
- par **solution** : en milieu aqueux, la matière peut être transportée dissoute, sous la forme d'ions.

## 2.1.2. L'érosion des versants

### a) Définition des versants

La définition du terme « versant » (*hillslope*) n'est pas parfaitement claire, du moins pas assez pour que tout le monde soit certain de désigner le même objet sous ce nom.

Les versants se définissent surtout par opposition aux rivières (fig. 2), organisées en réseau hydrographique arborescent qui transporte les sédiments des zones d'érosion à l'exutoire (lac ou océan). Entre les rivières, les versants couvrent l'essentiel de la surface terrestre et contribuent également à l'essentiel de la production sédimentaire. Les limites entre versants et rivières sont nettes en dehors des têtes des rivières et correspondent aux berges des rivières. À la tête des rivières, la transition est bien moins franche et varie souvent spatialement en fonction du temps (principalement à cause des fluctuations du climat).

Certains auteurs compliquent ce point de vue en introduisant le schéma : versant (domaine dit « convexe », i.e. où les écoulements sont divergents, près des crêtes) / vallée (domaine dit « concave », i.e. où les écoulements sont convergents mais non chenalisés) / rivières (domaine où les écoulements sont chenalisés).



**Fig. 2 - Exemple de versants développés le long d'une faille (Mongolie).**

Le plus simple est encore de définir le versant par les processus érosifs qu'il subit, par opposition à ceux qui affectent les rivières. Dans les modèles d'évolution géomorphologique, le problème est simplifié et la distinction versant/rivière se fait suivant le critère de l'aire drainée : au-delà d'une certaine aire drainée seuil, on considère que les processus deviennent fluviaux et on se trouve alors en rivière (ainsi les points représentant la vallée se répartissent entre versant et rivières selon l'aire drainée locale).

### b) Processus de versants

Les processus d'érosion affectant les versants sont liés à la gravité (mouvements de terrain - *mass wasting*), ou aux écoulements d'eau qui profitent accessoirement de la gravité.

Les mouvements de terrain sont fréquemment induits :

- par la pluie, qui peut
  - augmenter le poids du matériel qui devient plus sensible à la gravité,
  - réduire les liens de cohésion entre les particules et donc la résistance interne du matériau,
  - par percolation, lubrifier un plan de litage du matériau qui devient alors un plan de glissement potentiel,
- par les séismes,
- avec une fréquence plus modeste, par des événements catastrophiques naturels comme les éruptions volcaniques, ou par des facteurs anthropiques.

Sur les versants, l'érosion par impact des gouttes de pluie (*rainsplash*) se traduit souvent par une redistribution des particules détachées par la pluie en aval du point d'impact (contrairement aux zones plates où les particules sont redistribuées tout autour) : au-delà d'une pente de 25°, presque toute la matière part dans la direction de plus grande pente.

Une grande partie des sédiments des versants est transportée par lessivage, ou ruissellement de surface (*overland flow* ou *rainwash*).

Souvent, une lame d'eau n'a pas grand pouvoir érosif, mais génère au contact des irrégularités topographiques des *rills* qui par coalescence forment de petites rivières et ainsi de suite.

### **Sédiments non consolidés**

De fortes pentes caractérisent souvent les formations de sédiments non consolidés telles que les cônes alluviaux, plaines d'épandages glaciaires ou dunes de sable. Dans ce cas, les mouvements de masse se produisent du fait d'instabilités localisées et s'organisent parfois en avalanches par effet « domino ».

### **Sédiments consolidés**

Au contraire, les versants constitués de matériaux consolidés sont sujets aux glissements rotationnels et aux coulées de boue (fig. 3).

Les glissements rotationnels (ou *slumps*) sont souvent induits par l'érosion de la base de la pente par une rivière (ou des vagues). Les coulées de boues se produisent lorsque le matériau est si saturé qu'il n'a plus aucune cohésion ; il s'écoule alors comme un fluide jusqu'à avoir perdu assez d'eau par infiltration pour redevenir cohérent.



**Fig. 3 - Exemple de glissement de terrain de type coulée de débris (La Conchita, Californie, 1995 - photo du National Geophysical Data Center [1]).**

Les versants sont également victimes de phénomènes d'érosion beaucoup plus lents, comme la reptation de sol (*soil creep*) et la solifluxion. Le sol peut ramper sous l'effet cyclique de la gravité et des fluctuations de température et d'humidité. La solifluxion intervient en contexte de permafrost et correspond au mouvement du sol sous l'action des cycles de gel-dégel.

### **Roches dures**

Les roches dures ont une résistance interne très grande consécutive à leur formation par refroidissement de magma (pour les roches magmatiques) ou par lithification (pour les roches sédimentaires). Les mouvements de masse qui affectent ces roches (*rockfall*, fig. 4) sont dus à des zones de faiblesse généralement localisées le long de joints de stratification ou de plans de fractures préexistants.

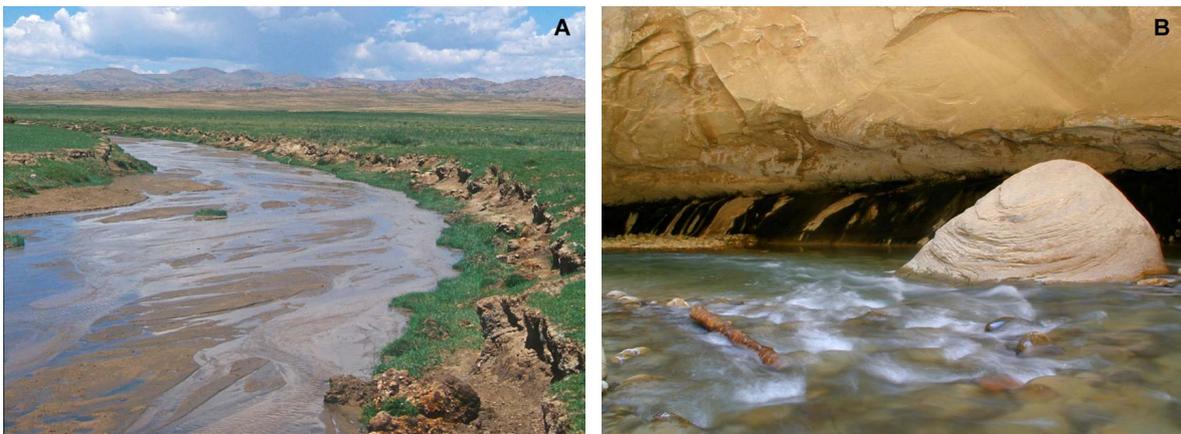


**Fig. 4 - Exemple d'éboulis rocheux (Castle Valley, Utah, 1986 – photo de la « Castle Rock Collaboration »).**

### 2.1.3. L'érosion fluviale

Les rivières exercent à la fois une action de détachement sur la surface de leur lit (rocheux ou alluvial) et une action de transport sur les sédiments érodés localement et provenant des versants.

On distingue communément les rivières alluviales (*alluvial rivers*) des rivières à lit rocheux (*bedrock rivers*), suivant la charge de fond (*bedload*) constituée des sédiments en mouvement au fond du lit de la rivière, par traction et saltation (fig. 5). Si l'épaisseur de cette charge est importante dans le cas des rivières alluviales, elle est au contraire réduite dans le cas des rivières à lit rocheux, laissant le substratum pratiquement à nu.



**Fig. 5 - Exemples de : (A) rivière alluviale (Mongolie) ; (B) rivière à lit rocheux (Utah, photo de T. Dewez).**

Plus précisément, la distinction est fonction du rapport entre capacité de transport et flux sédimentaire réel. Une rivière alluviale transporte autant de sédiments qu'elle peut en transporter, toute cette matière constituant la charge mobile de fond. Au contraire, une rivière à lit rocheux transporte beaucoup moins de sédiments qu'elle ne pourrait. Il existe également des rivières de type « mixte », particulièrement en contexte montagneux : ces rivières incisent un substratum résistant tout en transportant une charge sédimentaire importante, ce qui limite leur taux d'incision.

## 2.2. FORMALISATION

Parmi les nombreux modèles d'évolution géomorphologique existants, aucun ne présente d'approche purement mécanistique du problème de l'érosion. Les expressions utilisées pour modéliser les processus de surface sont pour la plupart phénoménologiques, mais apparaissent souvent suffisamment générales pour s'appliquer à d'autres contextes que celui dans lequel elles ont été élaborées. Les géomorphologues se réjouissent de découvrir des paramètres assez significatifs pour décrire leurs observations à l'aide de lois très simples, applicables aux données mesurables, naturelles ou expérimentales.

### 2.2.1. Principaux paramètres

Symbole	Définition	Dimension
A	aire drainée locale	$[L]^2$
D	diamètre caractéristique du grain de sédiment	[L]
h	hauteur d'eau (dans le lit d'une rivière)	[L]
I	taux d'incision (érosion verticale)	$[L].[T]^{-1}$
q	débit spécifique (i.e. par unité de largeur)	$[L]^2.[T]^{-1}$
q <sub>s</sub>	flux sédimentaire spécifique	$[L]^2.[T]^{-1}$
P	taux de production de sol	$[L].[T]^{-1}$
P <sup>ext</sup>	flux sédimentaire spécifique extérieur (cf. texte)	$[L]^2.[T]^{-1}$
S	pente locale (ou « gradient topographique »)	[1]
S <sub>c</sub>	pente critique (d'instabilité de pente)	[1]
u	vitesse d'écoulement	$[L].[T]^{-1}$
u*	vitesse de friction	
U	vitesse tectonique verticale	$[L].[T]^{-1}$
v <sub>s</sub>	vitesse de sédimentation	$[L].[T]^{-1}$
W	largeur de la rivière	[L]
z	altitude locale	[L]
φ	angle de friction interne	[1]
ω	puissance fluviale spécifique	$[M].[T]^{-3}$
ρ	masse volumique du fluide	$[M].[L]^{-3}$
ρ <sub>s</sub>	masse volumique du sédiment	$[M].[L]^{-3}$
τ	contrainte cisailante du fluide (en général sur le fond du lit de la rivière)	$[M].[L]^{-1}.[T]^{-2}$
τ <sub>c</sub>	contrainte cisailante critique	$[M].[L]^{-1}.[T]^{-2}$

## 2.2.2. Lois géomorphologiques

La revue qui suit se base sur la synthèse proposée récemment par Dietrich *et al.* (2003). Selon ces auteurs, la dénomination « lois géomorphologiques de transport » recouvre les expressions mathématiques :

- dérivées de principes ou mécanismes physiques,
- exprimant le flux de masse résultant d'un ou plusieurs processus,
- susceptibles d'être paramétrées par des mesures de terrain,
- valables sur des échelles de temps et d'espace significatives en géomorphologie.

Ce dernier point dépend bien sûr beaucoup du système que l'on cherche à modéliser. En ce qui concerne les modèles d'évolution géomorphologique sur lesquels se focalise ce rapport, les échelles spatiales et temporelles sont relatives à l'évolution d'un bassin de drainage. Ceci donne essentiellement une limite spatiale supérieure ( $6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  pour le bassin de l'Amazonie, le plus grand sur Terre), tout en laissant les autres limites à l'appréciation du modélisateur. En l'occurrence, les bassins versants d'intérêt dépassent la surface d'une parcelle agricole et leur évolution nous intéresse sur des durées supérieures au millier d'années, mais inférieures aux échelles de temps géodynamiques.

Les lois présentées ci-après reposent de préférence sur des bases mécanistiques, mais la plupart sont en pratique d'origine empirique ou semi-empirique. Ce problème sera discuté au § 2.3.1., p. 30.

### a) Conservation de la masse

De manière générale, l'équation de base de tout modèle géomorphologique est la conservation de la masse :

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q}_s + P^{ext}$$

dans laquelle  $z$  est l'altitude locale, et le flux  $q_s$  est égal au flux sédimentaire local (vecteur ayant pour direction et sens ceux du transport).  $P^{ext}$  est un flux spécifique regroupant tous les apports « extérieurs » de matière, c'est-à-dire tout ce qui n'est pas transporté par la rivière depuis l'amont et ne provient pas de l'érosion locale. Entrent en compte principalement :

- la matière déplacée par un éventuel mouvement tectonique vertical ( $P^{ext} = U$ , où  $U$  correspond à un taux de soulèvement s'il est positif) ;
- les sédiments apportés par d'éventuels cours d'eau tributaires, par les versants, ou provenant de l'érosion latérale de la rivière (érosion des berges).

L'équation de continuité de la masse est ici formulée en supposant que la masse volumique du sédiment est constante, hypothèse la plus courante - on peut éventuellement envisager de distinguer les masses volumiques du substratum, du sédiment en place et du sédiment érodé, en pondérant chaque terme de l'équation par le facteur approprié.

### **b) Processus de pente et diffusion**

Dès le XIXe siècle, Gilbert puis Davis remarquent que les sommets des collines présentent souvent des formes arrondies, convexes. Davis suggère que ces zones sont particulièrement sujettes à la reptation (*creep*) de débris, puisque les eaux ne s'y concentrent pas. Gilbert approfondit la question en proposant que la reptation résulte de la perturbation des surfaces par cycles d'expansion/contraction, eux-mêmes dus à des cycles gel/dégel, humide/sec ou chaud/froid. Il suggère en outre que ce processus dépend de la pente et qu'une crête soumise à une érosion continue finit en toute logique par être convexe.

Culling finit par formaliser cette hypothèse en 1960, en postulant que le flux de sédiments érodés sur les versants (par tous les processus imaginables ou presque) est proportionnel au gradient topographique local. Cette formulation, qui se calque sur des lois analogues de transport de chaleur ou de particules (lois de Fourier et de Fick), s'écrit dans sa forme la plus simple :

$$\vec{q}_s = -K \vec{\nabla}z$$

$K$  est un coefficient de proportionnalité qui a les dimensions d'une diffusivité. De nombreux auteurs ont par la suite intégré cette loi dans leurs modèles. Certains l'ont notamment exploitée en utilisant la forme d'escarpements datés pour estimer le coefficient  $K$ . Peu d'études se sont employées à la valider, mais elle semble corroborée par des données de datations par radionucléides cosmogéniques sur deux sites très différents (McKean *et al.*, 1993 ; Small *et al.*, 1999). Ces deux exemples se rapportent à des processus distincts (cycles saisonniers humide/sec et bioturbations vs. reptation par le gel) affectant des versants de pentes douces, couverts de sol ou de régolite, où le lessivage est négligeable.

### **c) Processus de pente et diffusion non-linéaire**

Dans les paysages au relief un peu marqué, les versants n'ont une courbure vraiment convexe qu'aux alentours des crêtes. Plus ils sont raides, plus leur courbure tend vers de faibles valeurs. Pensant que ce changement de morphologie était peut-être dû à des glissements de terrain peu profonds, certains auteurs ont proposé que l'érosion des versants s'écrive globalement sous la forme d'une loi non-linéaire entre le flux de sédiment et la pente (e.g., Roering, 1999).

L'idée sous-jacente est que le transport vers le haut s'oppose à la gravité et au frottement, tandis que le transport vers le bas s'oppose également au frottement tout en étant favorisé par la gravité. Le flux de sédiment érodé s'exprime alors en fonction de la pente suivant l'expression théorique suivante (Roering, 1999) :

$$\vec{q}_s = \frac{K \vec{\nabla}z}{1 - \left( \frac{|\vec{\nabla}z|}{S_c} \right)^2}$$

où  $K$  est encore la diffusivité, et  $S_c$  est la pente critique des versants (correspondant au coefficient de frottement de la surface). Le coefficient  $K$  varie comme l'inverse du carré de la pente critique, ce qui est assez intuitif (plus le sol résiste au frottement, moins il

risque d'être mobilisé), et dépend également de la puissance disponible (notion beaucoup moins claire).

Cette formulation rend compte du fait que le flux varie linéairement avec la pente pour les faibles gradients topographiques, mais augmente considérablement lorsque le gradient approche la pente critique. De même que la loi de diffusion linéaire, la loi non-linéaire ne s'applique plus dès que le substratum affleure.

#### **d) Pédogenèse**

Les processus de versants précédemment décrits ne s'appliquent qu'à des versants couverts de sol, c'est-à-dire où le substratum n'affleure pas. Le mot « sol » désigne en fait ici le matériel ayant perdu la structure initiale de la roche (altérée et/ou désagrégée). La définition manque de précision et la distinction entre sol et roche altérée (saprolite) réside théoriquement dans le reliquat de structure conservé par la roche altérée avant qu'elle ne devienne sol.

Il y a plus d'un siècle, Gilbert suggérait déjà que le taux de pédogenèse dépendait probablement de l'épaisseur de sol déjà existant. Il pensait que la pédogenèse s'annulait sous des dépôts trop épais, augmentant sous des dépôts de moins en moins épais, et cessant à nouveau lors de l'émergence du substratum à la surface. Bien plus tard, d'autres auteurs reprirent cette hypothèse que la production de sol était maximale sous une épaisseur donnée, assez faible de sol existant. Jusqu'à récemment, personne n'avait su modéliser le taux de pédogenèse. Depuis peu, des études de terrain semblent avoir mis en évidence, à partir de mesures de radionucléides cosmogéniques, une loi déterminant le taux de transformation du substratum en sol en fonction de l'épaisseur de sol sus-jacent (e.g. Heimsath, 1999) :

$$-\frac{\partial z_b}{\partial t} = \varepsilon_0 e^{-\alpha H}$$

où  $z_b$  est l'altitude de l'interface substratum/sol,  $\varepsilon_0$  est le taux de pédogenèse du substratum nu,  $H$  est l'épaisseur de sol dans la direction normale à la surface et  $\alpha$  est un paramètre. Le taux de pédogenèse maximal varie à la fois avec le type de roche et le degré d'altération. Il arrive incontestablement que ce maximum intervienne à une profondeur non nulle.

Il s'avère très important de tenir compte de la pédogenèse dans les modèles d'évolution géomorphologique, car, le substratum affleurant dès que le taux d'érosion local dépasse le taux de pédogenèse maximal prévisible, les processus et les taux d'érosion des versants dépendent fortement de ce phénomène.

#### **e) Glissements de terrain**

Les glissements de terrain dominent l'érosion des terrains instables ou très pentus. Aucune théorie solide n'existe quant à ce processus, et les seules tentatives de modélisation qui ont été faites reposent sur des bases empiriques. Deux d'entre elles sont présentées ici.

Schmidt and Montgomery (1995) appliquent le critère de stabilité de pente de Culmann (fin XIXe) à des versants de relief local variant de moins de 5 m à plus de 1 000 m. Cette expérience semble montrer qu'à une pente moyenne donnée correspond un

relief lié à une propriété de résistance de l'échelle des versants. L'équation de stabilité déterminée est la suivante :

$$H_c = \left( \frac{4C}{\rho_s g} \right) \left( \frac{\sin \beta \cos \beta}{1 - \cos(\beta - \phi)} \right)$$

où  $H_c$  est la hauteur du versant (relief critique),  $C$  la cohésion,  $\rho_s$  la masse volumique du matériau,  $\beta$  la pente topographique, et  $\phi$  l'angle de friction interne. Cette formulation se limite, comme la méthode de Culmann, à des instabilités se développant selon des plans.

Mais la modélisation de glissements de terrain devrait aussi répondre aux questions suivantes : quand et où se produisent les instabilités, quelles surfaces affectent-elles, et jusqu'où se déplace le matériel mis en mouvement. Il faut donc de toute façon définir d'autres règles pour compléter le critère de stabilité.

Montgomery et Dietrich (1994) ont développé un modèle de stabilité de pente censé s'appliquer aux glissements de terrain peu profonds (*shallow landsliding*) et tenant compte du rôle de la saturation de subsurface. Ce modèle repose sur le classique critère de Mohr-Coulomb (XVIII-XIXe) :

$$\tau = C + (\sigma - u) \tan \phi$$

où  $\tau$  et  $\sigma$  sont les contraintes tangentielle et normale au moment de la rupture,  $C$  étant la cohésion,  $u$  la pression de pore s'opposant à  $\sigma$  et  $\phi$  l'angle de friction interne. En pratique, les auteurs posent une cohésion  $C$  nulle (voire constante dans certaines versions du modèle), tout en soulignant que l'approximation est très grossière, mais qu'il serait extrêmement difficile de la prendre en compte dans la mesure où elle reflète notamment la cohésion du sol de par la végétation (et sa structure racinaire) qui varie énormément à la fois dans le temps et dans l'espace. L'équation se ramène alors à :

$$\frac{h_s}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right)$$

donnant la proportion de sol saturé lors de l'instabilité ( $h_s/z$ , où  $h_s$  est l'épaisseur de la zone saturée de subsurface et  $z$  l'épaisseur de la zone potentiellement instable) en fonction des masses volumiques du sol et de l'eau  $\rho_s$  et  $\rho_w$ , et de l'angle de pente  $\theta$ .

Sur une surface élémentaire de largeur  $b$ , d'aire drainée  $A$  si  $p$  est le taux de précipitation effective (évaporation retranchée), la loi de Darcy permet d'écrire :

$$p A = k h_s b \cos \theta \sin \theta$$

( $k$  étant le coefficient de perméabilité). A saturation ( $h_s=z$ ), le flux de subsurface est égal au produit de la transmissivité  $T$  par la largeur  $b$  pondéré par  $\sin \theta$  :

$$T b \sin \theta = k z b \cos \theta \sin \theta$$

d'où :

$$\frac{h_s}{z} = \frac{p}{T} \frac{A}{b \sin \theta}$$

$p/T$  représente le rapport de l'intensité d'un événement pluvieux sur la capacité de transporter l'eau en subsurface.

Ainsi, le critère de rupture devient finalement :

$$\frac{A}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \frac{T}{p} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \sin \theta$$

Les modèles de glissements de terrain, comme la plupart des modèles de processus de surface, ont besoin d'une calibration par des données de terrain pour aboutir à des résultats réalistes ; et malheureusement, ces données font à l'heure actuelle défaut.

### **f) Érosion par ruissellement de surface**

Le ruissellement de surface (*overland flow*) est un mécanisme d'érosion qui s'applique, lorsque l'eau météorique dépasse la capacité d'infiltration du sol, aux versants supportant peu ou pas de végétation, ou bien constitués de matériaux imperméables. On inclut généralement sous cette appellation le lessivage de surface (*sheetwash*) et le ravinement en rigoles (*rill erosion*). La difficulté de modéliser le lessivage réside entre autres dans la dépendance du phénomène

- d'événements pluvieux stochastiques dont la durée et l'intensité influencent fortement la distance de transport des sédiments ;
- des propriétés du milieu comme la cohésion, la capacité d'infiltration, le pavement, la végétation, qui sont très variables dans le temps et dans l'espace ;
- des effets de la microtopographie sur le transport et le dépôt des sédiments.

C'est pourquoi les modèles de lessivage soit sont trop empiriques, soit comportent trop de paramètres pour être utilisés dans des modélisations géomorphologiques.

En pratique, les modèles numériques d'évolution géomorphologique intègrent l'érosion par ruissellement de surface dans leur volet « transport fluvial ».

### **g) Érosion dans les rivières alluviales**

Dans ces rivières, l'érosion est limitée par le transport, puisque toute la capacité de transport est utilisée. Le taux d'érosion découle donc directement de l'équation de conservation de la masse, dans laquelle le flux sédimentaire local est pris égal à la capacité de transport locale de la rivière.

La loi d'érosion devrait donc s'écrire *in fine* à partir de la loi de transport de sédiment. Le transport de sédiment alluvial est sans doute le processus le mieux connu parmi les processus de surface, à la fois d'un point de vue théorique et d'un point de vue expérimental. Néanmoins, on ne sait pas encore modéliser proprement une rivière de bout en bout, encore moins un réseau hydrographique entier. Par exemple, on ne sait pas comment prendre en compte l'introduction stochastique de charge en suspension depuis les versants en amont des rivières, alors que l'on a des idées assez précises de son comportement dans les rivières à lit sableux s'écoulant en plaine.

De nombreux modèles d'évolution géomorphologique prennent en compte l'érosion des rivières alluviales, c'est-à-dire en fait le transport de sédiment, par une loi de puissance du type :

$$q_s = k q^m S^n$$

(e.g., Raudkivi, 1967) ou prenant en compte un seuil d'érosion :

$$q_s = k (\tau - \tau_c)^n$$

où  $k$ ,  $n$  et  $m$  sont des paramètres à fixer, ainsi que  $\tau_c$  la contrainte cisailante critique du fluide, correspondant à la mise en mouvement du sédiment.

Très souvent, ces relations sont en outre simplifiées par une loi d'échelle (empirique) liant le débit à l'aire drainée (loi de Hack), voire par la séduisante hypothèse d'une contrainte critique nulle.

Nous reviendrons sur des lois de transport plus mécanistiques dans le § 2.2.2.i., p. 25.

#### ***h) Érosion dans les rivières à lit rocheux***

L'érosion est ici limitée par le détachement, puisque la capacité de transport excède le flux sédimentaire provenant de l'amont et de l'érosion locale. Depuis les années 80, l'hypothèse la plus simple et la plus courante est une relation linéaire ou de puissance entre le taux d'incision et la puissance fluviale (*stream power*) ou la contrainte cisailante (*shear stress*) de la rivière (e.g., Howard and Kerby, 1983 ; Seidl and Dietrich, 1992). On écrit souvent par exemple :

$$I = k (qS)^n$$

que l'on simplifie à l'aide de lois de puissance liant débit et largeur à l'aire drainée :

$$I = k A^m S^n$$

Cette équation semble assez bien refléter l'évolution sur le long terme de systèmes de grande échelle, mais il faut encore calibrer les paramètres  $k$ ,  $m$  et  $n$  selon le contexte (à partir de taux d'incision à long terme et de mesures de pentes et d'aires drainées).

On souligne de plus en plus souvent la nécessité de prendre en compte le rôle de la charge sédimentaire (*sediment supply*) dans l'érosion du substratum, qui est double :

- le sédiment sert d'outil au détachement par abrasion, arrachement, etc. ;
- il protège le substratum en formant une armure sur le fond du lit.

Des expériences en laboratoire (Sklar et Dietrich, 2001) montrent qu'à flux sédimentaire croissant, le taux d'érosion croît puis décroît, le maximum étant atteint pour un niveau critique correspondant à une exposition partielle du substratum. Sklar et Dietrich (1998) avaient d'ailleurs proposé une théorie mécanistique à ce sujet, basée sur les hypothèses suivantes :

- l'incision du substratum est essentiellement due à un phénomène d'abrasion par la charge de fond en saltation,
- et le taux d'usure de la roche dépend linéairement de l'énergie cinétique d'impact des particules et de la fraction du lit non recouverte d'alluvions.

En outre, ils supposent dans leur modèle :

- que la couverture alluviale partielle du lit est liée au rapport du flux de sédiments grossiers sur la capacité de transport,
- que la vitesse d'impact des particules et leur fréquence d'impact varient en fonction des trajectoires de saltation, paramétrisées par des fonctions empiriques de la contrainte cisailante en excès.

Ils prennent également en compte la distribution granulométrique de la charge, car seuls les grains suffisamment grossiers peuvent armer le lit, tandis que la fraction fine est immédiatement emportée en suspension. L'équation du taux d'incision sur laquelle les auteurs concluent est assez complexe, de type parabolique en  $q_s$  avec un taux d'incision maximal pour un flux sédimentaire inférieur à la capacité d'érosion. De

bonnes données sont nécessaires à sa calibration. De plus, elle décrit spécifiquement l'érosion par abrasion-saltation, et n'est pas censée représenter tous les processus d'érosion du substratum.

Beaumont *et al.* (1992) avaient déjà proposé d'intégrer le rôle de la charge sédimentaire dans un modèle d'incision s'appliquant aussi bien aux rivières à lit rocheux qu'aux rivières alluviales :

$$I = \frac{q_C - q_S}{L_f}$$

où  $q_C$  est la capacité de transport théorique (par exemple linéairement dépendante du débit  $q$  et de la pente  $S$ , selon l'option choisie par Beaumont *et al.*),  $q_S$  le flux sédimentaire provenant de l'amont, et  $L_f$  une longueur caractéristique de l'érosion, qui peut varier en fonction du contexte (alluvial ou non) que l'on cherche à modéliser. Cette formulation (appelée « *undercapacity model* ») revient à décrire l'évolution du flux sédimentaire  $q_S$  comme une réaction du premier ordre :

$$\frac{\partial q_S}{\partial l} = \frac{q_C - q_S}{L_f}$$

( $l$  variable spatiale suivant la direction du transport). Plus  $L_f$  est grand, plus le flux sédimentaire mettra longtemps à atteindre la capacité théorique de transport (cas des rivières à lit rocheux), et inversement (cas des rivières alluviales).

### ***i) Transport de sédiment***

Le transport du sédiment est un problème fondamental dans la thématique de l'érosion. C'est le mécanisme qui a sans doute été le plus étudié, notamment par des physiciens et des hydrauliciens. Pourtant, de nombreuses théories sont disponibles sur le sujet et en choisir une reste une question délicate, car aucune approche ne surpasse suffisamment les autres pour apparaître comme l'unique bonne solution.

Parmi les nombreuses formules de transport de sédiment proposées depuis plusieurs dizaines d'années, la plupart sont semi-empiriques, voire complètement empiriques, découlant de corrélations observées sur des jeux de données naturelles ou expérimentales.

Certains physiciens ont cependant essayé d'approcher le problème du transport par des raisonnements théoriques. Nous citons ici quelques-uns de ces chercheurs qui ont particulièrement marqué leur époque et les suivantes.

Le transport de la charge en suspension n'est pas toujours pris en compte dans les modèles, car il exige d'être traité à part.

**$\alpha$ . Shields** dégage, à partir de considérations dimensionnelles, une quantité dont le rôle est capital dans le transport du sédiment : la contrainte (ou le paramètre) de Shields  $\theta$  (Shields, 1936) :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD}$$

où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement du fluide,  $\rho_s$  et  $\rho$  les masses volumiques respectives du sédiment et de l'eau,  $D$  est la dimension caractéristique du sédiment transporté.

$\theta$  représente, d'une certaine manière, le rapport de la force de cisaillement sur la force de gravité s'exerçant sur le sédiment. Il apparaît dans de nombreuses études ayant succédé à celle de Shields.

Comme la force de cisaillement  $\tau$  vaut :  $\tau = \rho g h S$ , le paramètre de Shields peut également s'écrire :

$$\theta = \frac{hS}{\Delta D}$$

où  $h$  est la hauteur d'eau sur laquelle le sédiment est transporté,  $S$  la pente locale, et  $\Delta$  l'écart relatif de masse volumique entre le sédiment et l'eau.

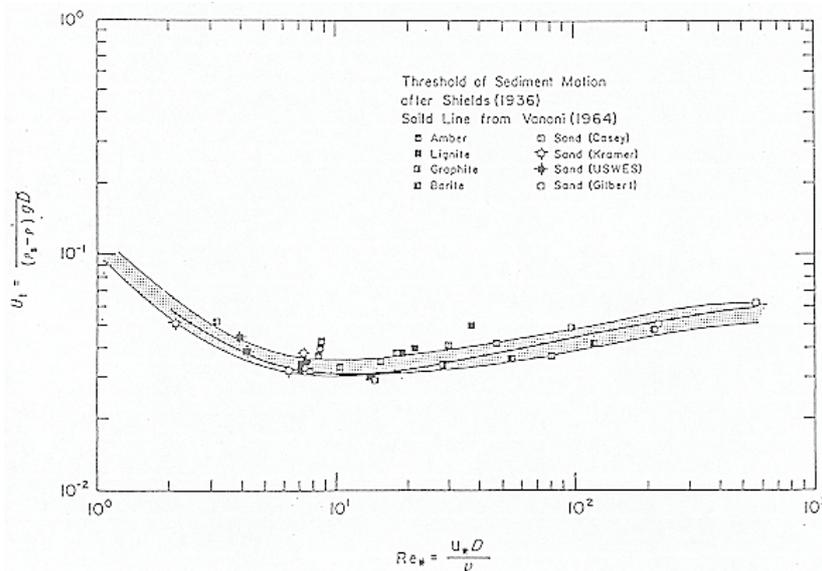
Shields souligne l'intérêt de cette quantité dans l'étude de l'initiation du mouvement, qui a lieu lorsque la force d'entraînement du fluide compense le poids du grain. On a alors :

$$\theta = \theta_c$$

où  $\theta_c$  est la valeur critique du paramètre. Shields montre (toujours par analyse dimensionnelle) que cette dernière grandeur est fonction d'un nombre de Reynolds défini par :

$$Re = \frac{u_* D}{\nu}$$

( $\nu$  étant la viscosité cinématique du fluide, et  $u_*$  la vitesse de friction définie par  $\tau = \rho u_*^2$ ); il construit d'ailleurs, à partir de divers jeux de données, une courbe  $\theta_c = f(Re)$  qui sert aujourd'hui encore de référence à beaucoup de géomorphologues.



**Fig. 6 - Diagramme de Shields : critère d'entraînement du sédiment en fonction du nombre de Reynolds et du paramètre de Shields  $\theta$ .**

Ce **seuil d'érosion** introduit par Shields a souvent été négligé par souci de simplification dans les modèles quantitatifs, mais on reconnaît récemment qu'il est d'une importance capitale dans la formalisation de l'érosion (e.g., Snyder *et al.*, 2003). Sa prise en compte oblige à certaines précautions quant à l'intégration du climat dans les modèles. En effet, le seuil d'érosion ne sera atteint que lorsque les événements

pluvieux le permettront. Il est donc nécessaire de ne pas moyenner le climat afin de ne pas ignorer l'effet érosif des tempêtes (Snyder *et al.*, 2003).

**β. Einstein** adopte une approche probabiliste du phénomène de transport (Einstein, 1941) : il raisonne ainsi sur la probabilité qu'une particule se mette en mouvement dans un écoulement turbulent, c'est-à-dire la probabilité que la force d'entraînement du fluide domine les forces de résistance au mouvement. L'expression finale à laquelle il aboutit est du type :

$$A\Phi = f(B\Psi)$$

où il pose :

$$\Phi = \frac{1}{F} q_s \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{1}{g^{0.5} D^{1.5}}}$$

$$\Psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{D}{RS}$$

Les constantes  $A$  et  $B$  et la fonction  $f$  doivent être déterminées expérimentalement ( $F$  est un facteur lié aux caractéristiques du sédiment et du fluide). Einstein utilise  $f(x) = e^{-x}$ , mais Brown, reprenant les mêmes données, choisit  $f(x) = x^{-3}$ , expression plus adaptée aux petits  $\Psi$ . Le travail d'Einstein est à la base de la plupart des formulations d'érosion du type :

$$q_s = k q^m S^n$$

(e.g., Howard, 1980).

**χ. Bagnold** aborde le problème du transport de sédiment sous un angle de bilan énergétique (Bagnold, 1966). Il s'appuie sur la grandeur suivante :

$$\omega = \rho g h S u = \tau u$$

qui représente la puissance fournie par la perte d'énergie potentielle d'une hauteur  $h$  de fluide, ramenée à une unité de surface du lit de la rivière. Cette puissance est fréquemment appelée « puissance fluviale » (*stream power*) et intervient dans nombre de modèles postérieurs à l'étude de Bagnold.

Le taux de transport de sédiment de charge de fond (*bedload*), d'un point de vue dynamique, ne concerne que le sédiment immergé, et s'écrit pour cette raison :

$$(\rho_s - \rho) g q_b$$

Introduisant un coefficient d'efficacité  $e_b$ , correspondant à la fraction de puissance disponible  $\omega$  effectivement convertie en taux de transport de la charge de fond (qui est un travail, dimensionnellement parlant), Bagnold écrit simplement :

$$(\rho_s - \rho) g q_b = e_b \omega$$

ce qui donne le flux de charge de fond :

$$q_b = e_b \frac{h S u}{\Delta}$$

Le flux de sédiment en suspension est déterminé de manière analogue. En plus de  $\omega$ , il dépend également du rapport entre la vitesse du fluide  $u$  et la vitesse de sédimentation des grains  $v_s$  ; en outre, le transport de la charge en suspension est fonction d'une efficacité  $e_s$  et de la puissance disponible restante  $(1 - e_b)\omega$  :

$$(\rho_s - \rho) g q_s = e_s (1 - e_b) \omega \frac{u}{v_s}$$

$$q_s = e_s (1 - e_b) \frac{hSu}{\Delta} \frac{u}{v_s}$$

### j) Érosion glaciaire

Lorsqu'un glacier participe à l'érosion, l'érosion glaciaire domine généralement tous les autres processus. La modélisation quantitative de l'érosion glaciaire est encore balbutiante, et pour l'instant, aucun jeu de données n'est disponible qui permettrait de valider ou d'invalider une loi de transport. Les modèles existants se basent sur l'hypothèse de Hallet (1989), qui propose que le taux d'érosion  $E$  soit proportionnel à la vitesse de la base du glacier  $U_b$  :

$$E = cU_b$$

La vitesse  $U_b$  est déterminée en fonction de la rhéologie de la glace et d'autres paramètres que l'on ne maîtrise pas encore.

### 2.2.3. Limitations dans la formalisation des processus

La mise en équations de processus que l'on sait à peine (voire pas du tout) observer est un exercice difficile et nombreuses sont encore les limitations dans ce domaine. Nous soulignons ici quelques-unes des lacunes majeures des modèles géomorphologiques actuels.

- De manière générale, on néglige le phénomène de dissolution. Si on en tenait compte, cela affecterait la masse volumique du sédiment ou bien conduirait à la disparition d'une partie de la matière érodée. En pratique, ce phénomène ne concerne que certains types de roches bien particuliers (par exemple le calcaire), dans des conditions favorables (eaux acides) de faible taux d'érosion global. La dissolution se traduit alors par la formation d'un karst. Kaufmann et Braun (2001) ont montré qu'en tenant compte de la dissolution, l'évolution géomorphologique d'un plateau apparaît beaucoup plus rapide et conduit au creusement de gorges similaires aux profondes rivières qui entament les Causses du Sud de la France.
- La plupart des modèles ne tiennent pas compte du fait que sur les versants, la divergence du flux de sédiment transporté  $q_s$  ne peut pas dépasser la somme du sédiment disponible et de la production de sol locale :

$$\begin{aligned}
 -\nabla \cdot q_s &= \frac{\partial h_{sed}}{\partial t} - P && \text{tant que le substratum n'est pas atteint} \\
 -\nabla \cdot q_s &= -P && \text{dès que le substratum affleure}
 \end{aligned}$$

$h_{sed}$  est l'épaisseur de sol ou de sédiment,  $P$  est le taux de pédogenèse (taux de conversion du substratum en sol). Ce taux est d'ailleurs susceptible de dépendre de l'épaisseur du sol  $h_{sed}$ .

Autrement dit, l'érosion des versants est limitée par le transport tant qu'ils sont recouverts d'un sol, et devient limitée par le détachement dès que le substratum affleure.

- La loi de diffusion est quelquefois appliquée dans des modèles où le maillage spatial est si grossier qu'une maille élémentaire est plus grande que la longueur typique d'un versant sujet à diffusion. Les versants naturels de la taille de ceux des modèles comportent fréquemment des affleurements de substratum, ce qui devrait empêcher le recours à une simple loi de diffusion.
- La principale difficulté dans la modélisation des mouvements de terrain réside dans le fait que l'on s'appuie sur des théories géomécaniques censées s'appliquer dans des conditions statiques, alors que l'on considère un matériau en perpétuelle évolution, dans le temps et dans l'espace, et que les instabilités que l'on cherche à formaliser sont souvent induites par des événements pluvieux ou sismiques intrinsèquement stochastiques.
- L'approche simplificatrice de l'incision par les rivières à lit rocheux (§ 2.2.2.h, p. 24) ne permet pas de tenir compte de nombreux processus importants. Par exemple, elle ne peut intégrer les points suivants :
  - le rôle des ruptures de pente (*knick points*) dans l'abaissement du lit ;
  - le décapage par les débris charriés par la rivière (*debris flow scour*) dans ses tronçons les plus raides, notamment en tête de rivière ;
  - l'influence de la granulométrie ;
  - l'influence d'événements météorologiques violents et stochastiques en regard des débits moyens sur le long terme ;
  - le rôle de la charge en suspension qui participe au détachement du substratum par abrasion, cavitation et arrachement.
- La loi d'incision du substratum en puissance de la pente et de l'aire drainée (§ 2.2.2.h, p. 24) n'est en pratique pas valable dans les reliefs les plus raides (Stock and Dietrich, 2003). En effet, l'observation de vallées de gradient topographique supérieur à 10 % (à la tête des rivières), le processus érosif dominant devient le décapage par coulées de débris (*debris flow scour*). Dans les bassins de relief très prononcé, l'approche par les lois d'incision classique mène à une surestimation des pentes et du relief qu'on ne saurait éviter qu'en s'appliquant à modéliser particulièrement ce processus jusqu'ici négligé.
- Les diagrammes pente-aire drainée sont parfois utilisés pour analyser des données de terrain dans l'idée de discriminer les processus de surface actifs. Cette approche doit être considérée avec prudence, car de nombreux processus différents peuvent en fait conduire à des relations pente-aire drainée similaires. Sklar et Dietrich (1998) ont notamment montré que des profils de rivières évoluant manifestement hors équilibre mettaient en évidence des lois de puissances entre pente et aire drainée, alors que ce genre de relation était à l'origine expliqué par la situation « à l'équilibre » d'un système en surrection soumis à un processus dominant de type détachement ou transport régi par une loi simple en puissance de la pente et de l'aire drainée (e.g. Willgoose *et al.*, 1991). Du reste, Schorghofer et Rothman (2001) démontrent que la relation pente-aire drainée résulte d'un effet statistique et n'est donc pas liée aux processus de surface de manière causale.

De manière générale, de nombreux modèles se basent sur des lois originellement liées à des hypothèses que l'on oublie de vérifier, ou que l'on ne peut pas vérifier. Beaucoup de théories prennent place dans des contextes de comportement *stationnaire* (transport de sédiment, etc.), ou sont élaborées pour des systèmes à *l'équilibre*. Or, il

est très difficile de vérifier par exemple qu'un système naturel comme un réseau hydrographique est « à l'équilibre » ; on ne sait d'ailleurs même pas si aucun équilibre n'est jamais atteint, compte tenu de la complexité des interactions qui le font évoluer. Certains systèmes géomorphologiques sont en effet chaotiques (e.g., Phillips, 1996) et ne tendent donc pas vers un hypothétique équilibre, même s'ils sont soumis à des conditions uniformes.

### 2.3. RÉFLEXIONS : QU'EST-CE QU'UN « BON » MODÈLE ?

Nous résumons ici quelques réflexions générales de Bras *et al.* (2003) concernant la modélisation et les aspirations des modélisateurs en géomorphologie.

#### 2.3.1. Rigueur

De nombreux scientifiques rêvent d'un « bon » modèle, qui repose sur des bases « physiques », et se présente sous la forme d'un système soluble d'équations, paramétrées par des grandeurs mesurables et accessibles dans les systèmes naturels. En réalité, aucun modèle ne peut prétendre s'appliquer à toutes les échelles. Si les hypothèses d'application de telle loi sont vérifiées à telle échelle, elles ne le seront plus à l'échelle inférieure et/ou supérieure. D'autre part, certaines grandeurs dites « physiques » ne correspondent à aucune propriété concrète du milieu et ne sont ni mesurables, ni prédictibles.

Ainsi, un « bon » modèle est en pratique un modèle qui :

- part d'une certaine compréhension des phénomènes,
- utilise certains principes généralisables (par exemple, la conservation de la masse ou de l'énergie),
- dépend d'un nombre minimal de paramètres ayant un sens réel,
- peut être validé par l'observation.

Une méthode heuristique peut donc parfois conduire à un « meilleur » modèle qu'une analyse rigoureuse, dans la mesure où elle fait ressortir les caractéristiques d'un système indépendamment de ses lois internes.

#### 2.3.2. Validation

À propos de la validation des modèles, Bras *et al.* (2003) soulignent qu'en sciences de la Terre, on ne peut jamais vérifier rigoureusement un modèle, car on se heurte très vite aux limites techniques d'observation et de mesure des systèmes naturels. Cela dit, il n'est pas impossible de « confirmer » (ou d'infirmer) un modèle en le confrontant à des jeux de données n'ayant pas servi à sa calibration.

Même si un modèle apparaît invérifiable, rien n'empêche qu'il devienne vérifiable à l'avenir. Du reste, un modèle invérifiable n'est pas forcément inutile, et peut même dégager des pistes de recherche intéressantes, d'autant qu'il stimule l'effort de collecte de données susceptibles de le tester. Cette démarche déductive (on pense un modèle

de prédiction avant de le confronter aux données) est courante en physique, mais encore peu appliquée en sciences de la Terre, où la théorie succède traditionnellement aux observations de terrain.

De plus, la modélisation aide à structurer la pensée scientifique, et oblige à préciser des notions souvent vagues. Par exemple, on interprète souvent les variations de taux d'érosion en termes de climat passé « plus humide » ou « plus sec ». La construction d'un modèle des interactions climat-géomorphologie contraint à se poser des questions telles que : un climat est-il « plus humide » parce que le taux de précipitation est supérieur ou parce que les tempêtes sont plus intenses ?

La comparaison de modèles vérifiables ou non peut révéler l'importance relative des processus ou des paramètres qui les constituent, de même que des analyses de sensibilité.

La plupart des intérêts que l'on peut trouver aux modèles invérifiables sont en fait également valables pour les modèles invalidés. L'exercice de modélisation est ainsi avant tout un genre de laboratoire virtuel, dans lequel les expériences peuvent être facilement contrôlées, renouvelées et modifiées.

### 2.3.3. Complexité

Les systèmes naturels sont généralement très complexes, dans le sens où ils impliquent de nombreux processus différents, connectés entre eux par des interactions et des rétroactions, et opérant sur des gammes très larges d'échelles de temps et d'espace.

Pourtant, malgré cette extrême complexité des systèmes géomorphologiques, on remarque que finalement, les comportements observés sont souvent très simples, dès qu'on les considère à des échelles plus grandes que les échelles caractéristiques des processus concernés. Ceci rappelle le comportement robuste et régulier de nombreux systèmes dissipatifs non-linéaires.

D'ailleurs, la régularité des morphologies est un des principaux moteurs de la recherche en géomorphologie. En effet, les paysages présentent à la fois une grande variabilité et des propriétés communes de par le vaste monde. Par exemple, l'érosion glaciaire produit des vallées en forme de « U » tout à fait reconnaissables, dans des contextes qui se distinguent les uns des autres par les détails du climat, des roches, en somme de tout ce qui paramètre le processus en cause.

La plupart des géomorphologues espèrent donc dégager des principes simples de l'apparente complexité des systèmes géomorphologiques. C'est sans doute pour cette raison que l'on décèle une tendance générale à construire des modèles qui commencent par une description très simplifiée d'un système, avant de progressivement s'enrichir de nouveaux éléments afin d'accroître le réalisme du résultat.

D'après Bras *et al.* (2003), cette inclination vers une complexité croissante est justifiée par le fait que l'exercice de modélisation implique un savant compromis entre la fidélité aux systèmes naturels et l'aspiration à la simplicité (économie de paramètres et facilité

de compréhension). En ajoutant petit à petit des détails, on suppose que l'on atteindra finalement un point de « complexité optimale » après quoi aucun détail supplémentaire ne sera nécessaire. On peut également procéder à l'inverse, en éliminant petit à petit d'un modèle les détails qui n'ont pas d'influence sur le résultat.

Un système naturel complexe peut montrer de la simplicité de deux manières. La première et la plus évidente est d'être dominé par un processus parmi d'autres. Par exemple, la notion d'érosion limitée par le transport permet d'éviter d'avoir à décrire les processus de détachement du sédiment, en affirmant que de toute façon, le taux d'érosion ne dépend que de la capacité de transport. La seconde, moins intuitive, est la possibilité qu'un résultat simple émerge parce que l'on tient compte de nombreux processus en interactions. Par exemple, une étude de Gasparini *et al.* (1999) suggère qu'en intégrant la distribution granulométrique d'un sédiment hétérogène à un modèle d'évolution de bassin, on peut restreindre la gamme de profils de rivières éventuels autour des profils naturels.

Finalement, Bras *et al.* (2003) concluent sur le fait qu'un « bon » modèle est un modèle qui remet en question les idées qui ont conduit à son élaboration. Les résultats d'un modèle sont d'autant plus enrichissants qu'ils amènent le modélisateur à modifier les schémas préexistants. Ainsi va la recherche...

#### 2.3.4. Limitations dans la modélisation

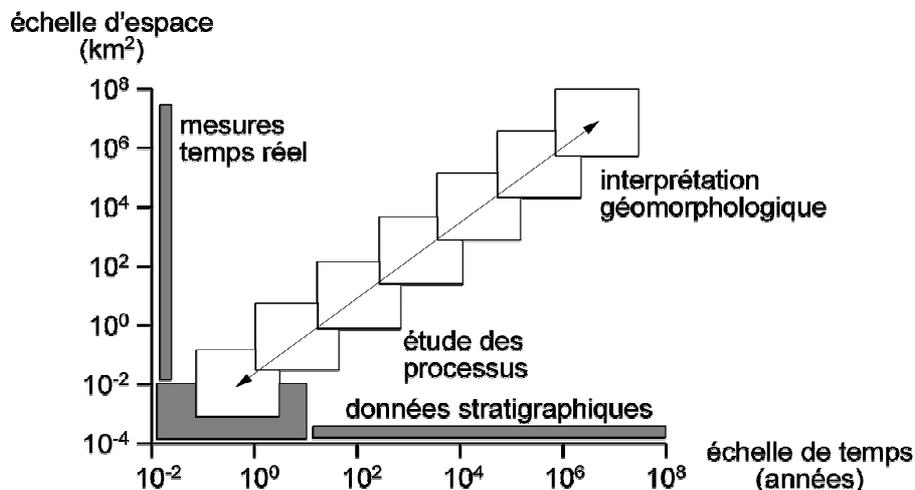
Haff (1996) relève un certain nombre de limitations dans l'usage de la modélisation géomorphologique comme outil de prédiction de l'évolution du paysage :

- l'imperfection des modèles : les lois utilisées sont généralement dérivées de relations observées ou démontrées à petite échelle, alors qu'on les applique à grande échelle. Pourtant, la moyenne de la petite échelle a peu de chances de s'écrire sous la même forme à grande échelle. En outre, la multiplicité des relations empiriques établies sur des données de terrain ou de laboratoire (petite échelle spatio-temporelle) démontre bien l'inexorable imprécision de telles relations lorsqu'on les intègre à des modèles de grande échelle. Finalement, beaucoup de modélisateurs ont recours à des lois de puissance de grande échelle (du type de celle liant l'incision au débit et à la pente) qui n'ont pas de sens à petite échelle, parce qu'on n'a aucune idée du détail des processus à une échelle plus fine ;
- l'oubli de certains processus : les systèmes naturels sont d'une telle complexité que toute tentative de modélisation passe forcément par une simplification de la réalité. Détailler autant que possible les phénomènes de petite échelle ne pourra jamais combler l'omission de certains processus. Par exemple, la mise en place de cônes alluviaux est couramment modélisée par des processus fluviaux, alors qu'elle pourrait aussi se produire par des coulées de débris qui ne sont pas prises en compte ;
- la méconnaissance des conditions initiales : qu'elles correspondent à l'actuel ou à un contexte passé, les conditions initiales ne sont jamais parfaitement connues. Un effort important est nécessaire quant à l'acquisition des données, qui ne peut qu'améliorer la fiabilité des modèles ;
- la sensibilité aux conditions initiales : une forte dépendance par rapport aux conditions initiales favorise les comportements chaotiques. Or, les systèmes géomorphologiques sont justement soupçonnés d'être chaotiques. Ceci transparait

dans l'usage des modèles d'évolution du paysage qui, partant de conditions voisines, mènent fréquemment à des résultats très différents ;

- l'hétérogénéité non-résolue des systèmes : dans certains systèmes physiques, la modélisation est d'autant plus facile que l'échelle à laquelle on les considère est grande, parce que les détails sont moyennés, diminuant ainsi l'hétérogénéité apparente. Les systèmes géomorphologiques sont plus délicats à aborder, car leur hétérogénéité se manifeste à toutes les échelles (par exemple végétation, rugosité...), et il n'existe pas de taille des systèmes à laquelle on puisse passer outre ;
- les contraintes externes : les systèmes géomorphologiques sont sollicités par de nombreuses actions externes difficiles à caractériser. Ces contraintes peuvent être prises en compte statistiquement si l'on dispose des distributions des événements caractérisant aussi précisément que possible leurs intensités et leurs durées (par exemple : distribution de tempêtes pour le climat, de séismes pour la tectonique).

Le problème des **transferts d'échelle** est sous-jacent à plusieurs de ces limitations : l'échelle des systèmes que l'on veut modéliser n'est pas la même que celle à laquelle les processus sont individuellement formalisés, non plus que celle à laquelle on peut recueillir des données, pour calibrer les modèles ou tester leurs résultats (fig. 7). Par souci de simplification, cette question est en général soigneusement éludée, et l'on est finalement incapable d'estimer la validité de la modélisation.



**Fig. 7 - Relations entre les échelles de temps et d'espace des études de terrain (boîtes grisées) et des interprétations géomorphologiques (d'après Kirkby, 1996).**

## 2.4. MODÈLES EXISTANTS

De nombreux modèles d'évolution géomorphologique (souvent appelés *landscape evolution models*) ont été développés durant la dernière décennie, principalement du fait de l'augmentation des capacités de calcul. On se cantonnait auparavant à des modèles en 2D, c'est-à-dire à des profils ou des coupes ( $z(x)$  - liant distance et altitude).

### 2.4.1. Différences

Ces modèles diffèrent principalement :

- par le choix des processus modélisés, et la sophistication des formalismes ;
- par l'échelle spatio-temporelle à laquelle ils peuvent s'appliquer ;
- par le mode d'implémentation numérique.

#### ***a) Formalisme***

Une des distinctions majeures concerne les hypothèses de bases de l'érosion fluviale : elle est limitée soit par le transport, soit par le détachement, soit par les deux. Les tronçons de rivière sont alluviaux ou rocheux selon le rapport local entre capacité de transport et flux sédimentaire provenant de l'amont et des versants.

En outre, le fait que l'érosion soit liée à la capacité de transport ou à l'écart à la capacité de transport (§ 2.2.2.h, p. 24) change notablement la physique sous-jacente du modèle ainsi que les comportements qu'il peut reproduire.

Une autre différence importante de principe sépare les modèles qui distinguent les processus d'érosion et de dépôt de ceux qui ne le font pas. En ce qui concerne les processus de versants, la plupart des modèles en tiennent compte de la même manière, par une équation de diffusion plus ou moins modifiée.

#### ***b) Échelles et résolution***

Certains modèles tendent à s'appliquer à des systèmes de taille continentale (1 000 km et plus) sur des échelles de temps géologiques (1 Ma et plus), quand d'autres visent à reproduire le comportement d'un bassin versant de grande rivière (10-100 km) sur des durées plus « quaternaires » (1-100 ka). De ces échelles de temps et d'espace dépend bien sûr la façon dont les différents processus de surface sont pris en compte. Dès que l'on aborde la question des écoulements chenalés, se pose le problème du rapport entre la taille de la maille élémentaire et la largeur des écoulements modélisés. En général, pour les modèles de grande échelle auxquels nous nous intéressons, la taille des mailles est souvent plus grande que la largeur d'une rivière. Le taux d'érosion calculé sur une maille doit donc tenir compte à la fois de l'érosion fluviale et de l'érosion de versant, en les pondérant par des facteurs liés à la largeur (supposée ou calculée) de la rivière éventuellement présente.

De même, de la résolution temporelle dépend la manière dont on peut ou non intégrer le climat sous forme d'événements ou non. Une alternative à ce problème est de modéliser le climat par un modèle de pluie stochastique, dans lequel la pluie intervient sous forme d'événements (tempêtes) discrets stochastiques (Tucker and Bras, 2000). L'intensité et la durée des tempêtes ainsi que l'intervalle entre deux tempêtes suivent des densités de probabilités fixées.

#### ***c) Implémentation numérique***

Les deux grands types de modèles sont :

- les modèles basés sur une résolution en différences finies des équations, sur une grille à mailles carrées ou une grille adaptative à mailles irrégulières ;

- les modèles utilisant un système d'automates cellulaires : les équations sont résolues au passage de marcheurs conditionnés par des règles de marche et d'érosion.

Dans le cas d'un maillage irrégulier dynamique, l'espace est maillé par la méthode de triangulation de Delaunay basée sur les cellules de Voronoï (e.g., Braun and Sambridge, 1997). Dans la triangulation de Delaunay, tout point a un nombre non fixé de « voisins naturels » (dont les cellules de Voronoï sont adjacentes à la sienne) avec lesquels il interagit.

L'utilisation d'un tel maillage (*TIN* pour *Triangulated Irregular Network*) permet de raffiner le maillage là où il doit être fin (notamment dans les chenaux où les processus importants interviennent à une échelle spatiale plus fine que sur les versants), et d'éviter l'anisotropie quant aux directions de transport d'un maillage carré. En outre, cette approche est essentielle pour tenir compte des mouvements horizontaux de matière induits par la tectonique ou l'érosion.

## 2.4.2. Modèles d'évolution géomorphologique

Nous présentons ici une revue non-exhaustive des modèles 3D les plus importants développés ces dernières années, que ce soit par leurs résultats ou par l'originalité de leur approche.

### a) *Les pionniers*

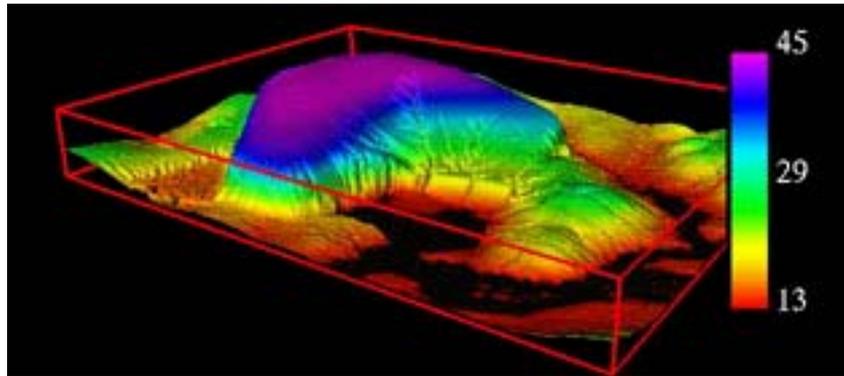
Les balbutiements de la modélisation géomorphologique 3D s'incarnent dans les modèles de **Ahnert** (1976) et **Armstrong** (1976), qui sont avant tout limités par les moyens techniques de l'époque. Ahnert élabore un modèle dans lequel le réseau drainage est imposé sur une grille de 10 x 10 mailles, où l'érosion se concentre sur les versants. Quoique peu réaliste, cette tentative d'Ahnert est assez sophistiquée, puisque son modèle comprend plusieurs processus (érosion par impact des gouttes, lessivage, glissements de terrain, etc.) modélisés par des fonctions mathématiques différentes, dépendant de la pente, du ruissellement et de l'érodabilité du régolithe. Armstrong utilise une plus grande grille (40 x 40) et impose également le réseau hydrographique, mais il distingue les processus de rivières des processus de pente.

Mike **Kirkby** (University of Leeds, UK) élabore un modèle d'évolution géomorphologique incorporant une version élémentaire mais analytique d'érosion par lessivage et fluage du sol (Kirkby, 1986). Le modèle sert à étudier la compétition entre les deux processus, et son effet sur la densité de drainage. Kirkby introduit les équations différentielles qui manquaient à Ahnert pour modéliser l'évolution de la pente topographique.

Garry **Willgoose** (à présent à l'University of Leeds, UK - auparavant à l'University of Newcastle, Australia) développe durant la dernière décennie le modèle **SIBERIA**, qui vise à simuler l'évolution de bassins soumis à l'action du ruissellement et de l'érosion sur des durées allant jusqu'à 1000 ans (Willgoose *et al.*, 1991a ; [2] et fig. 8).

Ce modèle discrimine clairement les processus de versants des processus de rivières, en définissant une « fonction d'initiation de rivière » qui permet d'étudier précisément la

dynamique du réseau hydrographique. L'érosion est limitée par le transport qui suit une loi de puissance du débit et de la pente et dépend d'un seuil d'érosion. Les processus de versants sont regroupés dans un terme de diffusion linéaire qui tient également compte d'un seuil (correspondant à un critère de stabilité de pente) en-dessous duquel le flux sédimentaire est nul.



**Fig. 8 - Exemple de paysage simulé par le modèle SIBERIA de G. Willgoose (1991).**

Dans SIBERIA, Willgoose rassemble les événements pluvieux sous la forme d'un pic de crue moyen. Il fait ainsi l'hypothèse que les événements catastrophiques n'interviennent pas particulièrement sur l'évolution d'un bassin, qui dépend donc essentiellement de la quantité d'eau finie apportée par le climat.

Alan **Howard** (Department of Environmental Sciences, University of Virginia, [3]) propose un modèle analogue à celui de Willgoose (1991), aux différences suivantes près (Howard, 1994) :

- il n'y a pas de fonction d'initiation de rivières,
- l'érosion fluviale du substratum est limitée par le détachement, et
- régo-lite et substratum rocheux sont distingués par leur érodabilité.

Dans son modèle, Howard autorise une maille à être soumise à la fois à des processus fluviaux et diffusifs (fig. 9). L'altération du substratum est prise en compte, sans explicitation de l'épaisseur du sol. Lorsque les pentes atteignent une valeur seuil, il y a glissement de terrain. Les rivières alluviales sont clairement distinguées de rivières non-alluviales, pour lesquelles le flux sédimentaire est inférieur à la capacité de transport.

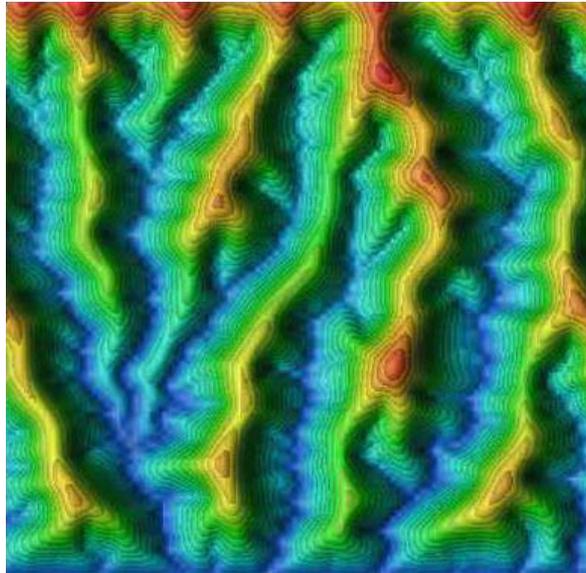
Ce modèle lui permet en outre de dégager l'importance de l'existence d'un seuil de transport dans l'évolution morphologique d'un bassin.

### **b) Les modèles initiés par Tucker**

Greg **Tucker** (School of Geography and the Environment, Oxford University) élabore de son côté **GOLEM** (Geomorphic/Orogenic Landscape Evolution Model), un modèle au départ destiné à étudier le développement sur le long terme d'escarpements d'érosion (Tucker and Slingerland, 1994 ; [4]). Les processus de surface pris en compte sont :

- l'érosion fluviale de rivière à lit alluvial, rocheux ou mixte ;

- à petite échelle, les processus diffusifs des versants, l'altération du substratum en sol, les glissements de terrain et l'initiation de la chenalisation (suivant l'idée émise par Willgoose).

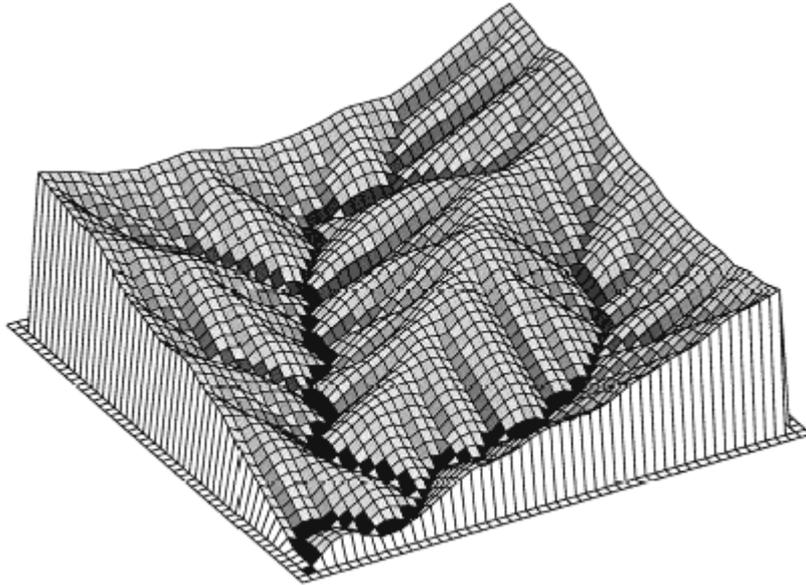


**Fig. 9 - Exemple de paysage simulé par le modèle de A. Howard (1994) ; les limites latérales sont périodiques, c'est-à-dire que la topographie est continue de gauche à droite de la grille.**

Le mode « petite échelle » de GOLEM correspond aux dimensions d'un « petit bassin versant » (option *catchment scale*), soit moins de 10 km de large en pratique. Il s'oppose au mode « grande échelle » (option *large scale*) qui s'applique dans le cas où la résolution est trop grossière pour distinguer les versants élémentaires. Les processus de versants suscités sont alors supposés être à l'équilibre avec le chenal de rivière principal de chaque maille. En effet, chaque cellule comporte nécessairement dans ce cas une partie fluviale.

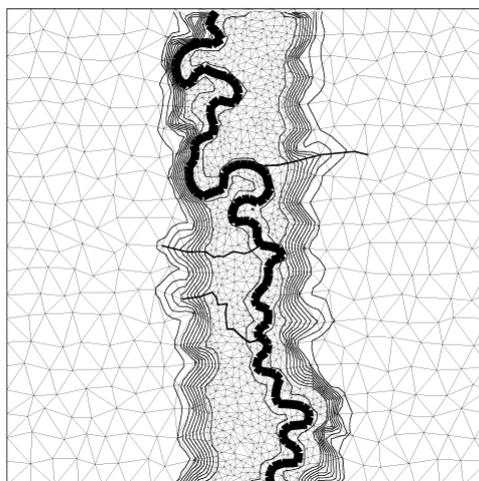
GOLEM permet en outre de traiter des lithologies différentes, soit juxtaposées, soit empilées en une séquence stratigraphique choisie par l'utilisateur. Chaque couche est caractérisée par son épaisseur, son érodabilité (relativement à l'érosion fluviale), son taux d'altération superficielle du substratum en sol (en mode de petite échelle), et sa pente limite de stabilité.

Une version améliorée de GOLEM (Tucker and Bras, 1998 ; fig. 10) modélise les glissements de terrain en incorporant la dépendance de la pression de pore du sol suivant la formalisation de Montgomery and Dietrich (1994 ; cf. § 2.2.2.e, p. 21).



**Fig. 10 - Exemple de paysage simulé par le modèle GOLEM de G. Tucker, en tenant compte des glissements de terrain suivant le critère de pression de pore de Montgomery et Dietrich (1994). Une pression de pore élevée autour des points de convergence des écoulements entraîne la formation de creux par glissements de terrain.**

**CHILD** (Channel-Hillslope Integrated Landscape Development model), le successeur de GOLEM, est développé à partir de 1997 au Department of Civil and Environmental Engineering du Massachusetts Institute of Technology, par Tucker et ses collaborateurs [5]. Le progrès principal est le recours à un maillage irrégulier et dynamique (cf. § 2.4.1.c, p. 34), qui permet notamment de modéliser l'érosion latérale des rivières et l'évolution de leurs lits majeurs (fig. 11).



**Fig. 11 - Simulation du développement de la vallée et du lit majeur d'une rivière par le modèle CHILD, illustrant l'intérêt du maillage à résolution variable (Tucker et al., 2001).**

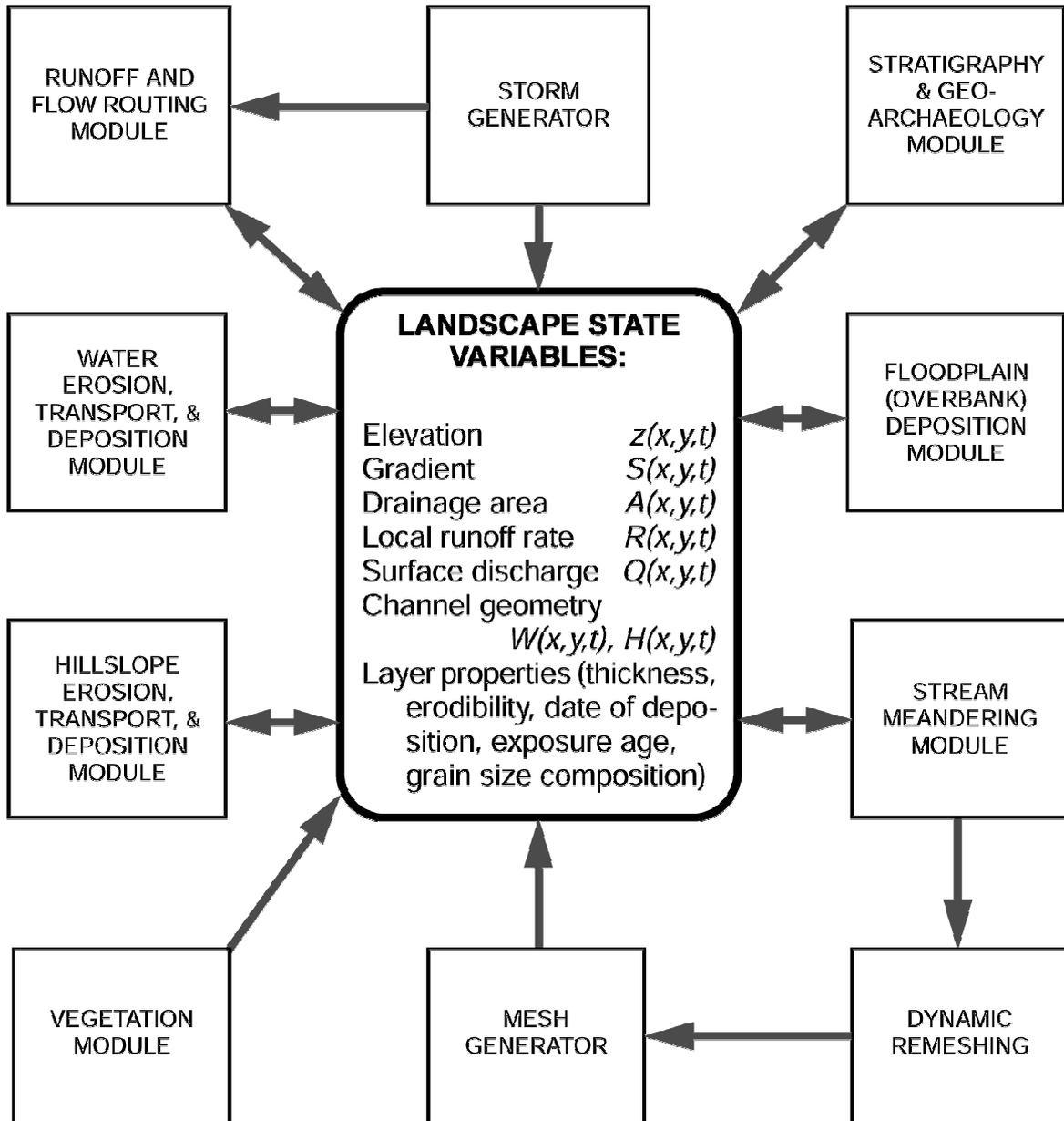
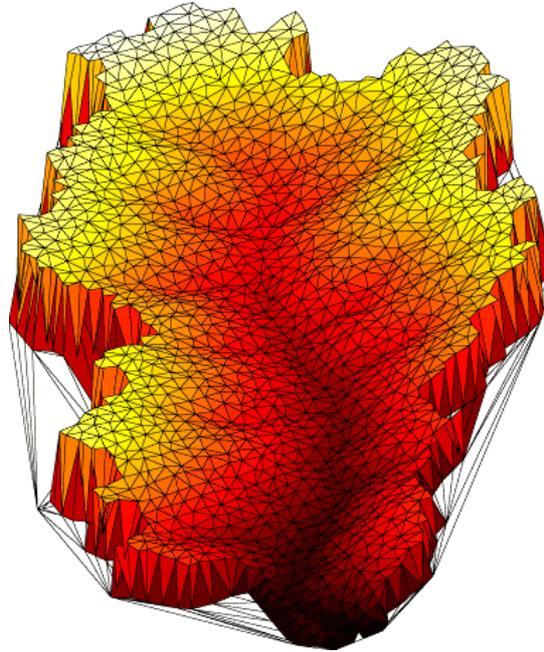


Fig. 12 - Vue d'ensemble du modèle CHILD (Tucker et al., 2001).

CHILD reprend par ailleurs les fonctionnalités de GOLEM en les améliorant (e.g., Tucker et al., 2001 ; fig. 12) :

- la stratigraphie est décrite par des paramètres supplémentaires : date de dépôt, âge d'exposition, type de dépôt (substratum ou régolithe) et granulométrie ;
- il est accessoirement possible de tenir compte de dépôts de débordement en cas de crues, et de dépôts d'origine éolienne ;
- le climat peut exercer une action continue et constante (correspondant à un climat moyen), ou intervenir sous la forme d'événements pluvieux discrets stochastiques, auquel cas les données d'entrée doivent être les distributions de :
  - l'intensité des tempêtes,

- la durée des tempêtes,
- l'intervalle entre deux tempêtes.



**Fig. 13 - Exemple de paysage simulé par le modèle CHILD, dans des conditions de soulèvement tectonique stationnaire et de tempêtes de durée et d'intensité variables.**

Notons que le ruissellement est généré par un mécanisme d'excès d'infiltration ou d'excès de saturation au choix, ce qui n'est pas sans incidence sur la forme des versants.

La sélectivité granulométrique de l'érosion, du dépôt et du transport est abordée en considérant qu'il existe une couche active à la surface de la topographie, composée de sables et de graviers dont le transport est formalisé par des équations différentes, basées sur le travail de Wilcock (1998). Cette sophistication est un progrès important, car la granulométrie est susceptible d'influencer notablement la structure et l'évolution du paysage. Gasparini *et al.* (1999) montrent à partir de CHILD que la texture du sédiment érodé s'affine vers l'aval, quelle que soit celle du substratum.

Le raffinement de la stratigraphie et la possibilité de modéliser précisément l'évolution d'une vallée ou d'une plaine d'inondation ouvrent la voie à des applications du modèle en « géoarchéologie ». Il permet en effet de reconstituer l'histoire d'une pile stratigraphique, information essentielle en géologie préhistorique.

### **c) Les modèles à automates cellulaires**

Clement **Chase** (Arizona University) propose le premier modèle 3D d'érosion-dépôt basé sur le principe des automates cellulaires (Chase, 1992). Les automates, appelés « **précipitons** », correspondent ici à des événements pluvieux élémentaires (se rapportant aux événements ayant la plus grande probabilité de se produire et la plus grande action géologique, par exemple une crue centenaire) jetés au hasard sur une

grille régulière de mailles carrées représentant la topographie. Ces précipitons se déplacent et agissent suivant des règles simples :

- un précipiton tombé sur une maille exerce une action diffusive (linéaire) sur les quatre plus proches mailles voisines,
- puis quitte sa maille d'origine pour la plus basse des huit mailles voisines - à moins que sa maille d'origine n'ait pas de voisin plus bas, auquel cas il s'arrête ;
- en érodant une quantité de matière proportionnelle à la différence d'altitude de sa chute,
- et en déposant dès qu'il a atteint sa capacité de transport, proportionnelle à la pente locale.

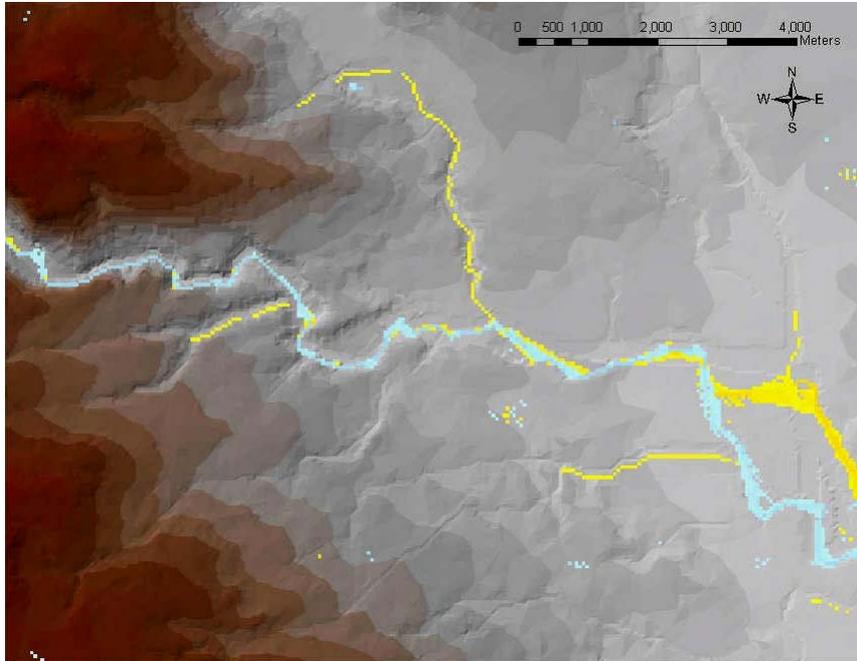
Ce modèle apparemment très simple produit des topographies complexes, presque fractales. Chase (1992) prétend que cette propriété découle de l'équilibre entre d'une part, la croissance de la rugosité due à l'érosion (à toutes les échelles), et d'autre part, le lissage dû à la diffusion (petites longueurs d'onde) et au dépôt (grandes longueurs d'onde).

Tom **Coulthard** (à présent à l'Institute of Geography and Earth Sciences, University of Wales, Aberystwyth) consacre sa thèse à la modélisation de la réponse d'un bassin aux changements environnementaux holocènes (University of Leeds, sous la direction de Kirkby et Macklin). Il développe dans ce but le modèle **CAESAR** (Cellular Automaton Evolutionary Slope And River, [6]) en choisissant la méthode des automates cellulaires en raison de l'échelle spatiale visée : quelques mètres de résolution afin de représenter les rivières de manière assez détaillée, suivant l'exemple de Murray and Paola (1994).

À la différence du modèle de rivière en tresses de Murray and Paola cependant, Coulthard cherche à représenter un bassin versant entier (de moins de 10 km<sup>2</sup>), en intégrant l'influence de la végétation et la résistance de la surface à l'érosion (e.g., Coulthard *et al.*, 1999). CAESAR prend en compte la granulométrie du sédiment en utilisant neuf classes de grains. Notons également que les écoulements ne suivent pas la direction de plus grande pente comme dans la majorité des autres modèles.

Le flux d'eau d'une cellule est au contraire distribué sur toutes les cellules voisines plus basses, suivant une pondération fonction de la pente locale. Enfin, ce modèle intègre un terme d'érosion latérale, qui lui permet de simuler le déplacement des cours d'eau (fig. 14).

Les applications de CAESAR montrent entre autres que le principal facteur limitant de l'évolution à long terme (10 ka) d'un bassin est l'apport sédimentaire des versants (en climat globalement tempéré).



**Fig. 14 - Exemple de dynamique du réseau hydrographique simulée par le modèle CAESAR de T. Coulthard, pour un contexte existant en Angleterre ; en jaune la rivière d'origine, en bleu la nouvelle après un siècle d'évolution.**

#### **d) Les modèles initiés par Beaumont**

Christopher **Beaumont** (Oceanography Department, Dalhousie University, Halifax) initie en 1992 une série de modèles d'évolution géomorphologique visant à étudier les interactions entre tectonique et processus de surface à grandes échelles spatiale et temporelle (taille et durée adaptées à l'étude d'une orogénèse - Beaumont, 1992 ; Kooi and Beaumont, 1994). Ces modèles distinguent les processus de versants, de courte portée, des processus fluviaux, de longue portée. Les premiers sont regroupés sous la forme d'une simple équation de diffusion linéaire, tandis que le réseau hydrographique évolue vers l'équilibre à un taux proportionnel au déséquilibre, suivant le « undercapacity model » décrit au § 2.2.2.h, p. 24. Dans cette équation, la longueur  $L_f$  peut prendre plusieurs valeurs :

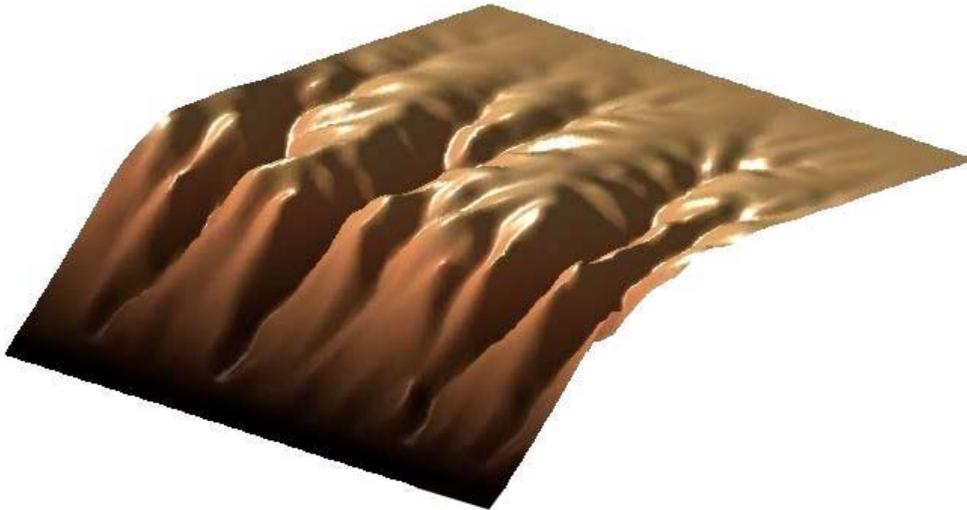
- si  $q_s > q_c$ , il y a dépôt et  $L_f = L_d$  ;
- si  $q_s < q_c$ , il y a érosion et  $L_f = L_e$ .

La capacité théorique de transport  $q_c$  est choisie proportionnelle au produit  $qS$  (cf. e.g. Bagnold, 1966).

À partir du travail de Beaumont, développé sur une grille spatiale régulière et statique, Jean **Braun** (Research School of Earth Sciences, Australian National University) établit un nouveau modèle d'évolution géomorphologique de grande échelle, appelé

**CASCADE**, utilisant une grille spatiale irrégulière et dynamique (Braun and Sambridge, 1997). Le modèle doit son nom à l'algorithme permettant d'ordonner les nœuds du maillage, qui rassemble en fait les points par aire drainée croissante – alors que la plupart des modèles jusque là ordonnaient les points du plus haut au plus bas

CASCADE peut en outre incorporer des glissements de terrain stochastiques (fonctions d'une pente critique), qui apparaissent comme le processus de versants dominants lors du retrait d'un escarpement d'échelle kilométrique (e.g., van der Beek and Braun, 1998 ; fig. 15).



**Fig. 15 - Exemple de retrait d'escarpement à long terme (plusieurs Ma) simulé par le modèle CASCADE de J. Braun.**

Par la suite, un module est ajouté afin de modéliser également l'érosion glaciaire (ICE CASCADE – Braun *et al.*, 1999). La dynamique des écoulements de glace (épaisseur et déformation des glaciers) est calculée à partir d'une approche assez sophistiquée (intégrant écoulements d'eaux sous-glaciaires, variations de la température basale et mouvements dus à la déformation interne et au glissement basal), et l'érosion conséquente est déduite de l'hypothèse de Hallet (cf. § 2.2.2.j, p. 28).

Du fait de sa méthode de maillage irrégulier dynamique, CASCADE se prête particulièrement bien à des modélisations intégrant la déformation de la topographie due à la tectonique. Le modèle a ainsi donné lieu à plusieurs études des interactions entre tectonique et processus de surface en contexte de déformation active (van der Beek and Braun, 1999 ; van der Beek *et al.*, 1999 ; Tomkin and Braun, 1999). S. Willett l'utilise notamment pour analyser l'origine possible de l'asymétrie souvent constatée des chaînes de montagnes (Willett, 1999 ; Willett *et al.*, 2001), tandis que J.H. Tomkin s'applique à regarder précisément l'influence de l'érosion glaciaire sur la morphologie des chaînes actives (Tomkin and Braun, 2002).

CASCADE est également employé par Kaufmann and Braun (2001), dans leur étude de l'influence du développement de karsts sur la dynamique géomorphologique.

### ***e) Zscape***

Le modèle Zscape a été développé par Alexander Densmore pendant sa thèse à l'Université de Memphis, à l'initiation de Michael Ellis [7]. Son but étant d'étudier l'évolution des montagnes bordées de failles (Densmore *et al.*, 1998), Zscape intègre des glissements de terrain rocheux (*bedrock landslides*) stochastiques et la déformation en réponse au fonctionnement de failles d'échelle crustale.

Les processus de surface pris en compte sont la production de régoélite, le transport par diffusion linéaire, les glissements de terrain rocheux et l'incision fluviale. L'originalité de Zscape réside dans les deux aspects suivants :

- l'intégration détaillée de la déformation, à partir d'un modèle de dislocations planaires dans un demi-espace élastique isotrope ;
- la prise en compte des glissements de terrain rocheux par un algorithme déterminant leur distribution spatiale et temporelle, reprenant les équations de Schmidt and Montgomery (cf. § 2.2.2.e, p. 21).

### ***f) Les modèles français***

Sous l'impulsion de Philippe Davy, Alain **Crave** (Géosciences Rennes) élabore durant sa thèse un modèle basé sur la méthode des marcheurs conditionnés, analogue à celui de Chase (1992). Dans ce modèle, baptisé **EROS**, les précipitons érodent suivant une loi classique de puissance du débit et de la pente, et/ou déposent suivant une équation similaire à celle de Beaumont (cf. § 2.2.2.h, p. 24), dépendant d'une longueur caractéristique de dépôt (Crave and Davy, 2001). Ainsi, en faisant varier cette longueur entre 0 et  $+\infty$ , le système évolue entre un mode limité respectivement par le transport et par le détachement. Les processus de versants sont modélisés de manière « classique », par diffusion, ruissellement et processus gravitaires.

L'originalité de ce modèle réside en fait dans la description stochastique des variables hydrauliques. Le débit local est calculé en comptant le nombre de précipitons traversant une cellule par unité de temps (aucune infiltration n'est prise en compte). Ce débit est implicitement lié à l'aire drainée de la cellule, mais il dépend essentiellement de la distribution de probabilités selon laquelle on largue les précipitons sur la topographie. On peut ainsi contrôler la distribution des précipitations et/ou des flux d'eau, tout en s'affranchissant du calcul des aires drainées à chaque pas de temps.

Initié par Francis Lucazeau (Institut de Physique du Globe de Paris), le développement du modèle **APERO** (Analyse Progressive de l'EROSion) est poursuivi par Sébastien **Carretier** durant sa thèse (Carretier, 2000a), puis dans le cadre de son travail au BRGM. APERO reprend les principaux processus d'érosion « courants » suivant une méthode classique de différences finies, en intégrant la réponse isostatique de la topographie à la redistribution des charges induite par la progression des phénomènes d'érosion. Ce modèle était en effet voué à l'origine à l'étude de l'évolution quaternaire d'un système régional en soulèvement actif (Carretier, 2000b).

Contrairement à la majorité des modèles d'évolution, APERO n'utilise pas le critère de plus grande pente dans son calcul de cheminement des écoulements. Il reprend une routine analogue à celle du modèle CAESAR, qui distribue le flux d'eau traversant une cellule à toutes les cellules voisines plus basses en pondérant les flux distribués par

les pentes locales. Cette approche permet une meilleure description du ruissellement sur des surfaces de pente faible ou au réseau hydrographique peu organisé – par exemple pour les systèmes de cônes alluviaux (Carretier, 2003). Là où le drainage est très organisé, chaque cellule n'a en général qu'une voisine plus basse et on retrouve le cheminement classique de concentration des écoulements.

Depuis l'arrivée de Peter van der Beek au Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines (LGCA, Université de Grenoble), l'équipe de ce laboratoire peut aborder la modélisation géomorphologique en reprenant CASCADE, le modèle de J. Braun.

### 2.4.3. Notes sur les modèles appliqués d'érosion de petite échelle

Parallèlement au développement de la modélisation de l'évolution géomorphologique dite « de grande échelle », ou d'échelle géologique, de nombreux modèles d'érosion ont été élaborés dans une optique d'évaluation des risques ou d'établissement de schémas d'aménagement pour la conservation des sols. Ces modèles visent donc à prédire l'érosion des sols, en tant qu'outils d'aide à la décision. Ils intègrent les processus dits d'érosion *rill* et *interrill* (ou érosion *diffuse* et *concentrée*, ou *linéaire*) par des approches empiriques ou déterministes plus ou moins analogues à celles que nous avons décrites plus haut. Ils tiennent compte par ailleurs des propriétés spécifiques des sols telles que structure, texture, cohésion, teneurs en certains éléments, et décrivent soigneusement leur comportement sous l'effet des processus érosifs (éclatement, désagrégation, etc.). Nous ne détaillons pas ici ces modèles dont la plupart sont répertoriés sur le site d'information sur l'érosion des sols [8].

Le logiciel TELEMACH, développé par le Laboratoire National d'Hydraulique d'EDF et distribué par la SOGREAH (cf. § 4.1.2.d, p. 55), est capable de modéliser des écoulements de surface libre par la méthode des éléments finis, en intégrant le transport de sédiment en charge de fond et en suspension (module SISYPHE).

## 2.5. CONCLUSION SUR LA MODÉLISATION

La construction d'un modèle d'évolution géomorphologique se base sur la distinction entre processus de versants et processus de rivières. La question principale de l'érosion fluviale demeure la formalisation du transport du sédiment, étudiée depuis des dizaines d'années par des chercheurs souvent doublés d'ingénieurs hydrauliciens, et cependant encore mal définie à l'heure actuelle. Le même problème se pose quant aux autres mécanismes d'érosion, pour lesquels plusieurs théories sont souvent disponibles entre lesquelles le choix est difficile. Les équations les plus sophistiquées ne sont pas forcément les plus adéquates, car elles impliquent généralement un grand nombre de paramètres que les données de terrain ne permettent pas toujours de caler. Inversement, les approches trop simplificatrices reposent souvent sur des hypothèses peu vérifiées dans la réalité.

Moins d'une dizaine de modèles sont apparus réellement innovants depuis le début de la vague de modélisation numérique en géomorphologie, durant les douze dernières années. Les plus satisfaisants à l'heure actuelle sont sans doute CHILD et CASCADE, développés respectivement par G. Tucker à Oxford et J. Braun à Canberra. Ces deux modèles séduisent en particulier par leur raffinement numérique, car ils utilisent un

maillage irrégulier dynamique de l'espace qui permet de tenir compte d'échelles spatiales différentes selon les processus dominants (par exemple rivières/versants), résolvant ainsi partiellement la question des transferts d'échelles.

En France, le laboratoire Géosciences Rennes élabore depuis quelques années un modèle à automates cellulaires surtout dédié à l'étude de la physique des processus et de la dynamique des systèmes. S. Carretier poursuit au BRGM le développement du modèle APERO, qui vise pour l'instant surtout à simuler l'évolution géomorphologique de systèmes en déformation active, dans l'idée d'exploiter l'analyse de la morphologie du paysage comme outil d'étude de la tectonique récente.

### 3. Données

L'acquisition et/ou l'analyse de données, naturelles ou expérimentales, constituent bien sûr un volet essentiel de toute étude géomorphologique. D'une part, l'observation de systèmes géomorphologiques réels peut initier l'élaboration de modèles. D'autre part, la confrontation aux données de terrain permet de valider ou non les modèles.

L'aspect quantitatif de la géomorphologie est un problème à la fois crucial et délicat. La compréhension des paysages et de leur évolution passe par la *mesure* de leurs caractéristiques. Or, un paysage n'est pas un objet facilement *mesurable*. Les informations les plus directement accessibles sont simplement spatiales et temporelles :

- la géométrie des formes,
- les variations de cette géométrie.

Autrement dit, l'appréhension quantitative du paysage se fait par la topographie et par la géochronologie. La géométrie actuelle est complètement caractérisée par la topographie, qui fournit souvent également des informations sur les géométries passées de la surface, à travers des marqueurs morphologiques comme les surfaces d'érosion ou de dépôt. La datation de ces marqueurs vient compléter l'information spatiale et renseigne ainsi sur la dynamique d'évolution du paysage.

Une fois le paysage qualifié dans l'espace et dans le temps par des mesures topographiques et géochronologiques, il reste encore à caractériser sa réponse aux divers processus auxquels il est soumis, en déterminant la valeur des paramètres (diffusivité, pente critique, cohésion...) apparaissant dans les équations associées. Lorsque ces paramètres ne peuvent être déduits des observations spatio-temporelles, des études plus ciblées sont nécessaires, que nous ne détaillerons pas ici en raison de leur spécificité. Nous mentionnerons cependant les données de flux, d'importance primordiale dans la description de la dynamique géomorphologique.

#### 3.1. TOPOGRAPHIE

Les données de topographie diffèrent selon l'échelle à laquelle on s'intéresse. Depuis quelques années, les modèles numériques de terrain (MNT) ou d'élévation se multiplient, devenant la source d'information topographique la plus facile à exploiter scientifiquement.

A l'échelle globale (mondiale), le meilleur jeu de données disponible depuis 1996 est GTOPO30 [14], qui résulte de la compilation de données de sources diverses (principalement de la « National Imagery and Mapping Agency » – NIMA). La résolution horizontale de ce MNT est de 30 secondes d'arc, et sa précision varie beaucoup selon la région.

La mission « Shuttle Radar Topography Mission » (SRTM) réalisée en 2000 avait pour objectif de cartographier la topographie de 80 % de la surface de la planète à haute résolution [15]. Les données brutes sont actuellement en cours de traitement

(technique de l'interférométrie radar) et devraient à terme conduire à une couverture de la topographie mondiale à une résolution horizontale de 30 m, pour une précision verticale de l'ordre de  $\pm 15$  m.

Pour des besoins de plus petite échelle, les moyens suivants peuvent être envisagés :

- relevés altimétriques par laser aéroporté, aboutissant à des MNT de l'ordre de 1 m de résolution pour une précision altimétrique de 20 cm ;
- réalisation de MNT par corrélation automatique de couples d'images stéréoscopiques optiques ou radars, satellites ou aériennes ;
- acquisition de MNT de précision décimétrique à l'aide d'un système de GPS différentiel (pour des très petites surfaces, ou des données localisées – profils topographiques par exemple).

### 3.2. GÉOCHRONOLOGIE

La datation de marqueurs morphologiques constitue une étape essentielle de l'étude de la dynamique d'un paysage. A l'heure actuelle, plusieurs techniques sont pratiquées par les géomorphologues. Elles se limitent souvent à la période quaternaire, car celle-ci est la mieux conservée.

La méthode du **radiocarbone** utilise le fait que la proportion entre les isotopes  $^{14}\text{C}$  et  $^{12}\text{C}$  de l'élément carbone reste constante dans les tissus organiques tout au long de la vie, car la radioactivité est la même que celle du  $^{14}\text{C}$  atmosphérique. A partir de la mort de l'organisme, le  $^{14}\text{C}$  n'est plus renouvelé par les échanges gazeux. Son activité décroît alors exponentiellement, avec une demi-vie de 5 570 ans. Ainsi, en comparant l'activité du carbone d'un échantillon à celle du « carbone moderne » d'un échantillon de référence, on peut en déduire la date de la mort de l'organisme échantillonné. Cette méthode s'applique à la matière organique, vestige d'organismes dont elle peut dater la mort jusqu'à environ 40 ka.

Les méthodes dites de **luminescence** exploitent la propriété qu'ont certains cristaux d'émettre de la lumière lorsqu'on les chauffe (thermoluminescence – TL) ou qu'on les éclaire (luminescence optiquement stimulée – OSL), à condition qu'ils aient été au préalable soumis à une irradiation naturelle ou artificielle. Dans le cas des matériaux géologiques, le phénomène est consécutif à l'exposition d'un sédiment à la radioactivité naturelle pendant toute la durée de son enfouissement. La datation par luminescence s'applique en géologie aux roches volcaniques et aux sédiments éoliens ou fluviaux contenant des grains fins (limons, sables fins) de quartz et/ou de feldspaths. Elle permet la détermination d'âges d'enfouissement de 0,1 à 500 ka environ.

La datation par **résonance électronique du spin** (ESR) s'apparente de près aux méthodes de luminescence, sauf que l'excitation à laquelle on soumet l'échantillon à dater est un signal de micro-ondes, et que la mesure est faite dans un fort champ magnétique.

En outre, l'ESR s'applique à la datation de quartz, mais aussi de calcite, coraux, dents et ossements, de moins de 400 ka.

La géomorphologie quantitative dispose depuis peu d'une nouvelle méthode de datation utilisant les **cosmonucléides**, c'est-à-dire les rares nucléides produits par l'interaction du rayonnement cosmique secondaire avec les silicates contenus dans les roches de surface. La mesure de la concentration de ces éléments radiogéniques ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ) produits *in situ* dans les roches conduit à l'estimation de leur durée d'exposition au rayonnement cosmique, ou du taux d'érosion affectant les surfaces où elles sont déposées.

La méthode des cosmonucléides s'applique surtout aux roches (galets ou blocs) contenant du quartz, peu sensible à l'altération et donc à d'éventuelles pertes ou contaminations. Elle permet de remonter jusqu'à quelques ka.

La méthode dite « **uranium-thorium** » utilise la radioactivité de l'isotope  $^{234}\text{U}$  de l'élément uranium. Lors de la formation des cristaux de carbonates de calcium (calcites), il y a capture de cet isotope et rejet du thorium. Le thorium détecté actuellement dans un échantillon provient donc de la désintégration de  $^{234}\text{U}$ . La mesure du rapport  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  permet ainsi de déduire directement la date de cristallisation. Cette technique concerne les carbonates, y compris les coraux, coquillages et squelettes animaux (os et dents), de 10 à 400 ka.

La **dendrochronologie** permet de dater les événements du passé récent en étudiant la croissance des cernes des troncs d'arbres. Elle prend en compte le nombre, la largeur et la dureté des cernes dans les troncs des arbres les plus anciens. Des échelles permettent aux dendrochronologues de dater avec précision les événements et les conditions climatiques des dernières 3000 à 4000 années. La datation par le radiocarbone des anneaux annuels d'arbres de longue durée par ailleurs datés par dendrochronologie a rendu possible la calibration des années de radiocarbone en années du calendrier. Suivant le même principe, le comptage de varves lacustres, qui sont des dépôts saisonniers, permet de dater des sédiments du domaine proglaciaire jusqu'à environ 13 000 ans.

### 3.3. AUTRES GRANDEURS GÉOMORPHOLOGIQUES

#### 3.3.1. Flux

##### *a) Flux d'eau*

En dehors de ses applications pratiques évidentes (aménagement du territoire, etc.), l'hydrométrie fournit accessoirement des données de calage indispensables à la modélisation de bassin versant. La mesure de débits est loin d'être un problème anodin. Différentes méthodes existent, dont il importe de connaître les limites ainsi que les conditions de bonne pratique. Un document très pédagogique est diffusé à ce sujet par le ministère de l'Environnement [9].

La technique la plus couramment utilisée est de mesurer en continu la hauteur d'eau par une station hydrométrique, pour en déduire le débit au moyen d'une courbe de tarage établie grâce à des jaugeages.

Le jaugeage consiste à effectuer une mesure instantanée de débit. Une méthode courante est l'exploration du champ de vitesse, à l'aide d'un moulinet hydrométrique.

Lorsque la configuration le permet, sur les petites rivières, le moulinet est monté sur une perche, et l'opérateur effectue la mesure en entrant dans la rivière. Pour les plus gros débits, le moulinet est monté sur un saumon, descendu dans la rivière depuis un pont, un téléphérique ou un bateau.

En pratique, on explore le champ des vitesses suivant une section transversale de la rivière, verticale par verticale. Aux endroits où les régimes d'écoulement sont réguliers et laminaires, les points de mesure peuvent être espacés. A l'inverse, on resserre le nombre de points et de verticales sur les secteurs où les variations de vitesse ou de hauteur d'eau sont importantes.

Depuis peu, on a recours au « courantomètre acoustique profileur » (ADCP pour *Acoustic Doppler Current Profiler*), qui utilise l'effet Doppler. Le capteur est installé sur une planche en surface, et envoie des ondes vers le bas. L'ADCP émet régulièrement des ondes sonores qui sont réfléchies par des particules en suspension. Lorsque le signal réfléchi revient, l'appareil se transforme d'émetteur en récepteur. Du temps de trajet entre l'émission et la réception et de la variation de fréquence entre signal émis et signal réfléchi, on déduit la direction du courant et sa vitesse à différents niveaux de la colonne d'eau. L'intégration de ces vitesses lorsqu'on déplace le capteur entre deux rives donne le débit de la rivière.

Le champ de vitesse de l'écoulement étant connu, il ne reste plus pour calculer le débit qu'à mesurer sa hauteur d'eau. L'appareil qui effectue cette mesure en continu s'appelle un limnigraphe, et se compose d'un capteur et d'un enregistreur. Les capteurs usuels sont classés en deux catégories : les capteurs directs qui mesurent une hauteur (flotteurs ou onde ultrasonore ou lumineuse) et les capteurs indirects qui mesurent une grandeur physique associée à la hauteur, cette grandeur étant le plus souvent la pression hydrostatique ou la conductivité de l'eau. L'enregistrement de la variation des hauteurs en fonction du temps se fait sur des diagrammes appelés limnigrammes. Un ensemble de mesures hauteur d'eau-débit, pour des régimes hydrologiques aussi variés que possible, fournit la courbe de tarage qui permettra ensuite de déduire directement le débit de la hauteur d'eau.

### ***b) Flux sédimentaires « instantanés »***

La mesure du flux de **sédiment en suspension** (*suspended load*) dans une rivière se fait de manière analogue à la mesure du débit. On échantillonne l'eau de la rivière, de préférence en répartissant ses prélèvements sur une section transversale où la turbulence assure un bon mélange eau-matière en suspension. On mesure ensuite la concentration des échantillons (par exemple en les filtrant à l'aide d'une pompe), qui multipliée par le débit donne directement le flux de matière en suspension.

La mesure du flux de **charge de fond** (*bedload*) est moins facile. On emploie quelquefois des pièges (paniers) que l'on dépose sur le lit de la rivière pendant une durée contrôlée, et dont on pèse ensuite le contenu (systèmes d'échantillonnage de Helley-Smith). Cette méthode est assez approximative car les pièges, qui doivent être suffisamment lourds pour rester stables dans le fond du lit, perturbent l'écoulement et ont tendance à s'enfoncer lorsque le lit est raclé sur leurs bords, sans compter que les sédiments s'en écartent à mesure qu'ils se remplissent.

Une autre option est d'installer dans le fond de la rivière une trappe dans laquelle les sédiments tombent à travers une fente (e.g., Habersack *et al.*, 2001). La trappe perturbe moins l'écoulement que des paniers, et permet de mesurer l'évolution de la quantité de sédiments piégés jusqu'à ce qu'elle soit pleine (systèmes d'échantillonnage de Birkbeck).

La charge de fond est également susceptible d'être mesurée par des méthodes (Froehlich, 2002) :

- acoustiques : des microphones sont placés dans de longs tubes dans le fond de la rivière. L'intensité du son enregistré est fonction croissante du taux de transport, tandis que sa fréquence apparaît inversement proportionnelle au diamètre des particules en mouvement ;
- magnétiques : des aimants sont insérés dans des graviers mêlés à la charge de fond en amont de la rivière. Un système électromagnétique, analogue à un détecteur de métaux, mesure le long de la rivière le passage des aimants, dont on peut choisir la taille proportionnelle à celle des graviers introduits, de manière à mesurer également la granulométrie de la charge de fond.

Ces techniques, quoique encore à l'essai, semblent prometteuses. Elles permettent notamment de mesurer les flux de charge de fond lors de crues, ce que n'autorisent pas les méthodes traditionnelles.

### **c) Flux sédimentaires à long terme**

Si l'on peut évaluer les flux de sédiments transportés par les rivières à très court terme par des mesures directes, il est beaucoup plus difficile de déterminer la production sédimentaire à plus grande échelle.

S'intéresser au flux de matière exportée d'un bassin versant oblige parfois à faire également un saut d'échelle temporelle, car il faut alors se baser sur des grandeurs plus « géologiques ». Métivier *et al.* (1999) proposent une estimation de l'accumulation sédimentaire dans les principaux bassins d'Asie depuis le début du Cénozoïque (66 Ma), à partir de cartes isopaques, de coupes et de données de puits. Leur reconstitution des volumes de sédiments mène à des valeurs dont l'erreur reste, selon les auteurs, inférieure à 50 %.

Une toute autre approche consiste à faire des bilans géochimiques. En mesurant la concentration de certains éléments chimiques (ou isotopes stables) dans les différentes fractions de matière érodée (matière dissoute, en suspension, en charge de fond, éventuellement déposée dans des plaines alluviales) et en combinant entre eux les bilans relatifs à plusieurs éléments, on peut en déduire à la fois le flux de matière total et ceux qui le composent (e.g., Galy and France-Lanord, 2001). Mise en équations, la méthode consiste à écrire le système suivant, reliant flux  $\Phi$  et concentrations  $[X]$  :

$$\begin{cases} \Phi_{total} = \Phi_{SL} + \Phi_{BL} + \Phi_{diss} + \Phi_{stock} \\ \Phi_{total}[X]_{global} = \Phi_{SL}[X]_{SL} + \Phi_{BL}[X]_{BL} + \Phi_{diss}[X]_{diss} + \Phi_{stock}[X]_{stock} \end{cases}$$

où *SL*, *BL*, *diss* et *stock* désignent respectivement la charge en suspension, la charge de fond, la charge dissoute exportées par les rivières, et la matière stockée en cours de route (avant l'arrivée à l'exutoire). En exploitant les concentrations de différents

éléments X induites par le fractionnement minéralogique entre les phases, on finit par résoudre le système des flux. L'information ainsi obtenue ne concerne ni l'instant, ni des durées géologiques comme l'approche précédente, mais le domaine de validité de la méthode n'est généralement pas précisé.

La mesure de la concentration en surface de radionucléides cosmogéniques produits *in situ* permet, sous certaines hypothèses, de remonter au taux d'érosion moyen du bassin sur le long terme (e.g., Brown *et al.*, 1995). La concentration en  $^{10}\text{Be}$  ou  $^{26}\text{Al}$  de quartz prélevé dans les rivières est reliée à ce taux de dénudation et au taux de production de cosmogéniques local, que l'on suppose représentatif du bassin dans son entier. Cette méthode s'applique si le taux d'érosion est suffisant pour qu'au moment de la mesure, la quantité de cosmogéniques ne varie plus qu'à cause de l'érosion, et non du fait de la décroissance radioactive. En outre, il faut pouvoir négliger le stockage de sédiments dans le bassin.

### 3.3.2. Bases de données

ICARE (Inventory of CAatchments for Research in Europe) est une base de données signalétiques contenant des informations sur les bassins représentatifs en Europe [10]. ICARE est rattaché au réseau européen de chercheurs en hydrologie ERB (European Research Basins) créé en 1986, et basé en France, à Lyon, au CEMAGREF (§ 4.1.2.b, p. 55). Les données rassemblées concernent des domaines divers : chimie, hydrologie, climat, biologie...

La division « Land and Water Development » de la FAO (Food and Agriculture Organization) propose une base de données de la production sédimentaire annuelle de rivières et autres réservoirs disséminés dans le monde [11]. Cette base résulte de la compilation de publications sur le sujet, et fournit des données très globales, se rapportant aux bassins dans leur entier.

Les archives de l'UNESCO concernant les débits des rivières ont été rassemblées dans une base de données globales dite « Global River Discharge Database » (RivDis, [12]). Les données de débit d'environ 1 000 stations sont ainsi répertoriées sous forme de séries temporelles.

Sous le patronage de l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO), le Global Runoff Data Centre (GRDC) centralise également les données de débits journaliers et mensuels de rivières de plusieurs milliers de stations de par le monde [13].

## 4. Projets récents et organismes impliqués

La plupart des actions scientifiques entreprises dans le domaine de l'érosion ont pour toile de fond le souci grandissant de préserver l'environnement, tout en s'en préservant. Le sol est à l'échelle humaine une ressource non renouvelable, dont il s'agit sérieusement de limiter la dégradation, en particulier d'origine anthropique. Les projets d'étude de l'érosion visent ainsi très souvent des applications concrètes de gestion de l'environnement, et concernent de ce fait principalement les domaines de l'hydrologie et de l'agriculture.

Nous recensons dans cette partie les programmes de recherche et les organisations susceptibles de favoriser, de près ou de loin, l'étude de l'érosion. La plupart des actions citées dans cette partie ont trait à des échelles de temps et d'espace restreintes, du fait de leurs objectifs très appliqués. La modélisation de l'évolution du paysage telle qu'elle nous intéresse dans ce rapport n'apparaît que rarement dans les grands programmes de recherche européens ou internationaux, car elle relève plutôt d'une recherche fondamentale qui exige peu de moyens financiers.

### 4.1. SUR LE PLAN NATIONAL

#### 4.1.1. Programmes nationaux

Durant la dernière décennie, le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), et plus spécifiquement l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), a lancé plusieurs programmes dont certaines thématiques traitaient plus ou moins explicitement de l'érosion.

Les programmes **DBT** (Dynamique et Bilan de la Terre), puis **DBTII**, lancés dans les années 1990, comportaient un volet « Fleuves et Érosion ». Citons deux exemples d'études réalisées dans le cadre de ces programmes :

- le thème « Dynamique des systèmes fluviaux au cours du Post-Glaciaire » (1990-1992 ; Université de Tours (GeEAC Géologie des Environnements Aquatiques Continentaux), Université de Bourgogne), qui visait à déterminer l'impact des variations climatiques tardiglaciaires et holocènes et des phases de défrichement anthropique sur les transferts particuliers et dissous. Cette étude a mené à la quantification de l'érosion dans trois bassins versants (10 à 1 000 km<sup>2</sup>) par mesure de flux de matière solide à partir des lacs exutoires ;
- le thème « Dynamique de l'érosion et des réseaux hydrographiques » (1995-1997 ; Géosciences Rennes), qui a initié la modélisation des processus d'érosion et de sédimentation au laboratoire de Géosciences Rennes, tant sur le plan numérique qu'expérimental.

En 1996, le programme **PROSE** (Programme de Recherche Sols et Erosion) précise la volonté de développer un domaine peu représenté en France :

- mécanismes fondamentaux du fonctionnement global des sols et de l'érosion;
- nature, réactivité et dynamique de la matière organique dans les sols;

- structuration, organisation et évolution des sols;
- modélisation de l'évolution du relief (érosion);
- rôle des sols et de l'érosion dans les cycles globaux.

Ce programme, doté de 2,2 MF au total, est dirigé par l'INSU, et également associé à l'ORSTOM pour les zones intertropicales (PEGI – Programme Environnement Géosphère Intertropicale).

Créé en 1999, le **PNSE** (Programme National de Recherche Sols et Erosion) prolonge l'action entreprise en 1996 par le Programme PROSE. Ce programme associe plusieurs organismes : le BRGM, le CNRS au travers de trois Départements (Sciences de l'Univers, Sciences Chimiques et Sciences de la Vie), l'INRA et l'IRD. Il vise à développer les deux thématiques Sols et Erosion, et favorise notamment la modélisation des processus fondamentaux qui régissent les phénomènes d'érosion continentale, ainsi que l'approche intégrée des grands cycles géochimiques et biogéochimiques.

Parmi les activités d'équipes ayant abordé le thème de l'érosion grâce au PNSE, citons les exemples suivants :

- les activités « Mécanismes élémentaires et changement d'échelle », 1997-1999, puis « Développement et dynamique de systèmes fluviaux », 1999-2000, à Géosciences Rennes ;
- l'installation d'un dispositif expérimental à l'IPGP, visant essentiellement à simuler des systèmes fluviaux ;
- l'étude de l'« Influence de l'érosion sur les flux de matière organique fossile dans les géosystèmes continentaux actuels (sols, cours d'eau) : bassins expérimentaux de Draix, Alpes de Haute Provence, France. », collaboration entre l'Université de Tours, le CEMAGREF, l'Université de Bourgogne, l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans.

Dans son appel d'offres 2001-2002, le PNSE proposait encore un 4<sup>e</sup> volet ciblant la « Modélisation de l'évolution du relief : érosion

- les processus de l'érosion : rôle et échelle des hétérogénéités liées à la diversité des matériaux et des processus ; incision fluviale ou glaciaire ; processus éoliens ;
- surfaces et paléosurfaces : méthodes de datation et intégration des données dans les bilans d'érosion ;
- géomorphologie quantitative ; mesure des flux ».

Notons que, comme il l'a été souligné lors du dernier colloque SIC (Surfaces et Interfaces Continentales – Montpellier, décembre 2002), « La modélisation numérique a été peu représentée dans les propositions reçues au PNSE, et il conviendrait d'attirer d'autres communautés. De nombreux champs scientifiques sont de grande actualité, comme la non-linéarité des systèmes, l'hétérogénéité spatiale et la hiérarchisation des échelles en relation avec une description fractale de l'organisation des sols ou encore l'hétérogénéité temporelle et la variabilité périodique (saisonnière) ».

Jusqu'à présent moins explicitement centré sur l'érosion, le **PNRH** (Programme National de Recherches en Hydrologie), commencé en 1994, intègre désormais

l'érosion hydrique et la dynamique fluviale aux échelles fines et moyennes, qui relevaient précédemment du PNSE [16].

Le programme **ECLIPSE** (Environnement et CLimat du Passé : hiStoire et Evolution, 2000-2004) est l'un des sept programmes lancés par le CNRS en 2000, et vise à accroître la compréhension des processus naturels qui ont contrôlé l'environnement terrestre dans le passé, leur variabilité spatiale et temporelle, ainsi que la compréhension des relations entre systèmes environnementaux et écologiques [17]. Or, l'érosion est un des moyens primordiaux par lequel le climat exerce son influence sur l'environnement. Le thème de l'érosion est notamment abordé à travers :

- l'étude des différents stocks de carbone et des échanges entre les réservoirs, dont l'un des buts est la quantification de l'impact de l'orogénèse et de l'érosion sur le bilan du carbone continental ;
- l'étude de la variabilité de la mousson en Asie au cours du Cénozoïque et de l'Holocène, clairement mise en évidence dans la morphologie des reliefs.

#### **4.1.2. Organismes nationaux**

Hormis le CNRS responsable des grands programmes nationaux sus-cités, d'autres organismes (publics ou non) sont susceptibles d'être associés à des travaux traitant de l'érosion. Nous en citons ici quelques-uns qui abordent explicitement ce thème parmi leurs projets.

##### ***a) L'IRD***

L'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), qui s'intéresse aux relations entre l'homme et son environnement dans la zone intertropicale, comporte notamment une unité de recherche « Erosion et Changements d'Usage des terres » (ECU, [18]). Cette unité de recherche a pour objectif essentiel de comprendre l'érosion agricole. L'IRD est également impliqué dans l'unité mixte de recherche LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Grenoble) qui aborde la géomorphologie par des sujets tels que [19] :

- l'impact anthropique sur la morphologie des cours d'eau ;
- la modélisation numérique du ruissellement dans les bassins (TOPSIMPLE, dérivé de TOPMODEL) ;
- la modélisation expérimentale des interactions sols-écoulements (mise en place de PERSE : Plate-forme Expérimentale Sols et Ecoulements), notamment pour étudier l'effet érosif de la pluie sur le micro-relief des sols.

##### ***b) Le CEMAGREF***

Le CEMAGREF (CEntre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts) est un institut public de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement [20]. L'un de ses cinq axes de recherche principaux est la compréhension du bassin versant, d'un point de vue essentiellement hydrologique. Le thème de recherche TRANSFEAU se focalise ainsi sur les transferts en bassins versants et réseaux hydrographiques [21]. Dans ce cadre, un groupe de recherche est constitué autour du problème de l'érosion torrentielle [22]. Son objectif est d'améliorer

la protection contre les risques torrentiels par une meilleure définition des zones à risques et une conception mieux adaptée des ouvrages de correction.

Le CEMAGREF a développé dans cette optique l'utilisation de « Bassins Versants de Recherche Expérimentaux », les BVRE. Ces bassins, de petite ou moyenne taille (centaine de km<sup>2</sup>), sont de véritables laboratoires de terrain, spécialement choisis pour être observés et étudiés dans le temps. Ils sont équipés d'appareils de mesure des précipitations, des débits, de température ou d'autres capteurs de l'environnement aquatique. Les chercheurs peuvent ainsi observer, en grandeur nature, les différents phénomènes qui s'y jouent : précipitations, ruissellement de l'eau dans le bassin versant, écoulement des cours d'eau, formation des crues, évolution de l'écosystème aquatique.

Le plus ancien BVRE est celui de l'Orgeval, en Brie, créé par le CEMAGREF en 1962. C'est dans ce bassin versant de recherche qu'ont débuté, en 1981, les premiers travaux sur les modèles pluie-débit. En France, il existe une douzaine de BVRE répartis sur tout le territoire, chacun présentant des particularités géographiques, climatiques ou géologiques spécifiques.

Créés dans les années 1983-1984, les bassins versants expérimentaux de Draix-Le Brusquet ont pour principale caractéristique la mesure du transport solide dans des conditions de forte torrentialité. Situé sur des terrains marneux des Alpes du Sud-Est de la France, ils permettent des travaux de recherche sur des sujets très variés, qui portent sur l'étude des phénomènes physiques (crues, transport solide, érosion, etc.), et celle des phénomènes biologiques (revégétalisation, dynamique de la végétation en période de déprise agricole, etc.), thèmes auxquels il faut ajouter les recherches en instruments de mesure adaptés aux conditions particulièrement difficiles qu'on y rencontre.

L'équipe du CEMAGREF développe en outre un modèle d'érosion des torrents en crue (ETC), visant à simuler le comportement hydrologique et érosif des bassins versants. Les travaux du CEMAGREF sont principalement financés par les programmes nationaux et les PCRD (cf. § 4.1.1. et 4.2.).

### ***c) Le BRGM***

La modélisation géomorphologique s'intègre au moins dans deux thématiques développées au BRGM :

- en sismotectonique, la géomorphologie quantitative permet d'identifier les descripteurs morphologiques les plus pertinents pour la reconnaissance des déformations tectoniques superficielles, en fonction du domaine tectono-climatique. Dans ce dessein, une approche de modélisation numérique des processus superficiels est nécessaire pour permettre d'interpréter les observations morphométriques dans un cadre déterministe s'intéressant au processus de transport élémentaire (cf. modèle APERO développé par S. Carretier à ARN/MAS - § 2.4.2.f, p. 44) ;
- en dynamique fluviale, la modélisation constitue bien sûr un outil de prédiction des scénarii possibles d'évolution du réseau hydrographique en fonction des forçages externes, tectonique et climatique.

Le BRGM s'implique en outre dans la recherche sur l'érosion à petite échelle à travers des activités très appliquées, comme la coordination du projet européen FLOODGEN (cf. § 4.2) ou la participation à la cartographie de l'Aléa Erosion des Sols (cf. § 4.1.3.).

#### **d) Autres**

L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) participe à la recherche nationale sur l'érosion dans une optique très appliquée au domaine agricole. Il s'est notamment impliqué dans le projet national de cartographie de l'Aléa Erosion des Sols en France (cf. § 4.1.3.) et dans le projet européen FLOODGEN (cf. § 4.2.).

Parmi les entreprises privées dont les activités touchent à la thématique de l'érosion, citons la Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques (SOGREAH) qui fournit des services de conseil et d'ingénierie principalement dans les secteurs de l'eau et de l'environnement [23]. La SOGREAH propose par exemple la réalisation d'études de bassins versants, du point de vue hydrologique ou sédimentaire selon la demande (par exemple : étude du transport solide du Rhône, gestion intégrée de vallée de la Somme). Elle distribue en outre des logiciels d'applications hydrauliques comme le système TELEMAC développé par le Laboratoire National d'Hydraulique d'EDF, capable de modéliser des écoulements en surface libre aussi bien dans le domaine fluvial que dans le domaine maritime [24].

Le Groupe d'Hydraulique Numérique (GHN), créé à l'initiative du Centre d'Études Techniques Maritime et Fluvial (CETMEF) et de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), s'intéresse aux problèmes d'hydrodynamique et de transport de sédiment [25]. Le travail de modélisation de l'évolution des fonds mobiles en mer et en rivière par éléments finis mené par ce groupe a conduit à l'élaboration du logiciel de transport saturé SISYPHE. L'évolution de milieux marins ou fluviaux peut être simulée en tenant compte de l'érosion et du dépôt de sédiments non-cohésifs, à granulométrie homogène. SISYPHE complète le logiciel TELEMAC en tant que module de transport de la charge de fond.

### **4.1.3. Projets nationaux**

D'autres projets de visée plus modeste touchant à l'étude de l'érosion prennent place au niveau national. Nous en citons ci-après quelques exemples.

Une cartographie de l'Aléa Erosion des Sols en France [26] a été réalisée à la demande conjointe de l'IFEN (Institut Français de l'ENvironnement) et du MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement). Elle fait suite à un inventaire des coulées de boue au cours des dix dernières années, qui a mis en évidence l'importance des phénomènes d'érosion dans la plupart des régions de France bien au-delà des zones classiques de montagne ou de la bordure méditerranéenne. Seuls les problèmes d'érosion dans les zones agricoles sont abordés.

La réalisation de cette étude a été suivie par un comité scientifique composé de quatre experts appartenant à différents organismes concernés par l'érosion des sols : CNRS-Strasbourg, BRGM-Orléans, CEMAGREF-Lyon, INRA-Montpellier.

Le ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) et la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES) ont mis en place, sur la période 1999-2004, le programme de recherche GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique) [27]. Ce programme fédérateur constitue le volet « Impacts » du dispositif national de recherche sur l'atmosphère et le climat.

L'une des premières études réalisées dans le cadre du GICC concernait les « impacts potentiels du changement climatique sur le bassin versant du Rhône en vue de leur gestion » (CEMAGREF-Groupement de Lyon).

Le GIS-ECOBAG (Groupement d'Intérêt Scientifique Ecologie et Economie du Bassin Adour-Garonne) est un réseau interrégional de recherche finalisée. Ce pôle d'excellence regroupe 30 entités de recherche et 170 scientifiques et fédère ainsi les compétences de recherche des régions Aquitaine et Midi-Pyrénées dans le domaine de l'écologie, de l'économie et de la gestion des eaux continentales.

L'un des projets du GIS-ECOBAG concernait les transferts fluviaux de matières dans les bassins versants [28]. Des mesures de quantité de matières en suspension (MES) et de teneurs en carbone organique ont été effectuées dans ces bassins pendant deux à trois cycles annuels par les classes « Eco-fleuves ». Ces suivis ont mis en évidence l'importance des phases de crue ainsi que la grande variabilité interannuelle des flux.

## 4.2. SUR LE PLAN EUROPÉEN

Le **PCRD** (Programme Cadre de Recherche et Développement) est le principal instrument communautaire pour financer la recherche en Europe [29]. Les derniers PCRD soutenaient particulièrement la recherche concernant les ressources en eau douce et la désertification.

Les PCRD ont favorisé des travaux comme le projet MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use [30]), initialement soutenu par le programme EPOCH (Paléoclimatologie des 30 derniers millénaires, 1990-1993) de la DGXII de la CEE. MEDALUS comporte un gros volet de modélisation de l'érosion, à petite et grande échelle spatiale (MEDALUS et MEDRUSH respectivement) et à court terme (<100 ans), développé par M. Kirkby (University of Leeds). De nombreux projets mentionnant plus ou moins explicitement l'étude de l'érosion sont ainsi financés par la communauté européenne [29].

La modélisation géomorphologique pourrait s'intégrer dans des projets centrés sur d'autres sujets, comme la tectonique ou l'impact des changements climatiques.

Le projet FLOODGEN (Flood risk reduction by space borne recognition of indicators of excess runoff generating areas), lancé dans le cadre du 4<sup>e</sup> PCRD sur la période 1997-2000, ciblait surtout le problème des risques d'inondation, l'élaboration de leur cartographie et d'un outil d'aide à la décision en matière de politique agricole [31].

Ce projet, coordonné par le BRGM, associait plusieurs institutions de divers pays européens. L'INRA a notamment participé en développant le modèle STREAM (Sealing and Transfert by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management [32]). Ce modèle de ruissellement et d'érosion peut être utilisé en tant qu'outil d'aide à

la décision (simulations) et fonctionne avec des données d'acquisition facile. Il s'applique à l'origine au contexte des sols cultivés du Nord de la France, sensibles aux phénomènes de battance.

Le modèle permet, pour un bassin versant donné, d'élaborer un réseau d'écoulement en tenant compte des aménagements humains et des pratiques agricoles, de calculer un bilan infiltration/ruissellement en chaque point du bassin et un volume ruisselé à l'exutoire.

**COST** (European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research) est un organisme intergouvernemental dont la vocation est de coordonner les recherches nationales au niveau européen. Les actions de COST relèvent de la recherche fondamentale comme des activités d'utilité publique.

L'« action 623 » de COST, lancée en 1997, s'intitule « Soil Erosion and Global Change » [33]. Les objectifs affichés de cette action sont :

- de prédire avec réalisme l'impact des changements du climat et de l'environnement sur l'érosion des sols à travers la gamme de toutes les échelles spatiales et temporelles ;
- d'identifier les seuils critiques dans le paysage et les sols qui mènent à des changements irréversibles dans les modes et les taux d'érosion, et de développer les marqueurs capables de prédire ces changements irréversibles ;
- d'identifier et de rassembler des jeux de données documentant l'érosion historique et actuelle.

D'autres organisations comme l'ESF (European Science Foundation) sont susceptibles de financer des travaux touchant à la modélisation de l'érosion, mais peu d'actions sont en cours à ce sujet.

En général, la géomorphologie n'est pas citée explicitement dans ces programmes de recherche. L'objet bassin versant n'apparaît que dans le problème de la gestion des ressources en eau, et l'érosion dite « des sols » est traitée dans une optique de lutte contre la désertification ou l'appauvrissement des terres (cf. 6<sup>e</sup> PCRD [34]). La modélisation géomorphologique est encore peu développée en Europe.

## 4.3. SUR LE PLAN INTERNATIONAL

### 4.3.1. Programmes internationaux

Le programme **IGBP** (International Geosphere-Biosphere Programme) est un programme scientifique international lancé en 1986 par l'ICSU (International Council of Scientific Unions), qui a pour vocation de promouvoir la recherche scientifique à l'échelle internationale [35]. L'objectif du programme IGBP est la description et la compréhension des processus physiques, chimiques et biologiques qui interagissent pour réguler le système terrestre, ainsi que leurs changements et leur évolution liée à l'action anthropique. Ce programme est essentiellement financé par des agences nationales ou régionales (européennes par exemple).

**GTCE** (Global Change and Terrestrial Ecosystem) est un des projets d'origine du programme IGBP [36]. Ses objectifs scientifiques sont de :

- prédire les effets des changements du climat, de la composition atmosphérique et de la gestion de l'environnement sur les écosystèmes terrestres, en particulier l'agriculture, les forêts, les sols, et la biodiversité ;
- déterminer quelles peuvent être les rétroactions de ces effets sur l'atmosphère et le système climatique physique.

Parmi ses quatre thèmes principaux, le troisième est consacré à l'agroécologie et aux systèmes de production. A ce titre, le GTCE a mis en place dans le cadre de l'action 623 de COST (cf. § 4.2.) un réseau international sur l'érosion des sols (Soil Erosion Network) notamment appelé à développer et adapter la modélisation de l'érosion afin de pouvoir étudier les changements globaux à des échelles régionales aussi bien que locales [37].

**PAGES** (PAst Global Changes) est un programme international initié il y a dix ans par le programme IGBP également. Parmi ses cinq axes de recherche principaux figure **LUCIFS** (Land Use and Climate Impacts on Fluvial Systems during the Period of Agriculture), voué à [38] :

- la quantification des changements du paysage et des flux actuels et passés d'eau, de sédiment, et d'éléments chimiques ;
- l'identification dans le bassin versant des facteurs actuels et passés contrôlant ces flux, l'identification de la rétroaction de ces changements de flux, à la fois sur la société humaine et sur les cycles biogéochimiques.

La modélisation entre pour une grande part dans les objectifs de ce projet, qui cherche à développer des « modèles semi-mécanistiques simulant le mouvement des sédiments et des éléments chimiques à travers les bassins versants, suite à des perturbations ».

#### 4.3.2. Organismes étrangers

Aux Etats-Unis, la National Science Foundation (NSF) finance la recherche scientifique dans tous les domaines, y compris les sciences de la Terre (Division of Earth Sciences - EAR), et notamment en géomorphologie [39].

Les objectifs des projets entrepris sont :

- le développement des théories des processus,
- la surveillance des systèmes naturels (observation et quantification),
- la modélisation expérimentale et numérique,
- la confrontation entre théorie, observation et modélisation, et la comparaison avec
- l'étude de l'histoire du paysage et du climat auquel il a été soumis.

Le corps d'ingénieurs de l'armée américaine participe également largement à la recherche scientifique, dans des domaines très divers.

Les travaux de G. Tucker et de ses collaborateurs (modèles GOLEM et CHILD, § 2.4.2.b, p. 36 ont par exemple été financés par l'USA-CERL (U.S. Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratories), ainsi que par le U.S. Army Research Office. En outre, le Conseil National de Recherche Italien a également contribué à l'élaboration du modèle CHILD.

La NASA (National Aeronautics and Space Administration), agence gouvernementale américaine, est naturellement impliquée dans la recherche en géomorphologie puisqu'elle fournit de nombreux supports d'observation du paysage (images satellitaires et produits dérivés comme les modèles numériques de topographie). Ces données sont très utiles dans toute entreprise de modélisation des processus de surface, pour renseigner, calibrer les modèles, et comparer les résultats de simulations à la réalité.

L' « Office of Mission to Planet Earth » de la NASA a financé l'élaboration du modèle Zscape par A. Densmore (cf. §2.4.2.e, p. 44). La branche « Geodynamics » de la NASA comporte un programme « Topography and Surface Change » dont l'objectif affiché est de comprendre les processus qui façonnent la morphologie superficielle de la planète, à partir des enregistrements que constitue la topographie terrestre.



## 5. Conclusions et perspectives

La modélisation de l'évolution du paysage a considérablement progressé durant cette dernière décennie. La description et la formalisation des mécanismes élémentaires participant de l'érosion, quoique souvent basées sur des études anciennes, ne sont pas réellement abouties, puisque l'on cherche aujourd'hui encore à les améliorer. En outre, la diversité des approches proposées remet en question la validité des équations utilisées.

La prédiction absolue de l'évolution du paysage est impossible, car de trop grosses incertitudes demeurent quant aux phénomènes climatiques et tectoniques qui la contraignent. Les différents modèles déjà développés permettent néanmoins d'évaluer des réponses possibles du paysage à certaines sollicitations imposées. Ces études de sensibilité demandent encore à être poursuivies, avec confrontation aux données, pour aboutir à une bonne calibration des modèles.

L'état de l'art présenté dans ce rapport dégage plusieurs axes de recherche intéressants à approfondir dans le domaine de la modélisation de la dynamique géomorphologique :

- les données géomorphologiques disponibles sont à la fois rares et locales. Pourtant ces données sont indispensables à la progression des modèles, à la calibration des lois et au test de leur validité. Le problème délicat de l'acquisition de données (par exemple : suivi des flux hydrauliques et sédimentaires en période de crue, contrôle de la granulométrie du sédiment transporté) est loin d'être résolu ;
- de nombreux modèles emploient des lois empiriques hors de leur contexte d'origine, sans vérifier qu'elles sont encore valables. Même s'il est pratiquement impossible de construire un modèle d'évolution sur des bases rigoureusement mécanistiques, il serait souhaitable de vérifier au préalable que les lois empiriques utilisées ne constituent pas des approximations trop exagérées, notamment à cause des transferts d'échelle auxquels on procède sans doute parfois abusivement. En d'autres termes, les domaines de validité des lois phénoménologiques doivent être clarifiés, par exemple par la confrontation directe aux données ;
- certains effets de seuils sont déjà pris en compte par la plupart des modèles (existence d'une contrainte critique nécessaire à l'initiation du transport sédimentaire, d'une pente critique d'instabilité de terrain...). Leur importance est capitale dans l'évolution des paysages, car ils peuvent modifier radicalement la dynamique de certains processus. Intégrer ces effets de seuil implique également de ne pas négliger tous les phénomènes susceptibles de les déclencher. Ainsi, la stochasticité du climat est un élément essentiel qui doit apparaître dans les modèles, car les crues qui en résultent modifient radicalement le type d'érosion provoquée et son intensité. Pourtant, peu de modèles incluent cet aspect stochastique, la plupart moyennant le climat par souci de simplicité (parce que le pas de temps du calcul ne permet pas de tenir compte des catastrophes) ;
- sans chercher à sophistiquer systématiquement les modèles, certains détails jusqu'ici éludés ou simplifiés demanderaient à être ajoutés, ne serait-ce que pour étudier leur possible impact sur l'évolution de systèmes réels. Par exemple, la végétation n'intervient que rarement dans les modèles, ou très sommairement

(CHILD), alors que son action sur l'érodabilité des versants ne laisse aucun doute. De même, l'hypothèse est presque toujours faite que la largeur des rivières suit une loi de proportionnalité constatée sur certaines rivières alluviales ( $W \propto \sqrt{Q}$ ), mais l'évolution de cette largeur devrait s'inscrire dans la modélisation de la dynamique du système au même titre que celle d'autres paramètres.

L'examen des actions récentes et en cours dans la recherche scientifique nationale et internationale montre de flagrantes lacunes au niveau français, voire européen, dans l'élaboration de modèles d'évolution du paysage. Les Etats-Unis ont au contraire beaucoup contribué au développement de tels modèles, et la géomorphologie quantitative figure en bonne place dans les grands programmes de recherche en sciences de la Terre comme celui de la NASA.

Développer la modélisation de l'évolution du paysage au BRGM présenterait plusieurs intérêts :

- valoriser les résultats de projets en cours comme l'étude de la dynamique fluviale ou de la dynamique torrentielle ;
- fournir ou améliorer des outils d'analyse du relief en termes de déformation récente (étude comparée des influences respectives de la tectonique et du climat sur la dynamique géomorphologique) ;
- s'insérer dans le grand axe de recherche en plein essor (au niveau international) qui concerne l'étude des changements climatiques à long terme et de leurs implications.

La thématique exposée dans ce rapport englobe en fait une grande partie des risques naturels déjà considérés au sein de l'unité ARN. Les compétences en matière de mouvements de terrain et de dynamique fluviale, et les données recueillies au cours d'actions passées ou présentes (par exemple, suivi des crues à la Réunion), seraient avantageusement mises à profit dans le perfectionnement du modèle APERO (§ 2.4.2.f, p. 44).

## Bibliographie

- Ahnert F. (1976) - Brief description of a comprehensive three-dimensional process-response model of Landform development. *Zeit. Geomorph. Suppl.*, **25**, 29-49.
- Armstrong A.C. (1976) - A three-dimensional simulation of slope forms. *Zeit. Geomorph. Suppl.*, **25**, 20-28.
- Bagnold R.A. (1966) - An approach to the sediment transport problem from general physics. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 422-I.
- Beaumont C., Fullsack P., and Hamilton J. (1992) - Erosional control of active compressional orogens. In *Thrust Tectonics*, edited by K.R. McClay, p. 1-18, Chapman and Hall, New York.
- Beek P.v.d. and Braun J. (1998) - Numerical modelling of landscape evolution on geological time-scales : a parameter analysis and comparison with the southeastern highlands of Australia. *Basin Res.*, **10**, 49-68.
- Beek P.v.d., and Braun J. (1999) - Control on post-mid Cretaceous landscape evolution in the southeastern highlands of Australia: insights from numerical surface process models. *J. Geophys. Res.*, **104**, 4945-4966.
- Beek P.v.d., Braun J. and Lambeck K. (1999) - Post-Palaeozoic uplift history of southeastern Australia revisited: results from a process-based model of landscape evolution, *Australian Journal of Earth Sciences*, **46**, 157-172.
- Bras R.L., Tucker G.E. and Teles V.T. (2003) - Six myths about mathematical modeling in geomorphology. In *Prediction in Geomorphology*, edited by R.M. Iverson, and P. Wilcock, p. 63-79, AGU.
- Braun J. and Sambridge M.S. (1997) - Modelling landscape evolution on geologic time scales: a new method based on irregular spatial discretization. *Basin Res.*, **9**, 27-52.
- Braun J., Zwartz D. and Tomkin J.H. (1999) - A new surface processes model combining glacial and fluvial erosion. *Annals of Glaciology*, **28**, 282-290.
- Brown E.T., Stallard R.F., Larsen M.C., Raisbeck G.M. and Yiou F. (1995) - Denudation rates determined from the accumulation of in situ-produced <sup>10</sup>Be in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **129**, 193-202.
- Carretier S. (2000) - Cycle sismique et surrection de la chaîne de Gurvan Bogd (Mongolie). Approche de la géomorphologie quantitative, Montpellier 2.
- Carretier S., Lucazeau F. and Nivière B. (2003) - Effect of alluvial frontal basin on the erosion dynamic of mountain ranges. In *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, Nice, France.

- Carretier S., Lucazeau F. and Ritz J.F. (2000) - Estimating Geological Uplift Rate Along The Gurvan Bogd Range (Mongolia) Using Geomorphic Analysis and Modelling. *In Eos Trans. AGU, Fall Meet. Suppl.*
- Chase C.G. (1992) - Fluvial landsculpting and the fractal dimension of topography, *Geomorphology*, **5**, 39-57.
- Coulthard T.J., Kirkby M.J. and Macklin M.G. (1999) - Modelling the impacts of Holocene environmental change in an upland river catchment, using a cellular automaton approach. *In Fluvial processes and environmental change*, edited by Browne, and Quinne, p. 31-46, Wiley, Chichester.
- Crave A. and Davy P. (2001) - A stochastic 'precipiton' model for simulating erosion/sedimentation dynamics. *Computers & Geosciences*, **27**, 815-827.
- Culling W.E.H. (1960) - Analytical theory of erosion. *J. Geology*, **68**, 336-344.
- Densmore A.D., Ellis M.A. and Anderson R.S. (1998) - Landsliding and the evolution of normal-fault bounded mountains. *J. Geophys. Res.*, **103**, 15, 203-15,220.
- Dietrich W.E., Bellugi D.G., Sklar L.S., Stock J.D., Heimsath A.M. and Roering J.J. (2003) - Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics. *In Prediction in Geomorphology*, edited by R.M. Iverson, and P. Wilcock, pp. 103-132, AGU.
- Einstein H.A. (1941) - Formulas for the transportation of bed load. *American Society of Civil Engineers Proceedings*, **67**, 351-367.
- Froehlich W. (2002) - Monitoring of bed load transport in streams by use of acoustic and magnetic device. *In Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances*, Oslo.
- Galy A. and France-Lanord C. (2001) - Higher Erosion rates in the Himalaya: geochemical constraints on riverine fluxes. *Geology*, **29**, 23-26.
- Gasparini N.M., Tucker G.E. and Bras R.L. (1999) - Downstream Fining through Selective Particle Sorting in an Equilibrium Drainage Network. *Geology*, **27**, 1079-1082.
- Habersack H.M., Nachtnebel H.P. and Laronne J.B. (2001) - The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river. *J. Hydraul. Res.*, **39** (2), 125-133.
- Haff P.K. (1996) - Limitations on Predictive Modeling in Geomorphology. *In The Scientific Nature of Geomorphology*, edited by B. Rhoads, and C. Thorn, John Wiley, New York.
- Hallet B. (1979) - A theoretical model of glacial abrasion. *J. Glaciol.*, **23** (89), 39-503.

- Heimsath A.M., Dietrich W.E., Nishiizumi K. and Finkel R.C (1999) - Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth. *Geomorphology*, **27**, 151-172.
- Hergarten S. and H.J. Neugebauer (1998) - Self-organized criticality. *In a landslide model. Geophys. Res. Lett.*, **25**, 801-804.
- Howard A.D. (1980) - Thresholds in river regimes. *In Thresholds in Geomorphology*, edited by D.R. Coates, and J.D. Vitek, p. 227-258, Allen and Unwin, Concord, Mass.
- Howard A.D. (1994) - A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resour. Res.*, **30**, 2261-2285.
- Howard A.D. and Kerby G. (1983) - Channel changes in badlands. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **94**, 739-752.
- Kaufmann G. and Braun J. (2001) - Modelling karst denudation on a synthetic landscape. *Terra Nova*, **13**, 313-320.
- Kirkby M.J. (1986) - A two-dimensional simulation model for slope and stream evolution. *In Hillslope Processes*, edited by A.D. Abrahams, 203-222, Allen and Unwin.
- Kirkby M.J. (1996) - A Role for Theoretical Models in Geomorphology? *In The Scientific Nature of Geomorphology*, edited by B. Rhoads, and C. Thorn, John Wiley, New York.
- Kooi H. and Beaumont C. (1994) - Escarpment evolution on high-elevation rifted margins; Insights derived from a surface-processes model that combines diffusion, advection and reaction. *J. Geophys. Res.*, **99**, 12,191-12,209.
- MacKean J.A., Dietrich W.E., Finkel R.C., Southon J.R. and Caffee M.W (1993) - Quantification of soil production and downslope creep rates from cosmogenic <sup>10</sup>Be accumulations on a hillslope profiles. *Geology*, **21**, 343-346.
- Métivier F., Gaudemer Y., Tapponnier P. and Klein M. (1999) - Mass accumulation rates in Asia during the Cenozoic. *Geophys. J. Int.*, **137**, 280-318.
- Montgomery D.R. and Dietrich W.E. (1994) - A Physically-Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding. *Water Resour. Res.*, **30**, 1153-1171.
- Murray A.B. and Paola C. (1994) - A cellular model of braided streams. *Nature*, **371**, 54-57.
- Phillips J.D. (1996) - Nonlinear dynamics and predictability in geomorphology. *In The Scientific Nature of Geomorphology*, edited by B. Rhoads, and C. Thorn, 315-336, John Wiley, New York.
- Raudkivi A.J. (1967) - *Loose Boundary Hydraulics*. Pergamon Press, New York.

- Roering J.J., Kirchner J.W. and Dietrich W.E. (2001) - Hillslope evolution by nonlinear, slope-dependent transport: Steady state morphology and equilibrium adjustment timescales. *J. Geophys. Res.*, **106** (B8), 16499-16513.
- Schmidt K.M. and Montgomery D.R. (1995) - Limits to relief. *Science*, **270**, 617-620.
- Schorghofer N. and Rothman D.H. (2001) – A causal relations between topographic slope and drainage area. *Geophys. Res. Lett.*, **29** (13).
- Seidl M.A. and Dietrich W.E. (1992) - The problem of channel erosion into bedrock. *Catena Suppl.*, **23**, 101-124.
- Shields A. (1936) - Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, *Mitt. der Preuss. Versuchsanst. für Wasserbau und Schiffbau*, Heft **26**.
- Sklar L. and Dietrich W.E. (1998) - River longitudinal profiles and bedrock incision models: Stream power and the influence of sediment supply. *In Rivers Over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels*, edited by K.J. Tinkler, and E.E. Wohl, p. 237-260, AGU, Washington, D.C.
- Sklar L. and Dietrich W.E. (2001) - Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock. *Geology*, **29** (12), 1087-1090.
- Small E.E., Anderson R.S. and Hancock G.S. (1999) - Estimates of the rate of regolith production using <sup>10</sup>Be and <sup>26</sup>Al from an alpine hillslope. *Geomorphology*, **27**, 131-150.
- Snyder N.P., Whipple K.X., Tucker G.E. and Merritts D.J. (2003) - Importance of a stochastic distribution of floods and erosion thresholds in the bedrock river incision problem. *J. Geophys. Res.*, **108** (B2).
- Stock J. and Dietrich W.E. (2003) - Valley incision by debris flows: Evidence of a topographic signature. *Water Resour. Res.*, **39** (4).
- Tomkin J.H. and Braun J. (1999) - Simple models of drainage reorganisation on a tectonically active ridge system. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **42**, 1-10.
- Tomkin J.H. and Braun J. (2002) - The influence of alpine glaciation on the relief of tectonically active mountain belts. *Amer. J. Sci.*, **302**, 169-190.
- Tucker G.E. and Bras R.L. (1998) - Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology. *Water Resour. Res.*, **34**, 2751-2764.
- Tucker G.E. and Bras R.L. (2000) - A stochastic approach to modeling the role of rainfall variability in drainage basin evolution. *Water Resour. Res.*, **36** (7), 1953-1964.
- Tucker G.E., Lancaster S.T., Gasparini N.M. and Bras R.L. (2001) - The Channel-Hillslope Integrated Landscape Development (CHILD) Model. *In Landscape Erosion*

*and Evolution Modeling*, edited by R.S. Harmon, and W.W.D. III, p. 349-388, Kluwer Academic/Plenum.

Tucker G.E. and Slingerland R.L. (1994) - Erosional Dynamics, Flexural Isostasy, and Long-Lived Escarpments. *J. Geophys. Res.*, **99**, 12,229-12,243.

Tucker G.E. and Slingerland R.L. (1996) - Predicting sediment flux from fold and thrust belts. *Basin Res.*, **8**, 329-349.

Wilcock P. (1998) - Two-fraction model of initial sediment motion in gravel-bed rivers. *Science*, **280**, 410-412.

Willett S.D. (1999) - Orography and Orogeny: The Effects of Erosion on the Structure of Mountain Belts. *J. Geophys. Res.*, **104** (B12), 28,957-28,981.

Willett S.D., Slingerland R.L. and Hovius N. (2001) - Uplift, Shortening and Steady State Topography in Active Mountain Belts. *Amer. J. Sci.*, **301**, 455-485.

Willgoose G.R., Bras R.L. and Rodriguez-Iturbe I. (1991) - A physical explanation of an observed link area-slope relationship. *Water Resour. Res.*, **27** (7), 1697-1702.

Willgoose G.R., Bras R.L. and Rodriguez-Iturbe I. (1991) - A physically based coupled network growth and hillslope evolution model: 1 Theory. *Water Resour. Res.*, **27** (7), 1671-1684.



## **ANNEXE 1**

### **Liste des sites internet**



- [1] National Geophysical Data Center, Landslides  
<http://www.ngdc.noaa.gov/seg/hazard/slideset/landslides/>
- [2] Modèle SIBERIA de G. Willgoose  
<http://rambler.newcastle.edu.au/~cegrw/GRWpages/siberia.html>
- [3] Page de A. Howard (dont cours sur les processus de surface et leur modélisation)  
<http://erode.evsc.virginia.edu/>
- [4] Modèle GOLEM de G. Tucker  
<http://www.geog.ox.ac.uk/~gtucker/Software/Golem/GolemMain.html>
- [5] Modèle CHILD de G. Tucker  
<http://platte.mit.edu/~child/>
- [6] Modèle CAESAR de T. Coulthard  
<http://users.aber.ac.uk/jcc/research/caesar.htm>
- [7] Modèle Zscape de A. Densmore  
<http://www.ceri.memphis.edu/~ellis/research.html#zscape>
- [8] The Soil Erosion Site : Soil erosion models  
[http://www.soilerosion.net/doc/models\\_menu.html](http://www.soilerosion.net/doc/models_menu.html)
- [9] Charte qualité de l'hydrométrie  
<http://www.environnement.gouv.fr/infopratt/Publications/documents/fichierdocs/0022.pdf>
- [10] Base de données ICARE (réseau ERB)  
<http://erb.lyon.cemagref.fr/fr/index.html>
- [11] World River Sediment Yields Database (FAO)  
<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/sediment/>
- [12] The Global River Discharge Database (RivDis)  
<http://www.rivdis.sr.unh.edu/>
- [13] GRDC  
<http://www.bafg.de/grdc.htm>
- [14] GTOPO30  
<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html>
- [15] SRTM  
<http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>
- [16] PNRH : appel d'offres 2001  
[http://www.insu.cnrs-dir.fr/documentation/Insu\\_doc/FORM\\_PNRH\\_00/pnrh\\_ao\\_txt.html](http://www.insu.cnrs-dir.fr/documentation/Insu_doc/FORM_PNRH_00/pnrh_ao_txt.html)
- [17] Programme ECLIPSE  
<http://www.cnrs.fr/cw/fr/prog/progsci/Eclipse/Accueil/sommaire.php3>

- [18] IRD, unité de recherche « Erosion et Changements d'Usage des terres »  
<http://www.ur049.ird.fr/>
- [19] Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement  
<http://www.lthe.hmg.inpg.fr/index.htm>
- [20] CEMAGREF  
<http://www.cemagref.fr/>
- [21] CEMAGREF : TRANSFEAU  
<http://www.cemagref.fr/Informations/Presentation/PlanStrategique/gestion-aqua/orientations/vers/verseau-transfeau.htm>
- [22] CEMAGREF : Crues et érosion torrentielles  
<http://www.cemagref.fr/Informations/DossiersThematiques/DossierRisquesNaturels/Risques/cruets.htm>
- [23] SOGREAH  
<http://www.sogreah.fr/>
- [24] Logiciel TELEMAT  
<http://www.telemat.com/>
- [25] GHN  
<http://www.utc.fr/ghn/>
- [26] Cartographie de l'aléa « érosion des sols » en France  
<http://www.ifen.fr/erosion/methsom.htm>
- [27] Programme GICC  
<http://medias.obs-mip.fr/gicc/>
- [28] Etude des « Transferts fluviaux de matières dans les bassins versants Adour-Dordogne-Garonne » (GIS-ECOBAG)  
<http://www.cnrs.fr/dossiers/dosclim/rechfran/4theme/cycledeleau/transfertfluv.html>
- [29] Recherche scientifique soutenue par la CEE  
[http://www.cordis.lu/en/src/d\\_001\\_en.htm](http://www.cordis.lu/en/src/d_001_en.htm)
- [30] Projet MEDALUS  
<http://www.medalus.demon.co.uk/index.htm>
- [31] Projet FLOODGEN  
[http://lasig.epfl.ch/projets/floodgen/menup\\_fr.html](http://lasig.epfl.ch/projets/floodgen/menup_fr.html)
- [32] Modèle STREAM  
[http://lasig.epfl.ch/projets/floodgen/documentation/documents\\_publics/inra/STREAM.html](http://lasig.epfl.ch/projets/floodgen/documentation/documents_publics/inra/STREAM.html)

[33] COST Action 623 : « Soil Erosion and Global Change »  
<http://www.soilerosion.net/cost623/>

[34] 6<sup>e</sup> PCRD : « Sustainable development, global change and ecosystems »  
[http://fp6.cordis.lu/fp6/calls\\_activity.cfm?ID\\_ACTIVITY=315](http://fp6.cordis.lu/fp6/calls_activity.cfm?ID_ACTIVITY=315)

[35] Programme IGBP  
<http://www.igbp.kva.se/>

[36] Programme GTCE  
<http://gcte.org/>

[37] Programme GTCE Focus 3 : Soil Erosion Network  
<http://mwnta.nmw.ac.uk/GCTEFocus3/networks/erosion.htm>

[38] Programme PAGES Focus 5 / LUCIFS  
<http://www.pages.unibe.ch/structure/lucifs.html>

[39] National Science Foundation (NSF) / Division of Earth Sciences (EAR)  
<http://www.geo.nsf.gov/ear/>



**Centre scientifique et technique**  
**Service aménagement et risques naturels**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34