

Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants

Projet 5.3 du
Programme hydrologique
international

Rapport préparé sous
la présidence de A. Sundborg
Directeur de la publication:
W.R. White

Unesco

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Unesco aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Publié en 1986 par l'Organisation des Nations Unies
pour l'éducation, la science et la culture
7, place de Fontenoy, 75700 Paris, France

Imprimerie Louis Jean, Gap, France

ISBN: 92-3-202014-9

Version anglaise: ISBN 92-3-102014-5

© Unesco 1986



11 JUIL. 1986

Titres récents dans cette collection:

5. *Discharge of selected rivers of the world* (anglais/français/espagnol/russe). Volume III (Part IV): *Mean monthly and extreme discharges (1976-1979)*. 1985.
31. *Methods of computation of the water balance of large lakes and reservoirs*. Volume II: *Case studies*. 1984.
32. *Application of results from representative and experimental basins*. 1982.
33. *Ground water in hard rocks*. 1984.
34. *Ground-water models*. Volume I: *Concepts, problems and methods of analysis with examples of their application*. 1982.
35. *Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants*. 1986.
(Publié également en anglais.)
36. *Methods of computation of low stream flow*. 1982.
37. *Aspects spécifiques des méthodes de calcul pour les études hydrologiques. Actes du Symposium de Leningrad, 1977*. 1981. (Publié seulement en russe.)
38. *Méthodes de calcul pour les études hydrologiques concernant l'aménagement des eaux*. 1985.
(Publié également en anglais.)
39. *Hydrological aspects of drought*. 1985.
40. *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. 1984.
41. *Guide to the hydrology of carbonate rocks*. 1984.
42. *Water and energy: demand and effects*. 1985.

Préface

Si la quantité totale d'eau présente sur terre est généralement supposée à peu près constante, l'accroissement rapide de la population joint à l'extension de la culture irriguée et au développement industriel influencent fortement la quantité et la qualité de l'eau dans la nature. Face à l'aggravation des problèmes qui se posent, l'homme a commencé à prendre conscience du fait qu'il ne pouvait plus considérer l'eau ni aucune autre ressource naturelle comme bonne à "jeter après usage". Dès lors, la nécessité d'une politique cohérente de gestion rationnelle des ressources en eau s'est imposée.

Mais cette gestion rationnelle ne saurait se fonder que sur la connaissance approfondie du cycle de l'eau, de ses variations et de ses disponibilités. Afin de concourir à la solution des problèmes posés par l'eau dans le monde, l'Unesco a lancé en 1965 le premier programme mondial d'étude du cycle hydrologique: la Décennie hydrologique internationale (DHI). Le programme de recherche entrepris a été complété par un effort vigoureux d'éducation et de formation en matière d'hydrologie. Les activités de la Décennie se sont révélées du plus haut intérêt et d'une utilité considérable pour les Etats membres. Au bout de ces dix années, la majorité des Etats membres de l'Unesco avaient constitué des comités nationaux de la DHI pour mener à bien des activités nationales et participer à des actions de coopération régionale et internationale dans le cadre du programme de la Décennie. La connaissance des ressources en eau du monde s'était sensiblement améliorée. Partout l'hydrologie acquérait droit de cité en tant que spécialisation professionnelle à part entière, et des moyens de former des hydrologues avaient été créés.

Consciente de la nécessité d'élargir ces efforts en utilisant l'élan imprimé par la Décennie hydrologique internationale, l'Unesco, donnant suite aux recommandations des Etats membres, a lancé en 1975 un nouveau programme intergouvernemental à long terme: le Programme hydrologique international (PHI), destiné à prolonger la Décennie.

Bien que le PHI soit essentiellement un programme de recherches et d'éducation, l'Unesco est consciente depuis le début de la nécessité d'en orienter les activités vers la solution pratique des problèmes très réels liés dans le monde aux ressources hydrologiques. C'est pourquoi les objectifs du Programme hydrologique international ont été progressivement élargis, conformément aux recommandations de la Conférence sur l'eau organisée par l'Organisation des Nations Unies afin que le Programme porte non seulement sur l'étude des mécanismes hydrologiques considérés dans leurs relations avec l'environnement et les activités humaines, mais aussi sur les aspects scientifiques de l'utilisation et de la conservation des ressources en eau à des fins diverses, de façon à répondre aux besoins du développement économique et social. Sans détourner le PHI de sa finalité scientifique, on en a ainsi réorienté sensiblement les objectifs vers une approche multidisciplinaire de l'évaluation, de la planification et de la gestion rationnelle des ressources en eau.

Au titre de sa contribution à la réalisation des objectifs du PHI, l'Unesco publie deux collections: "Etudes et rapports d'hydrologie" et "Notes techniques d'hydrologie". En outre, afin d'accélérer l'échange des informations dans les domaines où celles-ci sont particulièrement demandées, elle publie des travaux de nature préliminaire sous la forme de documents techniques.

Le but de la collection "Etudes et rapports d'hydrologie", dont fait partie le présent volume, est de présenter les données rassemblées et les principaux résultats obtenus lors d'enquêtes hydrologiques ainsi que des informations sur les techniques de recherche en hydrologie. Les actes de colloques y figurent parfois également. On espère que ces ouvrages auront un intérêt à la fois pratique et théorique pour les spécialistes en hydrologie et pour toutes les personnes qui participent à l'évaluation, à la planification et à la gestion rationnelle des ressources en eau.

Sommaire

	Pages
AVANT- PROPOS	11
INTRODUCTION	13
I L'INFLUENCE DES ACTIVITES HUMAINES SUR LES PROCESSUS SEDIMENTAIRES	15
1.1 Les Interfluves	15
1.1.1 Introduction	15
1.1.2 Environnement rural	17
1.1.2.1 Utilisation des terres et planification	17
1.1.2.2 Techniques agricoles	17
1.1.2.3 Exploitations forestières	18
1.1.2.4 L'élevage	18
1.1.3 Environnement urbain et industriel	22
1.1.3.1 Les mines	22
1.1.3.2 Construction de routes et de bâtiments	22
1.1.3.3 Urbanisation	23
1.1.4 Les processus sédimentaires et les modifications écologiques	25
1.1.5 Régions arides et semi-arides	25
1.2 Le réseau de drainage	28
1.2.1 Introduction	28
1.2.2 Modification du régime d'écoulement et des apports de sédiments	28
1.2.3 Ouvrages de Génie Civil	29
1.2.3.1 Effets localisés	32
1.2.3.2 Effets généralisés	32
REFERENCES	34
II PROCESSUS D'EROSION ET DE SEDIMENTATION	37
2.1 Généralités	37
2.1.1 Les types d'érosion et de dépôts	37
2.1.2 Caractéristiques des bassins versants	38
2.2 Les interfluves	38
2.2.1 Les processus d'altération	38
2.2.2 Influence du climat	41
2.2.3 Facteurs topographiques	41
2.2.4 Facteurs géologiques et pédologiques	42
2.2.5 Couvert végétal	42
2.2.6 Occupation des terres	42
2.3 Réseau de drainage	43
2.3.1 Mouvement des sédiments	43
2.3.1.1 Caractéristiques des sédiments	43
2.3.1.2 Vitesse de chute	45
2.3.1.3 Vitesse limite de mise en mouvement	45
2.3.1.4 Transport de fond	46
2.3.1.5 Transport en suspension et transport de fond	46
2.3.1.6 Matériaux fins (charge de ruissellement)	46
2.3.1.7 Aspects du lit des cours d'eau	49
2.3.1.8 Pavage du fond	49
2.3.2 Caractéristiques du chenal	49
2.3.2.1 Topographie des chenaux stables	49
2.3.2.2 Facteurs agissant sur la topographie des chenaux	50
2.3.3 Dépôt et érosion	51
REFERENCES	52

	Pages
III PREDICTION DES EFFETS DES ACTIVITES HUMAINES	55
3.1 Collecte des données	55
3.1.1 Reconnaissance	55
3.1.1.1 Recensement des données disponibles	55
3.1.1.2 Reconnaissance du terrain	57
3.1.1.3 Photographie aérienne	57
3.1.1.4 Télédétection	57
3.1.2 Recherches sur le terrain	57
3.1.2.1 Recherches sur les processus d'érosion sur petits bassins versants et sur parcelles de ruissellement	57
3.1.2.2 Etude des transports de sédiments dans les cours d'eau	63
3.1.2.3 Recherches sur les sédiments dans les retenues	70
3.2 Analyse des données	72
3.2.1 Evaluation de la précision et de la fiabilité des données	72
3.2.2 Méthodes d'analyse	75
3.2.2.1 Analyse des données sur les sédiments	75
3.2.2.2 Morphologie fluviale	76
3.2.2.3 Données provenant des relevés des fonds de retenue	76
3.3 Méthodes de prévision	76
3.3.1 Méthodes empiriques	76
3.3.1.1 Evaluation des apports de sédiments d'après les données du cours d'eau	77
3.3.1.2 Production de sédiments estimés à l'aide de données sur les interfluves	77
3.3.1.3 Recherches expérimentales sur le terrain	78
3.3.2 Méthodes de calcul	83
3.3.2.1 Les cours d'eau	83
3.3.3 Méthodes de modélisation	91
3.3.3.1 Modélisation mathématique appliquée aux interfluves	91
3.3.3.2 Modélisation mathématique des cours d'eau	93
3.3.3.3 Modèles réduits	96
REFERENCES	100
IV METHODES DE DEFENSE CONTRE L'EROSION ET LA SEDIMENTATION	103
4.1 Bassins fluviaux	103
4.1.1 Introduction	103
4.1.2 Procédés agrotechniques	103
4.1.3 Restauration des forêts	104
4.1.4 Procédés hydrotechniques	104
4.1.5 Conclusions générales	107
4.2 Les cours d'eau	107
REFERENCES	113
V ETUDE DE CAS	115
5.1 Etude des processus sédimentaires dans une zone tropicale humide à PORTO-RICO	115
5.1.1 Introduction	115
5.1.2 Données sur les sédiments	115
5.1.3 Méthode de la courbe de tarage des sédiments	115
5.1.4 Méthode par relevés de retenues	118
5.1.4.1 Relevés de la retenue de Guayabal	120
5.1.5 Conclusions	122
5.2 Problèmes d'érosion des sols, de transport solide et de sédimentation liés à la construction d'une retenue de taille moyenne dans une zone semi-aride	122
5.2.1 Introduction	122
5.2.2 Programme d'étude	123
5.2.3 Cartographie par zones homogènes	123
5.2.4 Carte géomorphologique de la région de la retenue	124

	Pages
5.2.5 Pluie, végétation et érosion des sols	124
5.2.6 Examen des processus actuels d'érosion des sols	124
5.2.7 Transport de sédiments et sédimentation future probable dans la retenue	126
5.2.8 Principales conclusions des études sédimentologiques	126
5.3 Utilisation d'un modèle mathématique pour simuler les changements à long terme du niveau des fonds dans les estuaires	127
5.3.1 Introduction	127
5.3.2 Estuaire du Great Ouse	127
5.3.3 Le modèle	128
5.3.4 Résultats	128
5.4 Utilisation d'un modèle réduit pour l'étude des problèmes techniques que pose la construction d'un grand barrage	131
5.4.1 Introduction	131
5.4.2 Description du modèle	132
5.4.3 Protection des batardeaux pendant la construction	132
5.4.4 Dérivation du cours d'eau	132
5.4.5 Déversoir	132
5.5 Evaluation quantitative de l'érosion des sols ou du transport de sédiments dus à des orages isolés en région semi-aride	135
5.5.1 Données disponibles	136
5.5.2 Résultats	136
5.5.3 Conclusion	138
REFERENCES	139
VI BIBLIOGRAPHIE	141
VII ANNEXES	143
7.1 Techniques de calcul pour les interfluves	143
7.1.1 Objectif	143
7.1.2 Prédiction de l'érosion en nappe et en rigoles	143
7.1.3 Solution	148
7.2 Terminologie et définitions	149
REFERENCES	161

Avant-propos

Ce rapport technique sur les Problèmes sédimentologiques dans les bassins fluviaux a pour origine une décision du Conseil intergouvernemental du Programme hydrologique international (PHI) qui en a chargé, en 1975, un groupe de travail spécialisé, sous le numéro de projet 5.1.

Ce groupe de travail avait pour tâche de préparer un rapport sur l'état de la connaissance des relations entre la couverture végétale, l'écoulement superficiel, la production et le dépôt des sédiments, ainsi que la possibilité d'améliorer les conditions existantes d'érosion-sédimentation. Le rapport devait fournir une description des méthodes recommandées pour estimer et prédire les processus de sédimentation, de transport solide et d'érosion, quantitativement avec des exemples.

Le groupe de travail, qui s'est réuni à trois reprises (juin 1976, septembre 1977 et février 1980) se composait des experts suivants:

Mr. S.A. MAZA	(Mexique)
Mr. E.L. PEMBERTON	(Etats-Unis)
Mr. V.V. ROMANOVSKY	(USSR)
Mr. A. SUNDBORG	(Suède), président
Mr. W.R. WHITE	(Royaume Uni):

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Association internationale des sciences hydrologiques (AISH), l'Association internationale de recherches hydrauliques (AIRH), la Commission internationale de l'Irrigation et du drainage (ICID) participaient également aux réunions du groupe et ont fourni des éléments du rapport technique.

Pour préparer et écrire ce rapport, le groupe de travail a pris en considération les travaux du projet 3.8 du PHI "Etude des processus sédimentologiques des cours d'eau", ainsi que ceux de la Commission internationale pour l'érosion et la sédimentation de l'AISH sur les méthodes de mesure et les techniques de prédiction.

La mise au point finale de cet ouvrage a été réalisée par M. W.R. White (Royaume-Uni).

Introduction

Les phénomènes d'érosion et de sédimentation sont une partie de l'évolution géologique du paysage sous l'effet de l'eau, du vent, de la glace et des vagues. L'érosion de la surface du globe s'est poursuivie à travers les âges. L'entraînement, le transport et le départ des matériaux sont des phénomènes naturels visibles en tout temps et tout lieu. C'est l'ensemble de ces phénomènes qui, à travers les âges géologiques, ont façonné et remodelé la surface de la terre, créant les torrents de montagne, les vallées fluviales, les plaines d'inondation, les deltas, les plaines côtières et d'autres éléments du paysage. Les agents de l'érosion considérés comme les plus efficaces sont la pluie, les écoulements et le vent. L'action des vagues, du gel et des glaciers est limitée à des régions d'étendue restreinte, mais elle est importante dans les zones côtières et dans les régions glaciaires. Avalanches, glissements de terrain, éruptions volcaniques et tremblements de terre peuvent localement être la cause de modifications brusques et catastrophiques du paysage.

Le phénomène de l'érosion hydrique commence avec l'impact de la goutte de pluie initiale. Des particules minérales ou des fragments de roche se détachent et sont déplacés à courte distance, quelques-uns sont entraînés par l'eau de ruissellement et transportés plus loin. Les particules sédimentaires ont ainsi commencé leur mouvement des montagnes vers la mer. Elles peuvent se déposer temporairement dans une plaine d'inondation des vallées au cours d'une crue puis être emportées par l'érosion des milliers d'années plus tard et entraînées vers l'aval, puis se déposer à nouveau et attendre une nouvelle occasion dans ce processus de sédimentation.

Les cours d'eau et les phénomènes hydrologiques jouent un rôle important dans l'évolution du paysage. Les fleuves peuvent être considérés comme un immense système de transport pour l'eau et les sédiments. Ils évacuent des bassins versants les sédiments produits, facilitant ainsi l'altération et la production de sédiments ultérieures.

Partout sur terre et de tout temps, l'homme a été confronté aux problèmes liés au mouvement des sédiments, que ce soit des difficultés dues à l'érosion ou au dépôt des matières transportées, sur des terres agricoles ou destinées à la construction d'habitation dans les cités et les villes. Ces dernières années, l'homme est devenu plus conscient et plus préoccupé par l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments dans tout son environnement. La façon précise dont ces processus atteignent la vie sauvage, les zones de pêches et l'activité biologique dans cet environnement devient un sujet plein d'intérêt.

Par conséquent, l'étude et la connaissance du cycle sédimentologique complet: détachement, entraînement, transport, dépôt et consolidation des sédiments constituent les premiers pas pour définir des méthodes d'estimation de l'action de l'homme sur les phénomènes de sédimentation dans les bassins fluviaux. Il est également important de connaître et d'évaluer les événements catastrophiques tels que les éruptions volcaniques et les tremblements de terre, car ils peuvent être la cause soudaine de graves problèmes d'érosion des sols et de sédimentation.

L'utilisation des cours d'eau, de leurs ressources en eau et des dépôts sédimentaires crée souvent des problèmes techniques et d'environnement. Les projets d'irrigation, les centrales hydroélectriques, les prélèvements d'eau pour les besoins industriels et domestiques, l'industrialisation et l'urbanisation des paysages riverains modifient les conditions naturelles. Il peut en résulter des phénomènes de sédimentation accélérée, des déplacements de cours d'eau, des changements de régimes hydrauliques et bien d'autres effets indésirables.

La compréhension des processus d'érosion et de sédimentation nécessite une connaissance de base de quelques concepts et faits fondamentaux. Bien des types d'érosion rencontrés à la surface du globe peuvent être définis en termes quantitatifs, même mathématiques. Les pentes des lits, par exemple, sont comparables dans différentes conditions naturelles car elles sont fonction de différents paramètres physiques tels que le débit, la charge en sédiments et les caractéristiques des sédiments. Le tracé des méandres des cours d'eau et des chenaux de drainage créés par le ruissellement est dans une certaine mesure constant et prévisible. Ces similitudes que l'on rencontre dans le réseau de drainage naturel érodant les terres conduisent à une

approche quantitative qui permet d'appliquer des formules physiques et des relations mathématiques pour estimer certains phénomènes de sédimentation dans les bassins fluviaux. Ces mêmes principes et ces mêmes relations sont applicables avec des facteurs correctifs pour estimer les variations de la sédimentation résultant directement des activités humaines, en tenant compte de la végétation et de la vie animale.

Afin d'aider à une compréhension plus générale des problèmes, un index des termes relatifs à l'érosion et à la sédimentation se trouve dans l'annexe 7.2, tels qu'ils sont utilisés dans ce rapport.

Les principaux objectifs de ce rapport sont:

- 1) Définir les effets des activités humaines sur les processus d'érosion et de sédimentation dans les bassins fluviaux, notamment des activités telles que l'utilisation des terres et les pratiques d'irrigation et de drainage, et également les effets des réservoirs et barrages, des ouvrages correctifs des cours d'eau, des transferts d'eau de bassins à bassins.
- 2) Donner des informations sur l'état de la connaissance des relations de cause à effet entre la couverture végétale, le ruissellement, la production et le dépôt de sédiment.
- 3) Donner des informations sur les possibilités d'amélioration des conditions existantes de sédimentation-érosion.
- 4) Décrire des méthodes d'estimation et de prédiction des variations des phénomènes d'érosion et de sédimentation consécutifs à des changements dus à l'homme dans les bassins fluviaux. Ceci concerne aussi bien les modifications dans le bassin versant que dans le lit des cours d'eau.

Bien que l'on sache que les sédiments peuvent jouer un rôle important dans le transfert des éléments fertiles et des éléments polluants de la surface des terres vers le système aquatique, et qu'une érosion accélérée a des conséquences importantes pour la pollution des eaux à partir de sites d'origine non ponctuels, l'objet de ce rapport a été limité à l'étude des processus sédimentologiques.

Il a pour but de donner une information générale aux planificateurs des ressources en eau et en terres, et aux écologistes, il intéressera aussi les hydrologues et les hydrauliciens. Le texte est clair mais nécessairement superficiel à bien des points de vue: l'utilisation des formules et descriptions mathématiques a été réduite au minimum dans le texte principal. Pour illustrer les phénomènes sédimentologiques et les méthodes de prédiction, on a inclus des études de cas avec des exemples complètement traités. Pour le détail des travaux relatifs aux problèmes exposés dans ce rapport, le lecteur se reportera aux ouvrages et manuels cités dans la bibliographie.

1 Influence des activités humaines sur les processus sédimentaires

1.1 LES INTERFLUVES

1.1.1 Introduction

L'érosion c'est le détachement de fragments ou de particules de sol ou de roches de leur emplacement initial par l'eau et par d'autres agents géologiques tels que le vent, les vagues et la glace. Ainsi, l'érosion est un phénomène géologique naturel qui a façonné la surface de la terre au cours des âges géologiques. Ce phénomène est souvent désigné par le terme d'érosion géologique.

Diverses sortes d'activités humaines, pratiques agricoles, exploitations forestières, pâturages, constructions de routes et de bâtiments, etc ... tendent à modifier les phénomènes d'érosion, en accélérant souvent de façon considérable le rythme. Les phénomènes d'érosion dus à l'homme sont souvent désignés par le terme d'érosion accélérée ou d'érosion des sols.

Dans la plupart des régions habitées du monde, les phénomènes d'érosion et de sédimentation sont fortement influencés par l'homme. En beaucoup de lieux, l'érosion due à l'homme est prédominante alors que l'érosion géologique naturelle est seulement d'importance secondaire. Globalement, on ne connaît pas bien le rapport qu'il y a entre l'érosion géologique et l'érosion des sols due à l'homme. Des scientifiques ont estimé que le taux actuel d'érosion représente deux fois et demi le taux existant avant que l'homme ait commencé à modifier le paysage sur une grande échelle (Focus on Environmental Geology, 1976, p. 162). On doit encore cependant considérer ceci plutôt comme une hypothèse. Des recherches détaillées menées sur de nombreuses zones d'études plus petites ont donné une idée raisonnablement correcte de l'importance relative des deux types d'érosion. Dans une étude sur la zone du Piedmont, USA, Trimble (1974) donne un exemple frappant de l'influence de l'homme sur les processus érosifs. A l'époque où les Européens s'installèrent au 18ème siècle, l'érosion géologique était faible et celle due à l'homme pratiquement nulle. Après le défrichage et la mise en culture des terres hautes, surtout dans la dernière partie du 19ème siècle et au début du 20ème siècle, des ravines se sont formées, les pentes ont été sévèrement érodées, le réseau de drainage et les mares se sont remplis de sédiments tandis que les basses terres fertiles se transformèrent en bas-fonds marécageux. Au milieu du 20ème siècle, les mesures de conservation des sols ont eu pour résultat de réduire l'érosion des hautes terres. Du fait de la réduction des apports de sédiments, le réseau de drainage s'est approfondi, mais de nouveaux problèmes de sédimentation se sont développés à l'aval dans les réservoirs et les estuaires. L'évolution est illustrée schématiquement par la figure 1.1.

On peut observer de nos jours une détérioration semblable du paysage et du sol dans de nombreuses régions, partout dans le monde, souvent au premier stade de l'évolution. On peut prouver l'importance de l'utilisation des sols et de la couverture végétale par les résultats des tests d'érosion des sols sur des terrains portant différentes couvertures végétales menés en Tanzanie (fig. 1.2, reproduite d'après Staples, 1938). Les résultats des tests présentés par le diagramme ne sont pas représentatifs pour toutes les régions portant des types de végétations semblables mais, néanmoins, ils démontrent les grandes variations observables entre les différents environnements et les différents types d'occupation des sols. L'évaluation soigneuse des effets du changement d'utilisation des sols et de différentes pratiques agricoles est une étape nécessaire de toute étude d'érosion des sols et de sédimentation.

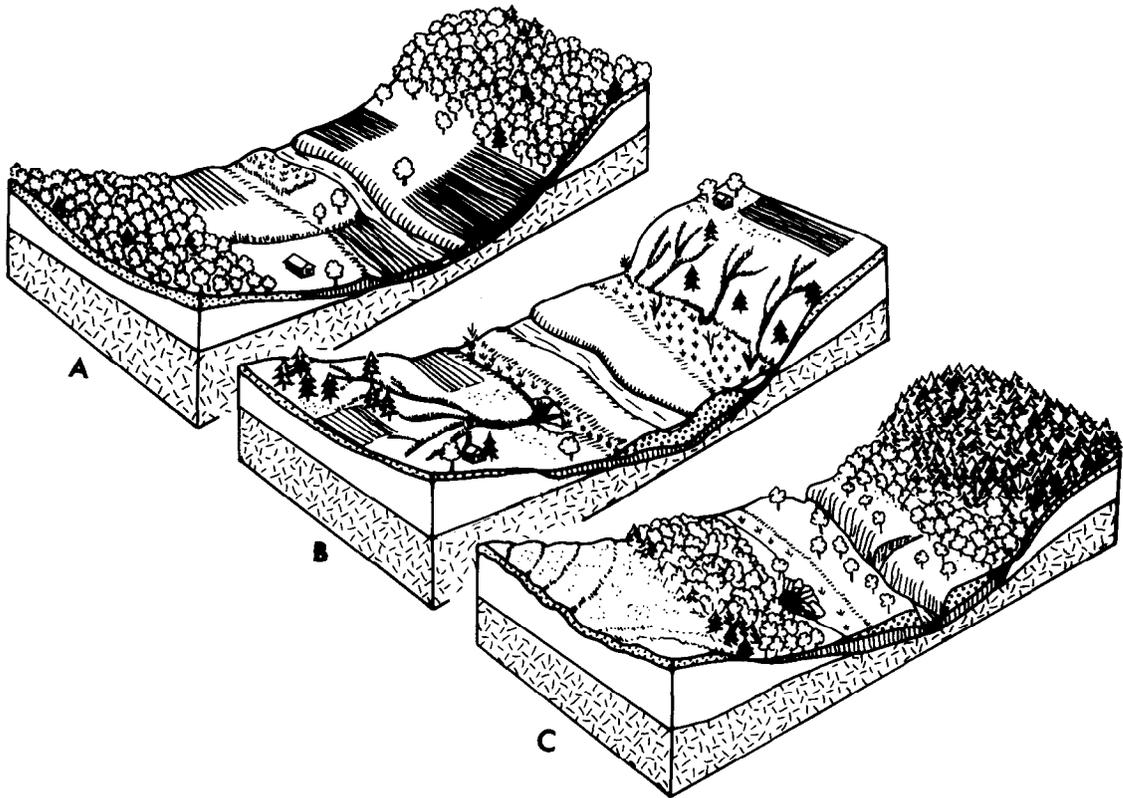


Fig. 1.1 Evolution générale du paysage du Piedmont (1700-1970). A. A l'époque de l'établissement des Européens. Remarquez la forêt de noyers avec quelques pins épars. B. Après le défrichement et la mise en culture érosive des hautes terres. Remarquez les ravines, le remplissage de la vallée par des sédiments récents, les zones de bas-fonds marécageux. C. Après l'arrêt de l'érosion, les forêts ont repoussé, surtout des pins, les bas-fonds marécageux sont drainés, le lit du cours d'eau s'est approfondi, on peut voir les traitements anti-érosifs. D'après Trimble, 1974.

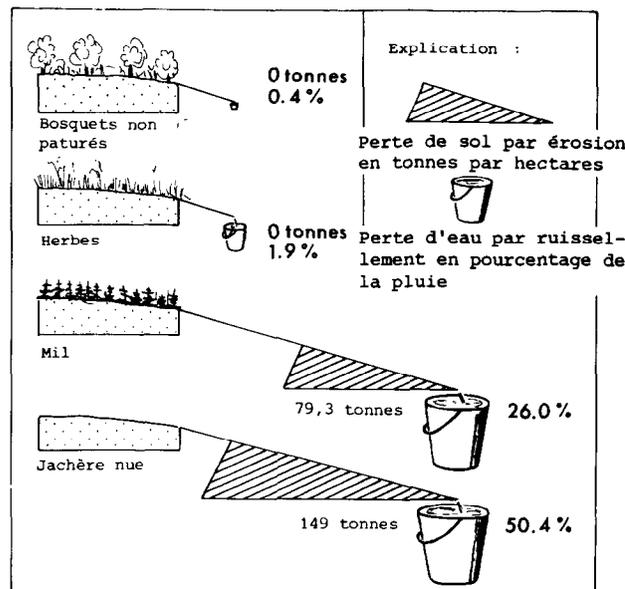


Fig. 1.2 Résultats des essais d'érosion des sols sur un terrain portant différentes couvertures végétales à MPWAPWA, Tanzanie. Moyenne annuelle de deux années de mesures sur des parcelles d'érosion de 50 m², d'un sol rouge sablo-argileux sur pédiment de 3,50 de pente, une couverture herbeuse protège efficacement des pertes de sol et du ruissellement. Résultats de Staples, 1938 (d'après Rapp-Berry-Temple, 1973).

1.1.2 Environnement rural

1.1.2.1 Utilisation des terres et planification. Comme on l'a déjà montré dans la figure 1.1, le taux d'érosion des sols dépend étroitement du mode d'utilisation des terres. On s'accorde à reconnaître que l'aménagement des terres conditionne l'érodibilité plus que toute autre activité. L'utilisation des sols en général et la gestion des cultures en particulier ont toutes deux une grande importance pour l'évolution des processus d'érosion. Par conséquent, la planification convenable de l'utilisation des sols est un des moyens les plus importants pour éviter une érosion des sols dévastatrice.

Le but d'une planification convenable de l'utilisation des sols est la sélection et l'aménagement des terrains pour différents usages, afin de parvenir à un emploi optimal de toutes les ressources en terres sans inconvénients sérieux pour l'environnement, c'est-à-dire sans érosion des sols. Un programme de planification de l'utilisation des terres comprend normalement une carte des potentialités des terres ou une classification qui indique l'aptitude des terres à être utilisées pour différentes cultures et en particulier pour différentes pratiques agricoles. Une classification d'aptitude des terres comprend l'étude de nombreux paramètres différents, par exemple l'épaisseur et la texture des sols, leur perméabilité, leur sensibilité à l'érosion et d'autres caractéristiques.

L'analyse des données fournies par les études de potentialités des terres peut se traduire par des programmes spécifiques pour différentes activités telles que :

- 1 Conservation des sols et des eaux
- 2 Aménagement des bassins versants
- 3 Lutte contre la pollution des eaux
- 4 Régulation de l'élevage et restauration de la végétation
- 5 Protection de la faune et de la flore
- 6 Recherche sur la restauration et la mise en valeur
etc...

1.1.2.2 Techniques agricoles. Le manque de végétation favorise l'érosion par l'eau ou le vent. Un couvert d'arbres, de buissons, de prairies ou d'autres végétations, empêche l'effet de battance de la pluie, réduit l'érosion d'impact, accroît l'infiltration et diminue le ruissellement. C'est pour cela que le défrichement de la végétation naturelle et la mise en culture des terres accroissent inévitablement le risque d'érosion des sols par l'eau ou le vent, ou les deux.

Par comparaison avec les conditions naturelles, la plupart des modes de culture entraînent une réduction importante de la couverture végétale, au moins durant une partie de l'année, accompagnée d'une perte de litière et d'humus. La teneur naturelle en humus dépend de facteurs climatiques: température et humidité, fortes températures et acidité ne favorisant pas le maintien d'un taux d'humus élevé. Les cultures, en particulier dans les régions tropicales et subtropicales à faible pluviosité, ont tendance à le réduire et l'érodibilité s'accroît.

Les cultures ont aussi d'autres effets sur les sols et la surface des terres, à savoir des modifications physiques des sols : destructions des agrégats - ce qui rend la surface davantage érodible par le vent et par l'eau -, imperméabilisation de la surface par les particules de limon et d'argile, compactage du sol et formation de nouvelles rigoles de drainage pour le ruissellement. Conjugés avec la réduction de la végétation protectrice, tous ces effets contribueront à réduire la capacité d'infiltration, à accroître le ruissellement et à concentrer dans le temps et l'espace. Il en résulte un accroissement de l'érosion pluviale, de l'érosion en nappe, de l'érosion en rigoles et ravines, qu'accompagne dans certaines régions l'érosion éolienne.

L'érodibilité des terres agricoles est très variable. Elle dépend de la nature des plantes cultivées mais aussi du mode de culture. La densité de la végétation et son état de développement ont de l'importance. Mais, tabac et coton laissent souvent une grande partie du sol nu et exposé à l'érosion d'impact, à l'érosion en nappes et en rigoles, surtout au début de leur développement. Ce n'est que durant leur période de croissance, ou plus exactement sa dernière phase, que les champs sont convenablement protégés de l'érosion.

La pente du terrain influence directement la vitesse du ruissellement et par conséquent aussi son érosivité. En Afrique de l'Est par exemple, il y a deux types de régions particulièrement sensibles à l'érosion (Rapp, 1975) :

- 1 Les montagnes déboisées cultivées sur de fortes pentes ;
- 2 Les savanes semi-arides et autres zones sèches avec un couvert végétal clairsemé en fin de saison sèche .

Dans ces deux types d'environnement critiques, la surexploitation, cause de l'érosion des sols et de la perte de productivité, correspond en général aux activités suivantes:

- 1 Surpâturage
- 2 Cultures trop intensives

3 Ramassage excessif de bois de feu et fabrication intensive de charbon de bois

4 Brûlis excessifs sur les prairies, les bois et les forêts.

L'érosion en ravine est l'une des formes les plus spectaculaires de l'érosion anthropique. Dans certaines zones, les ravines atteignent des formes et des proportions dominantes. Il ne faut cependant pas exagérer l'importance des dommages qu'elle cause, car elle se manifeste souvent dans des régions où l'agriculture a peu d'importance. Leur effet principal dans les bassins versants est souvent l'abondance des sédiments fournis en tête de bassin au réseau de drainage.

On verra au chapitre 4 qu'il existe différentes méthodes, pour limiter l'érosion des terres agricoles, tant des moyens de protection mécanique tels que les terrasses, les drains et fossés de diversion que des méthodes biologiques telles que les bandes enherbées, la culture selon les courbes de niveau, la rotation des cultures, etc... (voir fig. 1.3).

1.1.2.3 Exploitations forestières. Grâce à la protection de la voûte et à la couverture du sol par la litière et la végétation, les forêts et les terrains boisés se caractérisent généralement par un faible taux de ruissellement, une infiltration élevée et une érosion des sols négligeable.

Les sols forestiers ont souvent une structure relativement poreuse qui facilite la recharge des nappes. Cependant, lorsqu'on supprime le couvert forestier, les conditions hydrologiques sont modifiées et le risque d'érosion des sols et de mouvements de masse atteint un niveau critique (voir fig. 1.4).

On exploite les forêts pour bien des raisons : abattage pour l'industrie de la pâte à papier, pour les scieries et les fabriques de meubles, coupe de bois pour la construction locale, pour la fabrication de charbon de bois, ramassage local de bois pour se chauffer et pour la cuisine, défrichage des forêts, bois et broussailles pour étendre ou améliorer les cultures et les pâturages dans les zones d'élevage, coupe d'arbres ou de branchages pour faire du fourrage. C'est avec beaucoup de précaution que l'on doit pratiquer des déboisements et des défrichements situés dans les zones critiques pour éviter l'érosion des sols (voir fig. 1.5).

Il existe de nombreuses publications sur les risques d'érosion et la production accélérée de sédiments dans les zones d'exploitation forestière et de déboisement. D'après Megahan (1975), le taux d'érosion dans un bassin de l'Idaho (E.U.) soumis à des exploitations forestières atteint plus de 150 fois le taux d'érosion naturelle. La majeure partie des sédiments produits venaient des routes et travaux routiers destinés à faciliter l'exploitation forestière.

Dans les régions de cultures vivrières, la coupe de bois, pour la construction de maisons et le chauffage, se limite souvent à une zone définie par un accès pédestre commode à partir des villages. Dans le même périmètre, il y a aussi une forte demande de végétaux provenant des arbres et des buissons pour le bétail, pour préparer du fourrage, etc... La zone est également soumise à un piétinement intense de la part des hommes et des animaux. Il peut s'en suivre une érosion désastreuse, en particulier sur les fortes pentes et là où l'érodibilité est forte pour d'autres raisons. La destruction des forêts et broussailles peut entraîner des dommages irréversibles pour les sols et la végétation.

Il est parfois nécessaire de couper la végétation d'épineux des régions sèches pour favoriser la pousse des herbages et fournir un maximum de fourrage aux troupeaux. Pourvu que les conditions soient favorables à la pousse des herbes et qu'on empêche le surpâturage, la déforestation peut réduire l'érosion de l'horizon superficiel plutôt que l'augmenter.

Dans les prairies tropicales, le feu est un moyen d'éviter la croissance des broussailles. Les feux naturels ou allumés pour la chasse sont aussi fréquents. De façon générale, le brûlage des arbres, des buissons et des herbes sèches fait plus de mal que de bien, et la plupart des pédologues condamnent cette méthode. Les effets peuvent cependant varier selon la saison, le type de sol, la végétation, etc... La fertilisation du sol par la cendre est un effet à court terme. D'un autre côté, la quantité d'humus et de litière est considérablement réduite, ce qui peut avoir de sérieux effets négatifs sur la structure du sol, la perméabilité, l'humidité du sol et sa résistance à l'érosion. Il s'ensuit que l'utilisation du feu entraîne très souvent un risque d'érosion grandement accéléré.

1.1.2.4 L'élevage. L'effet des pâturages sur les paramètres hydrologiques et sur l'érosion des sols dépend du climat et de l'intensité de leur exploitation. La mauvaise gestion des pâturages est particulièrement grave dans les régions semi-arides où le surpâturage peut modifier considérablement le ruissellement et provoquer une érosion accrue.

Les méthodes de culture des prairies sont conditionnées par les caractéristiques du milieu, telles que les variations à long terme ou saisonnières du climat, les disponibilités en eau et en fourrage, etc... Le nombre de personnes vivant de l'élevage est aussi un facteur important.

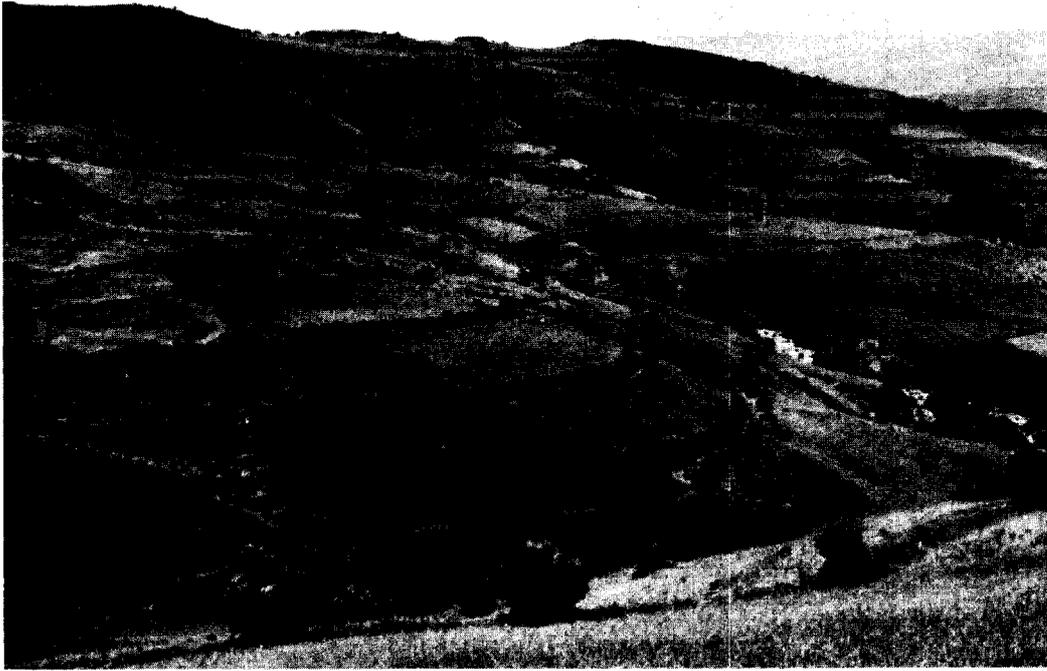


Fig. 1.3 Cultures sur fortes pentes dans les montagnes du Rif, Maroc. Le ruissellement est détourné par des sillons subhorizontaux bordés de bourrelets du côté de la pente aval. On empêche l'érosion accélérée en ravine des petites vallées et des dépressions, où l'écoulement se concentre, par des seuils en terre enherbés et avec une végétation buissonnante. Sillons et bourrelets favorisent l'absorption et l'infiltration de l'eau. Photo A. Sundborg, 1969



Fig. 1.4 Défrichage et brûlage préparent le sol pour la mise en culture mais accroissent le risque d'érosion du sol pendant la saison des pluies. Région de Kilosa, Tanzanie. Photo A. Sundborg, 1970



Fig. 1.5 Zone déboisée dans le Bihar, Indes. Après le déboisement, le ruissellement a provoqué une érosion en nappes et en rigoles. Les traces de roues ont détourné et concentré le ruissellement, et un système de ravines hiérarchisées s'est formé. L'érosion a atteint les couches rocheuses sous-jacentes à une profondeur de 2 ou 3 m. Photo A. Sundborg, 1973



Fig. 1.6 Zone très érodée au Lesotho, Afrique du Sud. L'érosion d'impact, en rigoles et en ravines a totalement emporté le sol de couverture au premier plan et laissé l'horizon rocheux complètement nu. Le surpâturage est l'une des principales causes de l'érosion des sols. Photo A. Rapp, 1974

La densité de population peut varier dans de larges limites. En Australie, un propriétaire de ranche peut disposer de 10.000 à 1.000.000 hectares, tandis que sous un climat analogue en Tunisie, en Algérie ou en Syrie, un éleveur devra gagner sa vie sur 10 hectares ou moins de terres non irriguées (Le Houérou, 1976).

Particulièrement pour les zones pâturées de façon relativement intensive des savanes de l'Afrique de l'Est et des terres semi-arides bordant le désert du Sahara, les observations suivantes peuvent être intéressantes (voir fig. 1.6).

Durant la saison sèche, les animaux sont souvent contraints à vivre et à paître à courte distance de marche d'un puits ou de tout autre point d'eau disponible. Pendant cette saison, les herbes et les autres végétaux sont secs et de faible valeur nutritive. Par conséquent, le brouillage des broussailles et des basses branches des arbres a une grande importance et un fourrage de complément est souvent fourni en coupant les branches inférieures des arbres. Lors des années exceptionnellement sèches - surtout au cours des séquences d'années sèches, toutes les espèces végétales peuvent être plus ou moins complètement détruites par le pâturage, le brouillage, le recherche du fourrage et le piétinement intense. Les érosions hydrique et éolienne peuvent atteindre des niveaux critiques.

Durant la saison humide on trouve ordinairement des points d'eau de surface à peu près partout. Les animaux peuvent se déplacer vers les meilleurs pâturages où l'herbe est abondante. Pendant cette saison les animaux ne détruisent pas aussi souvent la végétation et les sols. Cependant les zones qui ont été ravagées pendant les saisons sèches précédentes sont maintenant sensibles aux fortes précipitations avec une forte érosion d'impact, en nappe, en rigole et en ravines (voir fig. 1.7). On a observé que la destruction du sol et de la végétation est souvent un phénomène irréversible qui a transformé de vastes régions en surfaces stériles de roches nues, d'étendues gravillonnaires ou de sable mobile.

De telles pratiques d'élevage, qui sont une façon naturelle de pallier les déficits saisonniers en eau et en fourrage, sont ainsi à l'origine d'une érosion éolienne et hydrique et d'une production accrue de sédiments.

Une partie des matériaux provenant de l'érosion des sols se dépose sur les cônes de déjection et sur des replats boueux, le reste est entraîné jusqu'aux fleuves. Une bonne part des matériaux fins et de l'humus sont exportés de la zone, tandis qu'une partie du sable forme des champs de dunes avec un matériau mobile.

Même si les processus décrits sont typiques de régions semi-arides habitées par des nomades, le pâturage des troupeaux, moutons ou chèvres, conjugué avec les coupes de bois, peut entraîner une érosion du sol sérieuse, même dans des régions d'agriculture sédentaire.



Fig. 1.7 Ruissellement rapide et concentré érodant et dévastant la route entre Iringa et Mawanda (Tanzanie Centrale). Photo L. Stromquist, 1976

1.1.3 Environnement urbain et industriel

1.1.3.1 Les mines. Les exploitations minières sont souvent à l'origine d'un accroissement formidable de l'activité des phénomènes d'érosion et de sédimentation. En particulier, dans bien des régions du monde, l'exploitation à ciel ouvert de charbon et de schistes a été la cause de problèmes hydrologiques et sédimentologiques notables. De même l'extraction de sables et de graviers dans des carrières à ciel ouvert et le dragage des matériaux du lit des cours d'eau et des berges ou du fond des lacs conduisent à des problèmes similaires.

Les exploitations à ciel ouvert comprennent l'enlèvement du sol de couverture, des roches et des autres couches couvrant les dépôts du minerai ou du combustible ainsi que l'exploitation du dépôt. Elles présentent des avantages certains par rapport aux mines souterraines, mais peuvent avoir un effet considérable sur l'état des eaux de surface et proches de la surface, ainsi que sur les processus de sédimentation.

Les grandes exploitations minières coupent le réseau de drainage naturel et modifient les phénomènes de ruissellement et d'érosion des bassins fluviaux. Les écoulements non pérennes peuvent être détournés par les déblais et dépôts locaux. Les talus de déblais élevés au cours des opérations de décapage selon les courbes de niveau ont souvent des flancs très pentus et sont faits de matériaux faciles à éroder avec seulement une faible couverture végétale ou pas de végétation du tout. De fortes pluies peuvent provoquer une érosion désastreuse et de sérieux problèmes de sédimentation.

Les exploitations à ciel ouvert peuvent agir sur la qualité de l'eau et des sols, et par conséquent également sur la vie animale et la végétation. Les polluants chimiques ont souvent des effets toxiques. Si on exploite des minerais sulfurés par exemple, l'acidité des déblais peut être létale pour de nombreuses plantes (pH 4,0). La pollution physique par les sédiments est très importante dans les régions de collines à fortes pentes soumises à des intensités pluviométriques élevées. Les recherches entreprises dans le Kentucky (E.U.) ont montré que la "production des sédiments des régions de mines à ciel ouvert peut atteindre 1000 fois celle de la forêt naturelle. Sur quatre ans, l'érosion annuelle moyenne de talus de déblais dans le Kentucky a été de 9500 tonnes par kilomètre carré alors qu'on l'estimait égale seulement à 8,8 tonnes par kilomètre carré sous forêt" (Focus on Environmental Geology, 1976).

Dans les régions arides ou semi-arides, les problèmes d'érosion et de sédimentation dus aux exploitations minières sont en général moins graves qu'ailleurs car la végétation est aussi clairsemée dans les conditions naturelles et les fortes averses sont peut fréquentes. Cependant, quand survient une violente tornade, les effets peuvent être considérables et de grandes quantités de sédiments peuvent être exportés, de la zone minière, des talus de déblais et des routes d'accès.

Les exploitations minières à ciel ouvert doivent être soigneusement organisées pour éviter les problèmes hydrologiques, sédimentologiques et les autres problèmes liés à l'environnement. Guy (1977) a proposé les étapes suivantes dans l'organisation :

- 1 Estimer l'érosion des bassins dont les cours d'eau peuvent traverser ou longer la zone minière projetée.
- 2 Etablir des plans de canaux qui préviendront l'érosion et la sédimentation dues aux cours d'eau écartés de la zone minière.
- 3 Estimer l'érosion et le transport solide des zones traitées.
- 4 Estimer l'érosion, les transports solides et les dépôts de sédiments des différentes parties des chenaux artificiels tracés à travers la zone minière.
- 5 Estimer l'impact des sédiments sur les eaux du voisinage pendant et après les travaux miniers.

1.1.3.2 Construction de routes et de bâtiments. Les zones sans aucune couverture végétale courent toujours un plus grand risque de forte érosion que les autres. Ceci est particulièrement vrai pour les régions qui ont été travaillées et remodelées et où on a troublé l'équilibre sédimentologique naturel. C'est pourquoi on peut s'attendre à une érosion extrêmement intense sur les talus et fossés de route et sur les sites de construction de façon générale. Habituellement, la production de sédiment atteint son maximum pendant les premières étapes de la période de construction.

On a signalé à plusieurs reprises des productions de sédiments exceptionnellement élevées au cours de travaux routiers. Cependant, la relation de cause à effet entre les facteurs opérationnels et physiographiques et la production de sédiments est très vague. Cela vient de l'impossibilité de prévoir les processus érosifs liés aux différentes opérations de construction. Pour maîtriser les phénomènes de sédimentation, il est nécessaire de programmer soigneusement les travaux.

Du fait que souvent on crée des talus artificiels en remodelant le terrain au cours des

travaux, la stabilité des nouvelles pentes et des masses de terre déplacées peut être faible ou critique. Non seulement il se produira une érosion de surface due à l'impact de la pluie et au ruissellement, mais aussi différents types de mouvements de masse tels que glissements, loupes de glissement, déplacements de matériaux de rebut, éboulement et décrochements, etc... Ces phénomènes peuvent contribuer de façon significative aux quantités de sédiments apportés au réseau de drainage du voisinage. C'est ainsi que les travaux de construction peuvent modifier et conditionner le développement futur des phénomènes de sédimentation dans les bassins fluviaux.

1.1.3.3 Urbanisation. Les zones urbanisées ont souvent une érosion spécifique supérieure à celle des régions rurales. On a signalé des taux d'érosion de 20.000 à 40.000 fois supérieurs à ceux des régions naturelles ou non perturbées (Becker et Mulhern, 1975).

Les plus grandes quantités de sédiments sont produites durant les phases de construction, surtout quand la végétation et le sol de couverture sont provisoirement enlevés. Les travaux de construction peuvent accroître l'érodibilité et diminuer la stabilité des pentes de façon radicale. Mais des secteurs plus anciens des zones urbaines peuvent produire des quantités de sédiments considérables souvent mêlés de polluants chimiques et biologiques.

Wolman (1967) donne un exemple de modifications des caractéristiques de l'érosion, décrivant la variation de la production de sédiments au cours de périodes correspondant à différents types d'utilisation des terres et d'urbanisation d'une région proche de Washington, D.C. Le déroulement des phénomènes est illustré par la figure 1.8. La figure 1.9 (d'après Guy 1965) donne un autre exemple de changement de concentration des sédiments dans un cours d'eau drainant une région soumise à une évolution depuis l'état naturel jusqu'à un nouvel état stable en passant par une phase de constructions.

L'érosion et les sédiments produits dans les zones de développement urbain causent souvent plus de dommages aux régions situées à l'aval que dans les sites d'érosion eux-mêmes. Le réseau de drainage peut se remplir de sédiments et sa capacité d'écoulement décroître. Les réseaux d'adduction d'eau et d'assainissement peuvent être affectés. L'adaptation naturelle ou artificielle aux nouveaux rapports entre débits solides et débits liquides peuvent être à l'origine de problèmes considérables. Par des moyens appropriés, on peut réduire efficacement l'érosion et la production de sédiments sur les sites de construction. D'après une étude faite au Maryland, E.U., on a observé que la production de sédiments a été réduite de 60 à 80% en 8 ans dans des zones de construction active. "On a attribué une part de ces réductions à la diminution des pentes sur les sites de construction et à l'augmentation des distances entre ces sites et les lits des cours d'eau, cependant elles sont surtout dues à l'amélioration de la conception et de la mise en place des dispositifs protecteurs. Parmi ces moyens de lutte, on note la limitation des aplanissements pour réduire à tout moment les surfaces découvertes, la mise en végétation provisoire, l'utilisation de mulch pour protéger les sols exposés, la construction de diguettes de diversion et de fossés stabilisés pour réduire l'érosion sur les pentes critiques, et l'utilisation de grands bassins de décantation pour piéger les sédiments sur place" (Acte de la conférence sur la sédimentation, 1976).

Dans les zones urbanisées, bien des activités peuvent être à l'origine d'une production de sédiments considérablement accrue. Dès qu'une activité entraîne l'utilisation des terres, on peut s'attendre à des phénomènes d'érosion. On peut donner en exemple la construction de logements d'écoles, de centres commerciaux, d'ensembles de bureaux et d'usines, le développement du réseau de transport et de communication par la construction de voies rapides, de rues, de routes, de voies ferrées et de ponts, le développement des centrales électriques et des lignes de transport électrique, la construction d'ouvrages hydrauliques tels que les barrages, les aqueducs, les canaux et les moyens de protection contre les crues, et encore les constructions pour les activités de loisirs telles que les terrains de camping, les parcs de stationnement et d'autres projets à finalités multiples.

Les conditions locales, aussi bien que les types de construction, varient dans de très larges limites. C'est pourquoi le projeteur est confronté avec un problème très complexe lorsqu'il essaye de tenir compte de l'érosion probable et des problèmes de sédimentation associés à un projet déterminé de construction. Dans les milieux à risques d'érosion élevés, on doit être extrêmement attentif: il faut recueillir soigneusement les données et évaluer les facteurs de risques.

Les données sur le site doivent comprendre certaines informations hydrologiques, par exemple sur l'allure des écoulements de surface et souterrains, sur les caractéristiques topographiques et géologiques, sur la nature des sols, sur la densité du couvert végétal et sur les paramètres climatiques. Dans les informations sur les constructions, il faut inclure l'étendue des surfaces concernées et la nature des perturbations de surface du terrain, les types d'équipement utilisés et le nombre de personnes concernées, ainsi que le calendrier des opérations. Les méthodes d'acquisition de données et de prédiction des effets des activités sont exposées au chapitre 3.

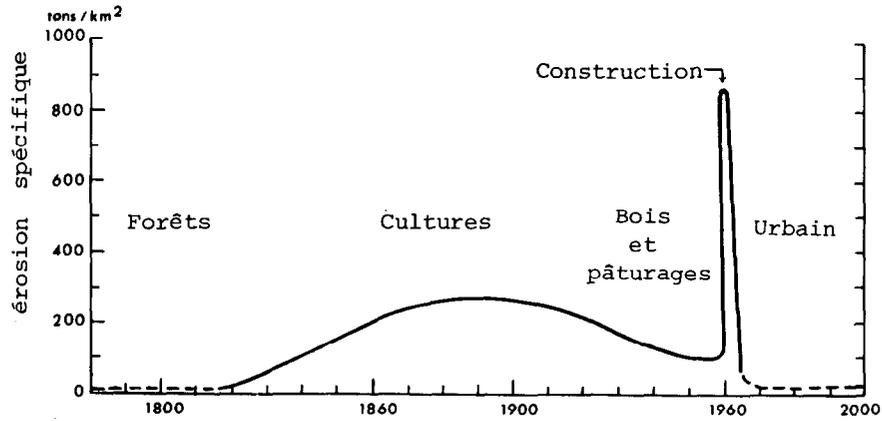


Fig. 1.8 Chronologie du changement d'utilisation des terres et de l'érosion spécifique associée; commençant avant l'extension de la mise en culture, se poursuivant pendant une phase d'urbanisation et finalement parvenant à l'urbanisation totale. Fondée sur l'expérience d'une région du Middle Atlantic des Etats-Unis (d'après Wolman, 1967).

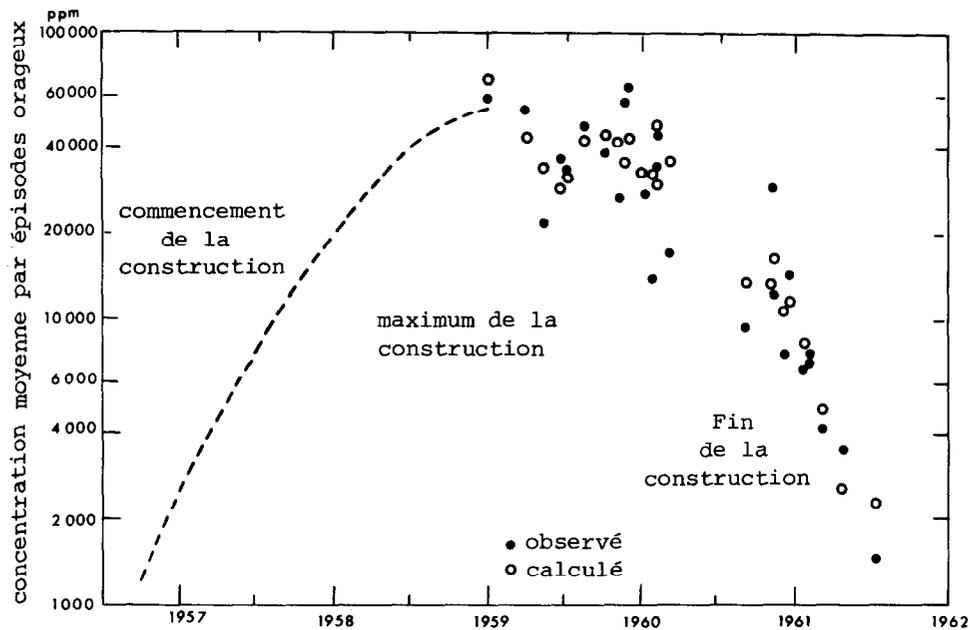


Fig. 1.9 Concentration moyenne en sédiments des écoulement d'orages dans une zone de construction résidentielle à Kensington, Maryland, E.U., 1957-1962 (d'après Guy, 1965).

1.1.4 Les processus sédimentaires et les modifications écologiques

Comme on l'a souligné, les phénomènes sédimentologiques dépendent en grande partie des facteurs du milieu et de phénomènes naturels; climat, géologie, topographie, végétation, vie animale, etc... (voir fig. 1.10). En plus, de nos jours, l'influence de l'homme est devenue très importante. Une approche écologique des problèmes du milieu met l'accent sur les relations entre les phénomènes physiques et biologiques. L'action de l'homme sur son milieu est particulièrement importante. L'accélération du développement technique a considérablement renforcé cette action, surtout dans les dernières décades.

Les ressources naturelles - énergie, minerais, sols - nous sont nécessaires pour l'agriculture et l'industrie, pour la production de nourriture et de biens de consommation. La pollution et la baisse de qualité de l'air, de l'eau et des sols est un problème à résoudre pour maintenir la qualité de l'environnement. On a accordé une grande attention au déséquilibre entre la croissance accélérée de la population et les disponibilités en sols aptes à la production de ressources alimentaires, disponibilités qui sont limitées, voire décroissantes. La dégradation des sols est en relation directe avec des phénomènes tels que le lessivage, la salinisation, l'érosion des sols et la sédimentation. Les variations des pluies, des écoulements, de la végétation, de l'occupation des terres, etc... ont une grande influence sur ces phénomènes.

C'est l'utilisation intensive des terres qui est la principale cause de l'action de l'homme sur les sols. Bien des effets de cette action entraînent des modifications irréversibles de la couverture en sols par érosion et sédimentation.

La dégradation des sols se conjugue souvent avec une destruction plus ou moins complète de la végétation naturelle, destruction dont elle est en partie la conséquence. Une production excessive de sédiments en tête de bassin du fait de l'accélération de l'érosion des sols a pour conséquence un accroissement des apports de matériaux aux rigoles, torrents et fleuves, aux étangs et aux réservoirs de barrages (voir fig. 1.11). Les travaux entrepris dans une partie du bassin versant auront dans la plupart des cas des conséquences dans d'autres zones et les problèmes surgissant dans une région déterminée ne peuvent être résolus qu'en prenant des mesures adaptées et mises au point dans d'autres endroits. On doit considérer l'ensemble du bassin versant comme une unité complexe (cf. Sundborg, 1964 et 1979). Le défrichement des forêts, de la végétation arbustive naturelle et des prairies n'a pas forcément pour résultat une accélération importante des processus érosifs, même si les conséquences pour la flore et la faune naturelles peuvent être irréversibles.

Par une gestion soigneuse, on peut maintenir la qualité des sols agricoles et même l'améliorer. Dans la plupart des cas, lorsque les sols de surface sont érodés ou couverts de graviers et de sables, la cause en est primitivement un aménagement des sols inadapté, dont une réduction inappropriée de la végétation, de la litière et de l'humus. Comme on l'a déjà noté, bien des méthodes traditionnelles d'exploitation des forêts, d'élevage et d'exploitation agricoles peuvent être à l'origine d'une érosion et d'une sédimentation dommageables depuis l'abattage des arbres pour la construction de charpentes jusqu'à la lutte contre les vols de Tsé-Tsé. La lutte contre l'érosion peut rendre nécessaire de limiter certaines de ces pratiques actuelles.

De nos jours, on dispose de techniques efficaces pour des objectifs de protection bien déterminés. On a mis en évidence des faits significatifs concernant les sols et leurs propriétés. Cependant, du fait de la complexité des processus d'érosion et de sédimentation, il est encore nécessaire d'effectuer des études détaillées. Lors de la mise au point de projets bien définis, de nombreuses études et recherches sont demandées. Le plus important cependant c'est d'accroître la connaissance et la compréhension des relations et processus écologiques complexes, afin de faciliter une meilleure application des techniques actuelles de conservation des sols dans la perspective d'une planification à long terme des ressources en eau et en sols.

1.1.5 Régions arides et semi-arides

Les régions arides et semi-arides sont particulièrement sensibles aux méthodes d'exploitation et aux changements d'utilisation des terres. Dans un rapport sur l'avancée du désert, on caractérisait la situation dans les terres arides de la façon suivante: "un tiers de la surface de la terre est aride ou semi-aride. Le territoire de la moitié des pays dans le monde est partiellement ou complètement dans des régions sèches. L'utilisation des terres arides primitives a été écologiquement tolérable pendant des milliers d'années. Ce n'est que récemment qu'une surexploitation est apparue -souvent conjuguée avec des fluctuations climatiques - du fait de l'accroissement des densités de population et des transformations sociales affectant les habitants des régions arides.

La grande variété des paysages est une caractéristique des zones arides. S'il est vrai que l'irrégularité des disponibilités en eau est un point commun, les variantes de l'environnement conduisent l'homme, dans l'ensemble, à exploiter les ressources de bien des façons différentes. La grande variété des paramètres et problèmes dans les zones arides et semi-arides compliquent



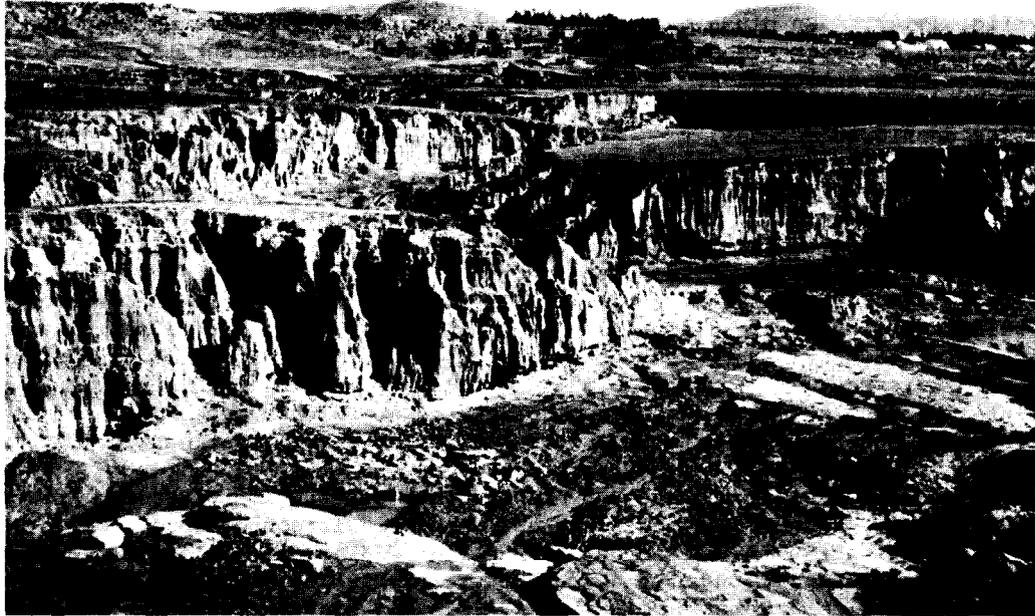


Fig 1.10 Erosion ravinante atteignant le sous-bassement rocheux et s'élargissant par érosion latérale. Le fond du ravin est à 8 à 10 mètres au-dessous de la surface primitive des terres. Lesotho, Afrique du Sud. Photo A. Sundborg, 1969.



Fig. 1.11 Une production accrue de sédiments en tête de bassin peut être cause d'une surélévation de fonds et de modifications du lit des cours d'eau plus à l'aval. La figure montre comment une crue a débordé par dessus la berge du cours d'eau à travers une brèche (coin supérieur gauche). Elle a inondé la zone, la couvrant de sable et détruisant la plantation de sisal. Mkonda river près de Kilosa, Tanzanie. Photo A. Sundborg, 1970

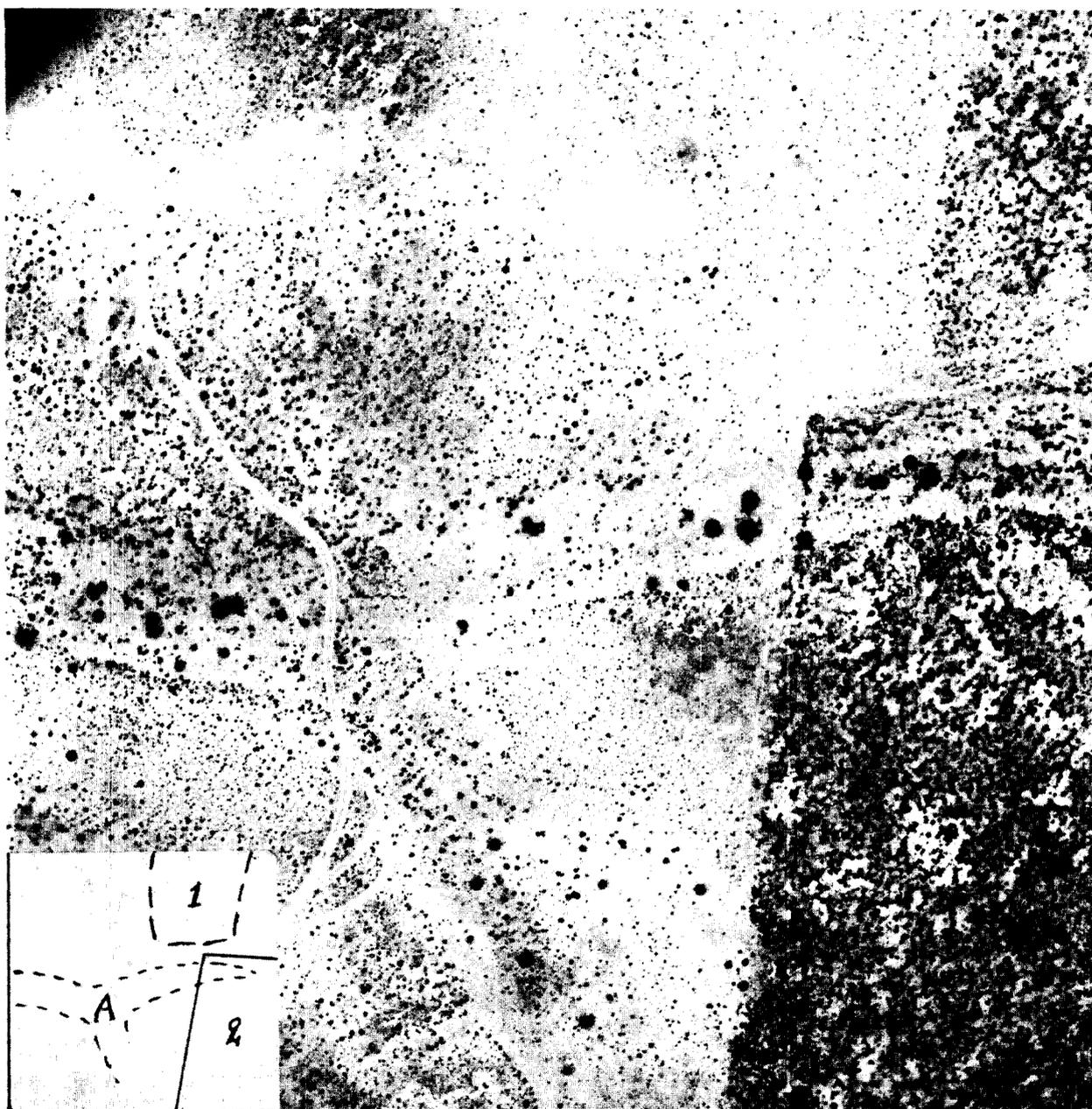


Fig. 1.12 Effets de différentes utilisations des terres dans un environnement semi-aride. La plaine côtière au nord de monts de Matmata, Tunisie. A est une zone sableuse avec des touffes d'herbes perennes résistantes. Le reste de la zone est couvert de broussailles basses:

1. Zone cultivée durant 4 ans, maintenant entièrement couverte de dunes.
2. Zone expérimentale avec pâturage contrôlé. Le reste de la région a été fortement pâturé et 20% de sa superficie est couverte de petites dunes.

Photo R. Larson, 1975.

les opérations de développement. Depuis le lancement par l'Unesco du premier programme en zone aride, il y a 25 ans, la recherche scientifique et technique a beaucoup fait progresser la possibilité pour l'homme d'utiliser ces ressources des terres sèches. En contrepartie, la surexploitation mentionnée plus haut a pour résultat une désertisation accrue qui peut contrebalancer les efforts faits pour relever la qualité de la vie dans les zones sèches (Brink, 1976; voir aussi la figure 1.12).

Dans les zones arides et semi-arides, les faibles précipitations, les variations exceptionnelles et les irrégularités de la pluie dans l'espace et dans le temps, la teneur en eau insuffisante des sols et leur déficit en certains éléments fertilisants sont les principaux facteurs limitants du développement. Même si la situation actuelle est décourageante pour l'homme dans de nombreuses régions sèches, les terres arides seront d'une extrême importance dans l'avenir, également d'un point de vue général, en tant que réserve notable de ressources naturelles. Résoudre le problème du développement des régions sèches, sans conséquences sérieuses pour l'environnement, devrait être une entreprise interdisciplinaire nécessitant avant tout la connaissance de l'écologie et du milieu ainsi que les efforts de spécialistes de toutes sortes.

"On dit que nous avons une bonne connaissance des processus responsables de la désertisation et des techniques de restauration des zones désertiques, mais notre connaissance de la structure et du fonctionnement des écosystèmes secs est en général faible. La recherche doit jouer un rôle important en nous aidant à trouver les moyens de restaurer les zones soumises à la désertisation, mais aussi pour les améliorer et les transformer en des systèmes écologiques adaptés avec une meilleure productivité. Nous avons un besoin urgent de plus d'information sur les liens existants entre les systèmes écologiques et socio-économiques. En matière de desert, même la plus parfaite technique est sans intérêt si elle ne peut être adaptée à la réalité économique et sociale" (Le Houerant et Rapp, 1976).

1.2 LE RESEAU DE DRAINAGE

1.2.1 Introduction

On peut déterminer l'origine externe des sédiments transportés dans le lit d'un cours d'eau ou dans le réseau de drainage, c'est-à-dire les sédiments provenant soit des pentes du bassin versant, des interfluves ou du lit de la rivière et des plaines d'inondation à l'amont. En chaque site particulier du réseau de drainage, la production de sédiments dans le lit représente une source interne dépendant des alluvions et autres matériaux disponibles dans le lit majeur.

Les activités humaines à l'amont du bassin ont un impact sur les apports externes de sédiments à un site particulier. Pour les interfluves, ces impacts sont décrits au chapitre 1.1. D'autres activités humaines dans, ou auprès d'un site particulier d'un fleuve, ont un impact sur les sources internes. C'est ainsi que des modifications dues à l'homme du débit ou du transport de sédiments à partir des sources externes de l'amont ou internes peuvent affecter radicalement la stabilité d'un lit avec des changements dans la formation et le développement du lit.

1.2.2 Modification du régime d'écoulement et des apports de sédiments

La formation du lit est un processus autorégulateur. L'effet régulateur dépend de la compétence du cours d'eau, elle-même déterminée par les caractéristiques de l'écoulement et par celles des sédiments transportés (Karauslev, 1960 et 1972; Graf, 1971).

Il y a érosion du lit si la compétence n'est pas atteinte, c'est-à-dire si la concentration est inférieure à la limite supérieure possible. Si elle n'est pas limitée par le cuirassage, cette érosion va accroître la profondeur du lit, d'où une diminution de la vitesse du courant et de sa compétence. L'intensité de l'érosion va à nouveau diminuer jusqu'à ce que la compétence corresponde aux apports de sédiments, l'érosion cessant alors.

L'importance de la modification du lit et le temps nécessaire pour qu'elle s'accomplisse dépendent à la fois des caractéristiques de base de l'écoulement et du lit, ainsi que du régime de l'écoulement et des apports en sédiments. La durée nécessaire peut aller de quelques heures jusqu'à des dizaines d'années.

Dans le cadre des processus régissant le réseau de drainage, le transport solide dépend des paramètres hydrauliques et les modifications du lit résultent de la différence entre la quantité de sédiments pénétrant dans le chenal et la compétence de l'écoulement dans le bief considéré.

Lorsque les interfluves fournissent des sédiments au cours d'eau, il s'agit d'une influence externe sur les processus du réseau de drainage. S'il s'agit de matériaux fins, cette influence reste marginale. Si le chenal reçoit plus ou moins des sédiments grossiers, il se produit une modification des processus pour assurer le transport des nouveaux apports de sédiments qui poursuit jusqu'à ce qu'on atteigne un équilibre dynamique. Par conséquent, les processus de forma-

tion du chenal sont déterminés non seulement par les débits liquides et/ou solides, mais encore par le rapport entre le débit réel de sédiments et la compétence de l'écoulement. Les modifications du lit peuvent ainsi être intensifiées par des changements naturels ou dus à l'homme des débits liquides et solides.

L'amplitude des modifications du chenal dépend de la différence entre les apports de sédiments dans le bief et la compétence de l'écoulement, et de la nature des matériaux composant le lit du cours d'eau. Selon ces conditions, les chenaux peuvent être définis comme stables ou instables. A.V. Karashev propose par exemple la classification dynamique suivante :

- 1 - chenaux stables : chenaux composés de matériaux consolidés et susceptibles seulement d'une légère érosion, même au cas d'une diminution considérable des apports de sédiments.
- 2 - chenaux en voie d'approfondissement : chenaux instables composés de sédiments érodibles et caractéristiques de biefs présentant un certain déficit de la charge en sédiment de l'écoulement (La Las Vegas Wash en est un exemple, voir fig. 1.13).
- 3 - chenaux en voie de comblement : chenaux instables caractérisés par un apport de sédiments excessif ou par une compétence réduite (Payette River avec le remous de la retenue de Black Canyon, voir figure 1.14).
- 4 - chenaux dynamiquement stables : chenaux dans lesquels la compétence et les apports de sédiments sont en équilibre stable (chenaux permanents).

Les débits solides et liquides dans les cours d'eau ont pour caractéristique une très grande variabilité naturelle. La variabilité du transport solide est étroitement liée au régime hydrologique et à l'état du bassin.

Les variations saisonnières et annuelles des débits solides peuvent être considérables, en particulier dans les régions arides ou semi-arides et les climats froids de montagne. Le rapport entre la compétence du chenal et les apports de sédiments peut évoluer dans le temps avec le régime de l'écoulement.

Les changements saisonniers de l'écoulement peuvent être caractérisés par la modification des processus hydrauliques et, dans une certaine mesure, ils déterminent la forme du chenal. Les variations saisonnières du rapport entre les apports de sédiments et la compétence du chenal peuvent être comparés aux variations saisonnières des dépôts temporaires.

Certaines modifications des apports liquides et solides des cours d'eau sont dues aux activités humaines et peuvent être bien plus importantes que les modifications naturelles. Les mesures faites dans les zones urbaines (Kuprianov, 1977) ont montré que toute période de construction est caractérisée par un accroissement du débit solide dû à la destruction du couvert végétal, au décapage du sol, à la perturbation de l'équilibre biologique du sol, etc... Il en résulte que pendant cette phase de construction, la qualité de sédiments apportés au chenal dépasse sa compétence et provoque inévitablement des modifications du chenal (voir paragraphe 1.1.3.3).

Lorsque la construction est achevée, le débit solide décroît en général, du fait du recouvrement des terrains, de l'asphaltage, de la création de parcs et jardins, etc... Ceci se traduit par un nouveau déséquilibre entre débit solide et compétence du cours d'eau. Les biefs situés à l'aval des barrages donnent un exemple des modifications artificielles des débits liquides et solides provoquant des changements importants dans le lit du cours d'eau. C'est un problème plutôt compliqué que celui des modifications du lit d'une rivière dont le régime hydraulique est très perturbé. Ces modifications peuvent s'étendre sur de grandes étendues et, dans ces conditions, les prévisions restent à un niveau assez général. Le calcul de l'évolution de longs biefs est plutôt compliqué et fait l'objet de nombreuses méthodes (voir chapitre 3.3.2 et 3.3.3).

1.2.3 Ouvrages de Génie Civil

Les ouvrages hydrauliques dans un cours d'eau dérangent les processus naturels d'équilibre. Par conséquent, dans tout projet hydraulique, on doit se préoccuper à la fois du transport solide et de l'effet des ouvrages sur le transport des sédiments. On peut classer les ouvrages d'hydraulique fluviale en deux catégories :

- 1 - Ouvrages agissant sur les processus du réseau de drainage avec des modifications locales et généralisées du lit, des berges et des plaines d'inondation;
- 2 - Ouvrages ne modifiant ni les débits ni les débits solides,

Si l'on adopte cette classification, les ouvrages du premier groupe peuvent être qualifiés d'"actifs" et ceux du second groupe de "passifs" (Kuprianov, 1977). Les ouvrages "passifs" n'ayant pas d'action sur les processus observés dans les chenaux, nous n'en parlerons pas ici. On peut classer les ouvrages "actifs" en deux catégories :

1. Les ouvrages à effets localisés, modifiant les phénomènes dans les chenaux à leur proximité immédiate.
2. Les ouvrages à effets généralisés, qui sont la cause de modifications profondes du

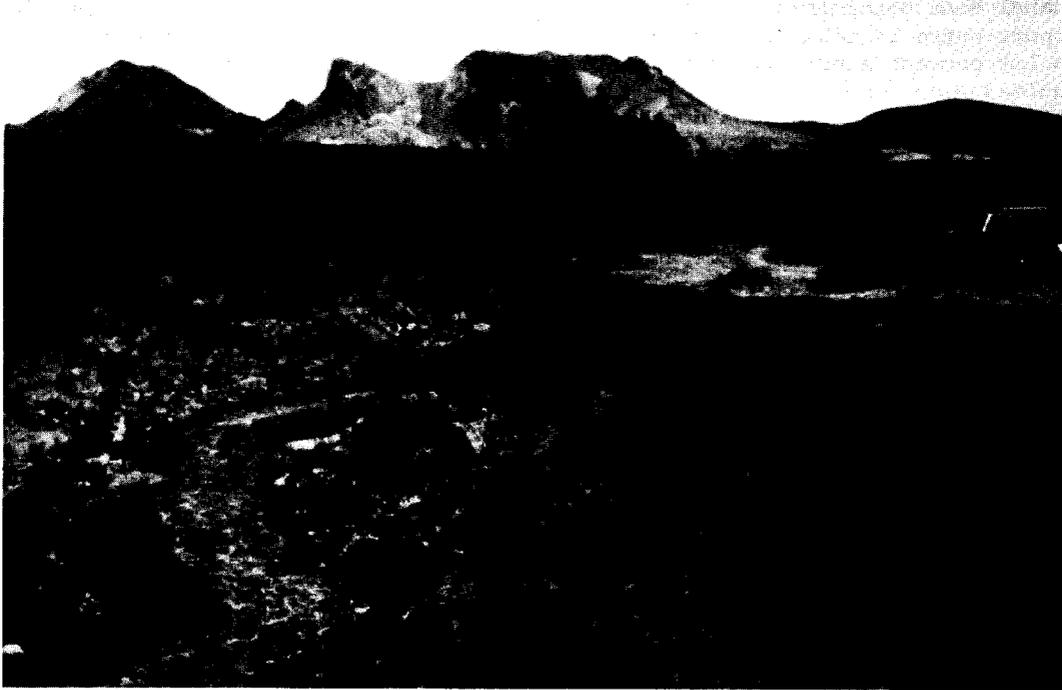


Fig. 1.13 Chenal instable consécutif à une grande crue du 3 juillet 1975, avec une érosion du lit de 2 à 3 m dans le Las Vegas Wash près de Las Vegas, Nevada, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U., 1975).

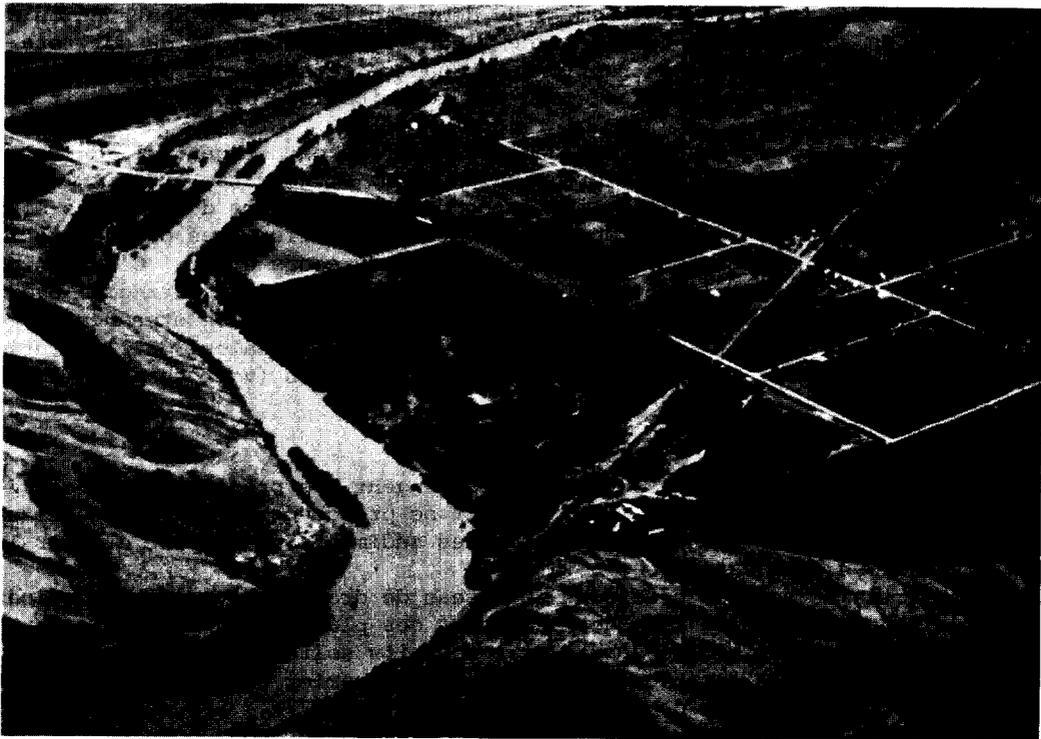


Fig. 1.14 Dépôt de sédiments dans la Payette River et perte de capacité du chenal dans l'extrémité de la retenue de Black Canyon, près de Boise, Idaho, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U., 1971).



Fig. 1.15 Epis le long de la rive droite du Rio San Pedro près de Tuxpan, Mexique.
Photo E.L. Pemberton, 1980.

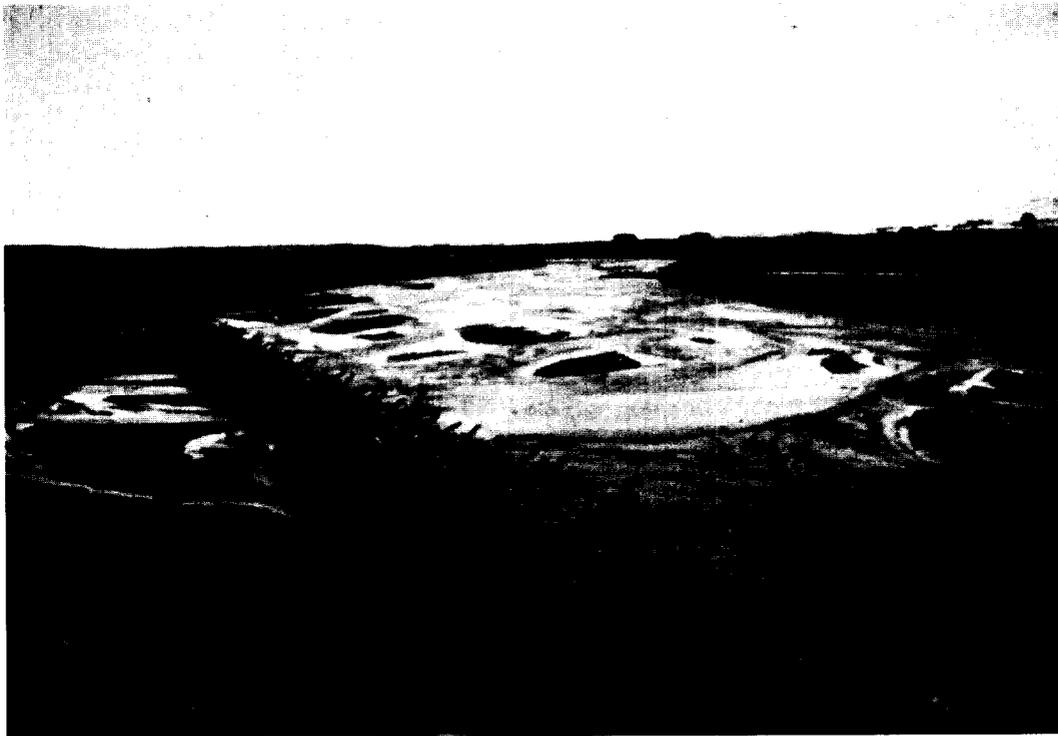


Fig. 1.16 Chevalets de bois utilisés pour lutter contre l'érosion de la Five Mile Creek
dans le Wyoming, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U., 1954).

régime hydrologique et de transformations du réseau de drainage sur de longues distances.

1.2.3.1 Effets localisés. Les ouvrages modifiant les lits peuvent être classés de la façon suivante :

- 1 - Ouvrages de berges: ces ouvrages sont liés à l'une des berges, comme les épis, les contreforts, les protections latérales et les digues de correction. Ces ouvrages peuvent réduire la largeur de la section en travers et, donc, être à l'origine d'une érosion transversale qui modifie la pente et la profondeur du bief. On doit aussi tenir compte du fait que beaucoup de ces ouvrages augmentent la rugosité des berges (voir figure 1.15). Il se produit également des affouillements localisés à leur pied.
- 2 - Ouvrages guidant le courant: ces ouvrages ne réduisent pas la section en travers de façon significative et ne produisent donc que des affouillements localisés. La figure 1.16 montre des chevalets de bois employés pour stabiliser un cours d'eau.
- 3 - Ouvrages de fixation du fond: on trouve dans ce groupe tous les ouvrages qui fixent ou élèvent le niveau du lit sur une courte longueur du bief ou une section en travers, tels que les déversoirs avec vannes, les barrages de dérivation, etc... L'effet principal de ce type d'ouvrage est une élévation du lit à l'amont et un affouillement à l'aval (voir figure 1.17). Dans un cours d'eau en équilibre dynamique, les ouvrages hydrauliques peuvent modifier localement la pente du cours d'eau et le champ des vitesses. Des zones de plus fortes vitesses et de turbulences apparaissent souvent dans leur voisinage. Cela perturbe l'équilibre du lit produisant des érosions et des dépôts localisés. Avec le temps cependant ces perturbations disparaissent et le chenal atteint un nouveau profil d'équilibre. Par exemple, lorsque l'on construit un ouvrage qui réduit la section en travers, l'augmentation de la vitesse du courant sur son emplacement aura pour conséquence un accroissement de la compétence. Si les conditions à l'amont du bief sont stables, les apports de sédiments sont alors stables. Ainsi la compétence de l'écoulement dépassera les apports de sédiments au bief. Le lit sera érodé, l'importance de la modification étant liée à la différence entre apports et compétence. L'érosion se poursuivra jusqu'à ce que la compétence soit égale aux apports.

1.2.3.2 Effets généralisés. Les grands aménagements sont la cause d'une redistribution des apports d'eau et de sédiments qui modifie les processus du réseau de drainage. Une retenue retient les sédiments et le pouvoir érosif de l'écoulement à l'aval tend à s'accroître par rapport à la situation initiale. Cela provoque une érosion localisée plus forte près du barrage, aussi bien qu'une intensification du phénomène dans le réseau de drainage plus loin à l'aval (Makkaveev, 1970; Simons et Sentork, 1977; Bureau of Reclamation, 1974). Ces changements à l'aval peuvent être ressentis sur de longues distances (10 km ou plus). Le comblement en tête de retenue à l'amont est intensifié, produisant une élévation du niveau de l'eau. L'abaissement du niveau de base est une autre source de perturbations généralisées perceptibles sur de longues distances. Si le niveau d'une mer, d'un lac ou d'une retenue où se jette un cours d'eau s'abaisse, alors une érosion linéaire peut se produire à l'extrémité aval du cours d'eau ayant pour effet d'accroître la pente du lit et la vitesse du courant (figure 1.18). La compétence augmente dans cette zone et il se produit une érosion du lit qui s'étend progressivement vers l'amont.

On observe souvent un abaissement du niveau de base à l'aval d'une retenue, là où les affluents se jettent dans un lit érodé. Il se produit dans ces affluents une érosion linéaire et la vitesse de l'écoulement s'y accroît. Comme il est plutôt compliqué de calculer les transformations du lit et que cela demande du temps, on considère en général des cas simples, encore qu'avec l'aide des ordinateurs modernes on surmonte cette difficulté grâce aux techniques de modélisation mathématique.



Fig. 1.17 Erosion des sédiments déposés à l'amont du barrage de dérivation du Rio Blanco en cours de déversement par le déversoir près de Pagosa Springs, Colorado, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U., 1973).

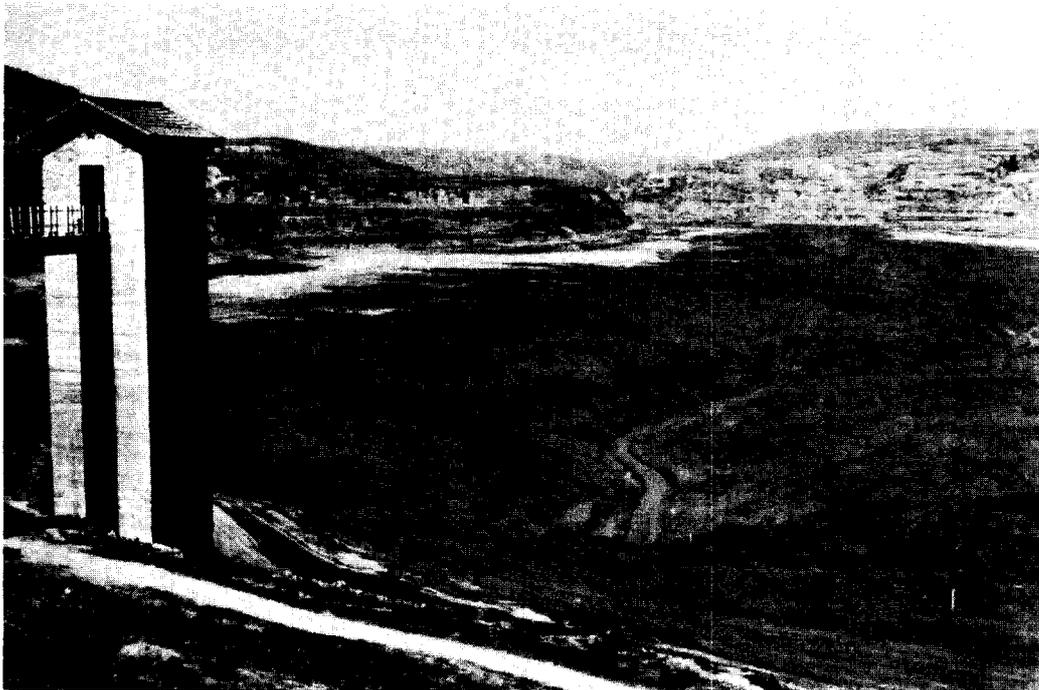


Fig. 1.18 Sédimentation dans la retenue de Heisonglin sur un affluent du Fleuve Jaune, Shenxi, China. L'eau chargée de sédiments est évacuée au début de la saison des crues pour diminuer le taux de sédimentation. Photo A. Sundborg, 1980.

REFERENCES

- Anderson, A.G. 1961. Sedimentation. In: Streeter, V.L. (ed.) Fluid dynamics handbook, chap.18. New York, McGraw Hill.
- Becker, B.C.; Mulhern, J.J. 1975. Sediment yield and source prediction for urbanising areas. Agr. Res. Service, U.S. Dept. Agric. (ARS-S140).
- Brinck, P. 1976. Preface to Ecological Bulletins no.24, Stockholm. Nat.Sci.Res. Council.
- Bureau of Reclamation, 1974. Design of small dams.
- Cooke, R.U.; Doornkamp, J.C. 1974. Geomorphology in environmental management. Oxford, Clarendon Press.
- FAO. 1976. Hydrological techniques for upstream conservation. FAO, Rome. (Conservation Guide 2).
- FAO. 1976. Conservation in arid and semi-arid zones. FAO, Rome. (Conservation Guide 3).
- FAO. 1976. Soil conservation for developing countries. FAO, Rome. (Soils Bulletin 30).
- Graf, W.H. 1971. Hydraulics of sediment transport. New York, McGraw Hill.
- Guy, H.P. 1965. Residential construction and sedimentation at Kensington, Md. U.S. Dept. Agric. (Misc. Publ. 970).
- Guy, H.P. 1977. Sediment information for an environmental impact statement regarding a surface coal mine, western United States. Proc. Paris symposium, July 1977. IAHS-AISH (Publ. no.122).
- Le Houerou, H.N. 1976. Rehabilitation of degraded arid lands. Ecological Bulletins, no. 24 Stockholm, Nat. Sci. Res. Council.
- Le Houerou, H.N.; Rapp, A. 1976. Can desertization be stopped? Summary and recommendations. Ecological Bulletins, no.24, Stockholm. Nat. Sci. Res. Council.
- Karaushev, A.V. 1960. Problemy dinamiki estestvennykh vodnykh potokov (Problems of the dynamics of natural streams). Leningrad, Gidrometeoizdat, p.392.
- Karaushev, A.V. 1968. Nekotorye teoreticheskie voprosy regulirovaniya rechnykh rusel (Some theoretical problems of river channel control). Symposium 'Current problems of river training and sediment movement'. Budapest.
- Karaushev, A.V. 1969. Technaya gidravlika (River hydraulics). Leningrad, Gidrometeoizdat p. 416.
- Karaushev, A.V. 1972. Obshie i nekotorye chastnye voprosy teorii ruslovykh protsessov i sklonovoi teorii (General and some specific problems of the theory of channel processes and slope theory). Trans. GGI, vol. 191 p.5-22.
- Kuprianov, V.V. 1977. Hydrologicheskie aspekty urbanizatsii (Hydrological aspects of urbanisation), Leningrad, Gidrometeoizdat, p.184.
- Makkaveev, N.I. 1970. Vozhdeistvie krupnogo hidrotekhnicheskogo stroitelstva na geomorfologicheskie protsessy v rechnykh dolinakh (Impact of large hydraulic structures of geomorphological processes in river valleys). Geomorphologia, no.2, p.29-34.
- Megahan, W.F. 1975. Sedimentation in relation to logging activities in the mountains of central Idaho. Agr. Res. Service, U.S. Dept. Agric. (ARS-S-40).
- Novikoff, G. 1975. Traditional grazing practices and their adaptation to modern conditions in Tunisia and the Sahelian countries. Ecological Bulletins, no. 24, Stockholm. Nat. Sci. Res. Council.
- Proc. Third Federal Inter-agency Sedimentation Conf. 1976. Denver, Sedimentation Committee, Water Resources Council.
- Rapp, A. 1975. Soil erosion and sedimentation in Tanzania and Lesotho. Stockholm, Ambio.
- Rapp, A.; Berry, L.; Temple, P. (ed.) 1973. Studies on soil erosion and sedimentation in Tanzania. Geogr. Ann. 54A, Stockholm.
- Staples, R.R. 1938. Report on run-off and soil erosion tests at Mpwapwa in semi-arid Tanganyika Tanganyika, Ann. Rep. Dept. Vet. Sci. Anim. Husb.

Sundborg, A. 1964. The importance of the sediment problem in the technical and economic development of river basins. Uppsala. (Medd.Uppsala Univ.Geogr.Inst., no.197).

Sundborg, A. 1979. Influence of man's activities on river behaviour in different climates. Hydrology in developing countries. Oslo. (Nordic IHP Report no.2).

Tank, R.W. (ed.) 1976. Focus on environmental geology. A collection of case histories and readings from original sources. London, Oxford Univ.Press.

Trimble, S.W. 1974. Man-induced soil erosion on the southern Piedmont 1700 - 1970. Soil Cons. Soc. America.

Ukazania pa raschetu zailenia vodokhranilistich pri stroitel'nom proektirovanii. 1973. (Instruction for the computation of sedimentation at water projects). Leningrad, Gidrometeoizdat, p.56.

U.S. Environmental Protection Agency. 1967. Nonpoint source control guidance construction activities. Washington, D.C. 20460.

Wolman, M.G. 1967. A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels. Geogr. Ann. 49 A, Stockholm.

2 Processus d'érosion et de sédimentation

2.1 GENERALITES

2.1.1 Les types d'érosion et de dépôts

On a défini l'érosion comme le détachement de fragments ou de particules de sol ou de roche de leur position initiale par l'eau et les autres agents géologiques tels que le vent, la glace, les volcans, les tremblements de terre, etc... Erosion géologique et érosion des sols sont les deux termes de base couramment utilisés pour décrire les phénomènes d'érosion. On utilise dans cette publication un troisième terme qui est l'érosion linéaire, principalement l'érosion des berges ou du fond du lit et quelquefois une partie de l'érosion des sols. Bien que les activités humaines influent principalement sur l'érosion des sols et l'érosion linéaire, l'homme a subi et ressenti les effets de toutes les formes d'érosion et de dépôts de sédiments.

L'érosion géologique est celle qui sculpte la surface de la terre, créant les montagnes, les vallées profondes, les plaines d'inondation, les déserts et les deltas dans des conditions naturelles ou relativement peu perturbées. L'altération est un processus de désagrégation des roches par des phénomènes mécaniques et chimiques et elle est considérée dans ce rapport comme faisant partie de l'érosion géologique.

L'érosion géologique a pour origine les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, les glissements de terrain, les coulées de lave et le ravinement. Elle a plus ou moins été influencée par les activités de l'homme, pouvant nécessiter une intervention correctrice.

L'érosion des sols est plus étroitement liée aux terres agricoles car, par définition, le sol est constitué des matériaux, minéraux ou organiques, non consolidés, qui sont propres au développement des cultures.

A la surface des terres agricoles, forestières ou à pâturages, les particules de sol sont détachées par la pluie, emportées par le ruissellement. Ceci peut prendre la forme d'érosion en nappe avec une mince lame d'eau s'écoulant sur une pente douce des hautes terres. L'érosion en rigoles est une autre forme, l'écoulement se faisant dans des incisions bien définies quoique petites à la surface des terres (voir figure 2.1). L'érosion en ravine c'est la dissection de la surface du sol par un chenal profondément découpé dans les terres se formant à l'aval d'un bief non incisé et créant ainsi une rupture de pente brutale.

L'érosion du réseau de drainage c'est l'érosion des berges et du fond des chenaux par l'écoulement (voir figure 1.13). Un fleuve ou un cours d'eau transporte les sédiments provenant du ruissellement de surface des parties amonts par les processus d'érosion géologique ou d'érosion des sols décrits ci-dessus. La capacité du cours d'eau à transporter sa charge de sédiments dépend de la vitesse du courant, de son énergie. Si les apports de sédiments provenant de l'amont sont faibles, alors il reste de l'énergie disponible qui attaque ou érode les berges et le fond du lit. Un faciès de méandres peut se développer du fait de l'action de l'érosion sur la rive extérieure ou concave. Les chutes d'eau sont une forme plus spectaculaire et moins courante d'érosion due à l'action différentielle de l'érosion sur une couche géologique plus résistante.

Dépôt de sédiment : C'est le terme du cycle sédimentaire. La forme la plus courante que l'on peut observer au cours du façonnement des paysages, c'est le dépôt temporaire des particules de roches et de sols. Ainsi qu'on l'a déjà dit, une particule isolée peut se déposer dans une plaine d'inondation et attendre des milliers d'années dans la berge d'un cours d'eau avant

d'être emportée par l'érosion.

Dans un bassin de n'importe quelle taille, grand ou petit, les particules une fois déplacées par une quelconque des forces d'érosion décrites plus haut peuvent se déposer temporairement n'importe où. Les vallées de montagne, les pentes des talus le long des collines de piedmont où des hauts plateaux, les plaines de graviers à l'aval des lits plus pentus de montagne, les cones de déjection, les plaines d'inondation et les deltas sont des lieux classiques de dépôt. Il peut se former des dépôts plus localisés à l'intérieur d'un bassin fluvial sur des terres de cultures à l'extrémité d'un champ, à l'aval d'une ravine, dans un bras-mort ou un ancien méandre, sur la rive interne ou convexe dans la courbe d'un cours d'eau ou dans des deltas plus petits à l'amont des lacs ou des retenues ainsi que le montre la figure 1.18.

2.1.2 Caractéristiques des bassins versants

Dans un bassin fluvial ou bassin versant, l'arrachement des particules sédimentaires de leur emplacement d'origine, leurs déplacements et leur dépôt dépendent de nombreuses caractéristiques de bassin. Ces caractéristiques peuvent être soit physiques, soit hydrologiques et sont fortement interdépendantes.

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influant sur l'érosion, le transport solide et les dépôts sont : le relief, la nature géologique, les sols, la végétation, l'occupation des terres, la morphologie du réseau de drainage.

Les perturbations inhabituelles agissent également sur l'érosion et le mouvement des sédiments : tremblements de terre, avalanches, éruptions volcaniques, coulées de lave et glissement de terrain (figure 2.2).

Outre les caractéristiques d'un bassin versant, il y a deux zones géographiques distinctes utiles pour évaluer aussi bien l'érosion que le transport solide, ce sont les interfluves et le réseau de drainage. Les interfluves comprennent toutes les zones hautes de montagnes à l'amont, aussi bien que les plus basses, les plus plates, les terrasses alluviales et les plaines mais ne comprennent pas le système complexe des chenaux d'écoulement et du réseau de drainage lorsque la largeur d'une rive à l'autre dépasse un mètre. Dans les interfluves, taux d'érosion et transport solide sont moins faciles à déduire des caractéristiques physiques et hydrologiques que dans le réseau de drainage. Dès que les sédiments atteignent un cours d'eau caractérisé, les transports solides deviennent mieux prévisibles à partir des caractéristiques physiques des particules et des forces hydrodynamiques dans le chenal d'écoulement.

Les caractéristiques hydrologiques comprennent des facteurs climatiques : précipitations et températures qui sont importantes pour le développement d'un bon couvert végétal. Précipitations et écoulements jouent aussi un rôle capital pour l'érosion et les transports solides. Le volume et l'intensité des précipitations jouent tous deux un rôle important dans les processus d'érosion par suite de leur effet dans la dynamique du détachement des particules des sols sans protection et du maintien en mouvement des particules par l'écoulement. Les autres caractéristiques hydrologiques à prendre en considération sont le déplacement des lignes de grain ou les orages convectifs, l'accumulation des neiges et l'évaporation.

2.2 LES INTERFLUVES

Les interfluves d'un bassin versant ont été définis comme étant tout ce qui n'est pas le réseau de drainage. Ils représentent en général 95% ou plus de la surface totale. Le caractère irrégulier, à la fois dans le temps et dans l'espace, de l'érosion des sols et des mouvements de sédiments dans les interfluves, provient de l'interdépendance et de la complexité des caractéristiques physiques et hydrologiques. Les particules sédimentaires sont constamment soit érodées, soit déplacées ou déposées selon les interactions des caractéristiques du bassin versant déterminées par les processus d'altération, les paramètres climatiques, les facteurs topographiques, géologiques et pédologiques, par le couvert végétal et l'occupation des terres.

Les particules de sol sont délogées par le choc des gouttes de pluie à la surface du sol avec des vitesses atteignant 9 m s^{-1} . L'impact des gouttes de pluie fournit une intense force hydrodynamique au point d'impact (Mutcher et Young, 1979). Une fois détachée, la particule est mise en mouvement par le rejaillissement de la goutte de pluie sur la surface du sol et entraînée par l'écoulement le long de la pente (Meyer et al., 1975). L'efficacité de ces processus est déterminée par les facteurs suivants :

2.2.1 Les processus d'altération

Les altérations qui se produisent dans les interfluves conduisent éventuellement à la formation de sols. Quoique l'eau et la roche soient considérées ordinairement comme les éléments de base



Fig. 2.1 Erosion en rigoles sur le flanc d'une colline dans l'Idaho, E.U.
Photo C.W. Johnson, 1977



Fig. 2.2 Glissement de terrain à Ichinomiya-Machi, Hyogo-Ken, Japon,
le 13.9.1976. Photo Hideo Kikkawa.

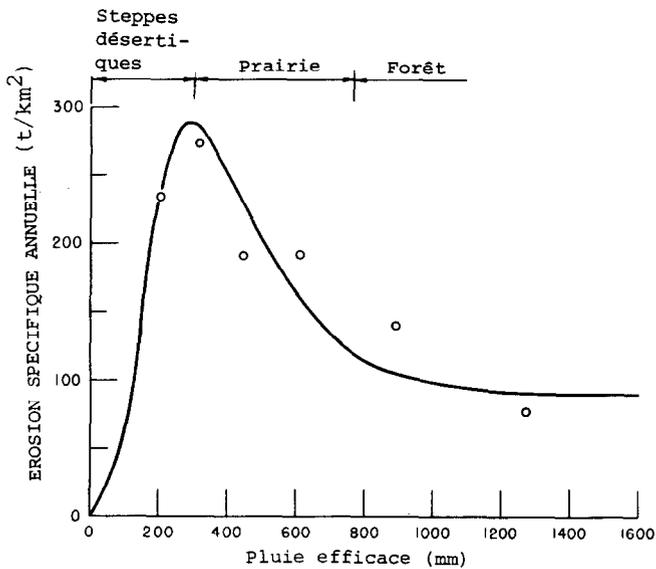


Fig. 2.3 Diagramme schématique montrant la variation de l'érosion spécifique en fonction du climat. Données provenant de 100 stations réparties à travers les Etats-Unis (d'après Langbein et Schumm, 1958).

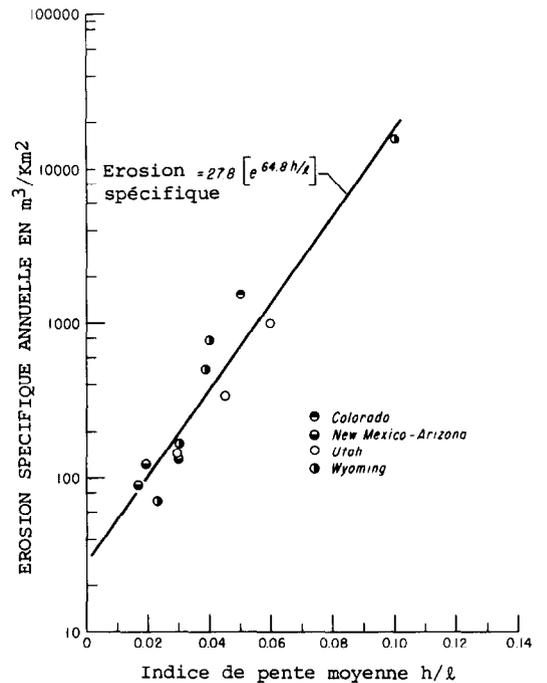


Fig. 2.4 Exemple de relation entre l'indice de pente moyenne et l'érosion spécifique en fonction du climat. Données provenant de 59 bassins versants (Schumm et Hadley, 1961).

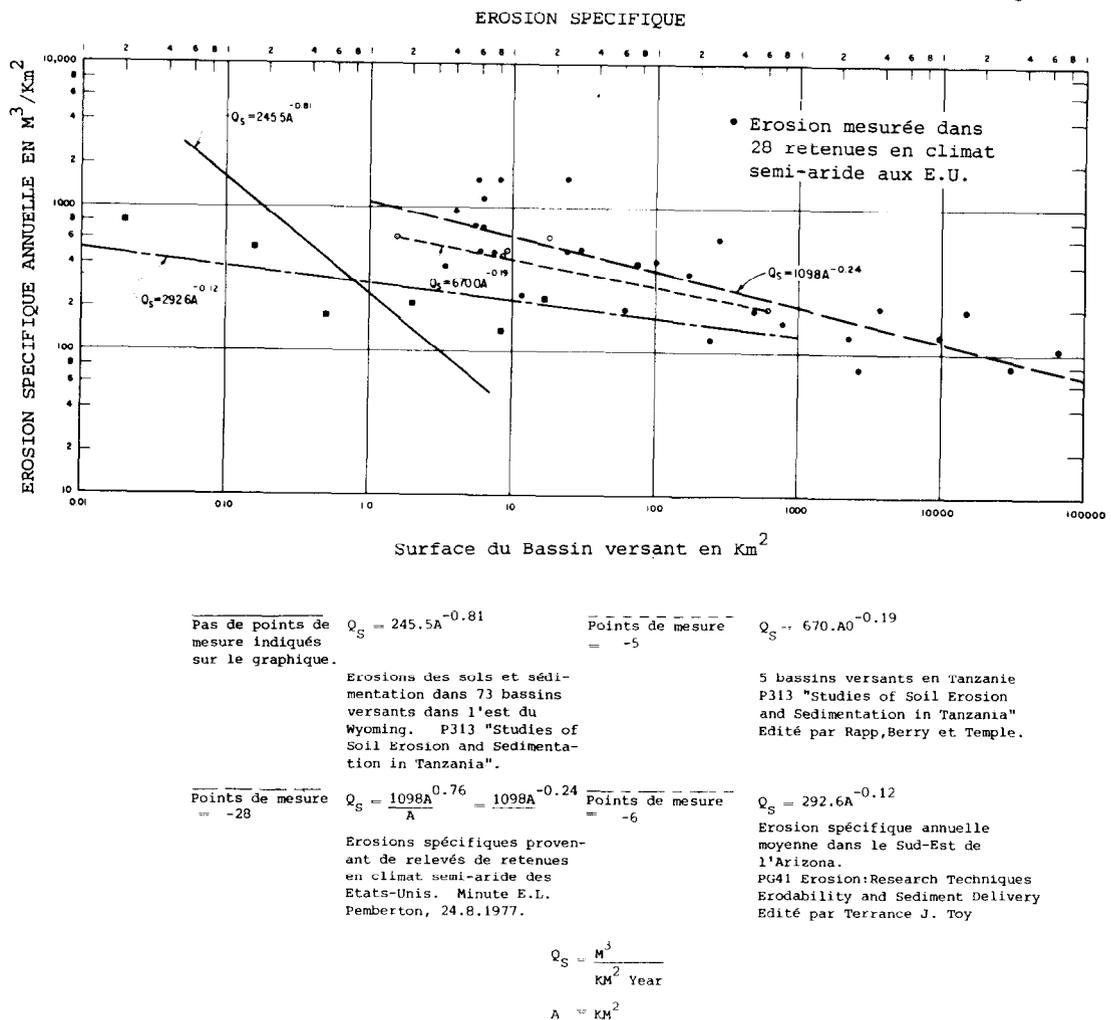


Fig. 2.5 Erosion spécifique en fonction de la superficie des bassins versants. (Bureau of Reclamation, USA).

des phénomènes d'altération, d'autres paramètres interviennent: minéraux, éléments chimiques, matière organique, température et relief. L'altération peut être qualifiée de mécanique, c'est la désintégration de la roche par l'eau, la glace et le vent, ou de chimique, c'est la décomposition de la roche par l'eau par une action chimique.

La reconnaissance de l'altération comme processus naturel de formation des sols est le fait important dans les interfluves. En bien des endroits, le stade de formation de ces sols est difficile à préciser car les particules de roches sont continuellement soumises à de nouvelles fragmentations par altération.

2.2.2 Influence du climat

Certaines influences climatiques constituent une partie des processus d'altération. Les changements de température, la hauteur de précipitation et le vent ont des effets prépondérants sur l'altération mécanique. La plupart de ceux qui étudient les phénomènes d'altération en climat aride au cours de la formation des sols pensent que le taux plus faible d'altération chimique s'explique par la granulométrie grossière des sédiments ou des sols.

Pluie et écoulement sont les deux phénomènes hydrologiques qui ont le plus d'importance pour l'érosion des sols. Hauteur de pluie et forme des averses sont ensemble des facteurs clefs de l'érosion. La pluie contribue ainsi à la croissance de la végétation qui a une forte influence sur l'érosion et une influence indirecte également sur l'utilisation des terres dans un bassin versant.

La pluie est essentiellement à l'origine de l'érosion par son impact sur les particules de sols qu'elle détache ainsi des matériaux de surface. Il s'ensuit par conséquent que l'intensité de la pluie est un facteur clé pour déterminer la quantité de sédiments arrachés au sol. Une fois les particules détachées, la quantité de pluie qui ruisselle détermine le mouvement de sédiments des interfluves vers le réseau de drainage. Les autres facteurs climatiques exerçant une influence sur l'érosion des sols par la pluie et les ruissellement sont la température, les variations saisonnières des orages, leur localisation, leur fréquence et le régime des vents. L'influence du climat sur l'érosion est difficile à évaluer à cause des variations des paramètres climatiques, aussi bien que de celle des autres caractéristiques des bassins versants. La relation établie par Langbein et Schumm (1958) entre hauteur de pluie efficace et érosion spécifique, en utilisant les résultats d'environ 100 stations de mesure des Etats-Unis, est un instrument utile pour évaluer l'érosion des sols (voir fig. 2.3).

L'érosion spécifique maximum (environ 290 t.km^{-2}) se produit en climat semi-aride avec un peu moins de 300 mm de pluie annuelle. On ne sait pas dans quelle mesure les activités humaines ont déjà influencé ou biaisé les données reportées sur la figure 2.3. Il ne fait aucun doute que les cultures, l'élevage, les constructions, les modifications du réseau de drainage telles que l'implantation de barrage-réservoirs et les travaux affectant les lits des cours d'eau ont une influence sur la production de sédiments. Toutefois, il est possible que la forme générale de la relation de la figure 2.3 ne soit pas représentative des phénomènes observés ailleurs dans le monde.

2.2.3 Facteurs topographiques

Dans les interfluves en conditions naturelles, sans intervention des activités humaines, il est difficile de mettre en évidence l'effet des facteurs topographiques sur les processus naturels d'érosion. Les modifications des formes du terrain donnent un aperçu des facteurs topographiques agissant sur l'érosion. Les facteurs topographiques essentiels sont la pente du bassin versant, le relief, la densité de drainage, l'importance des vallées et des plaines d'inondation, l'orientation et la taille.

Les fortes pentes avec un écoulement rapide sont en général à l'origine d'une érosion excessive dont l'importance dépend de la géologie, des sols et de la protection de la couverture végétale. Le relief d'un interfluve, communément défini par le gradient de pente, c'est-à-dire la dénivelée entre point haut et point bas divisée par la distance en ligne droite entre ces deux points, a été utilisé par Schumm et Hadley (1961), cherchant une relation entre ce facteur et l'érosion spécifique comme indiqué par la figure 2.4. Cette relation a été établie à partir de mesures faites sur 59 bassins versants des Montagnes Rocheuses aux Etats-Unis. On la considère comme un essai d'analyse de l'effet du relief sur l'érosion en zone semi-aride.

L'orientation d'un bassin versant influence l'érosion. Dans l'hémisphère Nord, les pentes exposées au Sud s'érodent plus rapidement que celles exposées au Nord. Ceci s'explique en grande partie par les différences de végétation. Cela est dû à de plus grandes variations de la température de l'eau et du sol sur les pentes exposées au Sud avec des alternances plus fréquentes de gel et de dégel.

La taille des bassins est le facteur topographique le plus communément utilisé pour estimer

quantitativement l'érosion spécifique. Il est commode d'utiliser les résultats obtenus à des stations de mesure de débit solide ou à partir des relevés des capacités de stockage des barrages-réservoirs pour rechercher des relations entre érosion spécifique et taille des bassins. On trouvera à la figure 2.5 de telles relations établies pour diverses régions arides ou semi-arides.

De nombreuses relations de ce genre ont été établies à travers le monde pour montrer l'influence de la taille des bassins. Invariablement, les points correspondants sur les graphiques aux petits bassins versants sont très dispersés, ce qui indique l'influence des variations des autres facteurs. Les équations représentées sur la figure 2.5 montrent également l'existence d'une corrélation négative entre érosion spécifique et superficie des bassins versants. Cela peut s'expliquer par le fait que sur des surfaces plus grandes on a moins de pentes d'un seul tenant, un pourcentage de la surface plus faible occupé par des formations plus facilement érodibles et plus de facilités pour que les sédiments arrachés aux fortes pentes se déposent dans les plaines d'inondations situées à l'aval.

2.2.4 Facteurs géologiques et pédologiques

Ce sont les facteurs géologiques relatifs aux roches de surface qui sont importants en matière d'érosion. Si les roches sont exposées à la pluie, au vent et aux forces de gravité, il peut y avoir désagrégation. Les roches les plus résistantes et les formations cohérentes produisent peu de sédiments. Les dépôts alluviaux peuvent être cités comme très érodibles. Quelques exemples d'érosion géologique : glissement de terrain avec chute de roches au bord des falaises, coulées de débris et avalanches dues à la rupture des roches et à une compacité plus faible. Dans certaines régions, toutes les formations géologiques peuvent être recouvertes d'alluvions ou de roches altérées qui sont des matériaux sensibles à l'érosion.

On considère le sol comme de la roche ayant subi une altération chimique ou physique et, dans bien des cas, mélangée à de la matière organique. A l'échelle mondiale, les sols présentent des caractéristiques très diverses et ont des profils variés selon les relations des caractéristiques hydrologiques et physiques. Les sols des régions arides ou semi-arides à la végétation clairsemée diffèrent beaucoup de ceux de climats plus humides, comme dans les zones forestières. La répartition granulométrique est une caractéristique fondamentale pour l'érosion de tous les sols : il s'agit de la composition en argile, limon et sable. Outre la répartition granulométrique des sols, leur perméabilité, la présence de certains éléments chimiques et de matière organique conditionnent l'érodibilité des sols. A ce jour, tous les essais pour définir l'érodibilité d'un sol sont qualitatifs. On a fait quelques études, sur le terrain ou en laboratoire, pour évaluer la résistance à l'érosion de certains sols. Tous les chercheurs ont mis en évidence les trois propriétés essentielles des sols pour déterminer l'érodibilité : (1) la teneur en limon et en argile, surtout en argile; (2) la matière organique qui assure la cohésion du sol; et (3) les caractéristiques minéralogiques et chimiques des sols qui ont un rapport avec la cohésion du sol.

La résistance au cisaillement d'un sol en kilogrammes par mètre carré est indirectement liée à son érodibilité. D'autres mesures de la résistance d'un sol sont celles que l'on fait des forces de cohésion comme l'index de plasticité ou le taux de dispersion.

2.2.5 Couvert végétal

La végétation qui couvre le sol des interfluves est une des variables à dépendances multiples, essentielles pour l'érosion, puisqu'elle dépend de la pluie, des sols et de la topographie. Un bon couvert végétal limite l'érosion en dissipant l'énergie de la pluie, favorise l'infiltration et s'oppose à toutes les formes d'érosion, que ce soit celle de l'eau, celle du vent ou celle due à la gravité.

Le couvert végétal peut être classé en trois types généraux : végétation arbustive des zones désertiques, prairies et forêts. La figure 2.3 montre les relations entre ces types de végétation et la hauteur de pluie. La dispersion des points de ce graphique s'explique en partie par des variations de densité aussi bien que par la variété des espèces rencontrées dans chaque type. On établit des corrélations entre la végétation et l'érosion en utilisant la densité du couvert ou la masse de végétation par kilomètre carré (biomasse végétale).

2.2.6 Occupation des terres

L'occupation des terres et la végétation sont en rapport avec d'autres facteurs tels que : topographie, géologie, sols, climat et caractéristiques hydrologiques. L'occupation, sauf en des lieux éloignés et inhabités, est en rapport direct avec les activités humaines. Les activités qui ont la plus grande influence sur l'érosion des sols sont l'agriculture, l'élevage, les exploitations minières, l'abattage du bois, la construction de routes et l'urbanisation.

Dans une zone de sols érodibles, la suppression de la végétation ou toute autre activité qui

entraîne une modification de la densité du couvert végétal agira sur les phénomènes d'érosion. Les activités de construction peuvent avoir l'effet le plus important à cause à la fois de la suppression de la végétation, des modifications topographiques et de la destruction de l'équilibre du sol. Certaines modifications de l'occupation des terres peuvent ne pas modifier l'érosion ou même la réduire comme l'aplanissement d'une zone fortement ravinée.

2.3 RESEAU DE DRAINAGE

2.3.1 Mouvement des sédiments

2.3.1.1 Caractéristiques des sédiments. On peut distinguer les sédiments cohérents et non-cohérents. Les sédiments cohérents reposant sur le fond ou dans les berges sont consolidés par des liens électrostatiques ou chimiques qui opposent une résistance aux forces d'érosion. Une fois en mouvement, cependant, ils perdent dans une certaine mesure ces liens et peuvent devenir non-cohérents après avoir poursuivi leur mouvement, la taille des sédiments cohérents est en général inférieure à 0,06 mm mais sans que cette limite soit précise. Les sédiments non-cohérents sont constitués de particules de plus grande taille dont les mouvements sont déterminés par les propriétés physiques de chaque particule et par les forces hydrodynamiques appliquées. Parfois, le lit du cours d'eau est composé d'un mélange hétérogène des deux types de sédiments.

Taille des particules: la taille des particules est en rapport direct avec l'aptitude à être transportés des sédiments, les tailles vont d'un diamètre équivalent de plus de 2 mètres (très gros rocher roulant dans le lit des torrents de montagne) jusqu'à moins de 0,0005 millimètres (argile très fine restant presque indéfiniment en suspension sans flocculer). Les sédiments d'origine naturelle sont de forme irrégulière et par conséquent définir la taille par une seule dimension est une simplification qui peut parfois être trompeuse. Les dimensions suivantes sont d'usage courant :

Diamètre au tamis: c'est la taille de la maille du tamis à travers lequel la particule peut passer.

Diamètre équivalent ou de sédimentation: c'est le diamètre d'une sphère de même densité que la particule et qui aurait la même vitesse de chute dans un fluide donné et à la même température.

Diamètre nominal: c'est le diamètre d'une sphère de même volume que la particule.

Dimensions tri-axiales: ce sont trois dimensions selon des axes orthogonaux choisis de telle façon qu'elles expriment la plus petite et la plus grande dimension de la particule. On utilise couramment la taille au tamis pour des diamètres entre 0,1 et 75 millimètres (du sable fin au gros gravier). Pour les particules plus fines, on détermine le diamètre de sédimentation par des méthodes d'analyse adaptées. Diamètre nominal et dimensions tri-axiales sont en général utilisés pour les tailles supérieures à 75 millimètres.

Les sédiments d'origine naturelle sont généralement composés de particules de tailles variées qu'on peut caractériser par une courbe de fréquences cumulées. La figure 2.6 présente les courbes granulométriques d'une série de sédiments et montre clairement que dans un cours d'eau l'écart type des tailles pour un sédiment grossier est plus grand que pour un sédiment fin.

Forme des particules: ce facteur a une influence sur le volume de transport solide. Les particules de schistes ou d'ardoise par exemple reposent sur le fond, orientées de façon à offrir le minimum de prise au courant. Cela veut dire que pour une telle particule la force tractrice n'est pas la même que pour une particule plus arrondie de même volume, les caractéristiques du mouvement s'en trouvant modifiés. On peut définir la forme d'une particule par l'un ou plusieurs des paramètres suivants:

Rapport surface-volume: c'est le rapport entre la surface de la particule et la surface d'une sphère de même volume.

Sphéricité: c'est la racine cubique du rapport du volume de la particule au volume de la sphère circonscrite.

Coefficient de courbure: c'est le rapport entre le rayon de courbure moyen des faces de la particule avec le rayon du plus grand cercle inscrit dans une section de cette particule.

Masse volumique de la particule: Le mouvement d'une particule dépend du rapport de la force tractrice au poids de la particule. La force tractrice dépend de la forme de la particule, le poids de cette dernière dépend de sa taille et de sa masse volumique. La masse volumique a par conséquent un effet important sur le mouvement. Les sédiments naturels peuvent contenir des minéraux variés, les différences de masse volumique pouvant être appréciables. Il en résulte une sélection des particules et des effets d'érosion ou de dépôt différentiels.

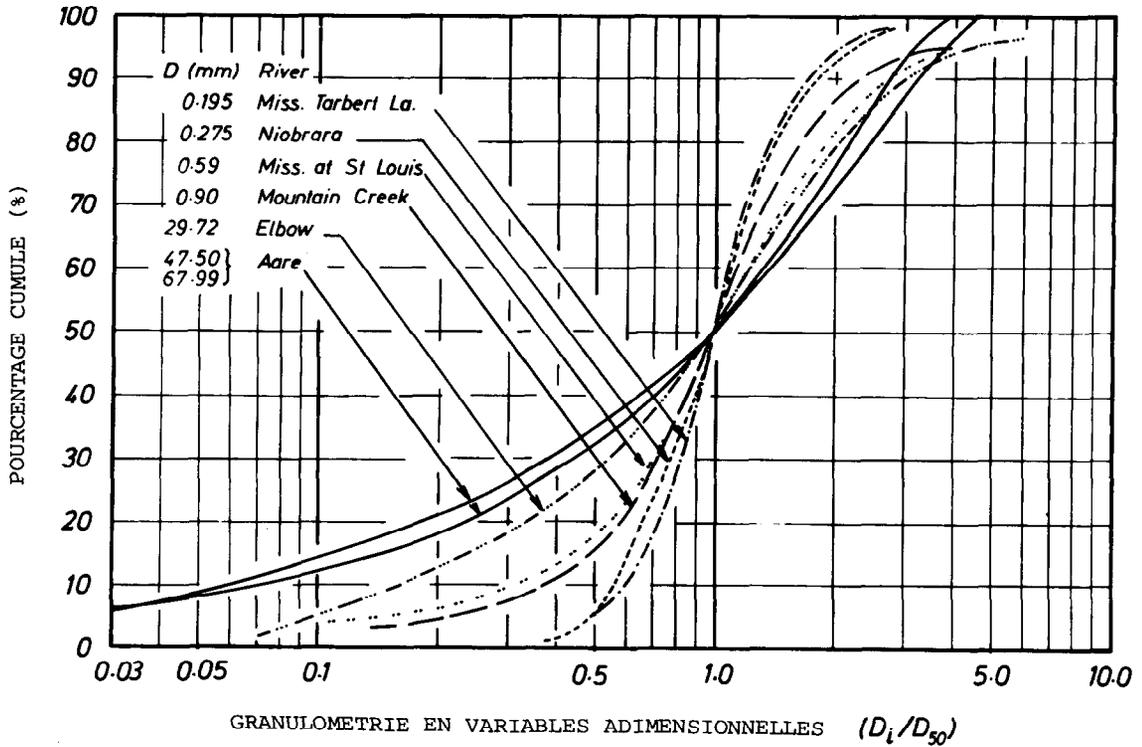


Fig. 2.6 Granulométrie. Dans "Sédiment transport: an appraisal of methods (HRS INT 119)", par W.R. White, H. Milli and A.D. Crabbe, 1978. (Copyright de la Couronne, reproduite avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume Uni).

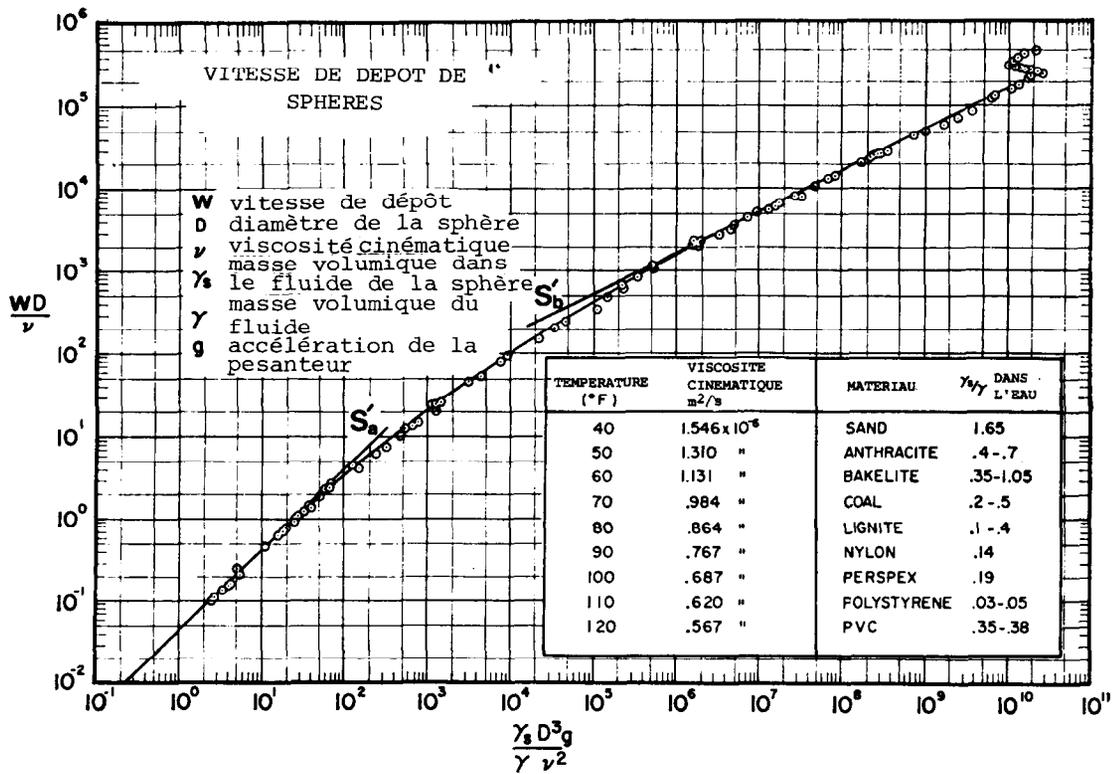


Fig. 2.7 Vitesse de dépôt. Extrait de Mechanics of sediment transport par M.S. Yalin (publié par Pergamon Press, 1977).

Il est parfois indispensable de prendre en considération la densité apparente et la porosité des sédiments. Les dépôts récents par exemple dans les retenues peuvent présenter une grande porosité et une faible densité apparente en comparaison de ce qui est observé dans le bassin à l'amont de la retenue.

2.3.1.2 Vitesse de chute. On utilise souvent la vitesse de chute dans les méthodes de prévision des transports solides. C'est une propriété fondamentale du système eau/sédiment qui dépend de la taille, de la forme et de la densité de la particule, de la densité et de la viscosité de l'eau. Yalin (1972) donne un graphique adimensionnel, voir figure 2.7, qui fournit la relation générale pour des particules sphériques. La forme des particules modifie cette relation et l'écart est très net pour les grosses particules ayant des vitesses de chute élevées, voir Graf (1971), Romanovsky (1972), ASCE (1975).

2.3.1.3 Vitesse limite de mise en mouvement. Lorsque la vitesse du courant croît au-dessus d'un lit de matériaux granuleux non cohérents, il arrive un moment où quelques grains sont délogés par l'écoulement et se déplacent à une petite distance dans le sens du courant. Ceci, bien que difficile à préciser, définit le seuil de mise en mouvement. Bien des auteurs ont décrit le phénomène comme Shields (1936), Grass (1970), White, S.J. (1976), Neill (1976), White, W.R. (1972) et Issledovanie (1976), en s'appuyant sur les propriétés physiques des sédiments et les contraintes de cisaillement imposées. La figure 2.8 présente de manière commode en variables adimensionnelles les relations fonctionnelles obtenues.

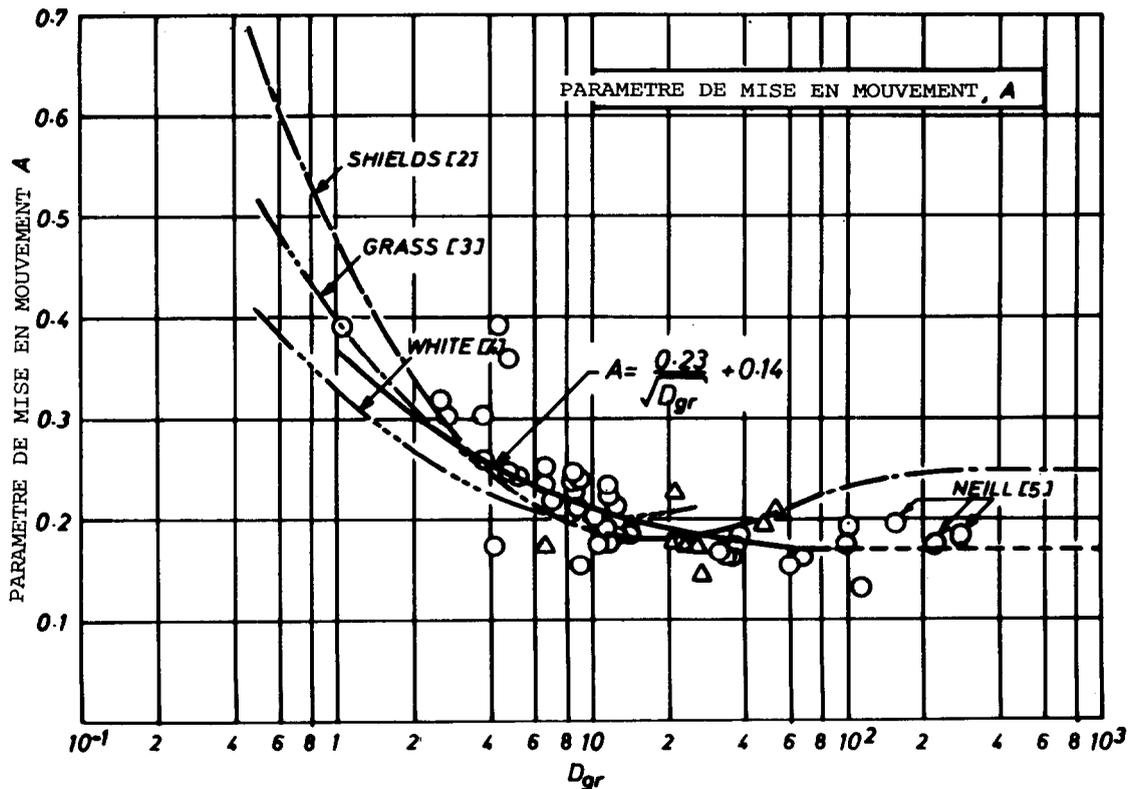


Fig. 2.8 Seuil de mise en mouvement. D'après "Sediment transport in channels; a general function" (HRS INT 104), par W.R. White, 1972. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

2.3.1.4 Transport de fond. Tout accroissement des forces hydrodynamiques au-delà de ce qui est nécessaire pour provoquer le début du mouvement entraîne le déplacement des matériaux du fond dans le sens du courant. Les particules individualisées commencent à se déplacer le long du lit du cours d'eau en roulant, glissant ou éventuellement par des sauts, par saltation. La direction du mouvement est en gros parallèle au fond et les accélérations verticales sont faibles. Ces particules qui se déplacent constamment près du fond à tout instant constituent le transport de fond du cours d'eau.

Il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge de fond mais Einstein a dressé une liste de caractéristiques qui y sont généralement associées:

1. Il y a un échange de particules permanent et intense entre la charge de fond en mouvement et le lit.
2. La charge de fond se déplace lentement vers l'aval et le mouvement de chaque particule, individuellement, se fait par à-coups rapides séparés par des intervalles de repos relativement long.
3. Le saut moyen d'une particule est à peu près indépendant des conditions d'écoulement, de l'intensité du transport solide et de la composition des sédiments.
4. Les vitesses de déplacement des différentes particules individuelles varient selon qu'elles se déplacent plus ou moins souvent. Ingénieurs, agronomes, écologistes et d'autres spécialistes sont intéressés par le débit solide de fond et dans les cent dernières années, on a mis au point des méthodes pour l'évaluer. Les premières méthodes reposent sur l'hypothèse que les sédiments se déplacent en couches de vitesses progressivement décroissantes de la surface vers le fond, tandis que les plus récentes, fondées à la fois sur des résultats expérimentaux et une explication théorique, se traduisent par des équations modernes en variables adimensionnelles que l'on trouvera dans les publications des auteurs suivants: White, W.R. (1972), Einstein (1950), Bagnold (1956), Du Boys (1879), Graf (1971), Meyer-Peter et Muller (1948), Raudkivi (1967), Bogardi (1974), White, W.R., Milli et Crabbe (1975), Kalinske (1947), Rottner (1959), Goncharov (1962).

2.3.1.5 Transport en suspension et transport de fond. Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans un cours d'eau, l'intensité de la turbulence et l'épaisseur de la couche turbulente s'accroissent également. On arrive finalement à un stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces ascensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules. A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire bien définie: au lieu de cela, elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur du fluide.

Suivant une trajectoire aléatoire, les particules peuvent éventuellement se redéposer sur le fond et peuvent donc faire partie alternativement de la charge en suspension ou de la charge de fond. Ainsi, il est difficile scientifiquement parlant de distinguer transport de fond et transport en suspension. Toutefois, la distinction qui est faite de ces deux types de transport reste utile pour les hydrauliciens.

La formule $y > 0,4$ où y est le paramètre limite de mobilité égal au rapport entre les forces de cisaillement et les forces de gravité est un critère usuel pour définir les conditions dans lesquelles il se produit un transport en suspension, voir Bagnold (1956 et 1966). Einstein (1944) donne une limite plus restrictive à savoir $v^* > 0,85W$ où v^* est la vitesse d'arrachement et W la vitesse de chute d'une particule.

La figure 2.9 présente cette relation entre y , paramètre de mobilité du sédiment de la taille de la particule, D_{gr} , en unité adimensionnelle. Cette figure donne ainsi des informations sur les sédiments de Mountain Creek, Goose Creek, d'après Einstein (1944) et sur la Skive Karop River, d'après Hansen (1966). Dans ces cours d'eau, où les sédiments sont de tailles très variées, les matériaux fins se déplacent de toute évidence en suspension tandis que les matériaux grossiers se déplacent encore dans le transport de fond.

2.3.1.6 Matériaux fins (charge de ruissellement). On voit sur la figure 2.9 que les particules d'une taille D_{gr} inférieure à 3 environ (sable de 0,1 millimètre) sont soit au repos sur le fond, soit transportées en suspension. Ces matériaux fins ne peuvent pas se déplacer par saltation. Il est impossible de préciser pour quelle taille ce phénomène se produit mais on admet généralement que c'est pour un diamètre de 0,06 mm pour des matériaux ayant une densité relative de 2,67.

Ces matériaux fins constituent la charge en matériaux fins et chaque particule se déplace à une vitesse proche de celle de l'eau à son emplacement. La quantité de matériaux fins en suspension ne dépend pas directement des caractéristiques hydrauliques. Elle dépend uniquement de la quantité de matériaux fins entrant dans le bief considéré et de la disponibilité en matériaux fins dans le bief même. Ceci est la différence essentielle entre la charge en matériaux fins et le reste du transport en suspension.

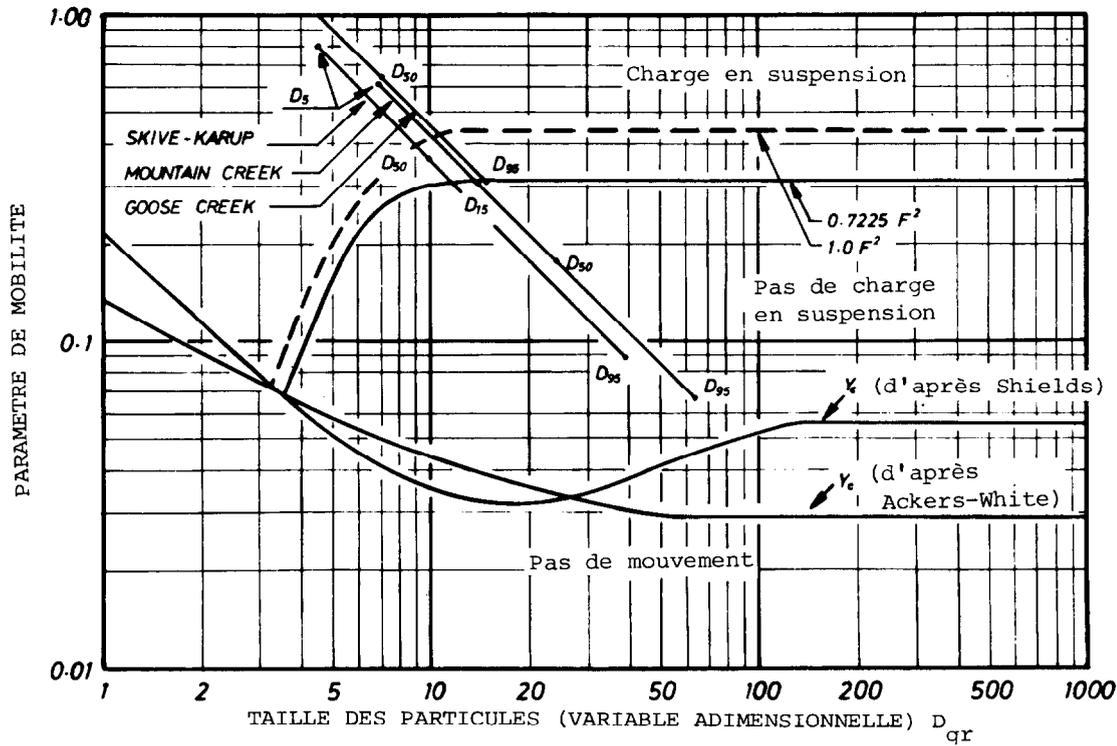


Fig. 2.9 Critères de suspension des sédiments. D'après *Sediment transport; an appraisal of methods* (HRS INT 119), par W.R.White, H. Milliet et A.D. Crabbe, 1978 (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

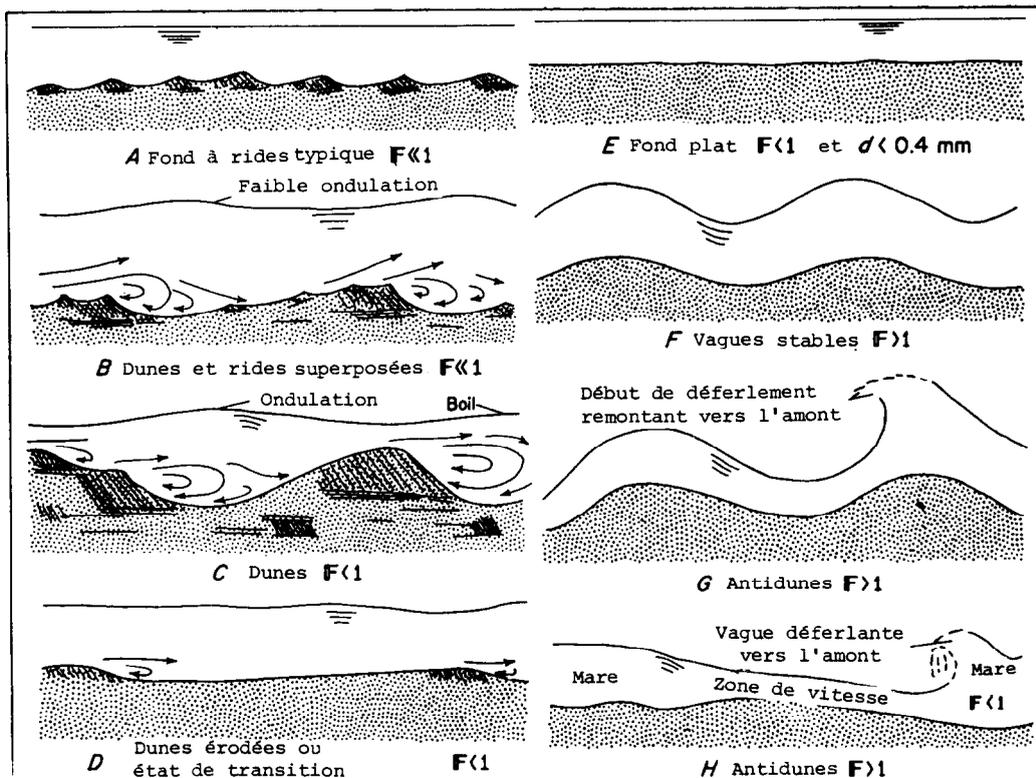


Fig 2.10 Aspects du fond. D'après *The Effect of bed roughness on depth-discharge relations in alluvial channels*, par D.B. Simons et E.V. Richardson, dans U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1498-E, 1962

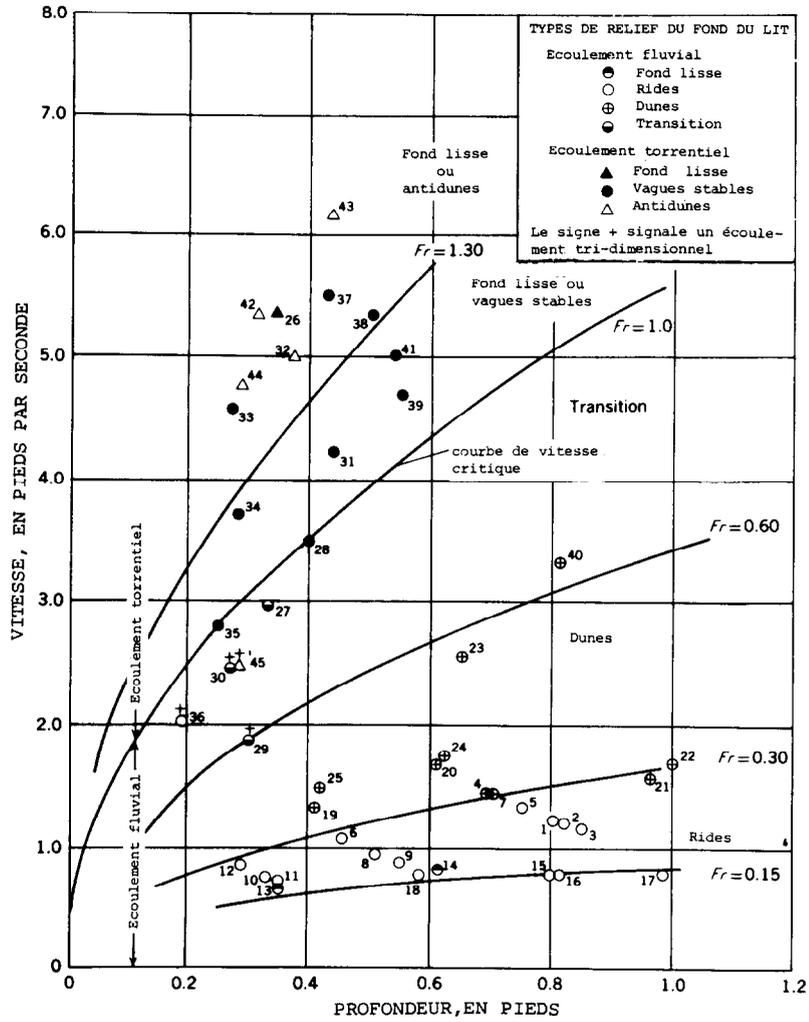


Fig.2.11 Relief du fond. D'après Flume studies using medium (0.45 mm) par D.B. Simons E.V. Richardson et M.L. Albertson, dans U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1498-1,1961

2.3.1.7 Aspects du lit des cours d'eau. On peut observer les différentes formes de fond qui suivent:

Fond plat: Dans ce cas le fond observé sur une superficie assez grande est une surface sensiblement plane. Cependant cela ne veut pas dire que le fond est hydrauliquement lisse car le sédiment constitutif présente une rugosité dépendant des particules individuelles. D'après la figure 2.10 les fonds plats peuvent exister soit lorsqu'il n'y a pas de déplacement des particules soit avec un mouvement rapide des particules dans des conditions particulières.

Rides: Les rides sont des ondulations du fond qui ont l'allure indiquée sur la figure 2.10. Elles se développent en général dans les trois dimensions et occupent rarement plus de 20% de la profondeur. Elles ont tendance à se manifester pour de faibles débits solides, chaque particule se déplace en contact plus ou moins permanent avec le fond en roulant par dessus la crête des rides et en venant se déposer sur leur flanc aval. La ride en avançant les recouvre alors et elles sont remises en mouvement un peu plus tard quand elles émergent à nouveau du flanc amont de la ride.

Dunes: Les dunes ont tendance à être plus grandes que les rides et leur profil longitudinal est asymétrique (voir fig. 2.10). Elles sont plutôt bi-dimensionnelles en ce sens que leur crête s'étend d'un bord à l'autre du chenal. Leur mouvement se fait vers l'aval et résulte du glissement des sédiments par-dessus la crête et de leur accumulation sur le flanc aval. Dans un lit donné, la taille des dunes varie et leur vitesse est inversement proportionnelle à leur taille.

Faciès de transition: A des vitesses du courant plus élevées, les dunes ont tendance à être effacées par le flot et le fond subit une série de transformations complexes (et mal expliquées). Bancs de sable, ondulations, dunes en voie d'effacement, fonds plats, telles sont les formes qui ont toutes pu être observées dans cette catégorie plutôt mal définie.

Antidunes: Les antidunes (voir figure 2.10) se présentent sous la forme d'un train d'ondes de sables symétriques qui est en phase avec un train de vagues correspondant à la surface de l'eau. Ces deux trains d'ondes se déplacent de façon régulière vers l'amont bien que les particules individuelles de sédiments se déplacent rapidement vers l'aval. La hauteur des ondes sableuses et des vagues s'accroît jusqu'à ce qu'elles se brisent. Il se produit alors une réduction soudaine de la hauteur. On observe ainsi une variation cyclique continue de la hauteur des ondes.

Yalin (1972), Graf (1971), Raï Kivi (1967), Znamenskaja (1976), Kennedy (1969) et Simons et Richardson (1960 et 1961) ont publié des études descriptives et analytiques sur les faciès des lits des cours d'eau. La figure 2.11 est empruntée à Simons et Richardson (1960) et l'hypothèse d'une relation entre le type de fond et le nombre de Froude local y est suggérée. Cependant, c'est probablement une trop grande simplification d'un problème hydrodynamique complexe.

2.3.1.8 Pavage du fond. Dans les chenaux où le matériau du fond se compose de particules de tailles très variées, il y a des mouvements différentiels selon la taille. Les grosses particules sont moins facilement emportées que les petites et ainsi la couche de surface devient plus grossière que le fond d'origine. Cette couche de surface a un effet protecteur sur les couches sous-jacentes. On désigne ce phénomène par le terme de pavage du lit. Le mouvement de sédiments de tailles très variées, à partir d'un fond pavé à l'origine, est un sujet complexe pas encore complètement élucidé. Les méthodes de prévision sont encore balbutiantes, voir Egiazaroff (1965), Neill (1968) et Gessler (1970) par exemple.

2.3.2 Caractéristiques du chenal

Ackers et Charlton (1970) ont discuté en détail des caractéristiques du chenal et les deux paragraphes suivants sont largement extraits de leur publications.

2.3.2.1 Topographie des chenaux stables. Les chenaux restent rarement rectilignes sur des distances supérieures à environ dix fois leur largeur (Leopold et Wolman, 1960) et il apparaît ainsi qu'un tracé rectiligne dans un matériau érodible n'est pas courant dans des conditions naturelles. Il y a des forces inhérentes à la plupart des cours d'eau (sinon à tous) qui s'opposent au maintien d'un chenal rectiligne.

Presque tous les chenaux dans des matériaux érodibles ont une propension à développer des méandres et on a essayé de définir un chenal à méandres par la symétrie des méandres, le degré de sinuosité, etc... Cependant, par suite de l'hétérogénéité des matériaux du fond et des berges des cours d'eau naturels, on observe souvent des tracés irréguliers. Schumm (1963) a classé les chenaux en cinq groupes: sinueux, irréguliers, réguliers, de transition et rectilignes.

Ackers et Charlton (1970) définissent trois groupes: (a) chenaux rectilignes ou légèrement irréguliers, (b) chenaux sinueux ou à méandres réguliers et (c) chenaux anastomosés (c'est-à-dire systèmes à branches multiples séparées par des files ou des hauts fonds).

2.3.2.2 Facteurs agissant sur la topographie des chenaux. Quoiqu'on ait étudié les chenaux à méandres, tant sur le terrain qu'au laboratoire, depuis des années et que bien des hypothèses aient été émises, leur formation à ce jour n'est pas complètement expliquée de façon satisfaisante. On a proposé comme cause possible d'un faciès à méandres les perturbations locales dues aux variations des matériaux des berges ou à des obstacles, l'énergie excessive du courant, les variations de cote du plan d'eau, l'existence de courants secondaires, la formation de courants convectifs et l'existence de seiches transversales (Fujihoshi (1950), Werner (1952), White, C.M. (1939)).

Cependant, en dépit d'hypothèses variées, la cause véritable reste obscure. Il n'y a pas de procédés acceptés universellement pour prédire si des méandres vont se former dans des conditions données de débit liquide et de débit solide, bien qu'il y ait d'abondantes informations empiriques de valeur utilisables dans le but de prédire les formes topographiques qui peuvent apparaître. Il y a encore des divergences d'avis considérables sur les types de cours d'eau qui forment des méandres. Werner (1952) affirme par exemple que les cours d'eau à méandres se caractérisent par leur faible profondeur et qu'il n'y a pas de méandre si l'eau dépasse une certaine profondeur. Il affirme aussi qu'un certain transport de fond est nécessaire pour la formation des méandres et qu'une teneur en excès de limon peut empêcher cette formation. Schumm (1963) croit par ailleurs que les chenaux peu profonds et relativement larges ont tendance à être rectilignes, tandis que ceux qui sont profonds et relativement étroits ont tendance à faire des méandres, mais il pense également que la teneur en limon a une influence sur la topographie (Schumm, 1960 et 1967).

Leopold et Wolman (1960) sont d'accord avec Werner (1952) pour dire que, dans les chenaux dont la profondeur est grande eu égard à leur largeur, la vitesse est presque constante le long d'une verticale et que, par conséquent, les courants hélicoïdaux deviennent quasiment négligeables et que dans les chenaux incurvés les lignes de courant restent pratiquement parallèles. Il en résulte que la vitesse à l'aval varie en raison inverse du rayon de courbure des lignes de courant. La zone de fortes vitesses reste parallèle à la berge d'origine et ne traverse pas le chenal. On ne connaît pas non plus le mécanisme de formation des hauts fonds.

Cependant Matthes (1941) affirmait qu'il y a des courants hélicoïdaux dans les chenaux profonds (par rapport à leur largeur) et il pense que les chenaux à méandres sont peu profonds et dépourvus de courant hélicoïdaux. Dans le Mississippi et les autres fleuves qu'il a étudiés, on ne pouvait mettre en évidence de courants hélicoïdaux.

Bagnold (1960) a montré que la perte de charge dans un chenal non déformable de section constante baisse très nettement jusqu'à un minimum défini lorsque précisément $2 < \frac{r}{b} < 3$, r étant le rayon de courbure du méandre et b la largeur du chenal. Dans un chenal naturel à méandres, la section en travers n'est pas constante mais Leopold et Wolman (1960) ont montré que, pour la majorité des fleuves, le rapport du rayon de courbure des méandres à la largeur du chenal varie entre 2 et 3. Leopold et al. (1964) en ont conclu qu'il n'y a aucun doute que les chenaux anastomosés ou à méandres ont une plus grande perte de charge que des chenaux comparables mais rectilignes. Blench et Qureshi (1964) l'ont confirmé en montrant que les chenaux à méandres faiblement sinueux ont des pentes égales à 1,5 fois celles des chenaux rectilignes comparables et les chenaux très sinueux 2,5 fois.

Inglis (1938-1939 et 1947) suppose que les méandres se forment de deux façons différentes. Dans ce qu'il appelle le cas primaire, la charge en excès venue de l'amont est supposée se diriger vers la rive convexe, tandis que, dans le second cas, la charge en excès ayant pour origine l'érosion de la berge dans le bief du méandre se déposerait sous forme de banc le long de la même rive. Friedkin (1945) a étudié le mouvement des matériaux érodés de la berge et en a conclu qu'ils se déposent plus loin à l'aval du même côté que celui où s'est produit l'érosion lorsque la berge est rapidement érodée, mais que lorsque la berge ne s'érode pas les sédiments traversent d'une rive à l'autre. White, C.M. (1939) a confirmé le dépôt des sédiments du même côté que celui d'où ils proviennent.

Werner (1952) a avancé l'hypothèse que les sédiments sont nécessaires à la formation des méandres et aussi que des sédiments surabondants l'empêcheraient, ainsi qu'Inglis (1947), dans sa définition des formations primaires et secondaires des méandres. D'un autre côté Schumm (1960) se fondant sur l'hypothèse que les sinuosités ne contribuent pas au transport de fond affirme qu'une diminution des apports de sédiments se traduit par un rétrécissement et un approfondissement du chenal et un accroissement de la tendance à former des méandres.

Ackers et Charlton (1970) ont fait en laboratoire des essais exhaustifs sur des petits chenaux artificiels dans un sable fin non cohérent et ils en ont déduit, pour l'essentiel, ce qui suit:

(1) La formation des méandres dans des alluvions commence si l'instabilité des transports de fond conduit à la formation de séries de bancs relativement grands alternativement sur un bord puis l'autre. Ce n'est qu'après que ces bancs ont atteint une taille importante que l'érosion des berges produit les sinuosités caractéristiques des méandres.

(2) Il y a deux types principaux de chenaux dynamiquement stables, à savoir les chenaux droits avec des irrégularités mineures et les chenaux sinueux réguliers.

(3) En écartant certains résultats douteux du fait de la croissance d'algues, dans des conditions stables entre 0,25 et 2,0 cusecs avec du sable de 0,15 mm, il y a une bonne corréla-

tion entre la longueur des méandres et le débit, la meilleure équation étant $l = 38 Q^{0,467}$ (unités pied et seconde.)

(4) La largeur d'un chenal à méandres est au moins égale à 2 fois celle d'un chenal rectilignes coulant sur les mêmes sédiments avec le même débit: les chenaux avec des bancs importants qui néanmoins restent rectilignes sont moins de deux fois aussi larges.

(5) La recherche d'une corrélation multiple entre la longueur d'un méandre, le débit et la concentration en sédiment (c'est-à-dire le débit rapporté au débit liquide) ne prouve aucune dépendance appréciable avec la concentration en sédiments.

(6) La pente des bancs augmente de quelques 10% quand le chenal s'élargit et lorsque les bancs se développent, mais la longueur d'onde observée des méandres concorde en définitive de très près avec celles des bancs initiaux.

(7) Si les apports en sédiments dépassent la valeur seuil après la formation des méandres dans un chenal qui se comble, la longueur d'un méandre tend à décroître lorsque la charge en sédiments s'accroît.

(8) La migration vers l'aval des méandres a été confirmée.

(9) Des tests menés avec du sable fluorescent ont montré que les matériaux érodés sur une berge ne traversent pas jusqu'à l'autre.

(10) Il y a une valeur seuil de la charge en sédiments au-dessous de laquelle les chenaux à petit débit ont tendance à rester rectilignes et au-dessus de laquelle il se forme des méandres, à condition que la pente disponible dans la vallée permette la formation du gradient hydraulique nécessaire à l'écoulement et au transport de sédiments.

(11) On peut classer les cours d'eau en trois catégories: rectilignes, rectilignes mais présentant des bancs bien développés, ou formant des méandres selon la ligne de pente générale du fond de la façon suivante:

- cours d'eau rectiligne $S < 0,0015 Q^{-0,12}$
 - cours d'eau avec bancs $0,0015 Q^{-0,12} < S < 0,0021 Q^{-0,12}$
 - cours d'eau à méandres $S < 0,0021 Q^{-0,12}$
- (Unités: pied et seconde)

(12) Lorsque la pente est insuffisante pour fournir le gradient hydraulique nécessaire aux débits liquides et solides dans un lit rectiligne ou à méandres, selon la charge en sédiments, alors un faciès de chenaux anastomosés apparaît.

Ces conclusions ne s'appliquent pas forcément à tous les cas réels pour lesquels d'autres variables peuvent avoir de l'importance.

2.3.3 Dépôt et érosion

Les hypothèses sur les mécanismes du transport de sédiments et le concept de chenal stable ou de chenal de cours d'eau à régime régulier sont fondés sur la prise en considération de phénomènes qui sont supposés correspondre à un état d'équilibre. Ceci est probablement vrai pour des chenaux en laboratoire avec des débits et des apports de sédiments constants. Cela peut être considéré comme vrai également pour de longs biefs de chenaux naturels où des modifications significatives ne se manifestent qu'après de longues périodes. Ces chenaux ne sont pas en équilibre à une échelle de temps géologique mais peuvent être considérés comme tels à l'échelle d'une vie humaine ou pour la durée de vie prévue des ouvrages de génie civil.

Dans bien des cas cependant, les conditions d'équilibre ne sont pas réunies et la différence entre les apports de sédiments et la compétence du cours d'eau est la cause soit d'une érosion, soit d'un dépôt.

Parfois, cette différence est due à des causes naturelles et parfois à l'homme ou aux animaux.

(1) Lacs et retenues. A l'endroit où le cours d'eau pénètre dans le lac ou la retenue, la vitesse d'écoulement diminue. Il en résulte une diminution de la compétence du courant et un dépôt de sédiments sous la forme d'un delta. Les matériaux les plus grossiers se déposent en premier et il peut se faire que les matériaux très fins traversent le système si le temps de résidence dans le lac ou la retenue n'est pas trop grand. Le dépôt de sédiment entraîne une réduction de la capacité du lac ou de la retenue, ce qui pose un problème supplémentaire aux ingénieurs chargés des approvisionnements en eau, qui comptent sur la capacité des réservoirs pour la stocker pendant le cycle pluviométrique annuel. La durée de vie de bien des réservoirs actuellement en construction est estimée à environ 70 ou 100 ans en ce qui concerne la sédimentation. Ainsi ce problème a des effets appréciables sur la rentabilité des schémas d'aménagement proposés; on présente plus en détail plus loin les méthodes d'évaluation de la sédimentation.

(2) Plaines d'inondation. La teneur en sédiments s'accroît avec l'écoulement et en période de crue il y a généralement de grandes quantités de matériaux mis en suspension. Ceci est particulièrement vrai dans les biefs les plus bas et les plus plats du réseau de drainage. Au cours des événements paroxysmiques, les fleuves débordent par dessus leurs berges et un écoulement de débordement se forme, adjacent à l'écoulement du fleuve dans son lit. La résistance

hydraulique des plaines d'inondation est en général supérieure à celle du chenal lui-même et cela entraîne une diminution de la vitesse du courant qui se traduit à son tour par le dépôt d'une partie ou de la totalité des sédiments fins en suspension.

Les dépôts des plaines d'inondation peuvent être dommageables à l'environnement si les routes et les chemins de fer sont rendus inutilisables, mais ils sont en général bénéfiques pour les terres agricoles du fait du dépôt en surface d'un sol riche (qui en est la conséquence).

(3) Estuaires. Les mouvements des sédiments dans les estuaires sont influencés en plus par le mouvement périodique des marées et par l'alternance de milieux en eau douce et en eau salée. Le dépôt d'alluvions fins est courant dans les estuaires et c'est la cause d'une réduction de la section en travers du lit. Il peut en résulter à l'amont des cotes d'inondation supérieures ou encore des difficultés de navigation dues à la diminution des profondeurs d'eau dans l'estuaire. L'analyse du difficile problème de la sédimentation dans les estuaires est entreprise plus loin.

REFERENCES

- Ackers, P.; Charlton, E.G. 1970. The geometry of small meandering streams. Proc. I.C.E., Supplement Paper 7328S.
- ASCE 1975. Sedimentation engineering: Manual number 54. New York, American Society of Civil Engineers.
- Bagnold, R.A. 1956. Flow of cohesionless grains in fluids. Proc. Roy. Soc. (London), Phil. Trans., series A, volume 249, number 964.
- Bagnold, R.A. 1960. Some aspects of the shape of river meanders. Washington. U.S. Geological Survey. (Professional paper number 282-E).
- Bagnold, R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. Washington, U.S. Geological Survey. (Professional paper number 422-1).
- Blench, T.; Mohd Ali Qureshi. 1964. Practical regime analysis of river slopes. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, 90, number HY2 (March), page 81-98.
- Bogardi, J.L. 1974. Sediment transport in alluvial streams. Budapest Akademiai Kiado Press.
- Du Boys, M.P. 1879. Le Rhône et les rivieres au lit affouillable. Mém. Doc., Ann. Ponts et Chaussées, ser. 5, volume 18.
- Egiazaroff, I.V. 1965. Calculation of non-uniform sediment concentration. Proc. A.S.C.E., number HY4 (July).
- Einstein, H.A. 1944. Bed load transportation in Mountain Creek. Washington D.C., U.S. Dept. of Agriculture.
- Einstein, H.A. 1950. The bed load for sediment transportation in open channel flow. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation. (Tech. bull. 1026).
- Friedkin, J.F. 1945. A laboratory study of the meandering of alluvial rivers. Vicksburg, Miss. U.S. Waterways Experiment Station. (May).
- Fujihoshi, Y. 1950. Theoretical treatise on the meandering of rivers. Jap. Sci. Rev., 1 number 3 (Sept.) page 29-34.
- Gessler, J. 1970. Self-stabilising tendencies of alluvial channels. Waterways & Harb. Div. Proc. ASCE, vol.96, no.WW2, paper 7263, p. 235-249.
- Goncharov, V.N. 1962. Dinamika rouslovih potokov, (Dynamics of channel flow). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1962, p.373.
- Graf, W.H. 1971. Hydraulics of sediment transport. New York, McGraw-Hill.
- Grass, A.J. 1970. Initial instability of fine sand bed. J. Hyd. Div., Proc. A.S.C.E., Paper 7139 (March).
- Hansen, E. 1966. Bed load investigation in Skive Karup river. Tech. University of Denmark. (Bulletin no. 12).
- Inglis, Sir Claude C. 1938-39. The relationship between meander belts, distance between meanders on axis of stream, width and discharges of rivers in flood plains and incised rivers. Central Board of Irrigation, India. Annual Report (Technical), p.49.

- Inglis, Sir Claude C. 1947. Meanders and their bearing on river training. Maritime and waterways engineering Division Meeting, Institution of Civil Engineers, London (January).
- Kalinske, A.A. 1947. Movement of sediment as bedload in rivers. Trans. Am.Geophys. Un., vol. 28, pp. 615-620.
- Kennedy, J.F. 1969. The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels. J. Fluid Mech. Palo Alto. vol.1 pp. 147-168.
- Langbein, W.B.; Schumm, S.A. 1958. Yields of sediment in relation to mean annual precipitation. Trans. Am.Geophys.Un., vol.39.
- Leopold, L.B.; Wolman, M.G. 1960. River meanders. Bull.Geol.Soc.Am., vol.74 (Sept.) p.1089-1099.
- Leopold, L.B. et al. 1964. Fluvial processes in geomorphology. Freeman, San Francisco and London.
- Matthes, G.H. 1941. Basic aspects of stream meanders. Trans.Am.Geophys.Un., vol.22, p.632-636.
- Meyer, L.D.; Foster, G.B.; Nikolov, S. 1975. Effect of flow rate and canopy on mill erosion. Trans.Am.Soc.Agric.Eng.
- Meyer-Peter, E.; Muller, R. 1948. Formulas for bedload transport. Proc. 2nd Congress, I.A.H.R., Stockholm (June).
- Mutchler, C.K.; Young, R.A. 1975. Soil detachment by raindrops. In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. ARS-S-YD. U.S. Department of Agriculture.
- Neill, C.R. 1967. Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed-material. Proc. 12 Conf. I.A.H.R., vol.3, pp. 46-54.
- Neill, C.R. 1968. A re-examination of the beginning of movement for coarse granular bed material. Wallingford Hydraulics Research Station. (Report no.INT 68).
- Raudkivi, A.J. 1967. Loose boundary hydraulics. Oxford, Pergamon.
- Romanovsky, V.V. 1972. Issledovanie gidravlicheskoj krupnosti estestvenih chastic. (Investigations of the fall velocity of natural particles). Trudy GGI, N191.
- Romanovsky, V.V. 1974. Issledovanie nachalnoj skorosti Vlechenija chastic, nanosov. (Investigations of the threshold velocity for particles). Trudy GGI, N210.
- Rottner, J. 1959. A formula for bed load transportation. La Houille Blanche, 4 no.3, pp.310-307.
- Schumm, S.A. 1960. The shape of alluvial channels in relation to sediment type. Washington, U.S. Geological Survey. (Professional paper 352-B).
- Schumm, S.A. 1963. Sinuosity of alluvial rivers in the Great Plains. Bull.Geol.Soc.Am., 74 (September)p.1089-1099.
- Schumm, S.A. 1967. Meander wavelength of alluvial rivers. Science, (New York), 157, no. 3796, p.1549-1550.
- Schumm, S.A.; Hadley, R.F. 1961. Progress in the application of landform analysis in studies of semi-arid erosion. Washington D.C., U.S. Geological Survey. (Circular 437).
- Shields, A. 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau. Berlin, Heft 26.
- Simons, D.B.; Richardson, E.V.; 1960. Resistance to flow in alluvial channels. Proc.A.S.C.E., 86, no.HY5.
- Simons, D.B.; Richardson, E.V. 1961. Forms of bed roughness in alluvial channels. Proc.A.S.C.E., 87, no. HY5.
- Werner, P.W. 1951-52. On the origin of river meanders. Trans.Am.Geophys.Un., 1951, vol.32, no.6 (Dec.) p.898-902. Discussion, 1952, vol.33, no.5 (Oct.), p.771-774.
- White, C.M. 1939. The influence of transported solids upon rivers. British Research Union. Géodesique et Géophysique Internationale, Commission de Potamologie. Question 3, rapport 1. Washington.

- White, S.J. 1970. Plain bed thresholds for fine-grained sediments. Nature, vol.228, no.5267, pp.152-153.
- White, W.R. 1972. Sediment transport in channels: a general function. Wallingford Hydraulics Research Station. (Report no.INT 104.
- White, W.R.; Milli, H.; Crabbe, A.D. 1975. Sediment transport theories - a review. Proc.I.C.E., part 2, vol.59, pp.265-292.
- Yalin, M.S. 1972. Mechanics of sediment transport. Oxford, Pergamon.
- Znamenskaja, N.S. 1975. Grijadovoe dvigienie nanosov. (Dune movement of the bed load). Leningrad, Gidrometeoizdat.

3 Prédiction des effets des activités humaines

Pour étudier l'effet des activités humaines dans un bassin fluvial, il faut d'abord étudier les mécanismes naturels d'érosion et de sédimentation décrits dans le chapitre 2: Processus d'érosion et de sédimentation. La détermination quantitative des modifications exige la mise en oeuvre d'un programme détaillé pour: (1) Recueillir les données de base, (2) Analyser les données et (3) Choisir les méthodes nécessaires, aussi bien à l'analyse des phénomènes qu'à la prédiction des modifications futures.

3.1 COLLECTE DES DONNEES

Pour établir un programme de collecte de données, on admettra que les données à recueillir seront limitées à celles qui sont nécessaires pour mener à bien le programme prévu. Les données recueillies doivent être bien archivées et condensées sous une forme d'accès facile. Elles doivent être utilisées conjointement avec d'autres données. Du fait de la variabilité des dimensions des zones concernées et de celle des nombreux facteurs régissant l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments d'une zone à une autre, les besoins en données varient en conséquence. On a indiqué au tableau 3.1 une liste des données à recueillir.

3.1.1 Reconnaissance

Avant de faire une étude détaillée ou de prédire l'effet des activités humaines, on doit faire une reconnaissance et préparer un rapport préliminaire. Ce rapport doit décrire les activités constatées en indiquant leur emplacement dans la zone considérée, ainsi que tous les projets de modifications physiques.

Parmi les informations nécessaires à la préparation du rapport d'expertise figurent toutes les caractéristiques hydrologiques du bassin versant, les transports et dépôts de sédiments, les données sur l'érodibilité telles qu'elles sont indiquées dans le tableau 3.1. Bien souvent, les types de renseignements énumérés dans ce tableau ne sont pas disponibles. Il est alors important qu'un spécialiste des problèmes d'érosion-sédimentation participe à l'étude du problème pour tirer parti de son expérience et d'évaluations par comparaison avec des problèmes similaires. Un élément clef pour réaliser un bon rapport d'expertise, c'est une reconnaissance faite sur le terrain par un spécialiste en sédimentation et morphologie fluviale, tandis qu'une analyse morphologique est faite des modifications passées et prédites fondée sur l'expérience et les données disponibles.

3.1.1.1 Recensement des données disponibles. Au cours de l'examen des données disponibles, il est recommandé de rechercher toutes les informations que l'on pourra trouver sur la zone à étudier. Les points à passer en revue sont indiqués dans le tableau 3.1 avec la classification suivante: (1) Données hydrologiques, (2) Données sur les caractéristiques du bassin versant, (3) Données sur les transports solides et les dépôts de sédiments, (4) Données sur l'érodibilité. Il est judicieux aussi de rechercher les mêmes données sur un bassin adjacent ou similaire. Ceci s'applique tout particulièrement aux données sur l'érosion provenant des relevés des dépôts de sédiments dans les retenues.

Toute information provenant de relevés sur une retenue de zones adjacentes ou de bassins versants ayant des caractéristiques similaires est utile.

On trouvera également des informations dans la littérature technique. Ces informations peuvent être utiles à la fois en fournissant des données provenant de bassins similaires et en indiquant des méthodes que l'on pourra utiliser plus tard pour l'analyse des données.

Table 3.1 - Données nécessaires à la prédiction des effets des activités humaines dans un bassin pluvial

- | | |
|--|---|
| <p>I. Hydrologie</p> <p>A. Pluie</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Moyenne annuelle 2. Intensité 3. Répartition saisonnière <p>B. Ecoulement</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Débits journaliers et annuels 2. Répartition <p>C. Données sur le vent pour l'érosion éolienne</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Vitesse et direction | <p>III. Transports solides et dépôts</p> <p>A. Echantillon de sédiments en suspension</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Instantanés, journaliers ou annuels <p>B. Echantillon de transport de fond</p> <p>C. Echantillons des matériaux de fond</p> <p>D. Relevés sur les retenues</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Dépôts de sédiments 2. Formation de deltas 3. Dégradation à l'aval <p>E. Deltas aux débouchés dans la mer ou l'océan</p> |
| <p>II. Caractéristiques des bassins versants</p> <p>A. Cartes topographiques</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Echelle et écartement des courbes de niveau <p>B. Photographies aériennes-basse altitude</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Echelle et précision <p>C. Images de Télédétection</p> <p>D. Données expérimentales au champ sur l'érosion des sols ou l'érosion en ravines</p> <p>E. Etudes morphologiques sur les mouvements des cours d'eau</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Relevés ou photographies aériennes | <p>IV. Caractéristiques de l'érodibilité</p> <p>A. Cartes géologiques</p> <p>B. Relevés sur les sols</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Granulométrie et cohésion des sols <p>C. Stabilité des berges des chenaux</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Granulométrie et cohésion 2. Végétation des berges |

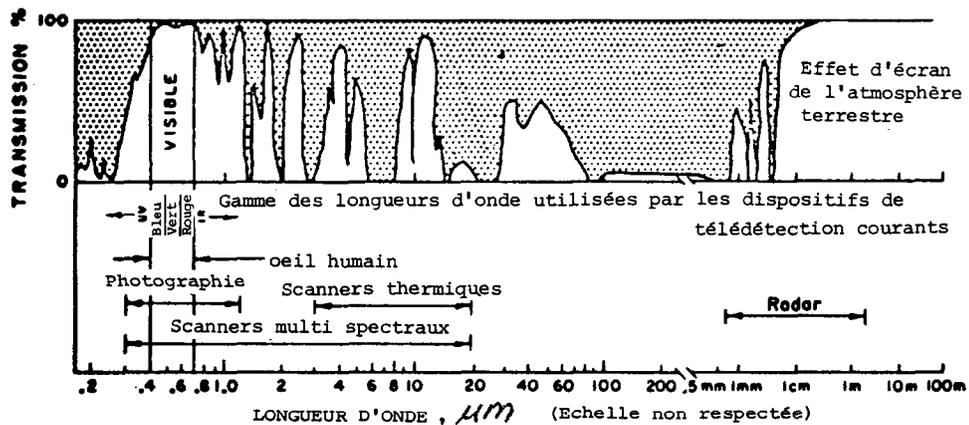


Fig. 3.1 Spectre d'énergie électromagnétique (d'après Scherz, J.P. et Stevens, A.R., 1970).

3.1.1.2 Reconnaissance du terrain. La reconnaissance du terrain sur le bassin versant est probablement l'étape la plus importante de l'étude préalable. Pour cette reconnaissance, il est utile de se munir des informations du tableau 3.1 disponibles et notamment d'une carte topographique et de photographies aériennes de la zone étudiée. La reconnaissance devrait toujours se faire au sol mais elle peut comporter des observations à partir d'un avion ou d'un hélicoptère si l'on dispose de peu de temps et s'il y a des zones éloignées intéressantes. Le premier objectif d'une reconnaissance de terrain faite par un spécialiste expérimenté en sédimentologie ou en morphologie fluviale est d'évaluer l'érosion historique et les processus sédimentaires. Ce spécialiste s'intéressera particulièrement aux activités passées de l'homme et aux modifications qui en ont découlé. Des photographies des activités et des modifications évidentes des phénomènes d'érosion-sédimentation accompagnées de notes descriptives guideront toute décision prise au moment de la reconnaissance. Le spécialiste peut aussi demander à faire des mesures de terrain pour faciliter l'évaluation des modifications historiques.

L'objectif étant de prédire les effets d'une activité constatée de l'homme, alors une part importante du travail du spécialiste consistera en la préparation d'un programme de collecte de données. Ceci doit être fait au moment d'une reconnaissance ou juste après de façon à ce que toutes les données puissent être recueillies avec les variations et les limitations de la zone à étudier. La détermination précise sur le terrain de l'emplacement et de l'importance d'un centre d'activité est aussi très importante qu'il s'agisse d'un projet de route, du développement d'une nouvelle zone de culture, de la destruction de la végétation pour ouvrir de nouveaux sites à la construction ou de la construction d'un nouvel ouvrage hydraulique le long d'une berge.

3.1.1.3 Photographie aérienne. A l'étape de la reconnaissance de terrain, il est nécessaire de recueillir toutes les informations sur les paramètres de terrain qui serviront plus tard de référence. Des photographies aériennes à basse altitude, prises à des hauteurs déterminées pour en connaître l'échelle, fournissent un excellent document sur le bassin versant, avant intervention des nouvelles activités. Ces photographies servent à la fois à relever les modifications (poste IIB du tableau 3.1) et à définir les paramètres de base avant toutes nouvelles modifications.

Depuis 1960, l'utilisation de matériels plus sophistiqués a permis d'améliorer les techniques de photographie aérienne. On utilise maintenant les photographies de précision à basse altitude pour compléter et parfois remplacer la carte topographique par ce qu'on appelle un orthophotoplan. On peut cartographier avec peu de mesures sur le terrain (faites par les méthodes topographiques classiques) des zones beaucoup plus étendues grâce aux prises de vue aériennes. La précision de la photographie dépend de l'appareil de prise de vue et de la hauteur du vol, les résultats permettant d'utiles comparaisons quantitatives, tant pour déterminer les volumes d'érosion ou de dépôt, que pour déterminer la taille des zones d'érosion active, le type du réseau de drainage primaire et le déplacement des sédiments le long des pentes.

3.1.1.4 Télédétection. La télédétection (poste II c du tableau 3.1) mérite une explication plus complète à cause des possibilités qu'elle offre pour les études à venir. Par suite des progrès techniques, notamment dans l'usage des satellites, cette technique sera plus largement utilisée à l'avenir. La télédétection utilise la lumière réfléchie et l'intensité du rayonnement émis par les objets. Le spectre d'énergie de la figure 3.1 explique très bien quelles plages de longueurs d'onde sont utilisées par les dispositifs de télédétection.

La photographie est la technique la plus connue et la plus largement utilisée. Avec un appareil, un objectif, un film et un filtre adaptés à la photographie aérienne et avec d'autres types de capteurs tels que radiomètres, scanners linéaires, scanners multispectraux pour interpréter et enregistrer les résultats, on utilise la méthode selon ses possibilités en ce qui concerne l'hydrologie comme tout autre outil servant à la collecte des données. Jusqu'à ce jour, la télédétection a fourni des données sur la présence d'eau, sur la végétation et sur les caractéristiques topographiques des bassins versants. Elle ne remplace pas de véritables données hydrologiques de terrain, mais les complète seulement et peut permettre une économie de temps dans un programme de collecte de données.

3.1.2 Recherches sur le terrain

3.1.2.1 Recherches sur les processus d'érosion sur petits bassins versants et sur parcelles de ruissellement. Ruissellement et érosion dépendent d'une combinaison complexe de facteurs naturels et anthropiques, comme exposé au chapitre 2. Affectant directement ruissellement et érosion, les précipitations, parmi les facteurs climatiques, ont une importance essentielle. Le ruissellement se produit lorsque des sols ne peuvent plus absorber l'eau de fonte des neiges ou la pluie. Le coefficient de ruissellement du bassin versant est une caractéristique hydrologique importante.

L'érosion hydrique provoque la formation de microchenaux sur les pentes à partir de petites

rigoles, la couche superficielle fertile est emportée par l'eau, la structure du sol se dégrade et les éléments de fertilité peuvent être lessivés. La détermination quantitative de l'érosion hydrique est très importante. Pour y parvenir, compte-tenu des aspects particuliers des processus, on peut utiliser différentes méthodes telles que celles décrites dans diverses publications (par exemple Mutchler, 1963; Wischmeier et Smith, 1965; et Agricultural Research Service, 1975).

Les trois méthodes suivantes sont les plus utilisées:

1. Mesure des débits solides de parcelles et petits bassins versants.
2. Mesures volumétriques des rigoles et des changements de niveau des surfaces à la suite de fortes précipitations individualisées.
3. Volume des sédiments provenant d'un petit bassin versant, déposés à l'amont d'un barrage de retenue ou d'un ouvrage écrêteur de crue.

Méthode 1: La méthode de base pour étudier l'érosion comporte des mesures de terrain pour le ruissellement et le débit de petites parcelles de ruissellement et de petits bassins versants, conjuguées avec le relevé des paramètres hydrométéorologiques et des caractéristiques de surface du bassin. L'objectif de l'enquête est d'obtenir des caractéristiques quantitatives du ruissellement et de l'érosion pour établir une corrélation entre l'intensité de l'érosion et les facteurs naturels et pour évaluer l'efficacité des dispositifs anti-érosion.

Les parcelles de ruissellement sont des surfaces isolées du terrain environnant, équipées d'instruments de mesure enregistrant les débits liquides et solides de la surface des parcelles. Les données obtenues permettent d'étudier l'effet sur le ruissellement et les processus d'érosion de la pente, de la longueur et l'exposition des parcelles, de la composition et de l'état du sol et du sous-sol, de l'occupation du sol et du mode de culture, des mesures préventives agrotechniques contre l'érosion et leur stade de développement, etc... Les parcelles de ruissellement peuvent être soit permanentes, soit temporaires, réalisées à l'aide d'un écran imperméable amovible qui les entoure. Les méthodes de lutte contre l'érosion sont étudiées en général à l'aide de parcelles temporaires, comme le montre la figure 3.2

On peut évaluer l'effet des facteurs possibles tels que la topographie du bassin versant, la fraction de la surface occupée par des ravines ou par la végétation, les mesures préventives contre l'érosion (à base de techniques multi objectifs, agrotechniques et hydrotechniques de conservation des forêts), à l'aide de petits bassins versants où l'on étudie l'érosion hydrique. Il est important de choisir des bassins versants qui soient nettement différents pour au moins l'une des caractéristiques étudiées (le relief, la surface couverte de forêt, la nature du sol et du sous-sol, les mesures préventives contre l'érosion, etc...).

Les parcelles représentatives pour l'étude de l'érosion hydrique doivent être implantées dans les principales zones où l'on rencontre les sols et les climats générateurs d'érosion et doivent représenter les conditions particulières typiques de ces zones (relief, sol, couvert végétal) ainsi que l'agriculture type.

Les conditions de base régissant le choix des sites de parcelles sont les suivantes:

1. Disponibilité de pentes, non perturbées par des excavations et des routes, sans irrégularités topographiques et sans distorsion des conditions naturelles d'écoulement.
2. Possibilité de mettre en place des délimitations perpendiculaires aux courbes de niveau autour de la parcelle.
3. Pente régulière.
4. Profondeur constante de l'aquifère.
5. Pas de résurgence d'eaux souterraines à la surface.
6. Sol et couverture végétale uniformes sur toute la parcelle.
7. Possibilité d'établir un bilan hydrique significatif.

On combine les mesures de débits liquide et solide sur les parcelles et les petits bassins versants, avec l'observation de tous les facteurs hydrométéorologiques déterminant les volumes d'eau et l'érosion. Un programme à buts multiples devra comprendre, lorsque cela sera possible:

1. L'observation des débits liquide et solide provenant des pentes, rigoles et ravines des bassins versants (ou des parcelles de ruissellement).
2. Les observations météorologiques.
3. Des mesures de l'humidité du sol.
4. L'observation de la distribution des couverts de neige et la détermination de la fonte des neiges résultante.
5. La détermination de la profondeur du sol gelé et de la zone de fonte.
6. La détermination de la capacité d'infiltration des sols.
7. La détermination des récoltes.

Pour faire une étude comparative des méthodes agrotechniques de lutte contre l'érosion, il est avantageux de faire des observations simultanées sur plusieurs parcelles, chacune d'elles étant soumise à une pratique culturale différente. Les données d'une série de parcelles doivent comprendre des informations sur les variations des sols et sous-sols, des pentes, de la taille, des caractéristiques hydrogéologiques, etc...

Afin de juger de l'effet des pratiques agricoles sur l'intensité des écoulements et sur l'érosion des sols pendant les périodes de débit variable, il est avantageux d'installer une parcelle permanente de référence située cette fois-ci sur une jachère, permettant ainsi une comparaison des données pour rechercher les effets de la rotation des cultures sur le taux d'érosion. On peut aussi faire des recherches sur l'effet de l'application de fertilisants sur les rendements agricoles et sur l'écoulement à partir de parcelles représentatives des sols typiques de la région étudiée. L'écoulement des parcelles, des bassins versants, des rigoles et ravines, etc... peut être mesuré à l'aide de canaux jaugeurs, de seuils à lame mince et de dispositifs de mesure similaires.

Le traitement des données d'écoulement consiste à calculer les débits des parcelles ou bassins versants pour des périodes calendaires: jour, décade, mois, année ou pour d'autres périodes déterminées. Le volume journalier écoulé se calcule à l'aide de l'équation suivante:

$$W_{\text{jour}} = \frac{Q_0 + Q_1}{2} \Delta S_1 + \frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta S_2 + \dots + \frac{Q_{n-1} + Q_n}{2} \Delta S_n \quad (3,1)$$

où $Q_0, Q_1, Q_2 \dots Q_n$ sont les débits instantanés en m³/s.

$\Delta S_1, \Delta S_2, \dots \Delta S_n$ les intervalles de temps séparant les mesures $Q_0-Q_1, Q_1-Q_2, \dots Q_{n-1}-Q_n$ en secondes.

W_{jour} le volume écoulé en une journée en m³.

Les observations de débit solide des parcelles, des bassins versants, des rigoles et ravines sont faites pour obtenir les caractéristiques quantitatives de l'érosion hydrique et pour établir des corrélations entre le taux d'érosion des sols et les facteurs de base déterminants.

Afin de déterminer l'intensité de l'érosion, on procède à des relevés des concentrations en sédiments et de débit sur un ou deux versants caractéristiques. On fait cela pendant deux ou trois jours d'écoulement intensif. Les relevés consistent en des mesures de concentration en sédiments et de vitesse du courant dans des sections en travers actives du réseau des petits chenaux et dans le chenal collecteur principal. A cet effet, on sélectionne 4 à 6 emplacements sur ces petits chenaux situés en différents endroits des versants, où l'on fait des mesures plusieurs fois par jour.

Pour déterminer l'érosion spécifique, on détermine l'aire du bassin versant. Après un écoulement important, on entreprend de cartographier et de mesurer le réseau de rigoles formées sur la pente, de déterminer le volume des cônes de déjection de bas de pente ou dans les microdépressions du relief. En même temps, on prélève des échantillons de sédiments pour en déterminer la masse volumique et la granulométrie. Ces mesures sont réalisées pour établir le bilan de l'érosion et de la sédimentation sur les pentes étudiées. Jusqu'à ce jour, la mesure des débits solides des pentes et petits bassins versants constituent la méthode de base pour déterminer l'érosion des sols. Elle demande cependant un matériel spécialisé et pas mal de temps.

Méthode 2: La méthode qui consiste à mesurer les modifications des petits chenaux et du niveau du sol ne permet pas de suivre les modifications du taux d'érosion dans le temps, mais fournit seulement l'érosion totale caractéristique de toute la période d'écoulement. C'est cependant l'une des méthodes les plus efficaces pour déterminer le taux d'érosion des sols. De telles mesures sont décrites dans diverses publications qui exposent les méthodes d'observation des processus d'érosion (Sobolev, 1948; Shvebs, 1974 et Dusan Lackar, 1970). Cette méthode présente les avantages suivants:

1. Elle détermine non seulement le volume total du sol érodé sur la pente, mais aussi sa répartition sur la surface étudiée et la mise en évidence des zones à taux d'érosion différents.
2. Elle fournit des mesures suffisamment précises pour la plupart des besoins à un coût relativement bas.
3. Elle est facile à mettre en oeuvre.
4. Une petite équipe de chercheurs peut faire les mesures annuellement sur un ensemble de parcelles et de bassins versants présentant des caractéristiques physiographiques différentes.

Pour mesurer l'engraissement des sols, on utilise des perches graduées en millimètres. Elles sont installées dans les sites où l'on s'attend à un dépôt pour en déterminer le volume et la profondeur moyenne. Pour évaluer l'érosion et les modifications de niveau de la surface du sol, on utilise une perche avec un plateau installée sur une forte pente. Une perche de 25 cm de long est insérée dans le plateau et mise au contact du sol. Au fur et à mesure de l'érosion,

le plateau glisse le long de la perche et indique la profondeur érodée. Un réseau de perches à plateau est installé sur la pente (Emett, 1965).

Méthode 3: Pour une évaluation approximative de l'érosion sur des petits bassins versants où il n'y a pas de mesures directes de débit solide, on peut utiliser les données disponibles sur les dépôts de sédiments dans les retenues artificielles. De même que la deuxième méthode, celle-ci fournit seulement un résultat global sur toute une période d'écoulement. Avec les relevés faits sur des sections en travers rapprochées ou sur les courbes de niveau pour évaluer le volume du dépôt au moment de la mesure, par comparaison avec la capacité d'origine et en estimant l'efficacité du piégeage et la densité des dépôts, on peut obtenir le taux de sédimentation dans la retenue (Rukovodstvo Vodnobilansovym stantsiam, 1973 et Asce, 1975).

Afin de déterminer la densité et la granulométrie des dépôts de sédiments, on utilise le préleveur présenté à la figure 3.3 pour prélever des échantillons non perturbés.

Sur bien des petits bassins versants, les observations sur la vitesse de progression des ravines sont essentielles pour déterminer les mesures préventives contre l'érosion, pour évaluer les dommages dus aux ravines et pour déterminer l'effet sur les structures hydrauliques existantes.

Pour évaluer la vitesse de progression d'une ravine, on mesure des paramètres caractéristiques: largeur, longueur, profondeur, surface, volume. On doit aussi repérer les événements climatiques ou les orages isolés exceptionnels, ainsi que n'importe quel événement saisonnier, annuel ou pluri-annuel susceptible d'influencer la vitesse de progression des ravines.

A l'origine, on fait un lever topographique. Par la suite, l'avance de la ravine (en longueur et en largeur) est relevée au moyen de mesures annuelles, ou plus fréquentes, des distances du sommet et des bords de la ravine à des bornes permanentes, aussi bien que par des levés topographiques répétés.

L'observation de l'approfondissement des ravines se fait à partir de sections en travers. La profondeur d'érosion ou de dépôt entre deux levés successifs est déterminée en superposant les profils des sections en travers à des sites permanents. Il est recommandé d'effectuer un lever au printemps après les crues de fonte des neiges et en automne après les crues pluviales, voir figure 3.4.

La propagation d'une ravine peut, dans certains cas, être déterminée en mesurant débit liquide et concentration en sédiments en deux endroits: à l'entrée et à la sortie de la ravine. A la sortie de la ravine, on recommande d'étudier les sédiments du cône de déjection. Pour cela, on mesure le cône de déjection après la crue de fonte des neiges et après les crues pluviales où l'on observe un débit solide considérable. Sur les parcelles de ruissellement ou les petits bassins versants, tout programme de recherche pour analyser les processus d'érosion exige de recueillir des données sûres sur les processus sédimentologiques et parfois sur les débits liquides, aussi bien que sur les autres caractéristiques physiques et hydrologiques significatives décrites au chapitre 2. Les données hydrométéorologiques, géologiques et pédologiques sont des facteurs clefs qui, conjointement avec les facteurs physiques et topographiques, sont employés dans les nombreux modèles mathématiques de prédiction pour quantifier le taux d'érosion et le développement des ravines sur petits bassins versants (Asce, 1976). Pendant les années d'étude sur les petits bassins versants et les parcelles de ruissellement, les données hydrométéorologiques comprennent les relevés de la couverture neigeuse, le volume d'eau retenu sous forme de neige sur les pentes des bassins versants, la couche de glace, la profondeur de sol gelé et de dégel du sol, l'humidité du sol, la hauteur et l'intensité des précipitations. Les données météorologiques disponibles dans la région sont repérées sur une carte et des postes pluviométriques supplémentaires sont choisis sur les bassins versants étudiés. Le nombre de postes dépend de la surface des bassins, de leur forme et de leur relief. Il est nécessaire de connaître la structure géologique et la lithologie qui influent beaucoup sur le déroulement des processus érosifs, spécialement les dépôts de loess qui sont attaqués facilement par l'érosion (Sobolev, 1948). Les limons alluviaux et les argiles fines ont un comportement parfois similaire à celui de loess, tandis que les alluvions anciennes, fluvioglaciaires et les sables éoliens présentent un comportement anti-érosif, tout à fait différent. Les sables très perméable à faible capacité de rétention en eau peuvent réduire le ruissellement. Cependant, ils peuvent aussi contribuer à réduire les pentes du bassin versant par l'action des affouillements. L'érosion des limons sableux est en général supérieure à celles des limons à ruissellement égal. Les formations de roches nues sont plus résistantes à l'érosion.

Ingénieurs et chercheurs, notamment Sylvestrov, 1949, et Sobolev, 1948, sont d'avis que la répartition granulométrique des sols n'est pas directement déterminante pour l'érosion, mais n'est qu'un paramètre parmi l'ensemble complexe des propriétés physiques et chimiques des sols. Les caractéristiques des sols les plus contraires à l'érosion sont: la structure du sol, de laquelle dépendent la capacité de rétention et donc le coefficient de ruissellement, la teneur et la qualité de l'humus dans le sol qui contribue à fixer et à stabiliser la structure du sol, la distribution granulométrique du sol qui est une importante propriété physique, et le complexe

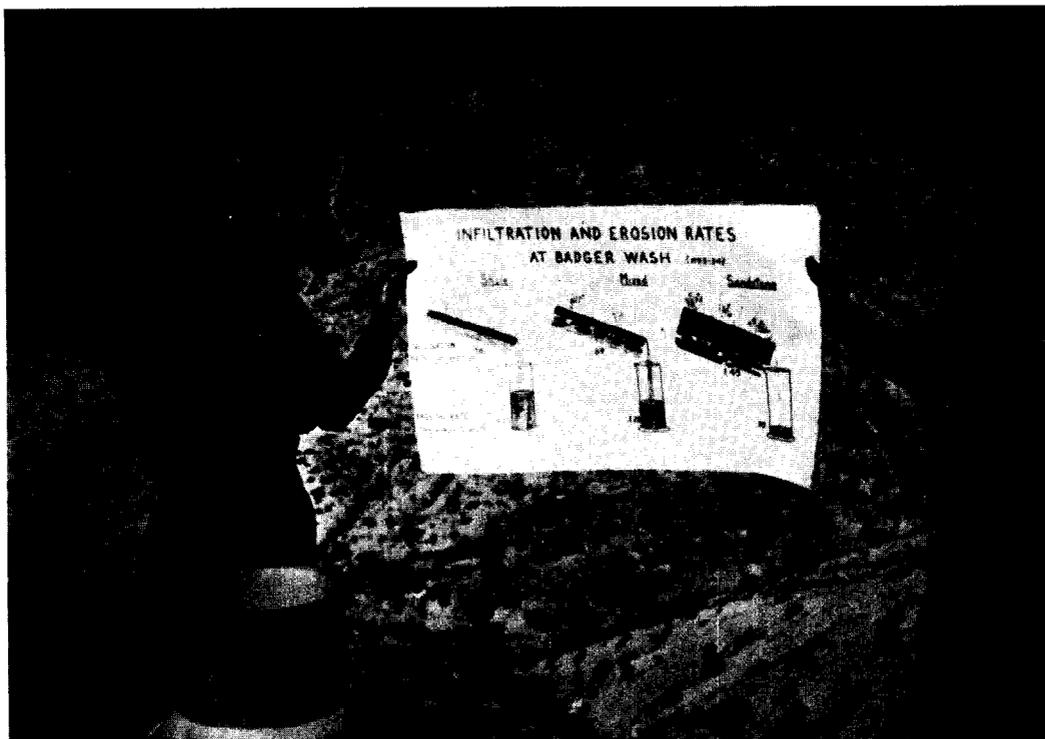


Fig. 3.2 Parcelle expérimentale d'essai pour mesurer les taux d'érosion sur le bassin du Badger Wash près de Grand Junction, Colorado, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U., 1957).



Fig. 3.3 Carottier immergé depuis un bateau pour prélever des échantillons des dépôts sédimentaires d'une retenue. (Bureau of Reclamation, dans la retenue de Elephant Butte, E.U., 1969).



Fig. 3.4 Localisation des sections en travers à suivre dans une ravine d'érosion, Nouveau Mexique, E.U. Photo E.L.Pemberton, 1969.

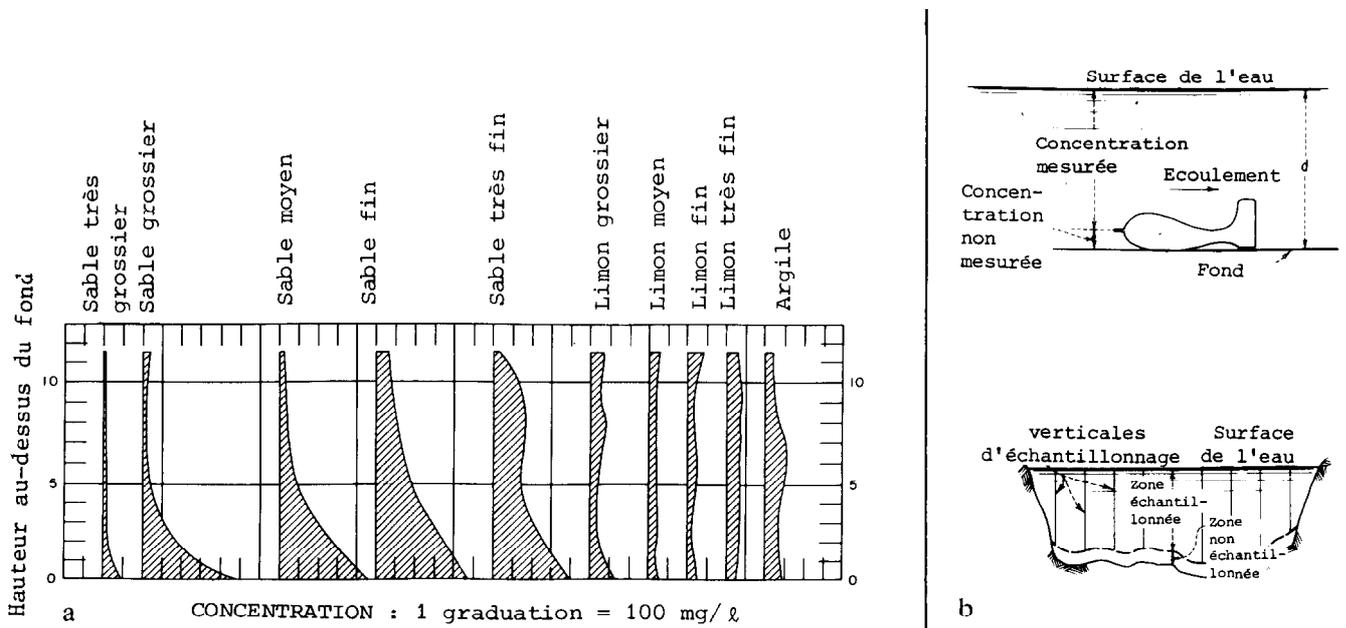


Fig. 3.5 Echantillonnage de matières en suspension

- a) Concentration en fonction de la profondeur, Missouri River à Kansas City, Missouri. (Corps of Engineers, E.U.).
- b) Charges mesurées ou non mesurées (Bureau of Reclamation, E.U.).

absorbant d'un sol qui conditionne sa capacité totale influencée par le degré de dégradation et de minéralisation des matières organiques.

L'humidité des sols influence l'écoulement de la fonte des neiges puisqu'elle agit beaucoup sur la capacité d'infiltration, en particulier à l'état de glace. La connaissance des profondeurs de sols et sous-sols soumises au gel et au dégel est importante pour étudier les pertes en eau dues à l'infiltration et pour caractériser la résistance à l'érosion des sols et sous-sols. Le nombre de points d'observations de l'humidité du sol dépend de la précision recherchée pour la détermination du stock d'eau moyen du bassin versant.

3.1.2.2 Etude des transports de sédiments dans les cours d'eau.

Transport en suspension. Au chapitre 2.3, on a donné les caractéristiques du transport solide d'un cours d'eau avec une description des nombreux paramètres impliqués. Si on peut mesurer les quantités de sédiments, il est alors possible de déterminer complètement l'érosion d'un bassin versant donné. La quantité totale de sédiment ou charge totale transportée par un cours d'eau est composée de la charge en suspension et du transport de fond. Ainsi, transport en suspension et transport de fond sont les deux termes du calcul du débit solide total.

Les mesures directes sur le mélange eau-sédiments fournissent une information sur la quantité de sédiments en suspension (concentration) et sur leurs caractéristiques physiques. Les mesures de transport en suspension doivent fournir des échantillons qui représentent avec précision le mélange eau-sédiments. Bien des variables conditionnant un échantillonnage représentatif sont indiquées au chapitre 2.3. Les plus importantes sont la variation spatiale et les fluctuations dans le temps décrites par Nordin (1980). Un échantillonneur bien conçu est profilé de façon à éviter les perturbations et son ajustage d'admission est dessiné de façon à prélever à une vitesse indentique à celle du courant (U.S. National Handbook, 1978). La variation spatiale de la composition granulométrique avec la profondeur pour un cours d'eau transportant argiles, limons et sables en suspension est indiquée par la figure 3.5a. L'autre paramètre spatial est la variation de la concentration le long d'une section en travers. Plus la section du cours d'eau est irrégulière et plus cette variation est importante et nécessite de recueillir des échantillons à plusieurs verticales de prélèvement comme indiqué sur la section en travers de la figure 3.5b. Ces caractéristiques des sédiments ainsi que les limitations physiques des possibilités d'échantillonnages des débits à toute station aideront à choisir le type de préleveur de sédiments en suspension et la méthodologie d'échantillonnage à adopter.

Trois types principaux de préleveurs sont utilisés pour les sédiments en suspension:

1. Préleveur à intégration
 - a. préleveur à intégration ponctuelle
 - b. préleveur à intégration sur une verticale
2. Préleveurs à pompe
3. Préleveurs instantanés

Le préleveur à intégration est préféré pour la plupart des recherches, parce qu'il est utilisé pour recueillir des mélanges eau-sédiments pendant un certain intervalle de temps, ce qui contribue à réduire les variations dues aux fluctuations temporelles. Ce peut être un intégrateur ponctuel qui est employé à recueillir des échantillons en plusieurs points par verticales (figure 3.6). L'autre type c'est le préleveur par intégration sur une verticale qui fournit un échantillon intégré de la surface au fond obtenu en déplaçant l'appareil à vitesse constante dans un aller retour de la surface au fond (figures 3.7, 3.8 et 3.9). On utilise généralement des préleveurs à pompe pour des études scientifiques particulières, par exemple lorsqu'il est important de recueillir un échantillon à des intervalles de temps déterminés au cours d'une crue. Cet appareil est en général installé de façon permanente avec une prise d'eau fixe dans le cours d'eau à un point déterminé d'une verticale.

Le préleveur instantané est le plus ancien des appareils car il a été utilisé de bien des façons, par exemple en descendant un récipient ouvert dans l'eau. On a construit des modèles plutôt sophistiqués de ce genre d'appareil, mais tous fournissent un échantillon instantané du mélange eau-sédiments en un point donné.

Il y a des conditions limites recommandées pour l'usage des différents types d'appareils, selon la masse de l'appareil, la profondeur, la vitesse maximum et la taille des sédiments.

Le préleveur à intégration verticale le plus courant (conçu par Inter-Agency Sedimentation Project aux Etats-Unis), modèle U.S. D-49 ou U.S. D-74 (figure 3.9) ne doit pas être utilisé pour des profondeurs supérieures à 5m et pour des vitesses supérieures à environ 2,10 mètres par seconde. Le préleveur à intégration ponctuelle U.S. P-61 peut être utilisé avec efficacité jusqu'à une profondeur de 55 mètres et il est calibré pour des vitesses allant jusqu'à 2 m/s. Une condition indispensable pour ce type d'appareils c'est qu'ils ne doivent pas être remplis à plus de 90% de leur capacité. Les préleveurs par pompe ou à prélèvement instantané ne sont utilisés en général que pour des cours d'eau transportant de l'argile ou des limons. S'il y a du sable en suspension, le préleveur doit être descendu près du fond, ou alors il faut recueillir des données permettant d'extrapoler les mesures jusqu'au fond.

Une fois choisi le préleveur, l'étape suivante consiste à définir une méthode de prélèvement qui permettra de déterminer convenablement la concentration des sédiments en suspension correspondant à l'écoulement pour calculer le débit solide en suspension. Les méthodes dépendent du préleveur choisi et peuvent être énumérées comme suit:

1. Méthodes par intégration verticale
 - a. Méthode d'égal débit-EDI
 - b. Méthode d'égale largeur-EWI (méthode ETR)
 - c. Méthode de la verticale unique
2. Méthodes ponctuelles
 - a. Méthodes à points multiples
 - b. Méthode à deux points
 - c. Méthode à un point
 - d. Méthode par sommation.

Dans un cours d'eau transportant une proportion appréciable quelconque de sable en suspension, un échantillon représentatif doit permettre de déterminer le transport jusqu'à proximité du fond. L'intégration sur une verticale est une bonne méthode car l'échantillon recueilli fournit une concentration moyenne pondérée par le débit le long d'une verticale. On multiplie cette concentration par le débit liquide le long de chaque verticale ou, si on utilise les méthodes EDI ou EWI, par le débit total du cours d'eau en utilisant la formule suivante:

$$Q_S = \bar{c} Q K$$

où Q_S = débit solide en suspension en tonnes par jour

Q = débit liquide en m³/s

\bar{c} = concentration moyenne pondérée par le débit en mg/l

K = facteur de conversion de 0,0864 pour les concentrations inférieures à 15.000 mg/l et qui doit être augmenté pour tenir compte des sédiments contenus dans l'eau pour de fortes concentrations.

Pour la méthode EDI, on partage la section en travers en au moins 5 sections partielles dont les débits sont égaux et on recueille par intégration un échantillon moyen pondéré par le débit sur la verticale passant par le barycentre des débits de chaque secteur. Chaque échantillon par verticale fait l'objet d'une analyse en laboratoire. La méthode EWI consiste à prélever des échantillons à des distances égales le long de la section en travers. Dans ce cas, on prépare un échantillon composé avec les prélèvements de toutes les verticales et une seule analyse est faite avec cet échantillon pour obtenir la concentration moyenne pondérée par le débit et la répartition granulométrique. Dans la méthode à une verticale, on recueille un échantillon moyen pondéré par le débit par intégration le long d'une verticale représentative. L'échantillonnage sur une seule verticale réduit le nombre des mesures et on l'utilise souvent lorsqu'un observateur local recueille des échantillons journaliers. Cette méthode convient particulièrement bien aux cours d'eau dont le lit est stable et lorsqu'elle est contrôlée fréquemment par les méthodes EDI ou EWI. La formule suivante ajustée sur plusieurs années permet de passer de la concentration moyenne pondérée sur une verticale à la concentration moyenne dans la section.

$$C_s = K C_{si} \quad (3.3)$$

La dispersion des points de mesure dans un graphique $C_s = f(C_{si})$ ne devrait pas dépasser 10%. Dans l'équation 3.3, C_s est la concentration moyenne pondérée par les débits provenant de mesures complètes EDI ou EWI, C_{si} est la concentration moyenne pondérée par les débits sur une seule verticale représentative et K est un coefficient de proportionnalité. Les méthodes par prélèvement ponctuel correspondent à des échantillons recueillis en un seul point à la fois par verticale et dans la section en travers. On peut donc utiliser indifféremment un préleveur à intégration ponctuelle, un préleveur à pompe ou un préleveur instantané. Il est important de se rappeler que dans ces méthodes de prélèvement ponctuel on doit mesurer la vitesse du courant au point d'échantillonnage pour calculer le débit solide. Le prélèvement ponctuel est bien mieux applicable dans les cours d'eau où les matières en suspension sont surtout des argiles et des limons, à moins que plusieurs points de prélèvement permettent une extrapolation près du fond. Dans la méthode à points multiples, on recueille cinq échantillons ou plus par verticale, répartis entre la surface et le fond, et on peut utiliser un grand nombre de verticales dans chaque section en travers. Avec un grand nombre d'échantillons et d'analyses, cette méthode est utilisable pour des travaux spécialisés de recherche scientifique. Dans la méthode à deux points, les prélèvements se font aux 2/10 et aux 8/10 de la profondeur sur chaque verticale et coïncident avec les mesures de vitesse aux mêmes points.

Dans la méthode à un point, on fait un seul prélèvement par verticale aux 6/10 de la profondeur. Si on utilise une seule verticale représentative, alors la méthode de corrélation utilisée pour la méthode par intégration sur une verticale est applicable (voir l'équation 3.3).

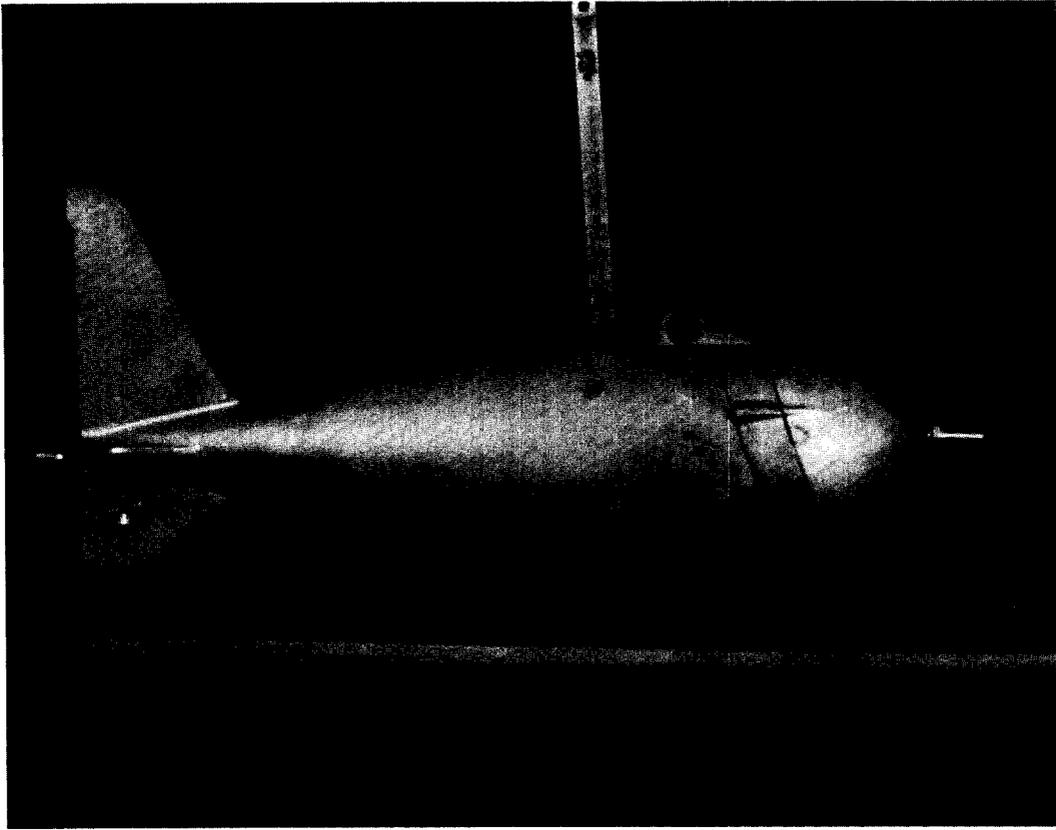


Fig. 3.6 Préleveur à intégration pontuelle US P-61 (E.U. Interagency Committee, 1963



Fig. 3.7 Utilisation d'un préleveur de matière en suspension à intégration verticale (US D-49) sur un pont du Rio Grande au Nouveau Mexique, E.U. (US Geological Survey, 1956).



Fig. 3.8 Préleveur sur perche de matières en suspension par intégration verticale (US DH-48) utilisé depuis un petit bateau sur le Colorado, près de Yuma, Arizona, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U., 1978).

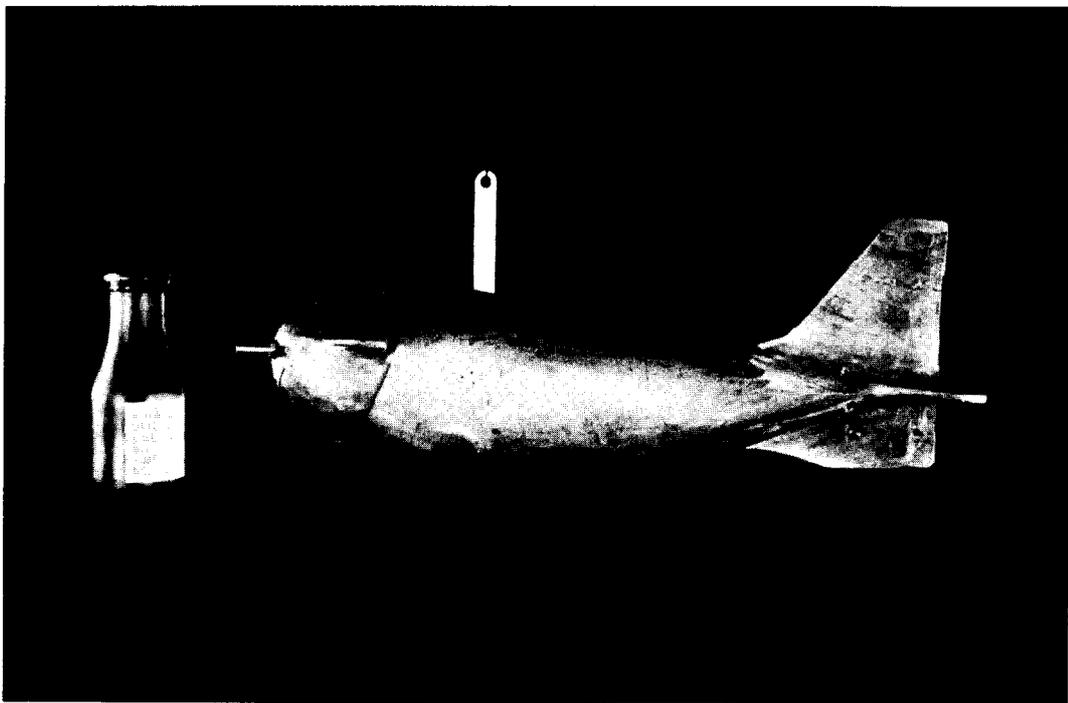


Fig. 3.9 Préleveur par intégration verticale US D-74 (E.U. Interagency Committee, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minnesota, E.U., 1980).

La méthode par sommation est une variante des méthodes à un ou deux points: le ou les deux prélèvements de chaque verticale sont mélangés en un seul échantillon et on détermine la concentration moyenne. Cette méthode est utilisée en général pour les concentrations inférieures à 200 gr m⁻³.

Transport de fond. Les deux méthodes de base d'échantillonnage du transport de fond sont soit la prise directe d'échantillons, soit la mesure indirecte, telles que les décrit Hubbel (1964). Les appareils les plus répandus sont du genre capteur de fond. De nombreux modèles ont été réalisés avec plus ou moins de succès. Les problèmes de ces appareils sont leur mise en place sur le fond et la perturbation du champ des vitesses, donc du mouvement des sédiments au voisinage du fond. Les recherches ont démontré que l'efficacité de l'échantillonnage est inférieure à 40% ce qui renforce l'obligation de faire un tarage. Le préleveur Helley-Smith à échantillonnage direct décrit par Emmet (1980) s'est montré efficace récemment pour des particules de 0,5 à 16 millimètres de diamètre. Lorsque les particules échantillonnées se situent dans cette gamme de sédiments grossiers, l'efficacité moyenne des prélèvements varie de 90 à 110% (fig.3.10).

Les mesures de transport de fond, à l'aide d'un capteur de fond, sont faites sur plusieurs verticales dans une section en travers. On choisit le nombre de verticales de mesure selon la longueur de la zone où se produit le transport de fond. La largeur de cette zone se calcule à l'aide d'équations déterminant la vitesse initiale d'érosion du fond. Les mesures de chaque verticale fournissent le débit unitaire à cette verticale.

$$q_{sb} = \frac{m}{\lambda T} \epsilon \quad (3.4)$$

où q_{sb} = transport de fond par unité de largeur

- m = masse de sédiments piégés
- λ = largeur de l'orifice d'entrée du capteur
- T = temps de prélèvement au point de mesure
- ϵ = coefficient d'efficacité du capteur

On détermine le transport de fond total par l'équation:

$$Q_{sb} = \sum_{i=1}^n \frac{q_{sb1} + q_{sb2}}{2} \Delta b_i \quad (3.5)$$

où Q_{sb} = débit solide de fond total

Δb_i = distance entre les points de mesure

Il existe d'autres méthodes pour mesurer le transport de fond: combinaison de dispositifs de mesures indirectes, techniques qualitatives pour détecter les mouvements, et d'autres appareils ou méthodes encore à l'essai tels que: appareils acoustiques, échantillonneurs à ultrasons, photographie et traçage du mouvement des dunes.

Hinrich (1970) a conçu un type d'échantillonneur combiné avec un hydrophone pour mesurer la charge de fond. L'hydrophone fournit simultanément des mesures du déplacement des sédiments du fond par une méthode volumétrique et également une surveillance acoustique du mouvement de la charge de fond ou des dunes. Nordin et Skinner (1977) décrivent un appareil combiné comprenant une sonde de profondeur, un préleveur par intégration ponctuelle et un moulinet utilisé pour des recherches sur les sédiments de l'Amazonie.

N.Ya. Soloviev (1969) a conçu un appareil pour enregistrer le déplacement des sédiments grossiers sur le fond. La figure 3.11 représente l'appareil utilisé pour enregistrer le mouvement des particules sédimentaires de grande taille. Le fonctionnement de l'engin repose sur l'enregistrement du choc des particules transportées sur le lit par une plaque réceptrice. L'engin, de par sa conception, permet d'étudier le déplacement de particules individuelles.

Dans le lit des cours d'eau à fond sableux et surtout pour ceux où le diamètre moyen ou médian est inférieur à 0,5 mm, toute mesure directe du transport de fond est impossible. Dans ce cas, la meilleure méthode indirecte c'est le calcul par la ou les formules indiquées dans les chapitres 2.3.1.4 (Transport de fond) ou 3.3.2.1 (Réseau de drainage). Pour appliquer ces formules, il faut disposer d'informations sur les caractéristiques des matériaux du lit ou des particules se déplaçant au fond. La répartition granulométrique et la masse volumique des matériaux du fond ou près du fond sont les caractéristiques les plus importantes. On peut obtenir des échantillons remaniés de ces matériaux à l'aide des préleveurs suivants (U.S. Inter-Agency Committee, 1963 et ASCE 1975):

1. Drague
2. Benne preneuse
3. Carottier à piston ou à tarière
4. Benne preneuse à secteur rotatif (fig. 3.12).

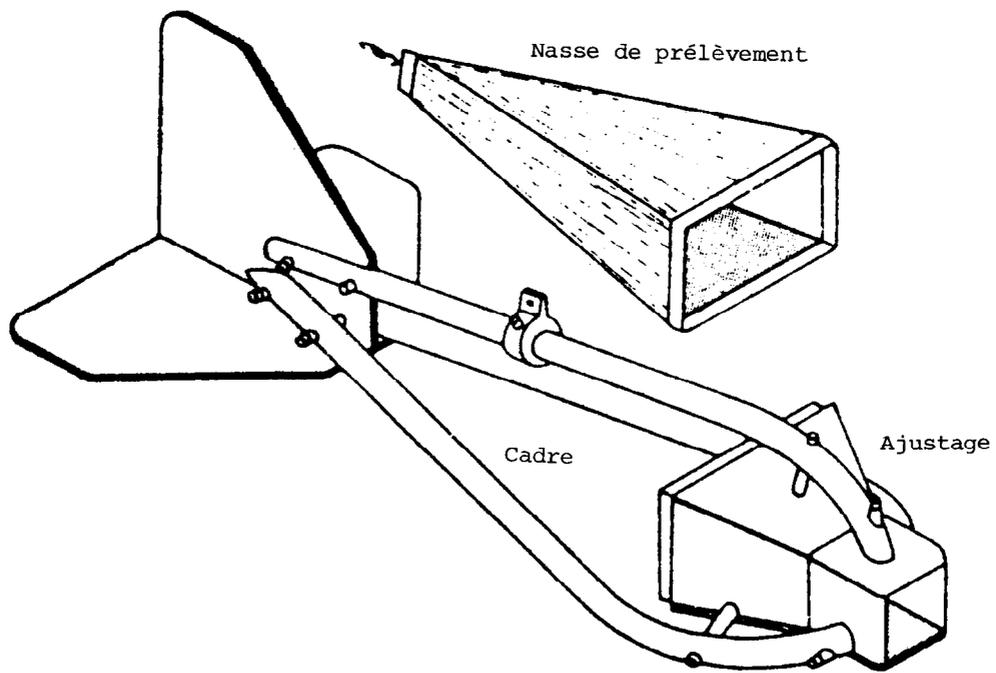


Fig. 3.10 Préleveur de transport de fond Helley-Smith. Emmett, W.W., 1980

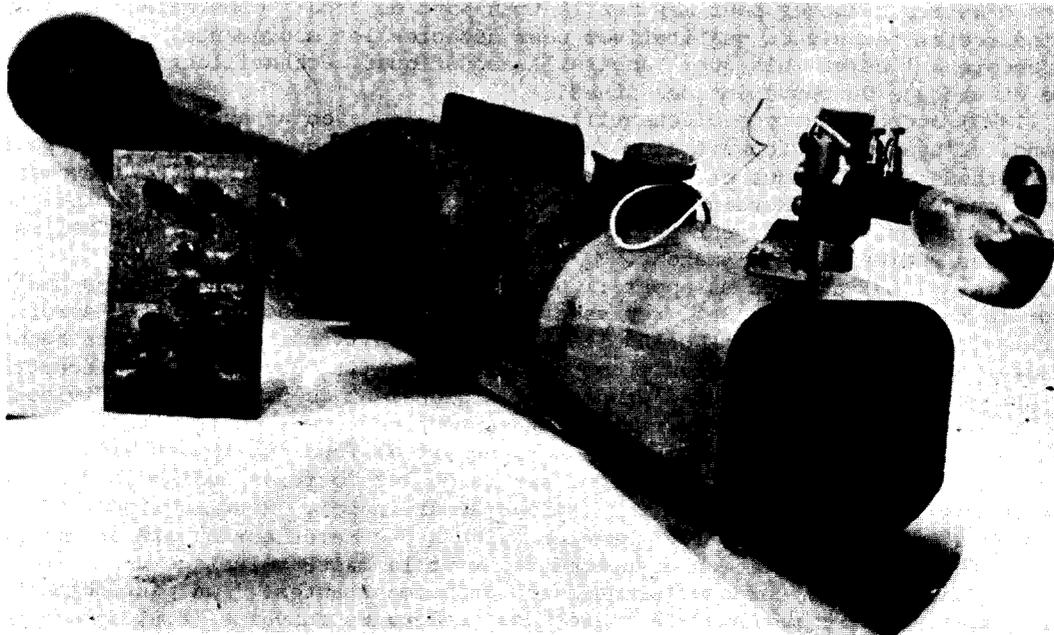


Fig. 3.11 Appareil pour enregistrer le mouvement des sédiments grossiers. Dans Instrument for registration of large sediment movement, Trans. GGI, vol. 172 (Gidrometeoizdat, 1969) par N.Y. Soloviev.

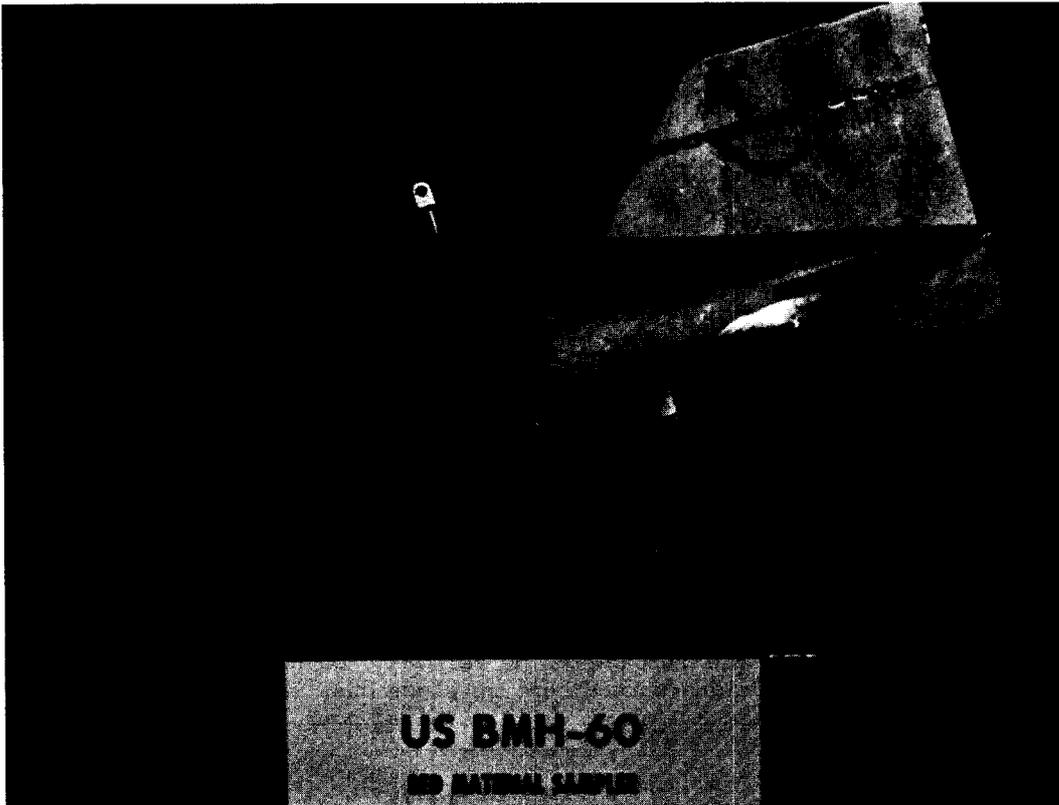


Fig. 3.12 Préleveur de matériaux du lit US BMH-60 (semblable au US BM-54 mais plus léger) (U.S. Interagency Committee, 1963).

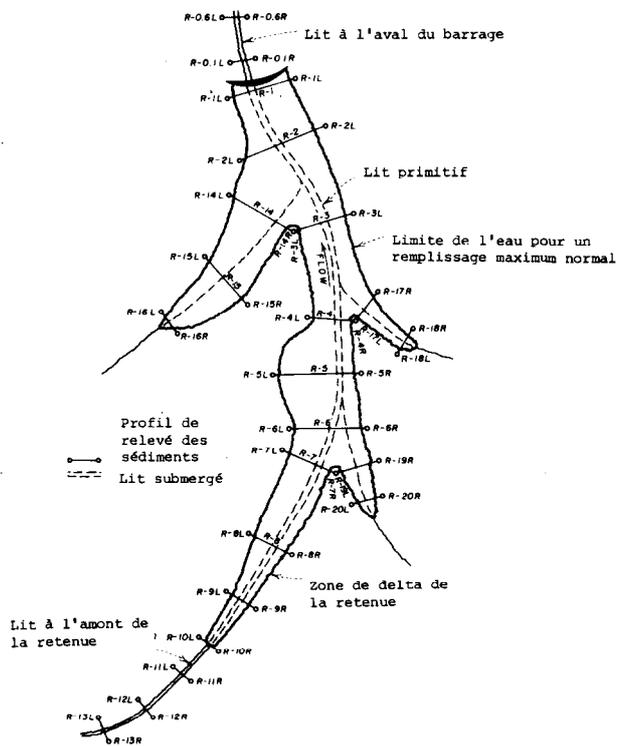


Fig. 3.13 Schéma type de relevés de retenue

Ces dernières années on a beaucoup utilisé la méthode des traceurs pour les travaux d'évaluation des masses de sédiments transportées (Metodika Izmerenia Raskhodov Nanosov i Izuchenie Deformatsij Rechnykh Rusel i Issledovanie Tverdogo Stoka, 1972). Dans les cours d'eau de plaine avec fonds de dune, on détermine le transport de fond par la mesure du déplacement des dunes. On mesure périodiquement les profondeurs le long de profils longitudinaux préalablement choisis. La vitesse de déplacement des dunes est déterminée par la comparaison de relevés successifs. Le débit solide de fond unitaire pour le profil considéré se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$q_{sb} = a \cdot p_s \cdot h_d \cdot V_d \quad (3.6)$$

où Q_{sb} = débit solide de fond par unité de largeur

p_s = masse volumique de la charge de fond

h_d = hauteur moyenne des dunes

V_d = vitesse moyenne des dunes

Le débit solide total au fond est calculé à l'aide de la formule (3.5). La méthode indirecte Metodischeskie Ukazania Upravleniam Gidrometsluzhby (1963) fondée sur le bilan sédimentaire d'une petite retenue est, sous certaines conditions, une méthode précise. Les données sur le volume de sédiments déposés dans la retenue pendant un intervalle de temps donné et celles sur les débits solides en suspension à l'entrée et à la sortie sont les données de base pour le bilan et pour le calcul du transport de fond. Le volume déposé est calculé à l'aide des données correspondant à la période séparant deux séries de relevés. On convertit le volume mesuré en masse en utilisant la masse volumique du sédiment en place dans la retenue.

Le débit solide du cours d'eau à l'amont de la retenue, pour la période considérée, se calcule avec l'équation suivante :

$$R_b = R_s - (R_{si} - R_{so}) \quad (3.7)$$

où R_b = transport de fond du cours d'eau à l'amont de la retenue

R_s = masse de sédiments déposés dans la retenue

R_{si} = masse de sédiments en suspension entrant dans la retenue, mesurée en amont de la zone de remous de la retenue

R_{so} = masse de sédiments en suspension sortant de la retenue.

La qualité des résultats de cette méthode dépend de beaucoup de facteurs tels que la précision des relevés de la retenue, de la détermination de la densité des sédiments déposés, la fréquence des mesures des débits solides en suspension entrant et sortant.

3.1.2.3 Recherches sur les sédiments dans les retenues. L'information sur les dépôts dans les retenues, y compris le mouvement des sédiments près du rivage et le long des berges est très importante pour résoudre de nombreux problèmes pratiques relatifs à l'évaluation de l'accumulation des sédiments dans les retenues, l'entretien des chenaux et voies navigables, le fonctionnement des ouvrages hydrauliques et des ponts, les projets d'utilisation des ressources en eau et l'entretien des pêcheries.

Les programmes d'observation de la sédimentation dans les retenues et du transport des sédiments le long des berges comprennent :

1. Des observations sur le dépôt des sédiments au fond et tout au long des retenues.
2. L'observation du mouvement des sédiments dans la partie libre de la retenue.
3. L'observation des transports de sédiments dans les zones d'eau peu profonde pour la formation du rivage et les mouvements des sédiments sous l'effet des vagues et des courants.

Le dépôt des sédiments: On fait des relevés périodiques des retenues ou des petits lacs afin de recueillir des données sur le volume et la position des dépôts de sédiments, sur leur densité et sur d'autres caractéristiques telles que la répartition granulométrique, etc... Les modifications de la profondeur d'eau à des sites ou des profils de mesures déterminés par comparaison avec des relevés antérieurs fournissent des données à la fois sur le volume et sur l'emplacement des dépôts.

La figure 3.13 présente une carte type de localisation de profils de mesure. Le nombre et l'emplacement des profils dépendent de la forme de la retenue et de l'importance des apports de sédiments. L'espacement des profils varie selon les exigences plus ou moins grandes en

précision, plus grandes par exemple dans la zone deltaïque critique en tête de retenue ou le long d'un rivage en progression rapide du fait d'une érosion excessive. Dans les zones de delta où les sédiments se déposent en mer, on doit disposer des profils de mesure de la même façon. On peut calculer les volumes déposés à partir des relevés des profils à l'aide des méthodes décrites par Pemberton (1980) ou l'ASCE (1979). La précision de ces calculs dépend de la précision relative des leviers successifs utilisés. C'est pour cette raison qu'il est important pour une retenue nouvelle où l'on s'attend à des dépôts importants de faire un lever initial d'une série de profils déterminés.

L'ASCE (1975) décrit les types de matériel nécessaires au lever des retenues. Pour les petites retenues ou celles qui se vident à l'occasion, les leviers se font en réalisant une nouvelle carte topographique, soit par un lever pédestre, soit par photogramétrie. Dans les grandes retenues on utilise à la fois la méthode précédente et, pour la partie immergée, un dispositif de sondage aux ultra-sons. Les figures 3.14 et 3.15 présentent respectivement un bateau effectuant un tel relevé et un enregistrement de sondage aux ultra-sons le long d'un profil.

Une méthode approchée pour déterminer le volume des sédiments déposés dans une petite retenue ou dans un bassin de décantation consiste à comparer les pentes du lit à l'amont du delta à l'entrée de la retenue et du fond de la retenue (Pankor, 1953 et Kikkawa, 1980).

Mouvement des sédiments dans les retenues: Pour déterminer la répartition des sédiments dans une retenue, on détermine la concentration des sédiments dans les eaux libres de la retenue en prélevant des échantillons. Les échantillons sont recueillis à plusieurs verticales, de façon à assurer une couverture complète. Le programme d'observation des concentrations en sédiments est en général périodique, de façon à s'adapter au régime d'exploitation de la retenue et au régime des cours d'eau débitant dans la retenue.

Les mesures comprennent : (a) le prélèvement d'échantillons eau-sédiments pour déterminer la concentration des matières en suspension et leur répartition granulométrique, (b) la température de l'eau, (c) le prélèvement d'échantillons de matériaux du fond pour en déterminer la répartition granulométrique. On mesure simultanément vitesse et direction des vagues. Si, lorsque l'on peut les mesurer, des matériaux très fins sont répandus dans toute la retenue, le débit solide en suspension sera mesuré au débouché du cours d'eau débitant dans la retenue.

Il est essentiel de connaître la répartition des courants pour déterminer la dynamique de la variation des concentrations en sédiments dans la retenue; en conséquence on fera, pendant les mesures, des observations sur les courants dans les eaux libres.

Observation des transports de sédiments dans les zones d'eau peu profondes: Les bordures peu profondes des retenues présentent des problèmes particuliers de transport de sédiments. Durant la période où les vagues exercent une action intensive le long des rivages, on observe un transport de fond appréciable et il faut faire des études particulières pour définir la direction et l'importance de ce transport. Le site de mesure utilisé près du rivage doit être représentatif de la retenue étudiée du point de vue de la géologie et de la géomorphologie. Le rivage doit faire un angle aigu avec la direction prédominante des vagues arrivant à la rive sur une distance de 200 à 300 mètres. Les profils de mesure (6 à 8) sont orientés perpendiculairement au rivage.

Les observations comprennent la prise d'échantillons pour la concentration en sédiments, des mesures du niveau de l'eau, de la température de l'eau, de la vitesse du courant et de celle du vent ainsi que de sa direction et de la hauteur des vagues. Deux ou trois fois par saison, on prélève des échantillons de sédiments en suspension et de transport de fond pour déterminer leur répartition granulométrique et leur masse volumique. L'échantillonnage des sédiments en suspension se fait à différents moments: eaux calmes, eaux agitées par des vagues. Les prélèvements d'échantillons de fond sont exécutés avec des instruments semblables à ceux utilisés dans les cours d'eau et décrits au chapitre 3.1.2.2. La figure 3.12 en présente un exemple.

Le transport de fond le long du rivage, Q_{sa} , se calcule à l'aide de l'équation suivante:

$$Q_{sa} = Q_a \cdot C_{sa} \quad (3.8)$$

où Q_{sa} = débit solide le long du rivage

Q_a = débit du courant côtier

C_{sa} = concentration moyenne en sédiments de la section en travers

On a utilisé le traçage fluorescent des particules pour étudier le transport des dunes de sable (Aibulatov, 1958; Galanov, 1966; Ingle, 1971; et Medvedev et Aibulatov, 1956). Certains inconvénients de cette méthode ont empêché qu'elle soit utilisée plus largement. L'épaisseur de la couche en mouvement est difficile à déterminer, la mesure prend du temps, le repérage et

le comptage des particules marquées sont difficiles.

Horikawa(1980) et Dean (1980) décrivent les méthodes de collecte des données nécessaires à l'étude du transport solide côtier et de quelle façon il agit sur la morphologie côtière.

3.2 ANALYSE DES DONNEES

On utilise les données recueillies dans le but de prédire l'effet des activités humaines sur l'érosion et la sédimentation, soit pour établir des relations empiriques, soit pour alimenter des modèles mathématiques. Un contrôle soigneux des données est nécessaire pour éliminer celles qui ne seraient pas sûres. Pour analyser les données, on choisit d'ordinaire l'une des méthodes statistiques suivantes (ou une combinaison de ces méthodes) : (1) Analyse graphique, (2) Recherche de corrélations à l'aide d'une calculatrice de bureau ou (3) Analyse par régressions multiples, si on a affaire à plus de deux variables indépendantes, en utilisant un ordinateur plus sophistiqué.

Une bonne collecte de données scientifiques et un programme d'analyse comportant des méthodes statistiques exigent que les données soient bien organisées et bien stockées pour être analysées et plus tard mises à disposition pour parvenir à une décision ou à une conclusion. Il pourra en résulter également par effet de retour des recommandations pour améliorer le programme d'acquisition des données.

3.2.1 Evaluation de la précision et de la fiabilité des données

Lors de la collecte et de l'analyse des données, on doit toujours avoir présent à l'esprit un fait primordial: la valeur vraie de la variable mesurée n'est pas connue. La plupart des données recueillies constituent des échantillons nécessaires à une définition approximative de cette vraie valeur. L'analyse statistique et l'interprétation des données exigent de tenir compte d'une caractéristique de ces données. La plupart des données hydrologiques telles que la pluie et l'écoulement sont presque totalement aléatoires à l'échelle annuelle mais, sur un espace de temps plus court, elles sont partiellement déterministes à cause de l'effet saisonnier. Débit solide et taille des sédiments du fond ont des caractéristiques analogues du fait qu'ils dépendent des variations dans l'année de la pluie et de l'écoulement. Les caractéristiques des bassins versants, superficie, pente, géologie, nature des sols et couvert végétal présentent une variation spatiale mais sont invariables dans le temps. Les dépôts de sédiments dans une retenue ne sont pas homogènes dans l'espace à cause des facteurs régissant leur dépôt. L'évaluation des caractéristiques homogènes et non homogènes des données constitue un premier test de leur fiabilité. Les caractéristiques non homogènes peuvent présenter des variations extrêmes dans les échantillons recueillis.

On peut utiliser les méthodes statistiques pour évaluer le degré de confiance à accorder aux données, en particulier par la méthode graphique qui fait aisément apparaître les points aberrants ou anormaux. Avant d'éliminer un tel point parce qu'il est sans valeur et imprécis, il est prudent d'examiner les autres paramètres qui peuvent influencer l'événement. Une valeur extrêmement forte de concentration en sédiments, explicable si un orage localisé se produit dans une zone très érodible, est un bon exemple de ce fait.

L'analyse en double masse, faite graphiquement ou à l'ordinateur, est une bonne technique de contrôle des données. On peut donner en exemple la comparaison de la pluie accumulée en millimètres à un poste pluviométrique avec la valeur accumulée simultanée d'un groupe de postes pluviométriques environnants. Une cassure dans la courbe signale des relevés anormaux, dus peut-être à un déplacement du pluviomètre. La même technique de double masse, utilisée pour analyser les écoulements, peut expliquer des relevés aberrants dus à des retenues ou barrages de dérivation à l'amont. Si l'on met en évidence par la méthode des double-masses des incohérences confirmées par une vérification des relevés d'observations, de l'emplacement de l'appareil ou de la section de jaugeage, alors des corrections appropriées de données se justifient.

Lors de l'évaluation de la précision relative des données recueillies, on peut être amené à revoir les techniques d'acquisition. Dans le cas des données pluviométriques, disposer d'un bon réseau pluviométrique dans le bassin versant est de première importance. Il en est de même pour un réseau hydrométrique pour obtenir un échantillonnage bien représentatif avec des sites où il est nécessaire de connaître les débits.

On peut utiliser l'analyse statistique avec un calculateur de bureau ou un ordinateur digital sophistiqué pour évaluer la précision relative des données. Pour la plupart des données hydrologiques, notamment pluie, écoulement et transports solides, une régression graphique analysée analytiquement fournit la précision relative par le calcul d'un coefficient de corrélation. En général, il faut un échantillon de 30 valeurs ou plus pour déterminer une distribution statistique avec un intervalle de confiance qui permet d'arriver à des conclusions et des décisions raisonnables à partir des données.

Par suite des possibilités actuelles de simulation des hydrogrammes, les modèles de simulation des flux analysant l'écoulement, le stockage, le transport solide, le dépôt des sédiments

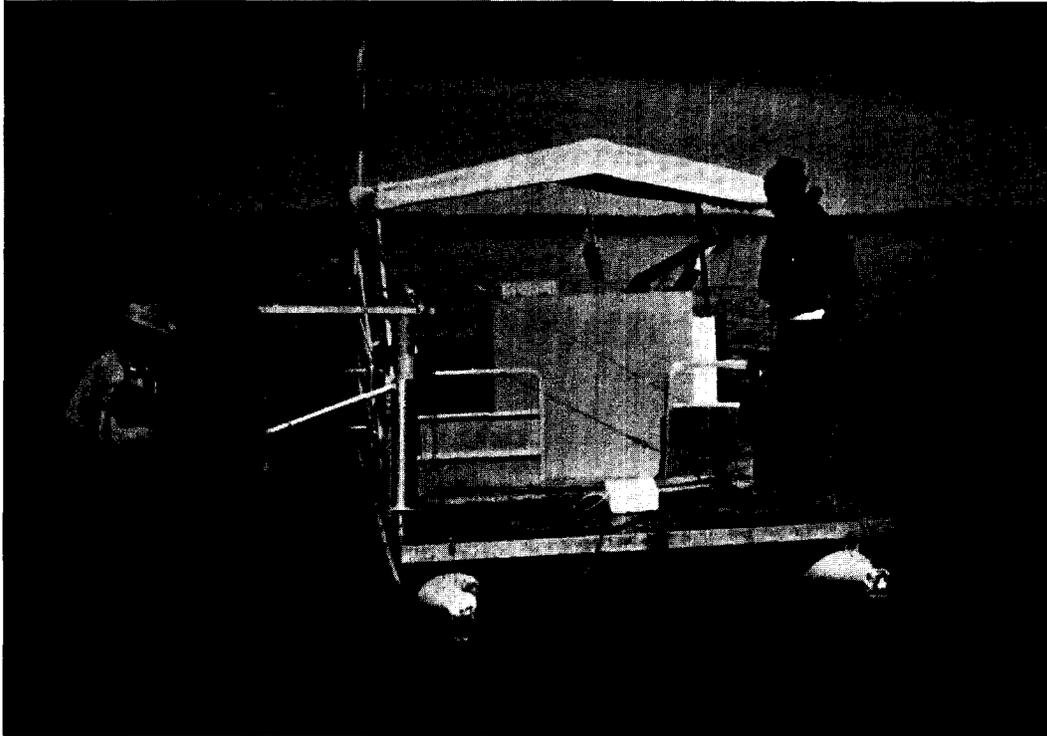


Fig. 3.14 Equipe de lever d'une retenue pendant une opération de sondage sur un profil (Bureau of Reclamation, E.U., 1973).

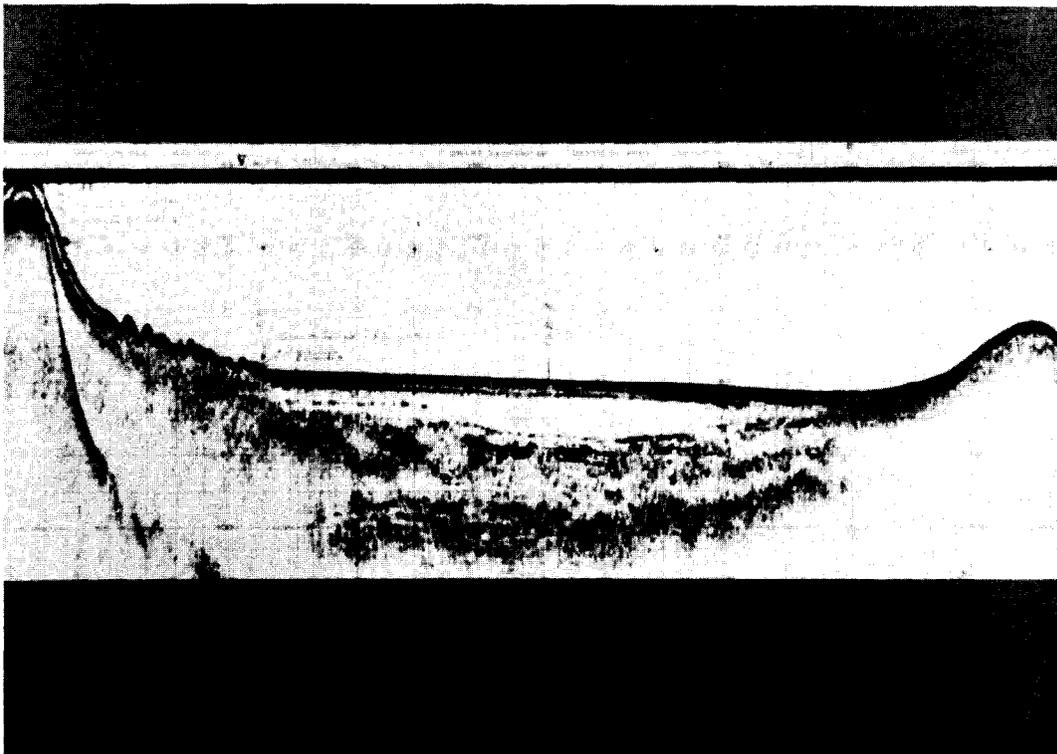


Fig. 3.15 Exemple de sondage aux ultra sons d'un profil de retenue (Bureau of Reclamation, E.U., 1971).

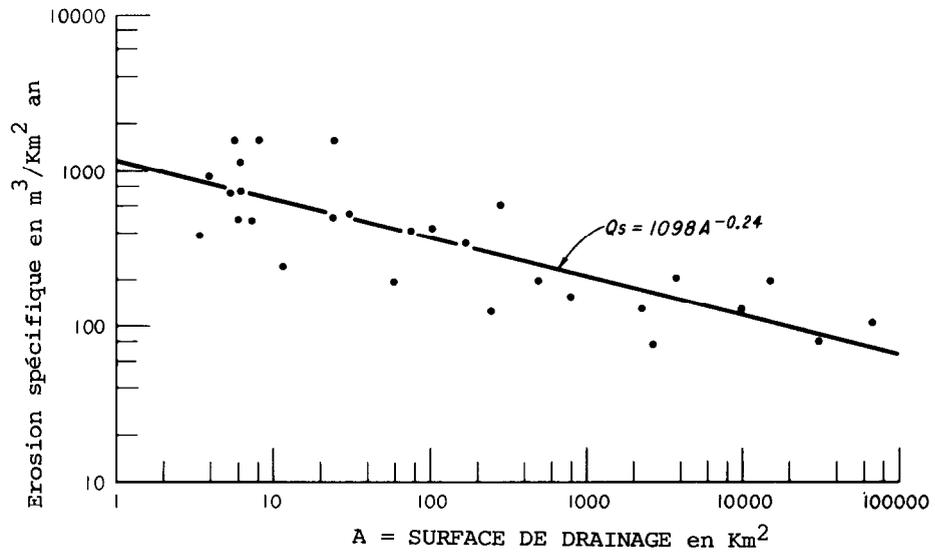


Fig. 3.16 Erosion spécifique d'après les relevés d'une retenue en climat semi-aride aux Etats-Unis (Bureau of Reclamation, E.U.).

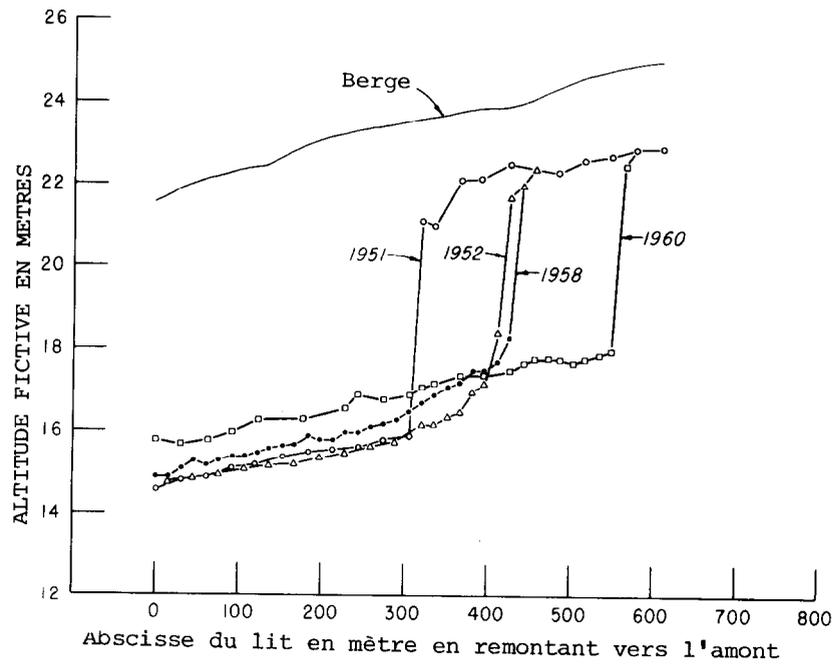


Fig. 3.17 Profils longitudinaux montrant le mouvement d'une ravine sur la Dry Creek, Nebraska (Données de base d'après V.I. Dvorak), (U.S. Department of Agriculture, Juin, 1976).

et l'érosion à l'aide d'ordinateurs digitaux perfectionnés se révéleront peut-être très utiles pour étudier les processus d'érosion et de sédimentation. Lorsqu'ils sont bien calibrés avec de vraies données de terrain (écoulements et sédiments), ces modèles de simulation des flux liquides et solides aident à améliorer l'acquisition des données et leur analyse. Cependant, il ne faut pas en arriver au point où l'on remplacerait par un ordinateur l'analyse scientifique faite par un spécialiste rompu aux techniques de collecte des données et à leur analyse.

3.2.2 Méthodes d'analyse

L'analyse graphique n'est pas aussi élaborée que certaines méthodes statistiques mais on la considère encore comme étant plus qu'adaptée et après des années, les sédimentologues et les spécialistes en morphologie fluviale ont prouvé son utilité. En général, cela consiste à reporter les données point par point puis à ajuster une équation par la méthode des moindres carrés. Avec plus de deux variables, il devient difficile d'interpréter la méthode graphique. Pour deux variables, les équations les plus courantes sont les suivantes:

$$y = a + bx \quad (\text{papier millimétré normal})$$

$$y = a x^b \quad (\text{papier semi-logarithmique})$$

L'ajustement d'une régression par la méthode des moindres carrés s'utilise par exemple pour rechercher une relation entre l'érosion spécifique en mètres cubes par kilomètre carré et la surface du bassin versant en kilomètres carrés. L'équation établie à partir des relevés de 28 retenues de la zone semi aride au Sud-Ouest des Etats-Unis provient d'une analyse par régression selon la méthode des moindres carrés. Elle est présentée par la figure 3.16.

De nombreuses équations ont été écrites pour modéliser l'érosion. La plupart lient les nombreux facteurs dont on a parlé au chapitre 2.2 (Interfluves) avec le taux d'érosion en nappe ou en rigole. Du fait de la complexité du problème et de la difficulté de définir les nombreux facteurs conditionnant l'érosion des interfluves, on considère que les équations disponibles ne sont qu'approximatives. Il est probable que l'analyse la plus complète des phénomènes d'érosion dans les interfluves est le travail de Wischmeier et Smith (1965) qui ont effectué une analyse par régression des données correspondant à plus de 10.000 stations-années obtenues sur des parcelles d'érosion dans 42 sites expérimentaux situés dans 23 états des Etats-Unis. Le modèle mathématique de l'équation communément appelée "Equation Universelle de perte en sols" est donné à l'annexe 3. On décrit la progression d'une ravine typique par le report graphique des relevés faits sur une petite ravine comme indiqué à la figure 3.17. On a utilisé des régressions multiples entre des données telles que celles de la figure 3.18 avec des données hydrologiques de pluie et d'écoulement pour écrire des équations déterminant la vitesse de croissance d'une ravine (Beer et Johnson, 1965). La complexité des facteurs déterminant l'érosion en ravine est tout à fait comparable à celle observée dans le cas de l'érosion en nappes et en rigoles, ce qui conduit à insister sur le fait que toute équation est au mieux une approximation.

3.2.2.1 Analyse des données sur les sédiments. La détermination finale du transport solide total à une station de mesure déterminé nécessite dans bien des cas un échantillonnage des débits solides en suspension, un échantillonnage des matériaux du fond et des mesures hydrauliques dans le chenal qui nécessitent des analyses par régression graphique et par la méthode des moindres carrés. En premier, il s'agit de reporter sur un graphique les mesures de transport solide en suspension pour établir une courbe de tarage pour les matériaux fins en suspension. Le nombre d'échantillons nécessaires pour définir une bonne courbe de tarage dépend des conditions hydrologiques mais les mesures doivent se poursuivre au moins pendant 5 ans pour être certain d'obtenir des échantillons à de forts débits. On recherche une corrélation soit entre concentration et débit liquide, soit entre débit solide et débit liquide, en coordonnées logarithmiques en général. Il peut s'agir de débits liquides en m³/s, soit instantanés, soit en moyenne journalière, mais beaucoup de chercheurs ont utilisé des débits moyens mensuels ou annuels aussi bien pour le débit liquide que pour la charge solide. Certaines des limites de la technique des courbes de tarage ont été décrites par Walling, 1977) qui a exposé les résultats d'une étude sur les erreurs estimées. La figure 3.18 présente un exemple de courbe de tarage pour les sédiments en suspension.

Si des estimations préliminaires montrent qu'il y a un transport de fond appréciable, ou une partie de la charge non mesurée à la station, des échantillons complémentaires de matériaux du fond peuvent être nécessaires. Pour les calculs relatifs aux transports de fond, on recueille des échantillons des matériaux de fond et on détermine leur répartition granulométrique. Il faut recueillir un nombre suffisant d'échantillons pour définir convenablement les matériaux du fond et pour avoir une bonne représentativité des matériaux transportés au fond. Lorsque le lit du cours d'eau est couvert de graviers ou de galets, il faut disposer de quelques échantillons de

ces matériaux. Si le pavage est détruit pendant la crue, il peut être nécessaire de disposer d'échantillons des matériaux sous-jacents. Le nombre d'échantillons dépend de la largeur du chenal et des variations de la section en travers (ce nombre varie en général de 3 à 5). Dans le cas particulier où la charge totale est calculée à l'aide d'une formule analogue à la formule d'Einstein modifiée décrite par Colbey et Hembree (1955) ou par le Bureau of Reclamation (1955), on doit procéder à une analyse granulométrique des matériaux en suspension. La figure 3.19 présente des exemples de courbe granulométrique de matériaux en suspension et de matériaux transportés au fond.

3.2.2.2 Morphologie fluviale. On peut distinguer parmi les données sur les caractéristiques des bassins versants : (1) celles qui sont employées pour déterminer les modifications du réseau de drainage par l'érosion des pentes ou (2) celles qui sont utilisées pour déterminer le mouvement du cours d'eau ou du chenal d'écoulement. L'analyse en régression multiple des changements déterminés sur les cartes topographiques ou les photographies aériennes et confirmés par de vraies données de terrain, est utilisée conjointement avec d'autres données hydrologiques et des transports solides, avec des caractéristiques d'érosivité pour déterminer l'érosion des sols, l'érosion en ravine ou le mouvement du lit. L'équation universelle de perte en sols présentée dans l'annexe 3 est un bon exemple de cette technique fondée sur l'analyse par régression multiple. Un bon exemple d'analyse des données sur les cours d'eau est fourni par l'étude des conditions morphologiques exposée par Schumm (1960) où il propose des formules générales pour décrire la forme des chenaux :

$$F = 255 M^{-1,08}$$

où F = forme du chenal définie par le rapport de la largeur à la profondeur
M = moyenne pondérée en % de limon et d'argile dans les berges et le lit.

Kennedy (1895), Blench (1969), Miller et Borland (1963) ont établi d'autres formules pour décrire des chenaux stables en régime stable, toutes utiles pour étudier les travaux d'un chenal ou les modifications du cours d'eau comme le montrent les figures 3.20 à 3.22. Les travaux furent faits pour maintenir l'écoulement dans le lit à un point de dérivation marqué (X) sur la figure 3.22. L'étude de photographies antérieures prises pendant la grande crue de 1976 (figure 3.21) et en 1971 (figure 3.20) fut faite pour aider à prévoir le déplacement du cours d'eau soit par accumulation de sédiments, soit par détournement naturel.

3.2.2.3 Données provenant des relevés des fonds de retenue. On utilise les relevés des fonds de retenues pour : (1) mesurer l'apport total en sédiments venant des bassins versants et (2) pour déterminer les caractéristiques du dépôt des sédiments dans les retenues. Les résultats des relevés des profils de mesure (figure 3.13) réalisés soit par un lever à terre, soit par un lever hydrographique (figures 3.14 et 3.15) fournissent les éléments nécessaires au calcul d'une nouvelle courbe de remplissage de la retenue et au tracé du profil des dépôts de sédiments comme indiqué schématiquement sur la figure 3.23. La différence entre les courbes de remplissage de la figure 3.23 représente le volume des sédiments déposés dans la retenue. On peut estimer l'efficacité du piégeage des sédiments par la retenue à l'aide de formules empiriques comme celles de Brune (1953), figure 3.24 ou celle de Churchill (1948), figure 3.25.

Pour beaucoup de retenues, toutes les données recueillies sur l'accumulation en delta en tête de retenue (où se déposent en premier les sédiments les plus grossiers) sont analysées et utilisées pour prévoir les changements des deltas existants et pour prévoir la formation de deltas dans de nouvelles retenues. Les méthodes d'analyse de la formation de deltas comprennent la comparaison des lignes de pente du fond de la retenue et de l'ancien lit du cours d'eau ont été décrite par Pemberton (1980) (cf. figure 3.26).

3.3 METHODES DE PREVISION

On utilise nombre des méthodes décrites dans le chapitre précédent concernant l'analyse des données pour prévoir les modifications dues aux activités humaines. Ces méthodes sont de trois types différents, parfois combinés : (1) Méthodes empiriques, (2) Méthodes par le calcul, ou (3) Méthode par modélisation. Au moment de la préparation du rapport d'expertise et plus particulièrement à l'occasion des visites de terrain par un spécialiste en sédimentation et en morphologie fluviale, on choisit en général la ou les méthodes qui seront utilisées pour prévoir les modifications. Comme on l'a déjà souligné, une part importante du travail de terrain consiste à rassembler les données disponibles puis à préparer un programme de collecte des données. Il faut essayer de déterminer rapidement au cours des recherches les méthodes pouvant être employées pour analyser les données.

3.3.1 Méthodes empiriques

Ces méthodes sont très utiles pour la prévision car ce sont des procédés qui s'appuient sur la

prise en compte de tous les processus complexes d'érosion, transport et sédimentation rencontrés dans le bassin versant. Elles reposent sur des données expérimentales ou des données réelles recueillies soit sur le bassin même ou d'autres bassins. En conséquence, les avantages de ces méthodes sont qu'elles sont en général considérées comme plus concrètes, plus réelles et plus faciles à comprendre. On leur trouvera des inconvénients si les caractéristiques hydrologiques et physiques agissant sur certaines des données expérimentales utilisées pour établir les relations empiriques sont aléatoires par nature et ne peuvent être correctement extrapolées en vue des prévisions attendues.

Pour prédire l'érosion ou la sédimentation consécutives à une activité humaine, on peut appliquer les méthodes empiriques de différentes façons. Ces approches sont très diverses selon que l'activité humaine en cause s'exerce dans les interfluves ou dans le réseau de drainage lui-même. Quelle que soit cette localisation, l'impact principal de tout changement dû à une action anthropique se manifeste en général dans le réseau de drainage. En beaucoup d'endroits le cours d'eau est un centre d'attraction du point de vue environnement. C'est souvent une base de loisirs et ce peut être également un habitat pour les poissons et les animaux sauvages. Aussi, tout accroissement ou toute diminution des apports de sédiments dans l'écoulement peuvent se traduire par une pollution du cours d'eau ou par une instabilité du lit, avec simultanément des modifications biologiques et des changements dans les caractéristiques hydrauliques du lit, par exemple les largeurs et les profondeurs.

3.3.1.1 Evaluation des apports de sédiments d'après les données du cours d'eau. Deux méthodes empiriques de détermination de la charge solide impliquent le rassemblement de données sur les sédiments comme indiqué au chapitre 3.1 et (1) La collecte des échantillons de débit solide en suspension et au fond nécessaires pour déterminer le transport solide total à une station de mesure ou (2) Le lever topographique de lacs, retenues et deltas pour calculer les apports de sédiments provenant des bassins versants. On utilise alors les données sur les apports de sédiments obtenues de l'une ou l'autre façon pour fournir une information sur le transport ou la production de sédiments, soit d'un bassin versant déterminé, soit, par extrapolation, de zones ayant des sols, des faciès géologiques, un couvert végétal et d'autres caractéristiques relatives à la production des sédiments proches de celles du bassin fournissant les données ci-dessus.

Lorsqu'on utilise les données par l'une ou l'autre de ces méthodes pour faire des prévisions, on doit aussi obtenir des informations sur les caractéristiques du bassin versant relatives à l'érosion et à la sédimentation durant la période où l'on prélève des échantillons de sédiments ou entre deux relevés de retenue. On peut déterminer à l'aide de photographies aériennes ou par des prospections au sol les caractéristiques physiographiques prédominantes du bassin versant et toute activité humaine historique telles que des constructions.

Toutes les données concernant des modifications ou perturbations de l'occupation des sols dans les interfluves ou des facteurs se rapportant au transport solide doivent être mises en évidence car cela peut avoir une influence sur la charge solide d'un cours d'eau. Un graphique en double-masse tiré des mesures faites à Grand Canyon sur le Colorado en Arizona (E.U.) illustre un bon exemple d'utilisation de la méthode des échantillons de transport en suspension. La figure 3.27 présente ce graphique en double-masse entre apports solides et liquides à la station de mesure du Grand Canyon, de 1926 à 1972. Ce graphique met clairement en évidence la construction du barrage de Glen Canyon (Batardeau terminé en 1959, barrage terminé en 1953) situé à environ 167 km à l'amont, ainsi qu'une réduction de l'intensité du pâturage aux environs de 1943.

Les apports solides obtenus à la fois à l'aide de prélèvements aux stations de jaugeages et par des relevés des retenues peuvent aussi servir à établir des cartes à l'intérieur d'un pays ou même pour un continent entier. L'érosion spécifique en tonnes par kilomètre carré et par an obtenue par l'une quelconque des méthodes et après une évaluation convenable de la fiabilité des résultats peut être utilisée et reportée sur des cartes comme celle du rapport UNESCO-AISH : "Gross Sediment Transport into Oceans", Paris 1974. La figure 3.28 présente l'exemple d'une carte d'érosion obtenue d'après les débits solides des stations de jaugeage et par des relevés de retenues pour trois bassins versants adjacents théoriques.

3.3.1.2 Productions de sédiments estimées à l'aide de données sur les interfluves. La détermination des apports de sédiments provenant de zones de drainage inférieure à 10 km² dans les interfluves par l'analyse de données recueillies à des stations de jaugeage du cours d'eau ou par des relevés de retenues n'est pas possible dans la plupart des cas. Cette inadaptation est sans aucun doute due au fait que les sédiments provenant de l'érosion en nappe ou en rigole sur des terres agricoles peuvent mettre des années, par une série d'étapes, avant d'atteindre éventuellement le cours d'eau plus important. L'érosion en tonnes par kilomètre carré et par an de petites surfaces de drainage, que ce soit sur des terres agricoles, des pâturages, des zones de construction de routes ou d'habitations, est en général plus intense que celle de bassins versants plus grands à l'amont de stations de jaugeage ou de retenue. On peut déterminer la quantité totale de sédiments provenant d'un petit bassin

versant et qui atteint le cours d'eau plus important en utilisant une courbe de tarage semblable à celle présentée à la figure 3.29. On notera que cette relation empirique a été établie pour le Centre et le Sud-Est des Etats-Unis.

La formule empirique de calcul des taux d'érosion la plus largement admise et utilisée aux Etats-Unis est celle de Wischmeier et Smith (1965), plus connue sous la dénomination d'Equation Universelle de Perte en Sol. On trouvera à l'annexe 7.1 un exemple d'emploi de cette formule. On doit prendre garde au fait que l'érosion globale calculée par cette méthode empirique est, au mieux, une approximation à considérer comme une estimation grossière. Du fait que l'Equation Universelle de Perte en Sol est déduite d'études faites sur de petites parcelles d'érosion - parcelles de 20 mètres de long environ - elle est adaptée au calcul de la perte en sol par impact des pluies, érosion en nappes ou en rigoles mais non pour des types d'érosion plus marqués tels que les ravines et les glissements de terrain. Elle ne prend pas en compte les phénomènes de transport et dépôt au-delà des parcelles cultivées. C'est pourquoi, pour estimer l'érosion de terres agricoles comportant un réseau de drainage, on doit étudier non seulement des parcelles d'érosion mais la bassin versant en entier.

On a formulé d'autres méthodes de régression linéaire pour prédire les apports de sédiments, certaines sont dues aux essais de simplification de l'Equation Universelle de Perte en Sol en comparant le taux d'érosion total et le taux d'apport en sédiment pour prédire les apports de sédiments. Le travail de J.M.L. Jansen et R.B. Painter (1973) est un exemple portant sur 70 bassins de superficie supérieure à 5000 km² et utilisant une analyse par régression linéaire multiple avec 5 équations représentant différentes conditions climatiques.

3.3.1.3 Recherches expérimentales sur le terrain. Les observations sur les processus d'érosion et de sédimentation dans les interfluves et dans le réseau de drainage fournissent au spécialiste expérimenté en sédimentologie et en morphologie fluviale une base pour expliquer et rechercher les causes des changements observés. Le spécialiste peut donner avec une bonne sûreté des explications sur les changements naturels et ceux dus aux activités humaines. Ce spécialiste s'appuie souvent sur des données obtenues expérimentalement sur le terrain comme exposé au chapitre 3.1.2.

Les expérimentations de terrain fournissent une information quantitative sur presque toutes les formes d'érosion ou de sédimentation, que ce soit dans les interfluves ou dans les cours d'eau. Dans les interfluves, les parcelles expérimentales sont assez souvent utilisées pour déterminer quantitativement l'érosion en nappes, rigoles ou ravines, dans des conditions variées de climat, de topographie d'occupation des sols, de nature des sols. Les zones soumises aux avalanches, glissement de terrain ou coulées de boues peuvent faire l'objet de test pour évaluer quantitativement les modifications. L'expérimentation dans les cours d'eau concerne généralement la collecte de données sur les sections en travers et sur les sédiments pour étudier le creusement ou le pavage à l'aval d'un barrage, les changements dus à la canalisation d'un bief, ou le développement d'un delta dans une retenue.

Parcelles expérimentales dans les interfluves :

Les données recueillies sur les parcelles expérimentales peuvent être analysées avec d'autres provenant de nombreuses zones différentes et fournir une nouvelle formule d'estimation de l'érosion, ou, dans bien des cas, ces données sont utilisées avec l'une ou l'autre des formules empiriques existantes telles que l'Equation Universelle de Perte en Sol, établie par Wischmeier et Smith (1965) ou les cinq équations climatiques de Jansen et Painter (1973) pour comparer les résultats. Les données expérimentales de terrain peuvent être extrapolées dans d'autres zones présentant une pente et des caractéristiques de bassin versant semblables. Le tableau 3.2 donne des indications utiles pour établir des coefficients de corrélation afin d'évaluer les productions de sédiments par transfert des résultats d'une zone à l'autre (Table d'approximation des productions de sédiments de Thronson, 1976). L'une des utilisations les plus intéressantes des parcelles expérimentales est la simple comparaison de l'érosion sur un bassin versant à l'état naturel avec celle d'un bassin versant voisin perturbé par les activités humaines. On a procédé à de telles comparaisons sur des coupes forestières par rapport à des zones adjacentes peu touchées par les coupes. Autres exemples de comparaisons : Des bassins versants avec ou sans route, avec ou sans urbanisation. Dans les régions où on a entrepris des luttes contre l'érosion, par exemple, en construisant des barrages de retenue, pour piéger les sédiments, on compare l'érosion à celle des bassins versants voisins non traités.

L'analyse des données recueillies a mis en évidence des résultats variables allant de changements significatifs à de très faibles modifications qui sont parfois altérées par d'autres activités non prises en compte dans le bassin. Pour procéder à ces comparaisons, il faut disposer de données abondantes sur les pluies et cela peut nécessiter deux ou trois périodes calendaires pour avoir une bonne représentativité hydrologique.

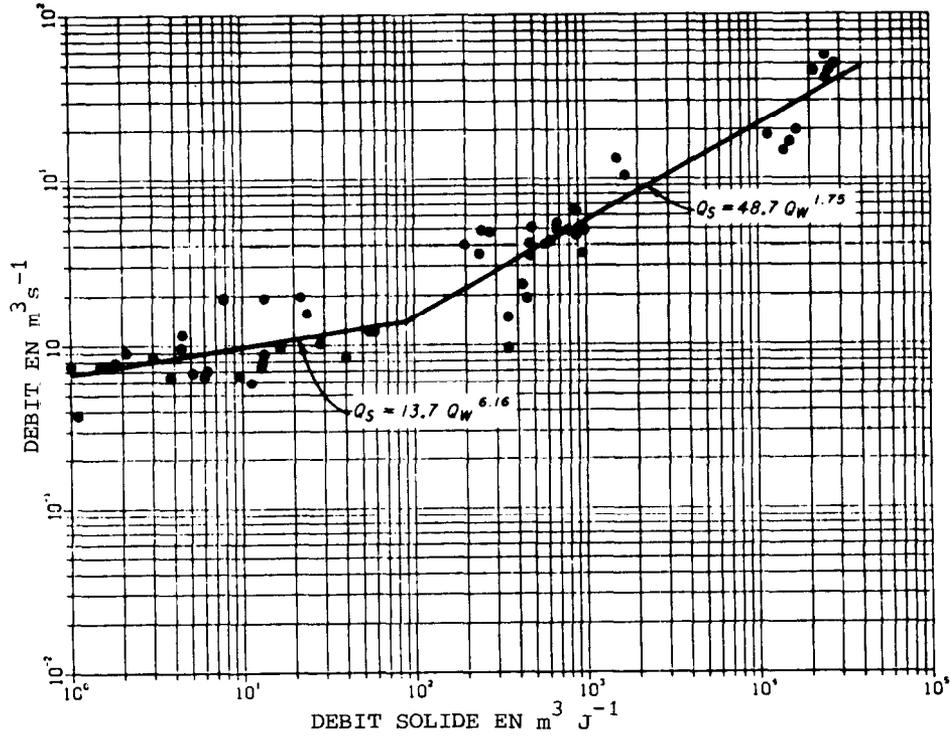


Fig. 3.18 Courbe de tarage des débits solides (Rio Toa Vaca, près de Villalba, Porto Rico) (Bureau of Reclamation, E.U.).

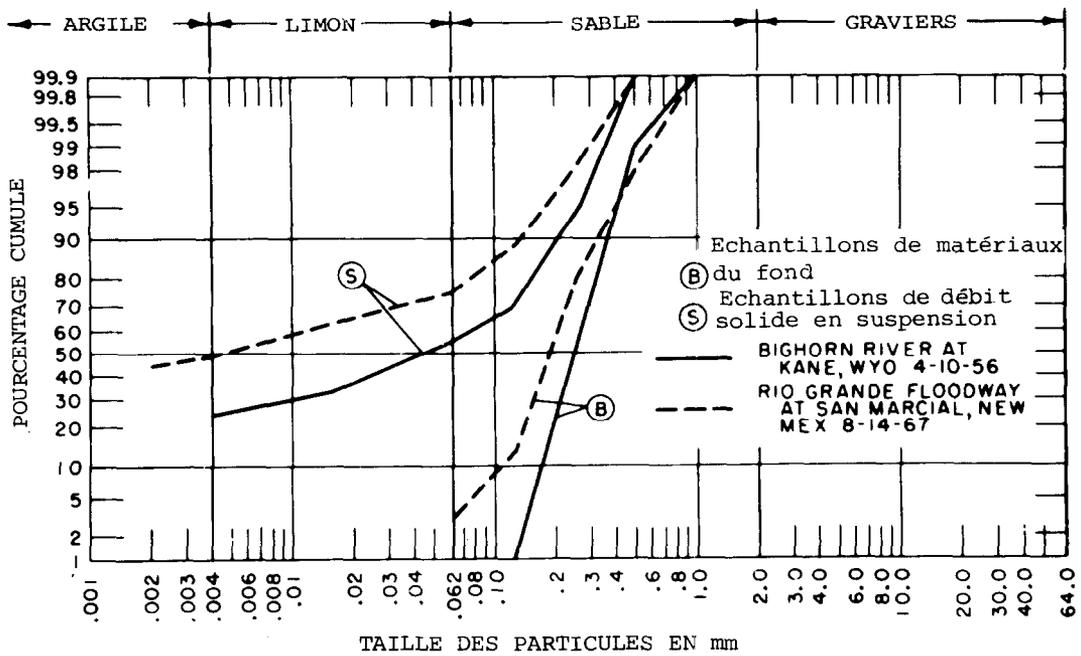


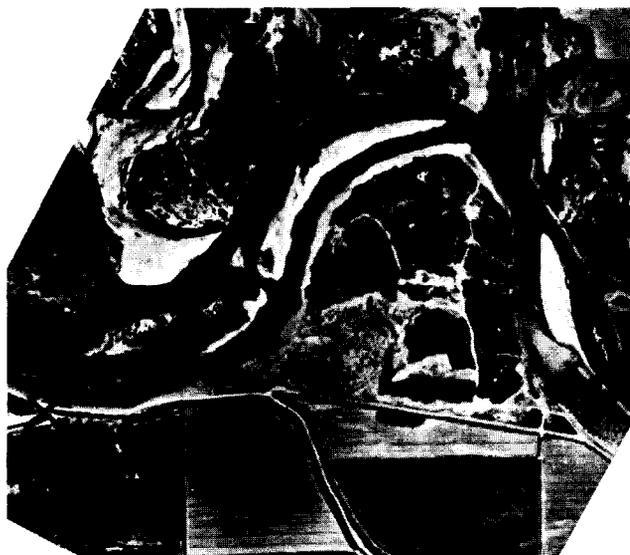
Fig. 3.19 Courbes granulométriques de matériaux de fond et en suspension (Bureau of Reclamation, E.U.).



Fig. 3.20 Snake River dans l'Idaho, E.U.,
en Août 1971 (Bureau of Reclamation, E.U.).



Fig. 3.21 Snake River dans l'Idaho, E.U.,
en Juin 1976, débit de crue
(Bureau of Reclamation, E.U.).



Fig; 3.22 Snake River dans l'Idaho, E.U.,
en mai 1977, montrant les ouvrages du chenal.
(Bureau of Reclamation, E.U.).

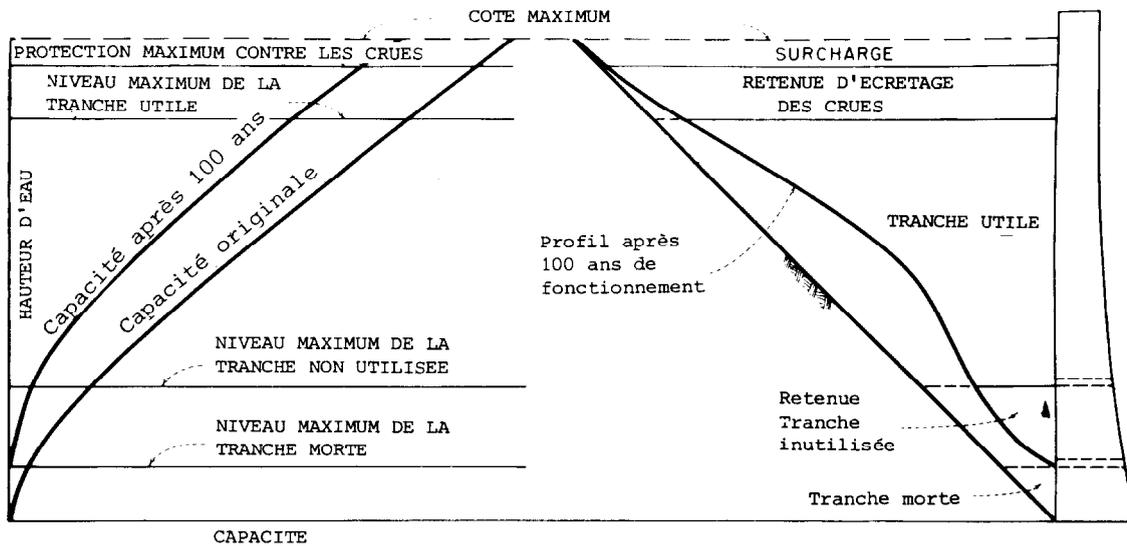


Fig. 3.23 Courbe de remplissage d'origine et après fonctionnement d'une retenue (Bureau of Reclamation, E.U.).

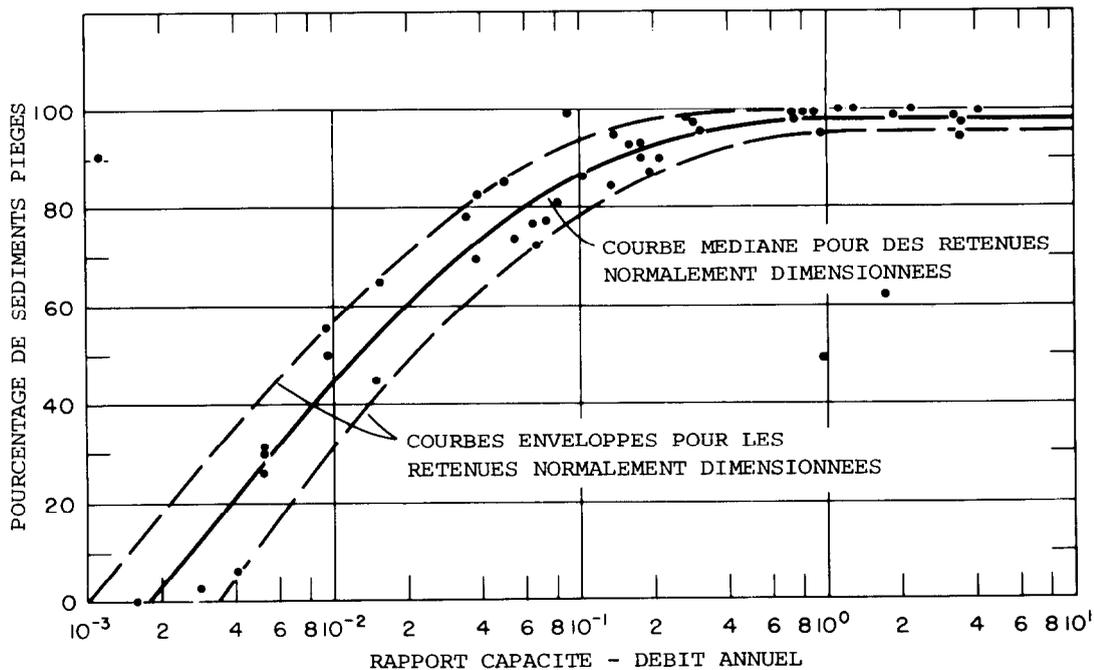


Fig. 3.24 Brune (1953). Efficacité du piégeage des sédiments. D'après Trap efficiency of reservoirs, par Brune (Transactions American Geophysical Union, Juin 1953).

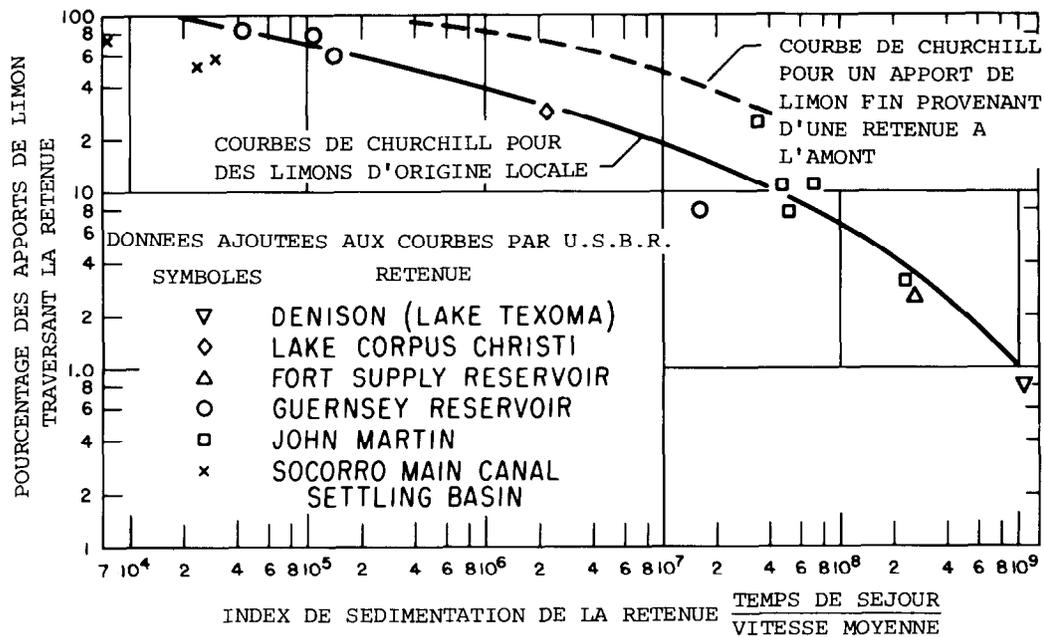


Fig. 3.25 Efficacité du piégeage d'après Churchill (1948). D'après Analysis and use of reservoir sedimentation data, par Churchill, U.S. Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, 1948).

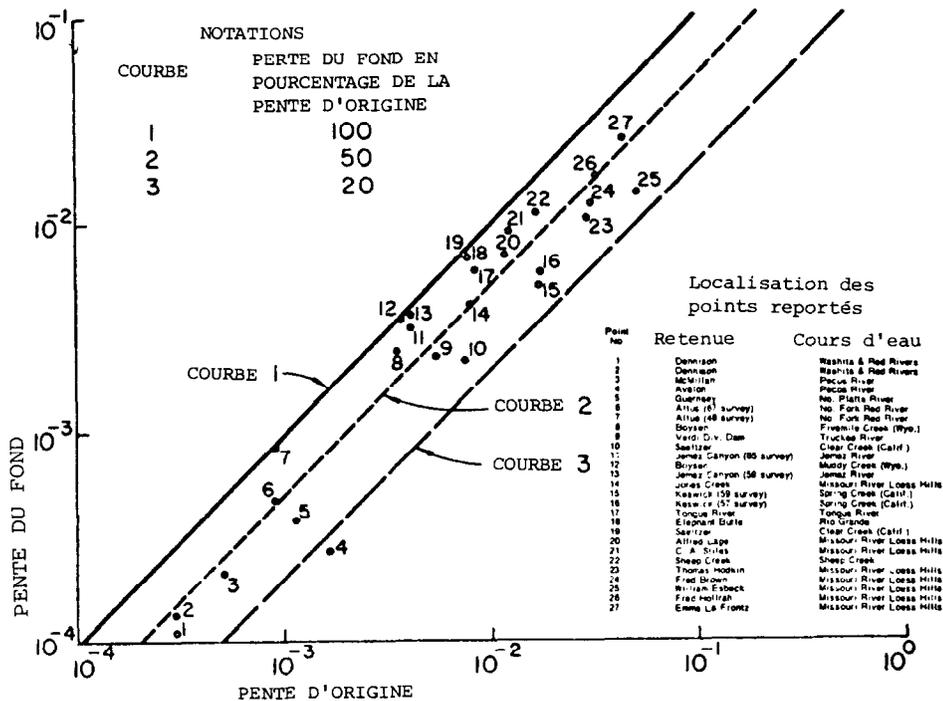


Fig. 3.26 Relation entre la pente du fond et la pente d'origine pour un delta de retenue. E.L. Pemberton, 1980.

Il est possible d'installer des stations expérimentales sur des ravines afin d'étudier la croissance d'un système de drainage en ravines. Les données sur les pluies, l'écoulement, la pente de drainage, la longueur de ravine ainsi que des relevés périodiques des sections en travers des ravines fournissent les éléments de base d'une formule de prédiction comme celle de Beer et Johnson (1963).

On peut utiliser des études expérimentales de terrain, comme ci-dessus pour les ravines, afin de recueillir des données sur les glissements de terrain, les avalanches et les mouvements d'éboullis qui, jointes aux informations sur les caractéristiques des bassins versants comme le taux d'humidité des sols, peuvent être utilisées pour quantifier l'influence des événements naturels et des activités humaines sur ces phénomènes.

Etudes des cours d'eau : on peut très bien observer sur le terrain dans un bief témoin les nombreux changements qui se produisent par exemple pour la charge solide ou par affouillement des berges et du fond. Les informations recueillies sur le bief témoin doivent être précises pour permettre une comparaison avec les données collectées dans un programme ultérieur. Si elles se font avec une base de temps appropriée, les comparaisons sur les changements concernant soit la charge solide, soit la granulométrie des sédiments ou encore les sections en travers du lit fournissent une base pour prédire les changements futurs. Dans bien des cas, on peut en faire une étude statistique pour établir des méthodes empiriques en vue de prévisions plus générales.

Le graphique 3.30 illustre l'effet de la construction d'un barrage sur un cours d'eau prenant en exemple la Middle Loup River dans le Nebraska (E.U.). Les dépôts à l'amont du barrage de dérivation de Milburn et l'érosion du lit à l'aval sont clairement mis en évidence. Dans ce cas, l'érosion à l'aval a pour cause le dépôt des sédiments dans la retenue à l'amont. Bien que le barrage soit muni d'une vanne de dévasement pour évacuer les sédiments à l'aval, l'eau reste relativement claire et elle a la capacité d'éroder le lit à l'aval. Les photos aériennes (figure 3.31) montrent les dépôts à l'amont.

Pemberton (1976) a observé un bief de 24 kilomètres de long sur le Colorado à l'aval du barrage de Glen Canyon, afin de quantifier les modifications survenues dans les dimensions des matériaux du lit et l'érosion du lit. L'érosion du lit à l'aval de Glen Canyon a été étudiée (figure 3.32) en effectuant des relevés sur 20 sections en travers du bief de 24 kilomètres. Cette étude de terrain, destinée à décrire les changements intervenants à l'aval du barrage, a montré que le pavage du lit par les matériaux les plus grossiers a empêché le creusement du lit. Pendant les 6,6 années couvrant la construction du barrage et la suivant immédiatement (barrage achevé en 1963), environ $9,74 \cdot 10^6 \text{m}^3$ de sédiments ont été emportés par affouillement du lit à un rythme annuel de $1,5 \cdot 10^6 \text{m}^3$ de 1959 à 1965. En 9,8 années, de 1965 à 1975, ce sont seulement $0,120 \cdot 10^6 \text{m}^3$ qui ont été emportés par affouillement à un rythme annuel de $0,012 \cdot 10^6 \text{m}^3$. En 1975 on a prélevé des échantillons du matériau de pavage avec les résultats indiqués dans la figure 3.33 avec des données antérieures sur la granulométrie. La figure 3.34 présente une photographie du pavage en 1975.

3.3.2 Méthodes de calcul

On a peu, ou pas du tout, utilisé les calculs de taux d'érosion basés sur les principes connus d'hydraulique ou du transport des sédiments pour les interfluves, sans doute du fait de la complexité des nombreuses variables impliquées dans les processus d'érosion et qui sont décrites au chapitre 2.2. A cause de leur nombre et de leur complexité, il est difficile de quantifier les résultats d'une combinaison prenant en compte les aspects principaux de l'érosion en nappe, en rigoles ou en ravines. Il y a un besoin certain de recherches dans ce domaine comme Bennett (1974) l'a indiqué dans une étude sur les besoins en matière de recherche et sur les méthodes mathématiques disponibles pour les parties amont des bassins versants.

Le transport des sédiments dans un cours d'eau bien défini est régi par des relations plutôt compliquées entre l'hydrodynamique de l'écoulement et les caractéristiques des sédiments. Dans les limites physiques du lit du cours d'eau, il y a également une interaction qui se manifeste entre ces composants de base, l'eau et les sédiments, par les formes du lit, les pertes de charges, les turbulences dues aux affouillements localisés et la morphologie du cours d'eau. Bogardi (1974), Graf (1971), Shen (1971), Simons et Senturk (1971) et ASCE (1975) ont décrit de façon plus détaillée l'interaction de ces facteurs ainsi que les nombreuses méthodes disponibles pour définir les caractéristiques de l'érosion et du transport des sédiments dans les cours d'eau.

3.3.2.1 Les cours d'eau. La forme du chenal transporteur, c'est-à-dire sa largeur, sa profondeur et sa pente, est considérée comme étant une fonction du débit, de la pente de la ligne d'eau, de la masse de sédiments provenant de l'amont et de leur taille, et des caractéristiques des matériaux du fond et des charges. On considère qu'un lit est en équilibre lorsque, dans les conditions naturelles, les changements de forme du lit d'année en année sont peu importants. La formule qualitative de Lane (1955) caractérise bien un état stable :

$$Q_w S = Q_s D \quad (3.10)$$

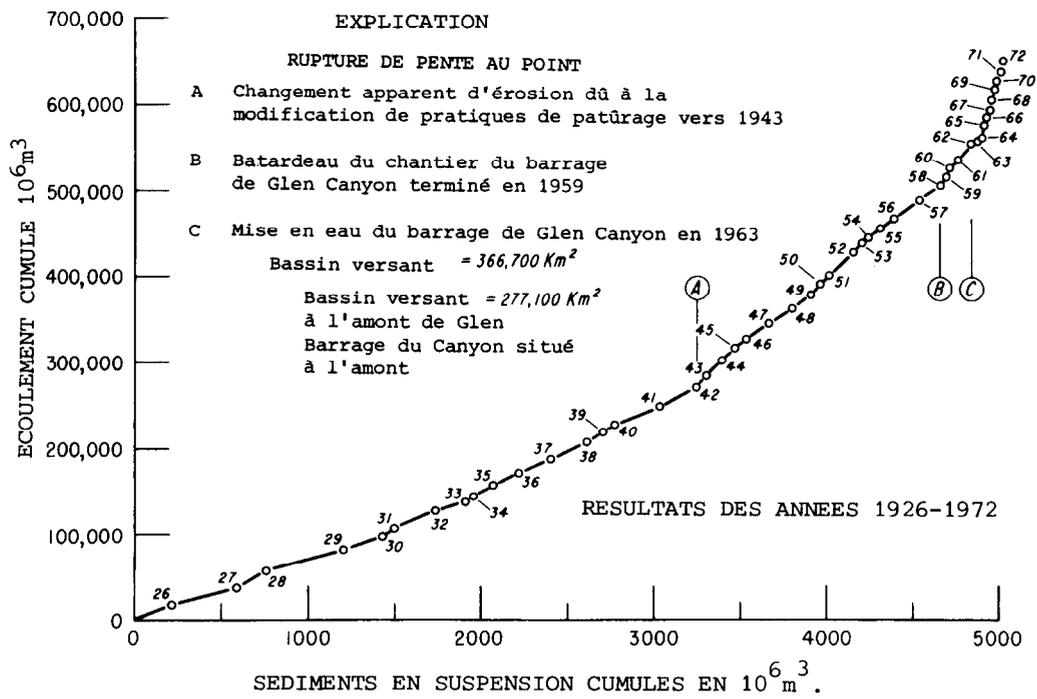


Fig. 3.27 Diagramme en double-masse des apports solides en suspension et des apports liquides, Colorado à Grand Canyon, Arizona, E.U., 1926-1972 (Bureau of Reclamation).

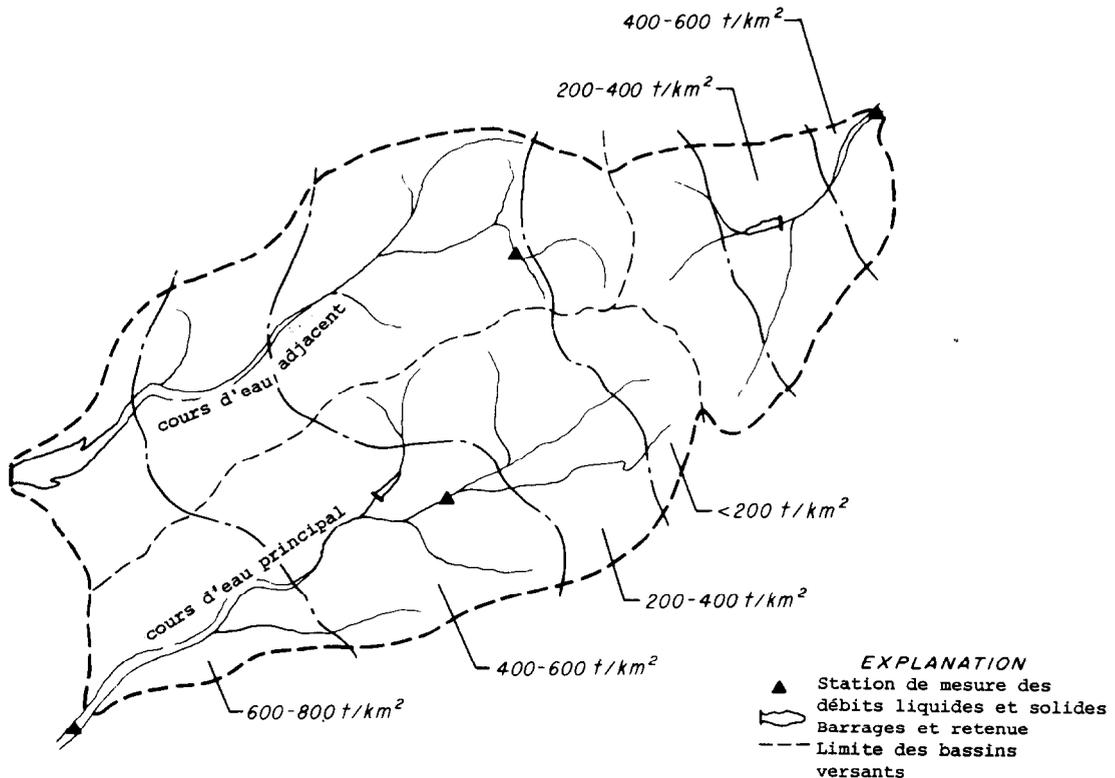


Fig. 3.28 Carte de production de sédiments pour trois bassins versants théoriques (Bureau of Reclamation, E.U.).

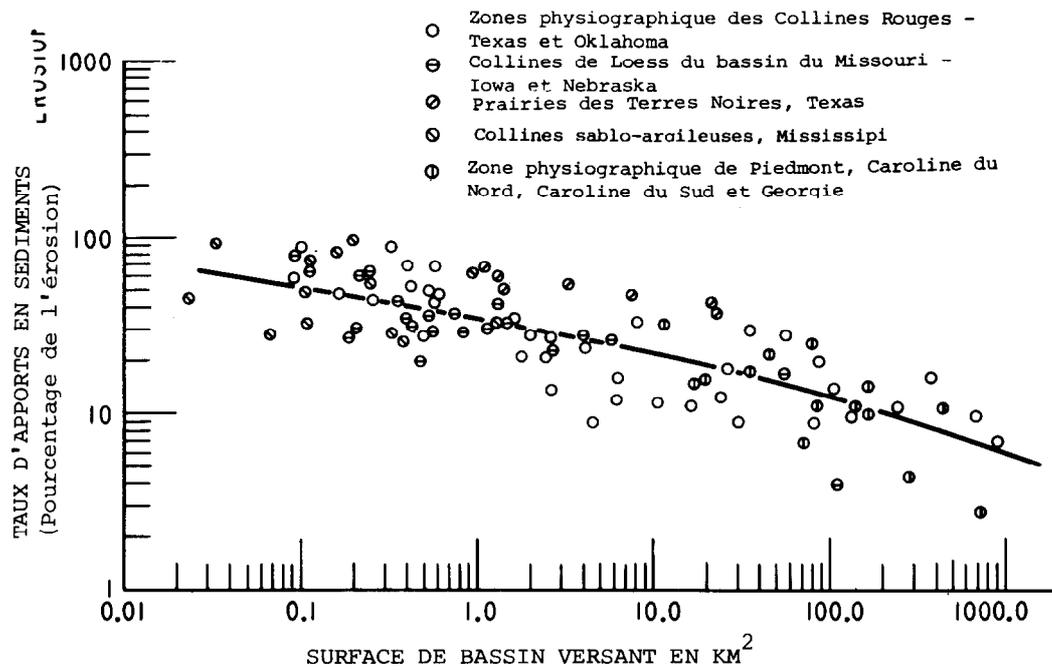


Fig. 3.29 Taux d'apports en sédiments (d'après Roehl, 1962).

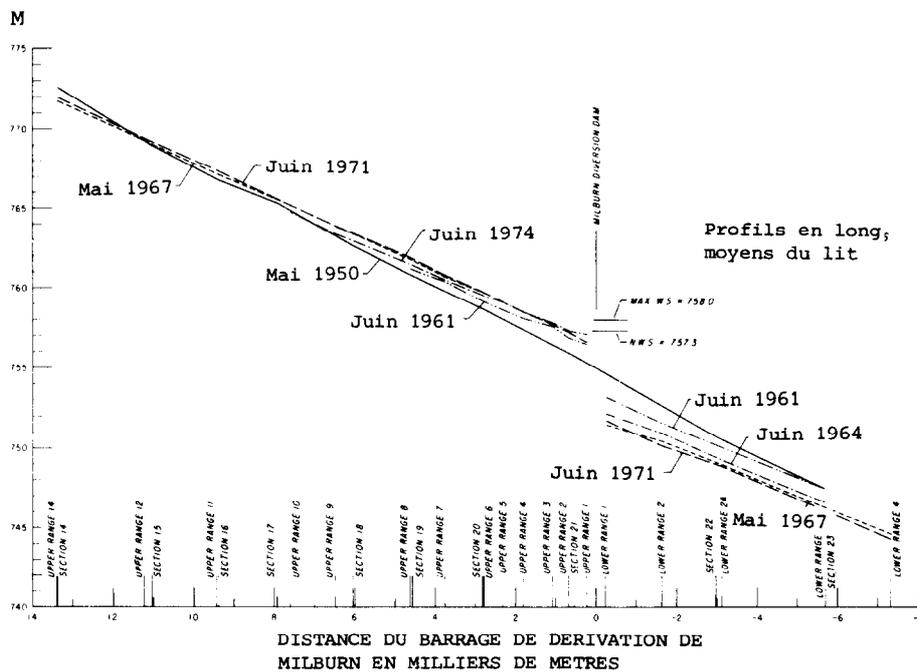


Fig. 3.30 Profil en long de la Middle Loup River au barrage de dérivation de Milburn dans le Nebraska, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U.).

Tableau 3.2 - ESTIMATION des APPORTS de SEDIMENTS

Apports de sédiments	Roche de surface (10)	Pédologie (10)	Zones à l'amont du site (20)	Erosion et dépôts (20)
Fort	a.Roches sédimentaires non cohérents. b.Roches de tous types bien altérées. c.Matériaux volcaniques non-cohérents, glissement de terrain, etc...	a.Sols non cohérents avec une granulométrie uniforme b.Sols non cohérents à grains fins.	a.Fortes pentes. b.Surfaces imperméables. c.Faible couvert végétal. d.Le ruissellement venu de l'amont rencontre peu d'obstacles.	a.Plus de 40% de la surface présente des rigoles. b.Cônes de déjection remarquables au pied de la plupart des pentes. c.Chenaux de drainage encombrés de sédiments. d.Zones de végétation encombrées de sédiments à la bordure supérieure des pentes.
Moyen	a.Roches de tous types moyennement consolidées. b.Roches moyennement altérées. c.Sédiments très denses et très argileux. d.Alternance de couches de matériaux érodibles et non érodibles.	a.Sols argileux gravillonnaires. b.Sols moyennement colmatés. c.Sols moyennement cohérents. d.Sols de granulométrie moyenne.	a.Pentes modérées. b.Capacité d'infiltration moyenne. c.Couvert végétale de densité moyenne. d.Ruissellement venant de l'amont limité.	a.Environ 20% de la surface présente des rigoles. b.Cônes de déjection au pied des pentes de 30%. c.Certains chenaux de drainage sont encombrés de sédiments. d.Quelques dépôts de sédiments sur le bord des zones de végétation.
Faibles	a.Roches massives, cohérentes et dures. b.Sédiments bien consolidés et durs.	a.Sols argileux cohérents. b.Sols gravillonnaires argileux denses. c.Sols gravillonnaires très perméables.	a.Pentes douces b.Capacité d'infiltration élevée. c.Couvert végétal dense. d.Pas de ruissellement en provenance de l'amont.	a.Pas d'érosion en rigoles apparentes. b.Peu de dépôts apparents au pied des pentes en bordure de zones de végétation, des ruptures de pente, etc...

1. Les nombres donnent la valeur approximative à donner aux observations.
2. Les lettres indiquent des caractéristiques indépendantes auxquelles on peut attribuer les valeurs totales.
3. Des enquêteurs expérimentés peuvent procéder à une interpolation entre les niveaux d'apports de sédiments.

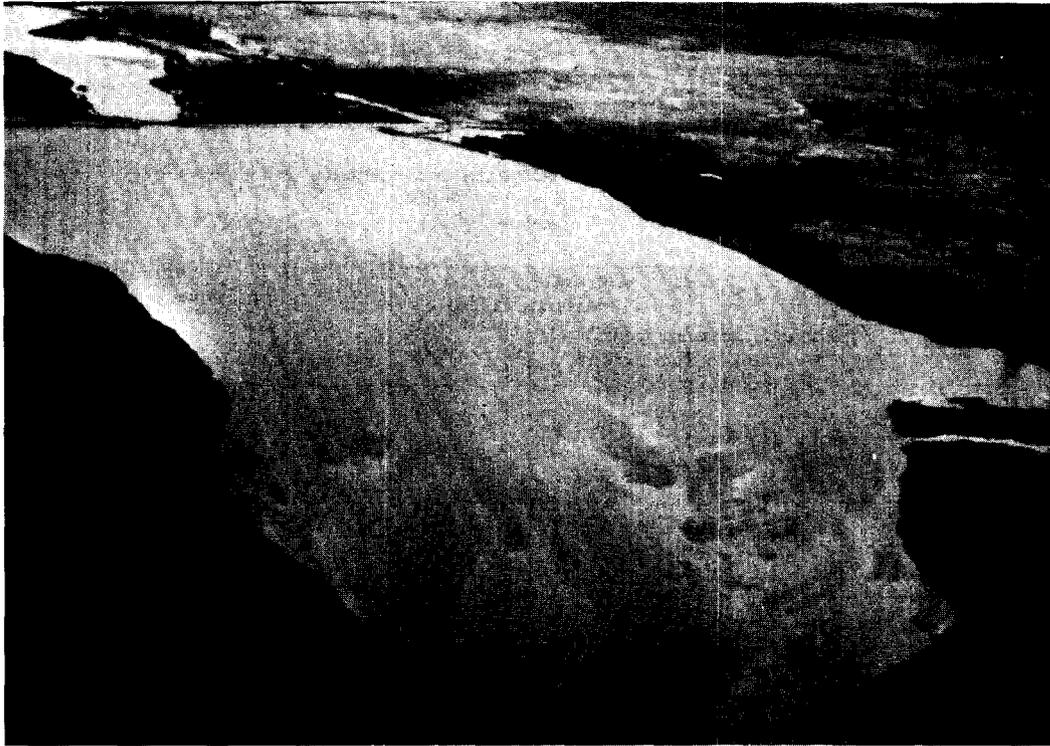


Fig. 3.31 Middle Loup River au barrage de Milburn au Nebraska, E.U. Photo E.L. Pemberton



Fig. 3.32 Barrage de Glen Canyon sur la Colorado River en 1975.
Photo J.O. Blanton, III, Juillet 1975.

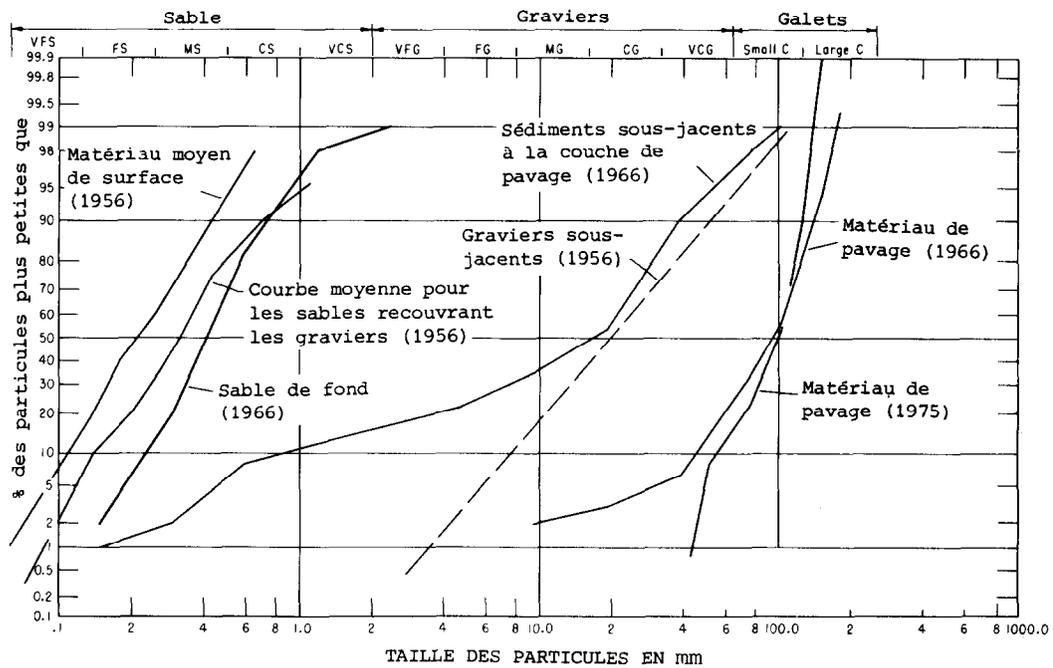


Fig. 3.33 Répartition granulométrique des sédiments du fond du chenal à l'aval du barrage de Glen Canyon sur la Colorado River, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U.à.

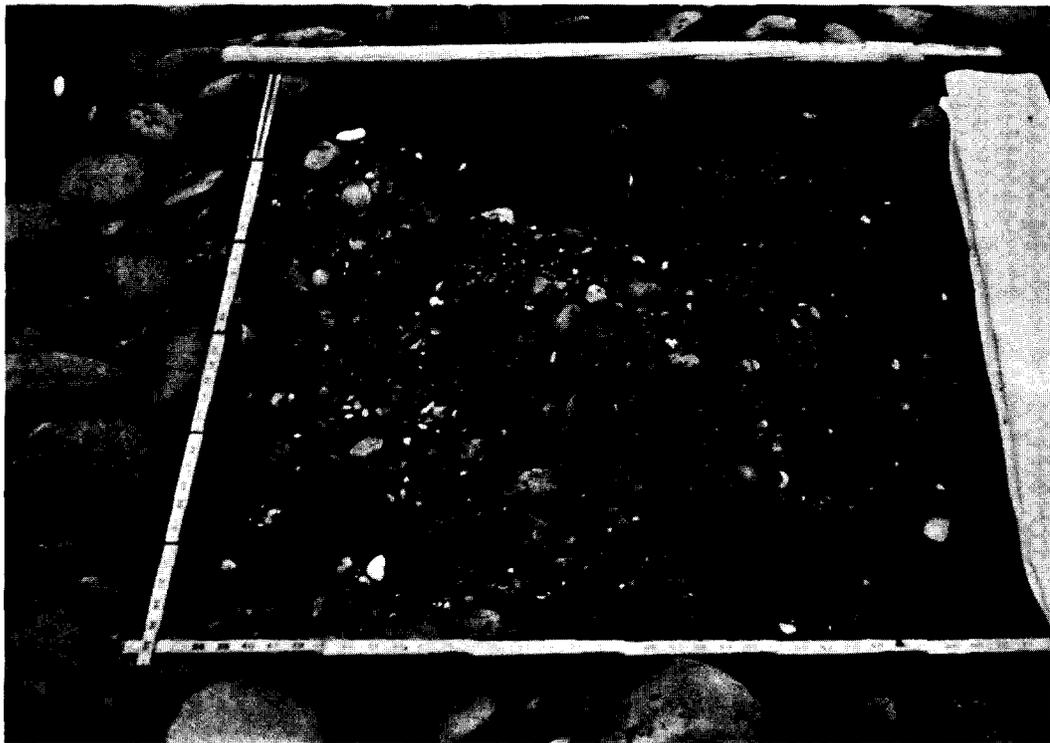


Fig. 3.34 Matériaux recouverts par la couche de pavage dans la Colorado River à l'aval du barrage de Glen Canyon en Juillet 1975. Photo J.O. Blanton, III.

Un cours d'eau peut être déstabilisé par l'activité de l'homme si il y a altération des conditions naturelles :

1. Accroissement du débit
2. Diminution du débit
3. Charge solide augmentée
4. Charge solide diminuée
5. Taille des sédiments transportés augmentée ou diminuée
6. Régime des écoulement modifié

La construction d'un barrage peut entraîner une ou plusieurs des modifications ci-dessus; il en est de même de la dérivation de l'eau d'un bassin versant dans un autre ou de la coupure d'un méandre: peuvent intervenir aussi les changements d'occupation des sols dans les bassins versants tels que l'établissement d'exploitations minières de pâturages, d'exploitations forestières, de cultures, la construction de routes ou l'urbanisation. Les événements catastrophiques naturels tels que les sécheresses, les tremblements de terre, les avalanches, les éruptions volcaniques, les glissements de terrain ou les grands incendies de forêt peuvent aussi affecter la stabilité d'un cours d'eau.

La formule de Lane (1955) est simplement qualitative. Elle se révèle utile pour se faire une idée des phénomènes. L'étape suivante consiste à obtenir des résultats quantitatifs. On classifie les méthodes de calcul en deux groupes: les méthodes (1) empiriques en régime stable et (2) semi-empiriques. Etant donné qu'un cours d'eau naturel a trois degrés de liberté, la solution du problème requiert trois équations.

On peut citer quelques exemples des méthodes disponibles :

Equations empiriques en régime stable

- Lindley, 1919
- Lacey, 1939
- Chitale, 1966, 1977 utilisée surtout pour les matériaux cohérents
- Blench, 1939, 1941
- Simons et Richardson, 1969

Equations semi-empiriques

- Altunin, 1961 pour matériaux grossiers
- Maza-Cruickshank, 1973 pour les lits à fond sableux

Théorie de la force tractrice

- Lane, 1953
- Raudkivi, 1967

Equations de transport de sédiments

- Einstein, 1950
- Toffaletti, 1969
- Engleund et Hansen, 1967
- Ackers and White, 1973
- Meyer-Peter et Muller, 1948

REGIME STABLE

Les équations en régime stable sont toutes empiriques. Elles sont utilisées la plupart du temps pour définir la largeur, la profondeur et la vitesse en fonction du débit liquide. Beaucoup de chercheurs estiment que ces formules n'ont qu'un usage limité car elles ont été établies à l'origine à l'aide de données provenant d'écoulements stables dans les systèmes d'irrigation de l'Inde. Lorsqu'on les utilise pour prévoir les changements de forme d'un lit, on doit se préoccuper des caractéristiques hydrauliques du cours d'eau et de celles des sédiments.

La formule de Lacey est un exemple de formule où l'on tient compte des caractéristiques des sédiments. Elle utilise les équations suivantes :

$$P = 4,838 Q^{1/2}$$
$$R = 0,4725 (Q/f)^{1/3}$$
$$S = \frac{N_a^2 f^{7/6}}{1,7 Q^{1/6}}$$

P et R en mètres, Q en $m^3 s^{-1}$ et des équations complémentaires :

$$f = 55,66 \sqrt{D} \text{ facteur de sédimentation}$$

$$Na = \frac{D^{1/8}}{16,27} \text{ rugosité}$$

où D est le diamètre en mètres.

EQUATIONS SEMI-EMPIRIQUES

Altunin a fondé sa méthode sur les données obtenues dans les cours d'eau du Sud de l'Union Soviétique. Il utilise trois équations de base : l'une prend en compte les forces de frottement, la seconde donne la vitesse critique principale et la troisième est semblable à celle des régimes stables. Lorsqu'on utilise la méthode pour des matériaux grossiers, sables grossiers et graviers par exemple, elle donne de très bons résultats.

Maza et Cruickshank ont proposé une méthode pour les cours d'eau à fond sableux. Ils utilisent aussi trois équations de base : une équation (proposée par Maza et Cruickshank) tient compte des forces de frottement quand le lit a des limites mobiles, la deuxième sert à évaluer le transport de fond (proposée par Engelund) et la troisième qui est la même équation empirique que celle d'Altunin. C'est la seule méthode qui permette de prédire les modifications des caractéristiques du lit (largeur, profondeur et pente S) lorsqu'il se produit un changement de débit solide.

Les trois équations d'usage obtenues à partir des équations fondamentales sont les suivantes :

$$B = \frac{0,308 D_{84}^{0,248} K^{0,7} Q^{0,63}}{W_{50}^{0,397} (\Delta g)^{0,06} (D_{35} Q_s)^{0,119}}$$

$$d = \frac{0,439 D_{84}^{0,174} Q^{0,441}}{W_{50}^{0,274} (\Delta g)^{0,042} K^{0,51} (D_{35} Q_s)^{0,083}}$$

$$S = \frac{2,966 \Delta^{1,28} g^{0,28} D_{84}^{0,223} (D_{35} Q_s)^{0,56}}{W_{50}^{0,352} Q^{0,767}}$$

où D_i = diamètre de la particule où i est le pourcentage du mélange pour lequel le diamètre est supérieur à D_i .

K = est un coefficient (K = 10 pour berges et fond sableux).

Q_s = débit solide de fond entrant dans la section étudiée en m^3/s .

Q = débit liquide en m^3/s .

Δ = $(\gamma_s - \gamma)/\gamma$

γ_s et γ = masses volumiques respectives des matériaux du fond et de l'eau en Kg/m^3 .

W_{50} = vitesse du dépôt des particules de diamètres D_{50} en m/s.

g = accélération de la pesanteur en ms^{-2} .

Comme on peut le voir, une variation de Q_s modifie davantage la pente que la largeur et la profondeur.

FORCE TRACTRICE

C'est Lane (1953) qui a le mieux exposé l'emploi de la force tractrice pour analyser les phénomènes en chenal : la force tractrice critique ou contrainte de cisaillement a été reliée au diamètre des particules de sédiment depuis les matériaux fins jusqu'aux matériaux grossiers (0,1 mm à 100 mm), la force tractrice étant exprimée par la formule suivante :

$$TF = 9,81 \gamma ds$$

où TF = force tractrice (Nm^{-2})

γ = masse volumique du liquide en $Kg m^{-3}$

d = profondeur moyenne de l'écoulement en mètres

s = pente de la ligne d'eau

La publication de Lane (1953) rassemble nombre des premiers travaux sur le sujet et comprend un tableau 3.3.2.1-1 des valeurs de la force tractrice d'après Fortier et Scobey (1926), très utiles pour prévoir les modifications consécutives à un changement de charge solide depuis une forte concentration jusqu'à des eaux claires pour des tailles variées des matériaux des berges. On emploie le tableau 3.3 en vue de la prévision d'abord pour calculer la force tractrice dans un chenal existant et assurant un transport solide dans des conditions stables. La force tractrice réduite calculée pour un passage à l'eau claire comme indiqué dans le tableau fournit des données pour prédire une nouvelle section en travers.

TRANSPORT DE SEDIMENT

On utilise de nombreuses formules de transport solide pour prédire les modifications des cours d'eau. Ces équations prédisant les changements dus aux forces érosives sont très généralement désignées par l'expression : "équations de transport de fond". La plus ancienne d'entre elle est celle de Du Boys (1979), utilisant la contrainte de cisaillement, suivie par les équations de nombreux chercheurs dont une développée par Einstein (1950) parmi celles qui font le plus appel aux méthodes statistiques. Avec toutes ces formules, il faut disposer d'informations sur les caractéristiques hydrauliques du chenal telles que la largeur, la profondeur, la pente, la température de l'eau et la vitesse de l'écoulement, et sur les caractéristiques des sédiments telles que la répartition granulométrique des matériaux du lit. Pour un débit donné, compte tenu des caractéristiques hydrauliques qui lui sont associées, certaines particules peuvent être mises en mouvement par le cours d'eau.

Les données de terrain sur l'hydraulique du chenal et les matériaux du lit sont des facteurs primordiaux pour la prévision à l'aide des formules de transport solide des modifications dues à l'érosion dans les cours d'eau. Le prélèvement d'échantillons des matériaux du lit nécessite l'intervention d'un spécialiste familiarisé avec l'emploi des formules de transport solide. Certaines équations comme celle d'Einstein (1950) et celle de Toffaleti (1969) calculent le transport solide pour chaque taille de grains, tandis que d'autres comme celle de Engelund et Hansen (1967) fournissent le mouvement des sédiments en fonction du diamètre moyen. L'intérêt d'un procédé comme celui d'Einstein (1950) se révèle lorsqu'il est important de prédire le mouvement des grains les plus fins associé à un pavage éventuel du fond du cours d'eau par les sédiments plus grossiers.

Il est important de ne pas oublier lorsqu'on utilise des équations de transport solide que le calcul fournit la capacité potentielle de transport du cours d'eau ou compétence. Du fait de turbulences mal définies, de blocage ou de pavage des sédiments, le transport réel peut être inférieur au résultat théorique. Le type de données disponibles est très souvent déterminant pour choisir une équation convenable. Il est sage d'utiliser plusieurs formules et d'adopter la moyenne des résultats en écartant même certaines valeurs qui paraissent excessives.

3.3.3 Méthodes de modélisation

Ces dernières années, grâce à l'ordinateur, la modélisation a pris un nouvel essor. L'ordinateur, grâce à ses possibilités de calcul automatique à grande vitesse, donne les moyens de simuler les processus physiques par "modélisation mathématique". Si l'on peut représenter mathématiquement un processus physique, l'ordinateur est programmé pour résoudre les problèmes mathématiques et pour fournir une simulation des processus physiques à l'aide de calculs automatiques.

Le modèle réduit est encore un outil pour simuler les processus physiques et spécialement ceux concernant un chenal ou un cours d'eau. La nécessité d'employer un modèle réduit résulte en général d'une difficulté qu'on ne peut résoudre à l'aide des formules mathématiques de la mécanique des fluides ou des transports solides.

3.3.3.1 Modélisation mathématique appliquée aux interfluves. On a beaucoup utilisé l'ordinateur pour développer des modèles tels que ceux établis dans les travaux de Wischmeier et Smith (1965) et d'autres décrits dans le chapitre 3.3.1. Toutefois, l'utilisation de la "modélisation mathématique" pour le calcul de l'érosion des sols et des transports solides dans les interfluves reste limitée. Cela vient de la complexité du problème de la définition du transport des sédiments à la surface d'un sol et de la complexité des quelques solutions numériques décrites par Bennet (1974). Ces problèmes ont davantage été abordés en utilisant des méthodes empiriques pour calculer l'érosion des sols et en appliquant un taux de production des sédiments pour déterminer les modifications des apports aux cours d'eau. L'objectif recherché par la modélisation mathématique de l'érosion des sols d'un interfluve est de donner la quantité de sédiments provenant d'un bassin versant en un temps donné ainsi que sa composition. On peut faire varier les conditions climatiques ou hydrauliques du modèle ainsi que les facteurs d'érodibilité variables qui dépendent de l'intensité et de la nature des activités humaines perturbatrices. Les deux composantes du modèle sont : (1) le ruissellement pluvial

Tableau 3.3 - Comparaison des vitesses limites et des forces tractrices par Fortier et Scobey (1926)

Matériau	n	Pour une eau limpide		Eau chargée de sédiments colloïdaux	
		Vitesse m/s	Force Tractrice N/m ²	Vitesse m/s	Force Tractrice N/m ²
Fin et colloïdal	.020	0.457	1.29	0.762	3.59
Glaise sableuse non colloïdale	.020	0.533	1.77	0.762	3.59
Glaise limoneuse non colloïdale	.020	0.610	2.29	0.914	5.76
Limons alluviaux non colloïdaux	.020	0.610	2.29	1.067	7.17
Glaise commune consistante	.020	0.762	3.59	1.067	7.17
Cendre volcanique	.020	0.762	3.59	1.067	7.17
Argile dure très colloïdale	.025	1.143	12.43	1.524	21.99
Limons alluviaux colloïdaux	.025	1.143	12.43	1.524	21.99
Marne et argile compactes	.025	1.829	32.03	1.829	32.03
Graviers fins	.020	0.762	3.59	1.524	15.30
Glaise à galets non colloïdaux	.030	1.143	18.16	1.524	31.55
Limon à galets colloïdaux	.030	1.219	20.55	1.676	38.24
Graviers grossiers non colloïdaux	.025	1.219	14.34	1.829	
Galets et galtes roulés	.035	1.524	43.50	1.676	

Légende :

n - Coefficient de Manning (rugosité)
m - Mètres
N - Newtons
s - secondes

localisé qui détache les particules de sol et (2) l'écoulement de surface ou le transport des sédiments aux cours d'eau plus importants. Ce sont Foster et Meyer (1972) qui ont le mieux explicité l'équation de conservation des masses du transport par laquelle ils établissent que :

$$\frac{\text{Le taux d'arrachement de l'écoulement}}{\text{Capacité d'arrachement de l'écoulement}} + \frac{\text{Charge solide de l'écoulement}}{\text{Compétence de l'écoulement}} = 1$$

Bien qu'on puisse obtenir le ruissellement dans le modèle par toutes sortes de techniques, l'arrachement des particules de sol est déterminé soit directement à partir de l'équation universelle de perte en sol, soit à partir d'équations analogues. C'est le transport de sédiments le long des pentes de l'interfluve qui est le plus difficile à définir mathématiquement. Cela représente l'écoulement de surface à travers de nombreuses rigoles, des incisions en forme de petits chenaux et des zones d'écoulement enherbées. Foster et Meyer (1971) utilisent dans leur méthode de calcul du transport de surface l'hypothèse que la compétence de l'écoulement est proportionnelle à la puissance 3/2 de la contrainte de cisaillement au fond et, en utilisant l'équation de Chezy pour l'écoulement, l'équation réduite de l'érosion pour une pente uniforme devient :

$$G_* = X_* - (1-\theta)(1-e^{-aX_*})/a \quad (3.14)$$

où G_* est la charge en sédiment rapportée à la compétence en bas de pente
 X_* est la distance depuis le haut de la pente
 θ est un coefficient du détachement dû à la pluie
 a est un coefficient du détachement dû au ruissellement

3.3.3.2 Modélisation mathématique des cours d'eau. Avant l'ère des ordinateurs, le calcul des processus hydrodynamiques prenait énormément de temps, même dans les cas les plus simples. C'est pourquoi les modèles physiques étaient moins chers et plus pratiques malgré leur coût élevé. Cette situation s'est modifiée depuis que l'on dispose de moyens de calcul à grande vitesse automatiques. Cela ne veut pas dire que les modèles mathématiques ont entièrement remplacé les modèles physiques ou qu'ils le feront dans un avenir prévisible. De même que, dans le passé, on a recherché la solution de nombreux problèmes avec des modèles physiques, de même leur usage se poursuivra. Dans l'avenir toutefois, les modèles mathématiques apporteront un complément toujours plus important aux modèles physiques.

On développe le modèle mathématique d'un cours d'eau de la même façon qu'un modèle physique : sa géométrie repose sur des relevés ponctuels. De même que la mise en forme d'un modèle physique nécessite une interpolation entre les relevés ponctuels, de même met-on en oeuvre dans un modèle mathématique des procédures d'interpolation. C'est au vrai sens du mot un modèle.

Il est généralement impossible de décrire le milieu naturel à l'aide de fonctions mathématiques simples. Il est nécessaire de découper le milieu en éléments simples. On dit parfois que l'on schématise le milieu. Par exemple, un fond marin peut être défini par une grille de sondages. On peut découper le lit d'un cours d'eau en éléments d'amont en aval et définir chacun de ces éléments. Pour cela, on peut utiliser des sections en travers types et les largeurs à la surface de l'eau correspondant à des hauteurs d'eau variées. La taille d'un modèle mathématique dépend du problème à résoudre, mais il est courant d'utiliser 10.000 à 20.000 nombres pour décrire convenablement un milieu physique.

Toujours de façon comparable à un modèle hydraulique, les différentes étapes d'un modèle mathématique sont définies à l'aide de programmes de calcul. Un programme traite les données de base (1ère étape d'un modèle hydraulique) et des programmes connexes convertissent ces informations sous une forme utilisable pour le calcul des différents processus d'écoulement. D'autres programmes créent les conditions initiales aux limites du modèle, remplaçant les appareils généralement utilisés pour créer marées et vagues ou remplaçant d'autres dispositifs de contrôle physique. A la base de tout modèle mathématique, il y a un programme de fonctionnement. Ce programme est fondé sur les équations hydrodynamiques adaptées et on l'utilise pour calculer le déplacement de l'eau à travers le modèle. La mise en oeuvre de ce programme est la même chose qu'une expérience sur un modèle hydraulique.

Le champ d'application des modèles mathématiques s'étend constamment. On trouvera ci-après quelques exemples de modèles :

Déterminations des niveaux d'eau dans les cours d'eau et les estuaires

Les modèles traitant ces problèmes sont parmi les plus courants, qu'il s'agisse de la propagation d'une onde de crue vers l'aval d'un cours d'eau ou d'une onde de marée vers l'amont

d'un estuaire. Pour résoudre ces problèmes, on procède aux calculs section après section le long du cours d'eau considéré pour des intervalles de temps successifs. Ces calculs sont basés sur les équations fondamentales du mouvement et de la continuité, c'est-à-dire sur l'hypothèse que, lorsqu'une force extérieure est appliquée sur une masse d'eau, elle subit une accélération et que le volume net d'eau entrant ou sortant d'un bief doit être égal au volume stocké ou perdu par le bief. Les équations doivent tenir compte des apports latéraux des affluents et du ruissellement direct du bassin versant le long du bief, ainsi que des forces de friction et des pertes de charge dans les courbes du chenal. Les équations sont formulées de telle façon que les apports ou les stockages des plaines d'inondation adjacentes sont pris en compte. De plus, les modèles peuvent comprendre des équations destinées à tenir compte des pertes de charges ponctuelles au niveau des ponts, de déversoirs ou d'autres ouvrages hydrauliques.

A la frontière amont du modèle, il faut en général définir les variations de débit ou de niveau dans le temps. Il en est de même à la frontière aval. Parfois hauteurs d'eau et débits sont liés par une relation fonctionnelle connue; c'est souvent le cas lorsque la limite aval est située sur un déversoir, ou encore, dans un système de drainage à une station de pompage où le débit est régulé en fonction du niveau instantané. Dans le cas de cours d'eau à très forte pente où les écoulements sont supercritiques, on doit définir à l'amont à la fois la variation des niveaux et celle des débits, sans que cela soit nécessaire à l'aval.

Un modèle mathématique se construit de bien des façons et ce n'est pas ici que l'on peut donner des explications détaillées sur chaque méthode. Toutefois, la liste suivante rappelle brièvement les schémas possibles et les méthodes de résolution des équations hydrodynamiques :

- Méthodes des différences finies : Dans ce schéma on choisit des sections en travers déterminées le long du cours d'eau ainsi qu'un pas de temps fixe. Les différentielles sont représentées par des différences finies d'une section à la suivante.
- Méthodes des éléments finis : Dans cette méthode, on établit un réseau afin de suivre les formes complexes des limites, avec une plus grande densité dans les régions où l'on souhaite avoir davantage de détails. Il est relativement facile de s'adapter aux différentes formes des limites.
- Méthodes explicites : Les méthodes explicites de résolution des équations de base sont les plus simples, mais il faut satisfaire un critère de stabilité qui a pour effet de limiter la longueur du pas de temps utilisable.
- Méthodes implicites : Elles sont plus difficiles à formuler mais elles assurent la stabilité par leur nature et on peut utiliser des pas de temps plus longs sans risques ou instabilités.
- Méthodes de résolution linéaire : Méthode de résolution simplifiée dans laquelle on linéarise les équations et qui permet d'économiser sur les coûts et le temps. La précision est limitée.
- Méthodes de résolution non linéaires : Connues aussi sous la désignation de méthodes de résolution complètes, dans lesquelles on utilise sans modification les équations de base.

On doit résoudre différents problèmes pour mettre au point un modèle pour un cours d'eau déterminé. Le premier réside dans l'insuffisance et l'imprécision des données disponibles. Par exemple, il peut ne pas y avoir assez de sections en travers pour définir les variations à grande échelle de la topographie du chenal principal. De même, du fait de la grande extension de certaines vallées, il peut être nécessaire d'effectuer une reconnaissance aérienne pour établir les sections en travers des plaines d'inondation. Il peut aussi être difficile de faire la synthèse des résultats de reconnaissances sur un chenal faites à des époques différentes, en partie à cause des modifications physiques du cours d'eau, en partie à cause de l'imprécision des relevés. Cependant, les problèmes les plus difficiles concernant les données sont ceux relatifs à l'information hydrologique qui est souvent loin d'être complète. Il est possible, par exemple, qu'il n'y ait qu'une seule station de jaugeage précise sur le chenal principal. S'il y a le long du bief des apports latéraux importants provenant d'affluents non jaugés, cela peut constituer un inconvénient important. On peut utiliser des techniques hydrologiques pour compléter les données, mais cela ne remplace pas des relevés réels. En règle générale, avant de commencer toute étude de modélisation d'un cours d'eau donné, on doit attacher une importance considérable à la collecte des données de débits, en installant même, si nécessaire, des stations limnigraphiques aux points stratégiques.

Le deuxième problème majeur à résoudre c'est le calage du modèle, c'est-à-dire qu'il faut ajuster les coefficients de rugosité, de façon à simuler le mieux possible les écoulements observés. Le modèle doit permettre l'optimisation du coefficient de rugosité le long de nombreux biefs secondaires, pour une série d'écoulements stables observés. On utilise les résultats pour évaluer les coefficients de rugosité à et à travers chaque section particulière, en tenant compte également de la conformation des limites naturelles. Lorsqu'on ne peut considérer les écoulements observés comme stables, comme en général dans le cas des débordements, on doit calibrer le modèle par des ajustements arbitraires des coefficients de

rugosité de la plaine d'inondation jusqu'à ce que les limites observées des crues ou des niveaux soient simulées aussi bien que possible.

Toutes les méthodes de calcul décrites jusqu'à présent fournissent seulement les niveaux d'eau et les vitesses moyennes dans les sections en travers (ou les éléments de section en travers). Elles conviennent parfaitement pour résoudre les problèmes d'inondation, de drainage, de régularisation des cours d'eau et d'autres problèmes de ce genre, mais elles deviennent insuffisantes quand on doit prendre en considération le mouvement de matériaux dans l'eau. Il faut alors mettre en oeuvre des techniques de modélisation plus élaborées, leur degré de sophistication variant avec le problème à résoudre.

Mouvements des polluants : les polluants pénétrant dans les cours d'eau constituent un danger croissant du fait du développement de l'industrie, et il devient indispensable de créer des techniques pour prédire le mouvement des polluants dans le réseau de drainage.

L'usage courant est d'utiliser un modèle global de base de l'écoulement et d'y ajouter des équations décrivant la dispersion des polluants entraînés par le courant. On suppose qu'il est possible de prévoir la dispersion à partir de la profondeur et des vitesses moyennes et qu'il n'est pas nécessaire de connaître en détail le champ des vitesses.

Lorsque le polluant se dégrade (par exemple une matière radio-active) ou quand il est partiellement absorbé durant le trajet, de nouveaux problèmes surgissent. Pour recueillir des informations sur ces phénomènes, il est souvent nécessaire de procéder à des mesures de terrain.

Les polluants qui ont une densité différente du fluide transporteur, soit à cause de leur température, soit du fait de leur composition chimique posent des problèmes supplémentaires car il faut tenir compte des accélérations et forces verticales. On peut citer en exemple la dispersion d'eaux d'égouts déversées par un collecteur submergé dans les eaux salées d'un estuaire ou celle d'eaux chaudes provenant d'une centrale thermique. On a établi des modèles simples de dispersion adaptés à ces cas, mais il est nécessaire de mieux connaître les processus complexes de mélange.

Mouvements de sédiments : Selon la nature des sédiments, on doit considérer plusieurs cas. Cela tient au fait que le mécanisme de transport est très différent selon qu'il s'agit dans un cas extrême d'un sédiment très fin transporté en suspension en quantités largement dépendantes des apports et dans le cas extrême opposé, de sédiments grossiers transportés au fond sous l'influence quasi exclusive de la force tractrice exercée sur eux par le courant.

Les lois physiques régissant le mouvement des sédiments très fins (c'est-à-dire des matériaux quartzes d'un diamètre inférieur à 0,06 mm) ne sont pas bien connues à ce jour. Cela vient de ce que ces matériaux présentent une cohésion caractéristique, qu'ils flocculent, que leur taux d'érosion varie avec la densité du dépôt d'origine et parce qu'une fois le mouvement déclenché ils se déplacent en quantités dépendant davantage des apports de matières que de l'intensité de la turbulence de l'écoulement. Les premiers modèles mathématiques évitaient ces problèmes en utilisant des données de terrain extensives au site considéré. Ils utilisaient un modèle global de base d'écoulement conjointement avec les concentrations de matières en suspension observées pour estimer le flux des sédiments dans le bief. Il était admis que les relations empiriques expérimentales resteraient valables lorsque se seraient produites les modifications de régime du cours d'eau (dues aux activités humaines ou à d'autres causes).

Dans les modèles plus récents, on calculait en général les concentrations moyennes en sédiments à partir de mesures faites près du fond mais parfois on les obtenait à l'aide de méthodes de calcul semi-empiriques bien connues.

Naturellement, la complexité de l'équilibre des limons et des argiles est telle qu'il faut simplifier le problème. Dans les estuaires, il y a toujours une variation de la distribution verticale des valeurs et des concentrations de matières en suspension, et pour résoudre ce problème, on a conçu des modèles à deux couches. La couche inférieure est considérée comme une zone limite où la vitesse croît rapidement de 0 à une vitesse proche du maximum. La concentration en matériaux fins diminue dans cette couche d'une valeur forte près du fond à une valeur bien moindre et sensiblement constante à une cote plus élevée au-dessus du fond. La couche supérieure, nettement plus épaisse que l'inférieure, correspond à la hauteur du reste de l'écoulement.

On utilise d'abord les modèles sous leur forme globale pour calculer les débits dans les deux couches réunies. Dans un deuxième temps, l'écoulement est réparti entre les deux couches. Au cours de la seconde opération, on tient compte des courants dérivés de 2ème ordre ainsi que de la distribution longitudinale des salinités et des effets de la remontée de la marée dans l'estuaire.

Les caractéristiques de l'écoulement obtenues dans la deuxième étape fournissent des éléments tels que la force tractrice qu'il faut connaître pour calculer les affouillements, la diffusion par turbulence, le mélange à l'interface des deux couches, la décantation et les

dépôts. A partir des équations relatives à ces calculs, et d'une équation de transport supposant que les matériaux fins sont transportés à une vitesse égale à celle de l'eau, on établit une équation de continuité pour le mouvement des matériaux fins. L'emploi de programmes comprenant ces équations constitue la troisième étape de l'utilisation du modèle.

Pour bien des raisons, il est plus facile de prédire le mouvement des sédiments grossiers (c'est-à-dire sables et graviers $> 0,06$ mm) que celui de sédiments fins cohérents. Il y a des critères connus et valables qui précisent les conditions d'écoulement permettant la mise en mouvement des sédiments et avec lesquels on peut ensuite évaluer quantitativement le transport, aussi bien au fond qu'en suspension. On peut formuler de manière relativement sûre les lois régissant le mouvement des sédiments grossiers car (1) les effets d'hysteresis peuvent en général être négligés sauf pour des transports importants de sables fins, (2) les complications dues aux forces de cohésion n'existent pas et (3) il y a une masse énorme de données de laboratoire et de terrain sur ce sujet.

Les sujets méritants une recherche et une évaluation complémentaire comprennent : (1) les problèmes de prédiction du mouvement des sédiments à granulométrie bien répartie avec la possibilité d'un pavage de la surface du fond par les particules les plus grandes, (2) l'effet de la forme des particules sur les phénomènes de transport, (3) le mouvement des sédiments sur des fonds non érodibles, (4) les problèmes concernant les caractéristiques des lits et leur rugosité et (5) la séparation en couches des sédiments du fond.

Les techniques numériques de calcul du mouvement des sables sont fondées sur les modèles de base de l'écoulement auxquels on ajoute des relations fondamentales, en général semi-empiriques, qui déterminent le taux de transport en fonction des caractéristiques des sédiments et des conditions hydrauliques instantanées. Cependant, comme les caractéristiques du lit agissent sur les conditions hydrauliques locales, comme la force tractrice au fond par exemple, il faut les mesurer sur le terrain (directement ou indirectement) ou les obtenir par des déductions fondées sur des méthodes semi-empiriques relativement fiables.

Lorsque le transport de fond est prépondérant, les conditions locales instantanées fournissent sans aucun doute des moyens convenables pour déterminer les débits solides. Cependant, s'il y a une part relativement importante de transport en suspension, il est souvent nécessaire de simuler les phénomènes de diffusion dans l'écoulement, et ceci, en fait, introduit des effets d'hysteresis. Et même des modèles plus évolués simulent les mouvements différentiels des matériaux de différentes tailles, prenant en compte les variations spatiales des emplacements soumis à l'érosion et au dépôt.

On peut désormais, en utilisant des modèles mathématiques d'écoulement convenables, comme indiqué ci-dessus, et de techniques appropriées de prédiction des mouvements des sédiments, modéliser numériquement les modifications des formes des cours d'eau. Ces modèles constituent l'équivalent mathématique des modèles physiques à frontières mobiles bien que les champs d'application de ces modèles soient différents. Jusqu'à ce jour, ils ont seulement été utilisés pour simuler les modifications des niveaux du lit qui se produisent à l'échelle interannuelle, mais il est probable que la gamme d'application à des changements de forme de lit à grande échelle s'étendra.

Utilisation des modèles mathématiques d'écoulement : Les modèles mathématiques ont un large champ d'application qui s'accroît sans cesse grâce à la capacité croissante des nouveaux ordinateurs et à la meilleure compréhension des phénomènes physiques. La liste ci-après fournit un guide d'application mais ne prétend pas être exhaustive.

- (1) Propagation de la marée dans les estuaires et les eaux côtières.
- (2) Pénétration saline dans les estuaires.
- (3) Dispersion des eaux d'égout et autres effluents.
- (4) Régularisation des cours d'eau.
- (5) Propagation des crues.
- (6) Mouvement des polluants dans les eaux.
- (7) Modifications morphologiques des cours d'eau.
- (8) Etudes des problèmes de digues, barrages, système de défense, dragages et circulation des eaux de refroidissement.

3.3.3.3 Modèles réduits. Les modèles réduits sont un moyen commode et économique pour étudier les problèmes relatifs aux cours d'eau et aux estuaires. On peut utiliser les modèles à fond fixe pour prédire les effets des modifications des cours d'eau sur les niveaux d'eau tandis que l'on peut étudier les problèmes plus complexes des mouvements de fond à l'aide de modèles à fond mobile.

Echelles : Les facteurs régissant le choix de l'échelle d'un modèle à fond fixe sont relativement bien établis. Dans la plupart des cas, le concepteur n'est pas tenu d'utiliser une

échelle donnée, et le choix final est en général déterminé par la taille minimum acceptable pour l'écoulement du fluide dans le modèle. En général, les forces d'inerties et gravitationnelles sont dominantes et la taille effective du modèle doit être choisie de façon que la résistance à l'écoulement due aux effets de viscosité et à la rugosité des parois permette de respecter les conditions de similitude de FROUDE. Dans certains cas, d'autres facteurs peuvent influencer le choix de l'échelle comme les effets thermiques, les effets de la salinité et de la tension de surface.

Les modèles à fond rigide destinés à l'étude de problèmes localisés, comme les projets de prises d'eau, de déversoirs ou d'évacuateurs de crue, sont en général sans distorsion, c'est-à-dire que les échelles verticales et horizontales sont identiques. Cependant, lorsqu'il faut modéliser une étendue plus grande comme un estuaire ou un bief d'une longueur suffisante, souvent on accroît l'échelle verticale pour avoir de plus grandes profondeurs d'eau. Cette façon de faire permet de conserver une similitude de FROUDE et rend les mesures de niveau plus précises.

Les problèmes d'échelles des modèles à fond mobile sont bien plus délicats. Lorsqu'on choisit l'échelle d'un modèle donné, on doit prêter attention non seulement à l'écoulement du fluide, mais aussi à la simulation des mouvements du lit. Le problème est en outre compliqué par l'interdépendance entre mouvements du lit et mouvements du fluide. Les particules en mouvement le long du lit forment des reliefs au fond (dunes, rides, etc...) qui, à leur tour, modifient la rugosité du lit. Les lois régissant ces phénomènes biphasiques ne sont pas faciles à exprimer et en outre la considération des données connues conduit souvent à des échelles incompatibles ou impraticables pour les modèles à fond mobile. Ces modèles sont en général conçus de façon que la mise en mouvement des matériaux se fasse à une vitesse équivalente à celle observée sur le terrain. Les quantités de sédiments transportés pour des écoulements plus importants ne correspondent cependant pas nécessairement aux observations. Il est souvent avantageux d'utiliser des sédiments légers dans les modèles tel que le polystyrène, le charbon ou la bakélite.

Construction et calage des modèles réduits : Le mieux est de construire les modèles dans des enceintes couvertes spéciales pour éviter les dégâts et les indisponibilités possibles dus à de mauvaises conditions atmosphériques. La taille de ces bâtiments dépend de la surface du prototype à simuler et des échelles nécessaires à la simulation du phénomène étudié. Les petits modèles peuvent occuper une surface de 10 m² tandis que les modèles de grands cours d'eau peuvent atteindre des tailles de 1.000 m².

La construction des modèles à frontières rigides se fait généralement en béton, les détails tels que les seuils, ponts et retenues étant construits en bois, plastique ou métal. Pour les modèles à fond mobile, le lit du cours d'eau est composé de matériaux granuleux tels que sables, charbon pulvérulent, bakélite, perspex, polystyrène ou sciure de bois. Eventuellement, lorsqu'on étudie les méandres, les berges du cours d'eau sont façonnées dans les mêmes matériaux granuleux. Les débits entrant dans le modèle sont contrôlés et les niveaux d'eau sont maintenus grâce à un système de vannes d'évacuation à l'aval du modèle. Les modèles d'estuaires sont munis d'un système de simulation des marées. Les premiers modèles étaient utilisés dans des conditions d'écoulement stabilisé mais on admet maintenant qu'il est souhaitable et possible de réaliser des modèles où l'on simule les variations dans le temps et simultanément des débits et des niveaux.

Une étape essentielle de toute étude sur modèle est celle du calage où les performances du modèle sont comparées et ajustées à celle du prototype. Dans le cas des modèles à frontières rigides, les rugosités des chenaux et des plaines d'inondations sont ajustés jusqu'à ce que les relations hauteur-débit soient satisfaisantes, en gardant à l'esprit que les données du prototype peuvent être imprécises. Le calage des modèles à frontières mobiles est plus difficile car il leur faut reproduire de façon convenable la topographie du lit. Avant de parvenir à un résultat satisfaisant, il est souvent nécessaire de procéder à des essais avec différents matériaux à des débits variables.

Utilisation des modèles réduits : Les modèles réduits à frontières rigides fournissent des données sur les hauteurs et les régimes d'écoulement. Ils sont particulièrement utiles lorsque la topographie des chenaux du prototype est compliquée et on peut les employer pour étudier en détail les conditions d'écoulement là où on ne peut pas faire de simulation mathématique.

On peut utiliser directement les données recueillies sur les hauteurs d'eau et les régimes d'écoulement pour les problèmes relatifs aux crues et à la navigation. Cependant, on les utilise aussi conjointement avec des relations fonctionnelles connues pour prédire les mouvements de sédiments dans les prototypes. On peut par exemple utiliser les vitesses et les directions du courant mesurées à proximité d'un barrage ou d'une zone de restauration, ou dans un lit approfondi pour déterminer les mouvements probables des sédiments dans ces zones.

La figure 3.35 présente un modèle à frontières rigides de la Lower Waikato River,



Fig. 3.35 Modèle à fond rigide de la Waikato River, Nouvelle-Zélande, 1965.
(Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO
et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

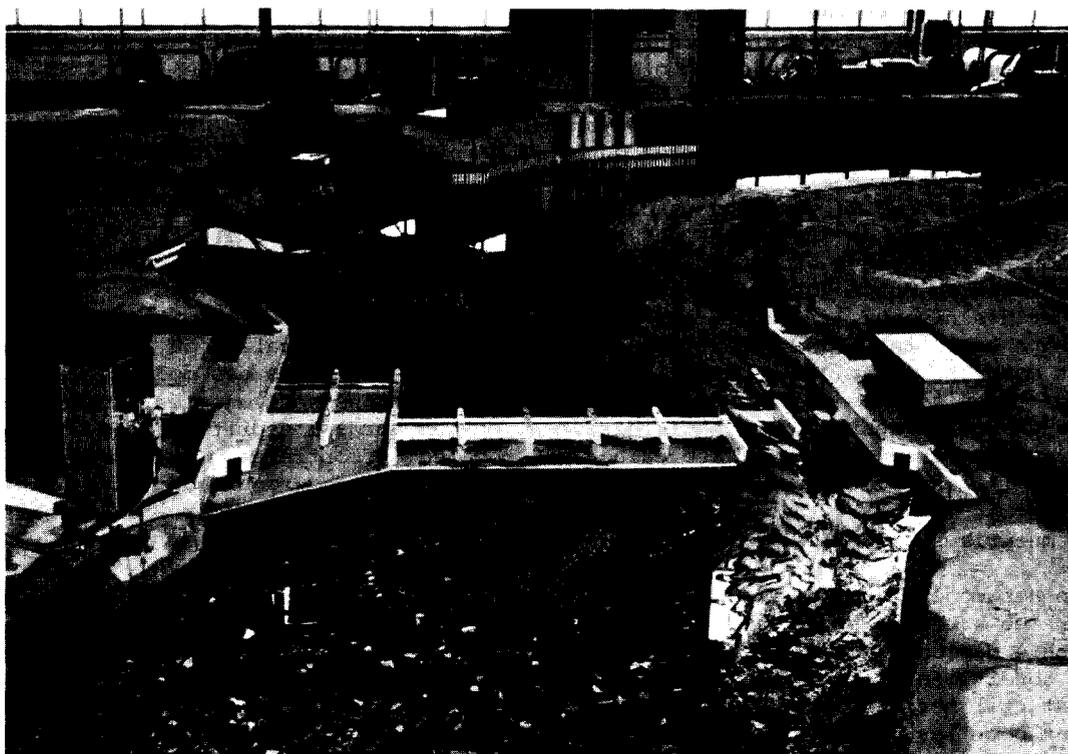


Fig. 3.36 Modèle à fond mobile de la rivière Tyne, U.K., 1975 (Copyright de la Couronne,
reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de
Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

Nouvelle Zélande. Les essais indiquent dans quelle mesure les hauteurs d'eau résultant des effets de marée et des écoulements variables pourraient être affectées par des modifications du profil des berges, par de petites retenues et par le dragage de la zone deltaïque. On peut classer les utilisations des modèles à frontières mobiles en deux catégories : Modèles pour effets localisés et modèles pour l'étude de la morphologie générale.

Effets localisés : L'influence humaine sur un système fluvial se manifeste souvent sous la forme de travaux de Génie Civil qui modifient localement le cours d'eau. On peut donner en exemple la construction de barrages, de déversoirs, de digues, de dispositifs de mesure des débits, d'épis, etc... Les modèles à frontières mobiles donnent de bonnes indications sur les changements futurs de la topographie locale, et de plus, dans certains cas, il est possible de prédire la vitesse à laquelle se feront ces transformations.

L'érosion des sédiments cohérents et des fonds rocheux est toutefois difficile à prévoir.

La figure 3.36 montre l'affouillement local et les dépôts causés par la construction d'une prise d'eau et des ouvrages de régularisation du chenal associés sur la rivière Tyne, Royaume-Uni. Le modèle a été construit au 1/40 sans distorsion et on l'a utilisé pour optimiser les ouvrages.

Morphologie générale : Les modèles à frontières mobiles sont d'un usage limité dans le domaine de la morphologie générale des cours d'eau. Ils sont utiles pour des biefs atteignant jusqu'à dix kilomètres de long dans les cours d'eau de taille moyenne. Les grands fleuves et les biefs plus longs ne peuvent être simulés car cela nécessiterait des modèles trop coûteux de taille excessive. Dans ce cas, on doit utiliser les modèles mathématiques. Les ouvrages de génie civil qui peuvent être simulés en utilisant des modèles à frontières mobiles comprennent les dispositifs de régularisation des cours d'eau et la construction des chenaux évacuateurs de crue.

La figure 3.37 montre un modèle à frontières mobiles d'une portion de la Vistule (Pologne). Le modèle a été utilisé pour préparer un projet de régularisation du cours d'eau.

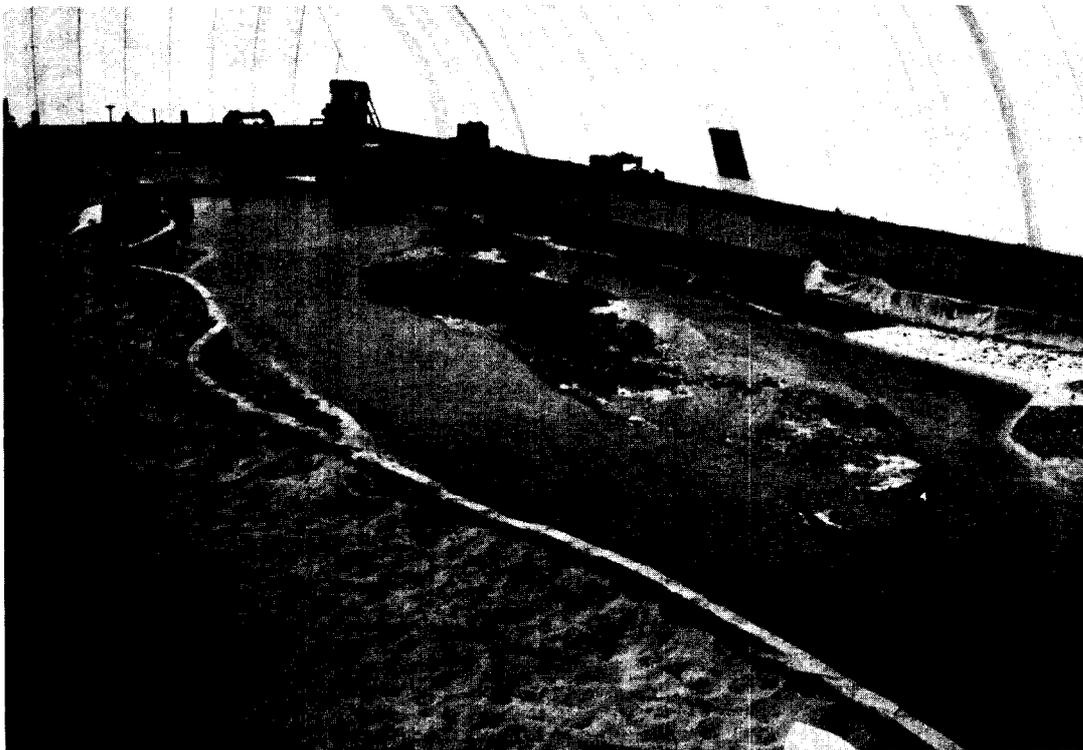


Fig. 3.37 Modèle à fond mobile de la Vistule (Pologne), 1973. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

REFERENCES

- Ackers, P.; White W.R. 1973. Sediment transport: New approach and Analysis. Hydraul.Div. ASCE. vol.99, HY11, pp 2041-2060.
- Agriculture Research Service. 1975. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. U.S. Department of Agriculture. ARS-S-40.
- Aibulatov, N.A. 1958. Novye issledovania vdolberegovogo peremeshenia peschanykh nanosov v more (New research on along-the-shore transport of sand dunes into the sea). Oceanograph Comm. Acad. Sci. USSR, No.1, p. 72-80.
- ASCE. 1975. Sedimentation engineering, Manual No.54. New York, American Society of Civil Engineers.
- Beer, C.E.; Johnson, H.P. 1965. Factors related to gully growth in the deep loess area of Western Iowa. Proc. Interagency Sed.Conf. 1963. U.S. Dept. Agr. (Misc. publ. no.970).
- Bennett, J.P. 1974. Concepts of mathematical modelling of sediment yield. Water Resources Research. Am. Geophys. Un.
- Blench, T. 1969. Mobile bed fluviology. Edmonton, Alberta, Univ. Alberta Press.
- Blench, T. 1970. Regime theory design of canals with sand beds. J. Irri. Drainage Div. ASCE, vol.96, no. 1R2.
- Bogardi, J. 1974. Sediment transport in alluvial streams. Budapest, Akademiai Kiado.
- Brune, G.M. 1953. Trap efficiency of reservoirs. Trans. Am. Geophys. Un. vol. 34, no.3.
- Bureau of Reclamation. 1955. Step method for computing total sediment load by the modified Einstein procedure. Denver, Colorado, The Bureau.
- Churchill, M.A. 1948. Discussion of 'Analysis and use of reservoir sedimentation data'. by L.C. Gottschalk. Proc. Fed. Inter-Agency Sed. Conf. Denver, Colorado.
- Colby, B.R.; Hembree, C.H. 1955. Computations of total sediment discharge Niobrara River near Cody, Nebraska. Washington D.C., U.S. Geol. Survey. (Water-supply paper 1357).
- Dean, R.G. 1980. Coastal structures and their interaction with the shoreline in 'Application of stochastic processes in sediment transport', edited by H.W. Shen and H.Kikkawa.
- Du Boys, P. 1879. Le Rhône et les rivières à lit affouillable. Ann. Ponts et Chaussées. Ser. 5 vol. 18.
- Dusan Lackar, 1970. Erizia pody. Unduvatel'stvo Slovenskie Akademie vied Bratislava.
- Einstein, H.A. 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. Washington D.C., U.S. Dept. Agr. Soil Conservation Service, Tech. bull. 1026.
- Emmett, W.W. 1965. The vigil network: methods of measurement and of sampling data collected. Symposium on design of hydrological networks, Quebec, vols. 1 and 2, IASH Publs. 67 and 68.
- Emmett, W.W., 1980 A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bed load sampler. U.S. Geol. Survey. (Prof. paper 1139).
- Engelund, F.; Hansen, E. 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Copenhagen, Teknisk Forlag.
- Fortier, S.; Scobey, F.C. 1926. Permissible canal velocities. Trans. ASCE, vol. 89, paper no. 1588.
- Foster, G.R.; Meyer, L.D. 1972. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In: Shen, H.W. (ed.). Sedimentation symposium to honour Professor Hans Albert Einstein. Colorado State University, Fort Collins.
- Galanov, L.G. 1966. Utochnenie Kolichestvennogo opredelenia peremeschenia peska v more (Precision of the quantitative determination of sand dune motion into the sea). Okeanologia, vol.6, issue 5, p. 894-899.
- Graf, H.W. 1971. Hydraulics of sediment transport. New York, McGraw-Hill.

- Hinrich, H. 1970. Bed-load measurement by means of bottom plates and bed-load samples with hydrophone attachments. Hydrometry. Proc. Koblenz Symp., vol. 2 pp. 544-549. Paris, UNESCO-WMO-IAHS.
- Hjulstrom, F. 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Bull. Geol. Inst. Uppsala, vol. XXV.
- Horikawa, K. 1980. Coastal sediment processes. In: Shen, H.W., Kikkawa, H. (eds.) Application of stochastic processes in sediment transport. Water Resources Publication, Littleton, Colorado, U.S.A.
- Hubbell, D.W. 1964. Apparatus and techniques for measuring bedload. U.S. Geological Survey. (Water-supply paper 1748).
- Ingle, J.C. 1966. The movement of beach sand: an analysis using fluorescent tracers. Elsevier Publishing Company.
- Jansen, J.M.L.; Painter, R.B. 1973. Predicting sediment yield from climate and topography. J. Hydrol., Amsterdam, vol.21, no.4, pp. 371-380.
- Kennedy, R.G. 1895. The prevention of silting in irrigation canals. Proc. Inst. Civ. Eng., vol. 119.
- Kikkawa, H. 1980. Reservoir sedimentation. In: Shen, H.W., Kikkawa, H. (eds.) Application of Stochastic Processes in sediment transport. Water Resources Publication, Littleton, Colorado, U.S.A.
- Kondratev, N. 1962. River flow and river channel formation. (trans. from Russian, (1959). Nat.Sci. Found. and U.S. Department of the Interior.
- Lane, E.W. 1953. Progress report on studies on the design of stable channels of the Bureau of Reclamation. Proc. Am. Soc. Civ. Eng., vol. 79.
- Lane, E.W. 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. Proc. Am. Soc. Civil Eng., vol. 81.
- Leopold, L.B.; Maddock, T.Jr. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Washington D.C., U.S. Geol. Survey. Professional Paper 252.
- Levi, I.I., 1967. Modelirovanie gidravlicheskih yavlenij (Simulation of hydraulic phenomena). Leningrad, Energia, p. 246.
- Lyatkhner, V.M.; Prudovsky, A.M. 1971. Issledovanie otkrytykh potokov na napornykh (Free surface study in hudraulic head simulation). Moscow, Energia, p. 168.
- Medvedev, V.S.; Aibulatov, N.A. 1956. Primenenie 'mechenogo' peska dlia izuchenia peremshenia morskikh nanosov ('Traced' sand application for the study of sea sediment transport). Izv. AN SSR. ser. Geog. no. 4, p. 99-102.
- Metodika izmerenia raskhodov nanosov: izuchenie deformatsii rechnykh rusel: issledovanie tverdogo stoka (Methods for sediment discharge measurements and studies, river bed changes and sediment discharges). 1972. Budapest, p.118.
- Metodicheskie ukazania upravleniam Gidrometsluzhby (Methodological instructions for the offices of Hydrometeorological Service). 1963. Leningrad, Gidrometeoizdat, p. 119.
- Meyer-Peter, E.; Muller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. Report on Second Meeting of International Association for Hydraulic Research, Stockholm.
- Miller, C.R.; Borland, W.M. 1963. Stabilization of Fivemile and Muddy Creeks. J. Hydraul. Div. ASCE, vol. 89.
- Mutchler, C.K. 1963. Runoff plot design and installation for soil erosion studies. U.S. Department of Agriculture, (ARS Report no. 41-79).
- Nordin, C.F. Jr. 1980. Data collection and analysis. In: Shen, H.W., Kikkawa, H. (eds.) Application of stochastic processes in sediment transport.
- Nordin C.F. Jr.; Skinner, J.V. 1977. Sediment-sampling equipment for deep fast currents. Seminar 3, IAHR Seventh Congress Proceedings August 15-19, vol. 6, Baden-Baden.
- Onstad, C.A.; Piest, R.F.; Saxton, K.E. 1976. Watershed erosion model validation for Southwest Iowa. Proc. Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conference.

- Pankov, A.N. 1953. Uproschenny metod rascheta objemov zailenia starykh prudov i vodoemov (Simplified method for the computation of sedimentation rate of old ponds and reservoirs). Complete transactions of Uman Agricultural Institute, vol. 11.p. 216-220.
- Pemberton, E.L. 1976. Channel changes in the Colorado River below Glen Canyon Dam. Proc. Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conference.
- Pemberton, E.L. 1980. Survey and prediction of sedimentation in reservoirs. In: Shen, H.W., Kikkawa, H. (eds.) Application of stochastic processes in sediment transport.
- Raudkivi, A.J. 1967. Loose boundary Hydraulics. Oxford, Pergamon.
- Roehl, J.W. 1962. Sediment source areas, delivery ratios, and influencing morphological factors. In: Publication no. 59, International Association of Scientific Hydrology, Committee on Land Erosion.
- Rukobodstvo vodnobilansovym stantsiam (Guide to water balance stations). 1973 (2nd ed.) Leningrad, Gidrometeoizdat, p. 306.
- Schumm, S.A. 1960. The shape of alluvial channels in relation to sediment type. Washington D.C. U.S. Geol. Survey. (Prof. paper 352-B.).
- Shen, H.W. ed. 1971. Sedimentation. Symposium to honour Professor H.A.Einstein, Colorado State University.
- Shick, A.P. 1967. Suspended sampler. Rev. Geomorphol, Dynamique, 17:4.
- Shvebs, G.I. 1974. Formirovanie vodnoi erosii stoka nanosov: ikh otsenka (Formation of water erosion sediment discharges and their evaluation). Leningrad, Gidrometeoizdat, p. 184.
- Simons, D.B.; Senturk, F. 1977. Sediment transport technology. Fort Collins, Col., Water Resources Pub.
- Sobolev, S.S. 1948. Razvitie erozionnykh protsessov na territorii Evropeiskoi chasti SSSR i borba s nimi (Development of erosion in the European USSR and measures for its prevention), vol. 1, Moscow-Leningrad, Izd-vo AN SSR, p. 305.
- Soloviev, N.Ya. 1969. Registrator dvizhenia krupnykh nanosov (Register of coarse bed-load motion). Trans. GGI, vol. 172, p. 90-95.
- Sylvestrov, S.I. 1949. Erozia i sevooboroty (v tsentalnoi lesostepnoi zone). Erosion and crop rotation (in central forest-steppe zone). Moscow, Selkhozgiz, p. 142.
- Thronson, R.E. 1976. Nonpoint source control guidance construction activities. U.S. Environmental Protection Agency, (Technical guidance memorandum: Tech - 27.)
- Toffaletti, F.B. 1969. Definitive Computation of sand discharge in rivers. J.Hydraul. Div.ASCE, vol. 95, no. HY1, Proc. paper 6350.
- UNESCO- IAHS. 1974. Gross sediment transport into oceans. Paris, UNESCO.
- U.S. Interagency Committee. 1963. Determination of fluvial sediment discharge. Report No.14, Subcommittee on Sedimentation, Inter-Agency Committee on Water Resources, St.Anthony Falls, Hydraulic Laboratory, Minneapolis, Minn.
- U.S. National Handbook. 1978. Sediment. In: chap. 3. National handbook of recommended methods for water-data acquisition. Reston, Va., U.S. Geological Survey.
- Walling, D.E. 1977. Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with particular reference to British rivers. Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters Symposium, Paris.
- Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. (Agricultural Handbook no. 282.) Washington D.C., Government Printing Office.

4 Méthodes de défense contre l'érosion et la sédimentation

4.1 BASSINS FLUVIAUX

4.1.1 Introduction

Erosion accélérée et dépôts de sédiments posent souvent de sérieux problèmes et sont la cause de modifications de l'environnement dans les interfluves. Le couvert végétal est détruit, les sols sont emportés, la fertilité est détruite et les zones agricoles sont endommagées ou complètement ruinées. Du fait que l'érosion des sols est étroitement corrélée avec le ruissellement, la maîtrise de ce dernier est particulièrement importante.

Les méthodes de lutte contre l'érosion et la sédimentation reposent sur l'étude de leur nature et de leur évolution. Le but des dispositifs de défense est de réduire ou d'éliminer les effets négatifs des processus observés. Les programmes de défense comportent des moyens de protection variés. Ces moyens associent des méthodes de limitation du ruissellement pour protéger les sols de l'érosion et dépôts et des méthodes d'amélioration et de restauration des zones atteintes. Selon la nomenclature retenue par ingénieurs et chercheurs, les moyens de lutte contre l'érosion peuvent être classés dans les catégories suivantes (Kozmenko, 1954; Regionalmye Sistemy Protivo-Erozionnykh Meropriatii, 1972; Skatchkov, 1965; Surmach, 1965; Soil Conservation Service, 1975; Soil Conservation Service, 1977; et Stewart et als, 1975):

- A. Procédés agrotechniques
- B. Restauration des forêts
- C. Procédés hydrotechniques

L'impact des principales mesures anti-érosives est discuté ci-dessous. Pour une information plus détaillée, le lecteur se reportera aux ouvrages de base déjà mentionnés.

4.1.2 Procédés agrotechniques

Les procédés agricoles sont de deux sortes : procédés généraux et procédés spéciaux.

Un des procédés agrotechniques les plus efficaces est le choix de cultures adaptées, en tenant compte de leur capacité à protéger le sol. Beaucoup de cultures annuelles peuvent être la cause de l'érosion ou la faciliter, tandis que les herbes pérennes protègent de l'érosion (cf. 1.1). Les herbes forment une couche fixant le sol, restaurant sa structure, améliorant la capacité d'absorption et réduisant l'érodibilité. Une autre méthode de protection consiste à cultiver selon des directions perpendiculaires à l'écoulement, parallèles aux courbes de niveau. Le labourage selon les courbes de niveau, que l'on peut combiner avec les cultures en bande (cultures zonales) est une méthode efficace de lutte contre l'érosion pour des pentes ne dépassant pas 2 ou 3 degrés (fig. 4.1). Le labourage descendant à travers les courbes de niveau n'est pas une méthode satisfaisante dans les zones à système d'eaux saisonnier ou occasionnel. Il se révèle particulièrement dangereux dans les régions où on observe de violentes averses après des périodes de sécheresse (zones semi-arides). Aussi, le labourage en travers des courbes de niveau doit être limité aux régions où il n'y a que des problèmes d'érosion mineurs.

Une technique qui se répand largement dans le monde est l'utilisation de techniques culturales conservatives. Cette méthode, consistant à réduire les perturbations du sol ou à ne pas le retourner du tout, en retenant ainsi en surface les débris végétaux, aide à réduire l'érosion du sol. On désigne également ces pratiques par les termes suivants : labourage minimum, labourage en bande, culture sans labour, mulch avec chaume, etc... Elles correspondent en fait au travail minimum du sol nécessaire aux cultures (Highfill et Kimberlain, 1977).

L'usage rationnel des engrais sur les sols érodibles stimule la croissance des plantes, y compris de leur système racinaire, ce qui contribue aussi bien à protéger le sol qu'à obtenir de forts rendements. Dans les régions où l'humidité du sol est suffisante mais irrégulière, il est judicieux d'utiliser des engrais azotés et phosphatés sur les sols érodés. Dans les zones sèches (régions arides ou semi-arides, chaudes ou froides), on doit utiliser les engrais conjointement avec des méthodes culturales favorisant l'économie de l'eau (dryfarming). Lorsque cela est possible, on doit aussi entreprendre des travaux pour la rétention de l'eau et pour restaurer les forêts.

Dans les régions à forte accumulation hivernale de neige, l'écoulement des eaux de la fonte des neiges peut entraîner une sérieuse érosion, réduisant la couche de terre arable et diminuant la fertilité. Ainsi, les mesures préventives, comprenant la rétention de la neige et le contrôle de la fusion, sont d'une grande importance. Il existe différentes méthodes de rétention telles que l'installation de barrières de neige dans les champs, la formation de levées de neige, la plantation de ceintures protectrices et la compaction de la neige molle. On doit adapter les méthodes aux conditions locales. Dans les régions où les chutes de neiges sont modérées, la rétention de la neige se fera surtout à l'aide de ceintures protectrices d'arbres ou de buissons, tandis que dans les régions de neige abondante on emploiera des méthodes mécaniques telles que le labourage de la neige et sa compaction.

Les méthodes agrotechniques spécialisées de protection contre l'érosion consistent surtout en procédés de culture appropriés pour retenir l'eau. On a indiqué plus haut qu'on parvient à une bonne rétention en eau en travaillant le sol selon les courbes de niveau ou en utilisant des techniques entraînant une perturbation minimum des sols.

Le travail selon les courbes de niveau est réservé aux pentes douces et aux régions de pluie modérée. Sur des terrains plus pentus et dans les régions où il peut se produire de fortes crues brutales, l'eau de ruissellement peut être retenue par des cultures en bande associées à des travaux de terrassement (banquettes, fossés, etc...) (voir figures 4.2). Les autres procédés spéciaux comprennent des fossés de rétention, des levées de terre, des fossés de diversion ou d'écoulement des eaux d'orage, des chenaux d'évacuation des eaux de drainage, des dispositifs de stabilisation des ravines, etc... (cf. 4.1.4 et FAO, 1976c). L'ameublissement profond des sols conservant le mulch en surface est aussi pratiqué pour réduire l'érosion.

4.1.3 Restauration des forêts

Lorsque la reforestation est possible, c'est un moyen efficace de conservation des sols. Les différents types de plantation ci-après sont particulièrement importants :

- 1) Ceintures forestières sur les terres agricoles pour régulariser le ruissellement, améliorer l'infiltration et protéger de l'érosion éolienne;
- 2) Bandes de forêt et bouquets d'arbres à l'intérieur du réseau hydrographique (dessin des chenaux d'écoulement) le long des ravines pentues et des vallées soumises à une forte érosion.

Les ceintures forestières protègent les sols de différentes façons. Elles réduisent la vitesse du vent et améliorent le micro-climat; elles contribuent à la rétention de la neige, réduisent l'écoulement et accroissent l'humidité du sol. Les forêts réduisent ainsi les effets des facteurs de l'érosion. Le rôle anti-érosif des ceintures forestières a été décrit en détail par Armand, 1961; Basov, 1963; Kharitonov, 1950; Loudermilk, 1930; Surmach, 1971, FAO, 1976b, etc...

Les ceintures forestières sont très efficaces lorsqu'elles sont plantées en lignes perpendiculaires au ruissellement (le long des courbes de niveau). L'écoulement peut alors être dispersé et l'infiltration favorisée. Cependant, une mauvaise disposition des ceintures forestières peut être la cause d'une intensification du ruissellement et de la formation de nouvelles rigoles et ravines.

Les plantations forestières anti-érosives dans le réseau hydrographique doivent être planifiées et réalisées en tenant compte de conditions locales, c'est-à-dire de la forme des berges, des processus réels d'érosion, des glissements de terrain, du relief, de la nature des sols et du couvert végétal.

4.1.4 Procédés hydrotechniques

Les procédés hydrotechniques de protection comportent certains types de structures et ne sont utilisés que si cela se justifie économiquement, ou si d'autres procédés se sont révélés inefficaces. Ces procédés comprennent les fossés d'infiltration avec banquettes, les barrages de rétention avec de grandes surfaces de retenue, des terrasses le long des courbes de niveau, des ouvrages de retenue et de diversion au sommet des ravines, différents types d'épandeurs de crue, des terrasses et des dispositifs de stabilisation de l'écoulement.

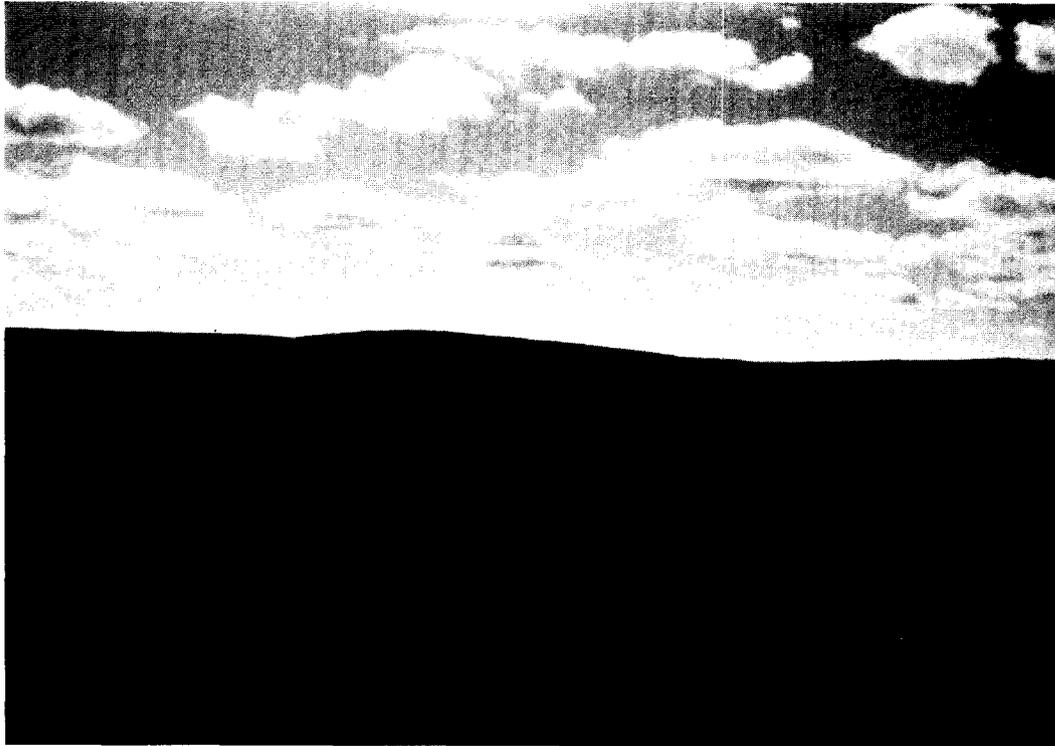


Fig. 4.1 Protection contre l'érosion des terres arables par des cultures en bandes dans le bassin du Missouri, Dakota du Nord, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U., 1965).



Fig. 4.2 Terrasses avec talus enherbés dans le Minnesota, E.U. (U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1977).



Fig. 4.3 Défense contre l'érosion par retenue de stockage sur la Twenty-Mile Creek près de Douglas, Wyoming, E.U. (Bureau of Reclamation, E.U., 1965).

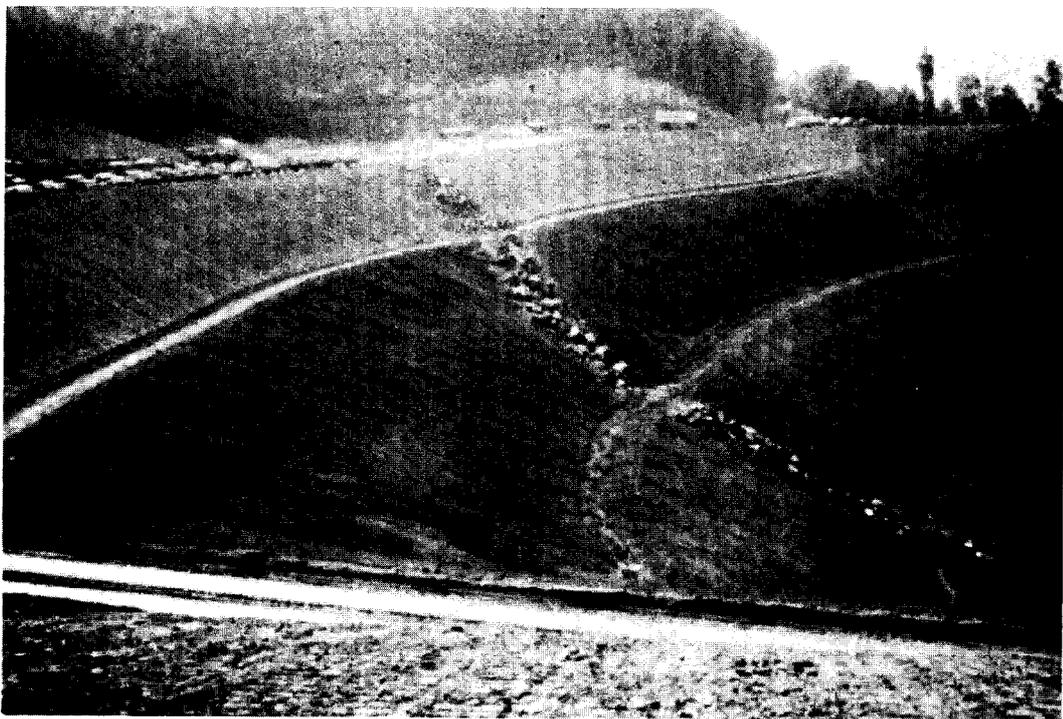


Fig. 4.4 Protection contre l'érosion par remblaiement de vallée, fossés de diversion et drain en enrochement dans une zone minière du Logan Country, Virginie de l'Ouest (U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1977).

On peut utiliser les fossés d'infiltration avec banquettes quand il est nécessaire d'arrêter ou d'empêcher la formation de ravines et de stopper l'érosion des sols sur de fortes pentes. Les barrages correcteurs recommandés pour la rétention des sédiments et de l'écoulement fluvial ou de fonte des neiges sur des pentes érodées sont largement utilisés aux Etats-Unis dans les zones à fortes pentes où l'érosion pluviale est très forte (figure 4.3).

Diversions et épandage de l'écoulement sont des techniques efficaces pour empêcher la formation et le développement des ravines; Un épandeur peut comporter un talus de 0,4 à 0,6 mètres de haut et un sillon de diversion. Diffuseurs et épandeurs peuvent être situés à différents emplacements sur un cours d'eau, l'écoulement étant détourné et l'eau répandue et en partie absorbée. De cette façon, l'écoulement perd la plus grande partie de son pouvoir érosif dans le bief à l'aval du diffuseur.

On détourne souvent l'écoulement à l'aide de fossés artificiels. Afin d'éviter l'érosion par les eaux détournées, on utilise divers types de dissipateurs d'énergie tels que revêtement de roches non érodibles, seuils ou barrages de contrôle stabilisateurs.

Pour définir les caractéristiques de tels ouvrages, le lecteur se reportera aux manuels techniques et aux précis de construction cités en référence.

Afin d'empêcher la progression ultérieure des ravines il faut les stabiliser en détournant l'écoulement à leur entrée. On peut utiliser diverses méthodes pour éviter la progression rapide d'une ravine, à savoir canalisations et déversoirs de crue (Brande, 1959; Sus, 1949 et FAO, 1976c). L'aplanissement des têtes de ravines est une méthode simple de stabilisation. On enlève une partie du sol en tête de ravine et on adoucit la pente jusqu'à une inclinaison de 4 à 6°. L'emplacement est alors protégé avec des herbes pérennes, du gazon, etc... Si nécessaire, on peut utiliser un enrochement non érodible ou d'autres matériaux de ce genre. Les canaux à forte pente sont plus complexes et plus coûteux mais en général plus efficaces comme moyen de stabilisation. Dispositifs d'arrêt ou barrages peuvent être indispensables dans les parties à forte pente des ravines ou lorsqu'il est difficile de mettre en place une couverture végétale. Les déversoirs sont des dispositifs nécessitant des calculs hydrauliques précis, une construction plus soignée et une surveillance systématique. On les utilise en général conjointement avec des barrages dans les ravines et des plantations forestières ou des enherbages. Sur très forte pente, les déversoirs peuvent aussi être constitués de drains en enrochements (figure 4.4).

4.1.5 Conclusions générales

L'utilisation faite des procédés agrotechniques, forestiers ou hydrotechniques varie selon les conditions locales, en accord optimum avec la régularisation du ruissellement, ce qui permet d'obtenir ainsi la diminution souhaitée de l'érosion dans les interfluves.

Les méthodes agrotechniques sont souvent les plus économiques, car on peut amortir la dépense rapidement, parfois en une seule année. La plantation de ceintures forestières nécessite un investissement initial plus important et cela peut prendre des années avant qu'on obtienne une protection efficace du sol. Les sommes investies dans les dispositifs hydrauliques, plus coûteux, sont normalement amorties après un temps plutôt long. Dans la plupart des cas, il est difficile, voire impossible, de prévoir les bénéfices matériels et économiques des différentes méthodes de protection des sols.

On constate en général que les dépenses de protection des pâturages ou des terres agricoles s'amortissent en trois ou quatre ans. Cependant, il faut observer que les durées d'amortissement varient dans des limites plutôt larges selon l'environnement et selon les investissements réalisés sur les sols protégés. Quand l'économie d'une région est fondée principalement sur l'agriculture, la priorité pour une protection à long terme des sols et pour l'accroissement des rendements agricoles l'emporte sur tout. L'efficacité des dispositifs de protection varie aussi beaucoup selon la gravité du problème et selon la méthode ou les méthodes choisies. Les expériences des autres et les enseignements que l'on peut tirer de leurs succès ou de leurs échecs sont en général très utiles pour orienter le choix des procédés de protection des sols. Certains procédés, pris isolément, peuvent paraître sans intérêt économique mais, associés à un ensemble de mesures, ils peuvent être utiles ou presque nécessaires.

4.2 LES COURS D'EAU

Erosion, transport solide et dépôts sont des phénomènes naturels permanents dans les cours d'eau. Dans le haut des bassins, les cours d'eau sont pentus et les vitesses sont élevées. Matériaux grossiers et galets caractéristiques de ces cours d'eau se déplacent vers l'aval au cours des crues et simultanément il se produit une érosion locale, des apports latéraux et un creusement général du chenal considéré. Plus à l'aval, le creusement naturel du lit s'atténue, mais les berges sont vulnérables à l'érosion. Les différences de résistance conduisent à des modifications localisées du réseau hydrographique, les chenaux peuvent s'élargir ou se réaligner. Durant les

crues, les cours d'eau peuvent dépasser la capacité de leur lit majeur et l'écoulement se répand dans les plaines d'inondation adjacentes. Erosion et dépôts se produisent d'une manière largement imprévisible et aléatoire; plus à l'aval encore, on observe des phénomènes d'écoulement réversibles et de remontées salines dans les estuaires et les mouvements des sédiments peuvent être la cause de changements majeurs dans les canaux multiples constituant le système global d'écoulement. Généralement, les berges ne sont pas érodées par l'écoulement dans ces biefs inférieurs, mais elles peuvent subir l'assaut des vagues.

L'érosion du réseau hydrographique est souvent la cause de difficultés et de pertes financières. Aussi est-il nécessaire de rechercher des moyens de protection contre l'érosion. On trouvera ci-après un bref résumé des méthodes disponibles. Il n'y a pas de méthode universelle et l'on doit tenir compte de nombreux facteurs, notamment du prix et de la disponibilité sur place des matériaux de construction ainsi que des risques encourus. Keown, M.P. et al. (1977) et California Highway Department (1970) donnent une classification des ouvrages de protection selon leur fonction. D'autres critères de classification peuvent être employés tels que la nature des matériaux de construction ou la forme des ouvrages. Nous avons retenu ici comme critère la fonction des ouvrages.

Revêtement de surface des berges : Le mode de protection des berges le plus courant est la mise en place d'un revêtement de protection fait d'un matériau résistant à l'érosion comme les enrochements, le béton, etc... et déposé directement sur le talus de la berge, nécessitant en général une protection au pied de la berge sous l'eau. On peut subdiviser ces revêtements en plusieurs types : rigide, flexible et auto-ajustable.

Rigide	: Béton armé Béton simple Dalage Gunité Maçonnerie Roches maçonnées Ouvrages en briques
Flexible	: Végétation naturelle (voir figure 4.5) Blocs articulés Gabions Treillis en fils de fer (voir figure 4.6) Treillis de branchages Treillis en matière synthétique Bitume
Auto-ajustable	: Roches naturelles (enrochement) (voir figure 4.7) Béton brisé Structures préfabriquées (blocs, prismes, tétrapodes, chevalets, etc...) Epaves de voitures

Freinage de l'écoulement : On peut obtenir un freinage de l'écoulement en mettant en place des structures perméables parallèlement à la base des berges. La diminution, localement de la vitesse réduit les risques d'érosion et facilite, lorsque les conditions sont favorables, le dépôt des sédiments et la croissance de la végétation le long des berges. Les ouvrages de ce genre comprennent les dispositifs suivants :

- Tetraedres d'acier
- Tetraedres de béton
- Chevalets en bois (voir figures 1.16)
- Chevalets en acier
- Palissades
- Alignement de poteaux

Guidage de l'écoulement : Jetées, épis ou chicanes sont souvent employés pour écarter courants et vagues des zones sensibles. La déflexion du courant modifie les processus de transport des sédiments et l'effet habituel est la formation de dépôts le long des berges menacées. On peut utiliser des structures perméables ou imperméables. Les meilleurs renseignements sur l'espacement, l'angle avec la rive et la pente sont donnés dans des ouvrages déjà cités et aussi par ASCE (1975) :



Fig. 4.5 Végétation naturelle protégeant les rives de la WYRE (Royaume-Uni).
Photo F. Charlton, HRS, 1975. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).



Fig. 4.6 Treillis de fil de fer avec alignements de cailloux intermittents assurent la protection de cours d'eau à fortes pentes à la Jamaïque. La croissance de la végétation est favorisée à travers le treillis, ce qui renforce la stabilité de la berge tout en réduisant localement la vitesse. Photo W.R. White, HRS, 1972. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).



Fig. 4.7 Des rochers à l'état brut protègent contre les vagues le parement amont du barrage d'El Chocon, Argentine. Photo W.R. White, HRD, 1973. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).



Fig. 4.8 Palissades protégeant des chenaux de drainage près du lac de Bolgoda, Sri Lanka. Photo P. Waite, HRS, 1978. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).



Fig. 4.9 Matelas de gablons protégeant la base des berges le long de la rivière Yallahs, Jamaïque. Photo W.R. White, HRS, 1972. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

Structures perméable	: Alignement de poteaux en bois Chevalets d'acier ou en bois Tetraedres d'acier ou de béton Gravats Plateforme de bois
Structures imperméables	: Palissade continue de bois ou d'acier (voir figure 4.8). Digues en terre ou en enrochement avec ou non un revêtement (voir figure 1.15)

Protection au pied des berges : Dans certains cas, les berges naturelles peuvent avoir une stabilité et une résistance suffisantes à l'érosion si l'on peut éviter les sapements à la base. On y parvient à l'aide de techniques variées :

Poteaux d'acier ou de bois
Murs de béton ou en maçonnerie
Gabions ou couverture de gabions (voir figure 4.9)

Aménagements hydrauliques : Les barrages modernes et autres ouvrages hydrauliques sont souvent de très grande taille, nécessitant la maîtrise de débits très élevés sous une forte charge. On doit mettre en place des dispositifs efficaces pour dissiper l'énergie des écoulements à grande vitesse pour empêcher des affouillements indésirables du lit à l'aval de l'ouvrage. Les dispositifs de dissipation de l'énergie utilisent les frictions externes entre eau et lit ou entre eau et air, ou les frictions internes et la turbulence (voir Bureau of Reclamation, 1974). L'énergie cinétique est transformée en turbulence et finalement en chaleur. On utilise couramment les dispositifs suivants :

Bassins de tranquillisation : Ce sont des ouvrages où l'on dissipe l'énergie. Ils sont disposés au pied des chutes ou déversements afin de dissiper l'énergie avant que l'eau rejoigne à l'aval le lit naturel du cours d'eau. Les bassins peuvent avoir une forme rectangulaire simple ou bien conique et sont éventuellement munis de redans, de déflecteurs et autres dispositifs annexes.

Sauts de ski et dissipateurs des barrages voûtes : Ces ouvrages utilisent l'air pour dissiper l'énergie. L'eau est projetée en l'air soit à travers un orifice du barrage voûte ou par l'extrémité profilée d'un déversoir. Dispersion de l'eau et dissipation de l'énergie se produisent avant que l'eau projetée n'atteigne le lit non protégé du cours d'eau. Dans certains cas, il peut être nécessaire de placer de gros rochers anguleux ou d'autres dispositifs pour empêcher l'érosion du lit.

REFERENCES

- Armand, D.L. 1961. Tiziko-geograficheskoe osnovy proektirovaniya seti polezaschitnykh lesnykh polos (Physiographic basis of projecting forest belt network). Moscow, Izd-vo AN AAR, p.367.
- Armand, D.L. 1972. (ed.) Regionalnaya sistema protiverozionnykh meropriatii (Regional system of anti-erosion arrangements). Moscow, p.544.
- U.F.; Grishchenko, N.M. 1963. Gidrologicheskaya rol lesnykh polos (Hydrological role of forest belts). Moscow, Goslesbumizdat, p.201.
- Belotserkovsky, M.Y.; Larionov, G.A. 1973. Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti pochvozaschitnykh meropriatii pri razrabotke generalnykh schem. Iz sb: Otsenk: kartirovanie erozionno - opasnykh zemel i deflyatsionnykh zemel (Evaluation of economic efficiency of soil protection measures while developing general schemes. In: Evaluation and mapping of land subject to erosion and deflation). Moscow University, p. 356-359.
- Braud, I.D. 1959. Zakreplenie: osvoenie ovragov, balok: krufykh sklonov (Fixation and cultivation of ravines and gullies with steep slopes) Moscow, Selkhozgiz, p. 283.
- Bureau of Reclamation. 1974. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipations. Denver, Col., Engineering and Research Centre. Engineering monograph 25.
- California Highway Department. 1970. Bank and shore protection in California highway practice. Sacramento, Calif., Department of Public Works, Division of Highways.
- Corps of Engineers. 1978. Interim Report to Congress. The streambank Erosion Control Evaluation and Demonstration Act of 1974. Waterways Experiment Station P.O.Box 631, Vicksburg, Mississippi 39180.
- FAO. 1976a. Hydrological techniques for upstream conservation. Rome, FAO, Conservation Guide 2.
- FAO. 1976b. Conservation in arid and semi-arid zones. Rome, FAO. Conservation Guide 3.
- FAO. 1976c. Soil conservation for developing countries. Rome, FAO. Soils Bulletin 30.
- Highfill, R.E.; Kimberlin, L.W. 1977. Current soil erosion and sediment control technology for rural and urban lands. In: Soil erosion and sedimentation. American Society of Agriculture Engineers. (Publication 4-77).
- Keown, H.P., et al. 1977. Literature survey and preliminary evaluation of stream bank protection methods. U.S. Waterways Experiment Station, May. (Report TR-H-77-9).
- Kharitonov, G.A. 1950. Wodoreguliruishchaya : protiverozionnaya rol lesa v usloviakh lesostepei (Water regulating and anti-erosion role of forest in the forest-steppe conditions). Moscow-Leningrad, Goslesbumizdat, p.76.
- Kozmenko, A.S. 1954. Borba s eroziei pochv (Soil erosion protection). Moscow, Selkhozgiz, p. 229.
- Loudermilk, W.C. 1930. Influence of forest litter on runoff, reclamation and erosion. J.Forestry, vol. 28, no.4.
- Regionalnye sistemy protiverozionnykh meropriatii (Regional systems of anti-erosion measures) 1972. Moscow, Izd-vo "Mysl", p. 544.
- Skatchkov, I.A. 1965. Erozia potchv : borba s neiu (Soil erosion and soil protection).Voronzh.
- Soil Conservation Service. 1975. Engineering field manual for conservation practices. Washington, D.C. Soil Conservation Service.
- Soil Conservation Service. 1977. National handbook of conservation practices. Washington D.C. Soil Conservation Service.
- Stewart, B.A. et al. 1975. Control of water pollution from cropland, vol.1. Washington, D.C. Environmental Protection Agency.
- Surmach, G.P. 1971. Vodoregulirujuchaja : protiverozionnaia rol nasazhdenii (Water regulating and anti-erosion role of plantings). Moscow, Lesnaya promyshlennost, p. 109.
- Surmach, G.P. 1976. Wodnaya erozia : borba s nei (Water erosion and protection against it). Gidrometeoizdat, Leningrad, p. 254.
- Sus, N.I. 1949. Erozia pochv : broba s nei (Soil erosion and protection against it). Moscow, Selkhozgiz, p. 350.

5 Études de cas

5.1 ETUDES DES PROCESSUS SEDIMENTAIRES DANS UNE ZONE TOPICALE HUMIDE A PORTO-RICO*

5.1.1 Introduction

Porto-Rico est une île tropicale qui s'étend entre 18°31' et 17°55' de latitude Nord, et entre 65°37' et 67°17' de longitude Ouest. Sa superficie est d'environ 8800 km². Elle a un paysage accidenté et montueux avec des sommets atteignant 1077 m d'altitude à l'Est et 1337 mètres à l'Ouest. Les hauteurs de pluie varient beaucoup dans l'île et sont d'origine orographique. La figure 5.1 présente une carte des isohyètes annuelles moyennes pour la période 1931 - 1960.

On a entrepris une étude des processus sédimentaires à Porto-Rico pour déterminer l'apport de sédiments dans une retenue en amont du barrage projeté à Toa Vaca sur la rivière Toa Vaca, à l'amont de la retenue existante de Guayabal (voir figure 5.2). L'objectif poursuivi était de déterminer la masse de sédiments déposés en cent ans dans la retenue projetée, afin de connaître le volume utile et de dimensionner le réservoir pour fournir l'eau nécessaire aux irrigations. Dans ce cas, le volume de stockage nécessaire était de 28,4.10⁶m³.

L'étude faite pour la retenue de Toa Vaca et présentée ici a été menée par le Bureau of Reclamation (1967). On a commencé la construction du barrage en 1969 et on l'a terminé en 1971 (Figure 5.3). Il n'y a pas eu jusqu'à ce jour de relevés dans la retenue pour vérifier les résultats de l'étude (1980); cependant on a établi des projets de mesure dans le barrage dans le but de faire cette vérification.

5.1.2 Données sur les sédiments

On a recueilli les données nécessaires pour calculer les apports de sédiments au barrage projeté de Toa Vaca par deux méthodes différentes. Ces deux méthodes sont : (1) L'établissement d'une courbe de tarage pour les sédiments en suspension à partir de 59 échantillons variés et (2) la détermination des apports de sédiments dans le Rio Toa Vaca en utilisant les résultats des relevés faits sur des retenues existantes dont la retenue de Guayabal à l'aval.

5.1.3 Méthode de la courbe de tarage des sédiments

On a recueilli les échantillons de transport en suspension sur le Rio Toa Vaca près de Villalba, qui est proche du site du barrage, d'Octobre 1963 à Novembre 1967. On a reporté les points correspondants aux 59 échantillons et une courbe de tarage calculée sur la figure 3.18. La courbe de tarage des sédiments en suspension, combinée avec une courbe des débits classés (figure 5.4) fournit en résultat une masse des sédiments en suspension transportés annuellement de 30 100 tonnes. La charge de fond à la station de mesure près de Villalba se limite au mouvement de sable, graviers grossiers et galets pendant les crues. Dans le bief du cours d'eau, près de la station de mesure, une portion du lit présente des roches nues. Les matériaux grossiers dominant au fond et le sable en suspension, on peut estimer correctement la charge de fond à 25% de la charge en suspension.

Le transport total, 37 600 tonnes par an, tel qu'il est calculé dans le table 5.1, corres-

* Les données de base de cette étude de cas ont été fournies par E.L. Pemberton, U.S. Department of the Interior, Denver, Etats-Unis.

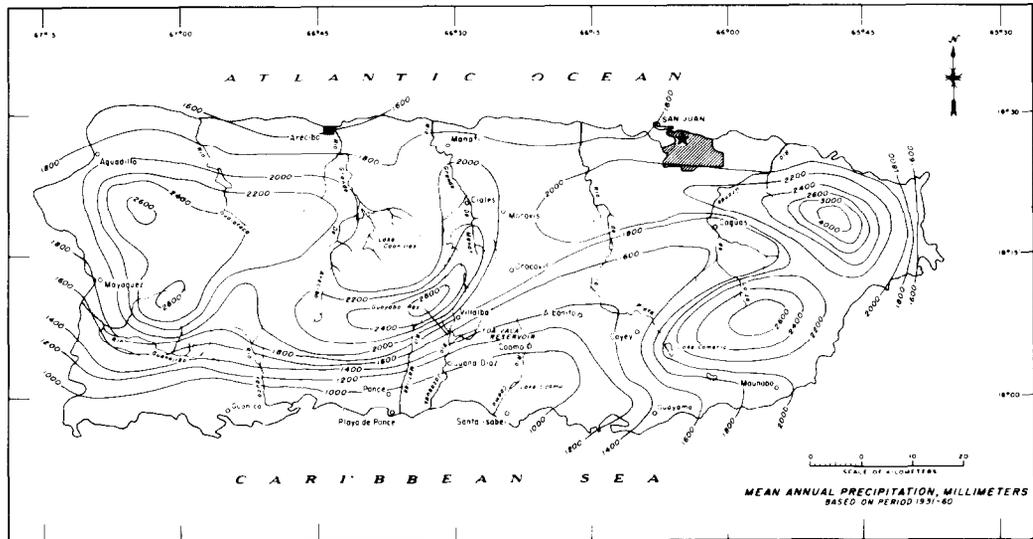


Fig. 5.1 Isohyètes annuelles de Porto Rico (Bureau of Reclamation, Etats-Unis).

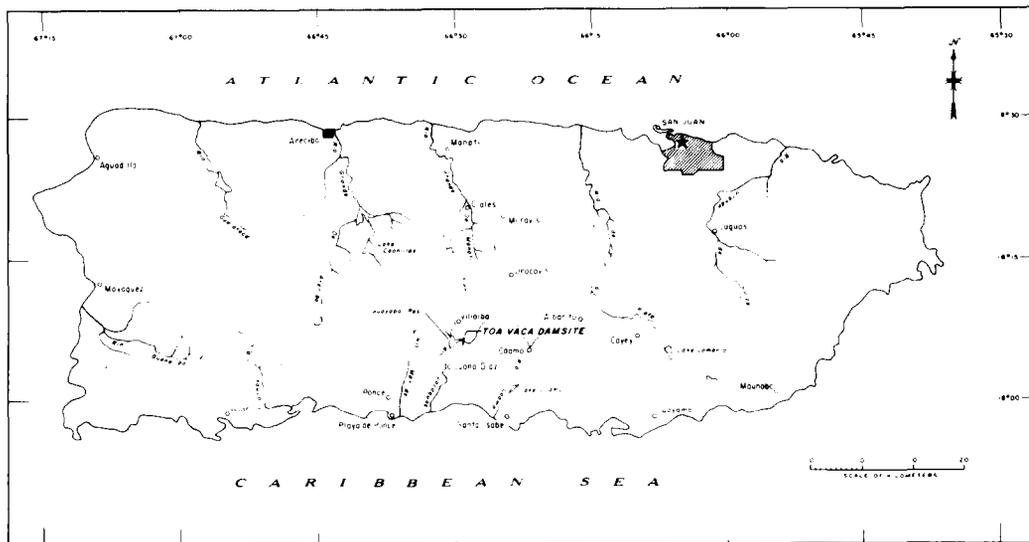


Fig. 5.2 Ile de Porto Rico avec les emplacements du site du barrage de Toa Vaca et les retenues ayant fait l'objet de relevés des dépôts de sédiments (Bureau of Reclamation, Etats-Unis).

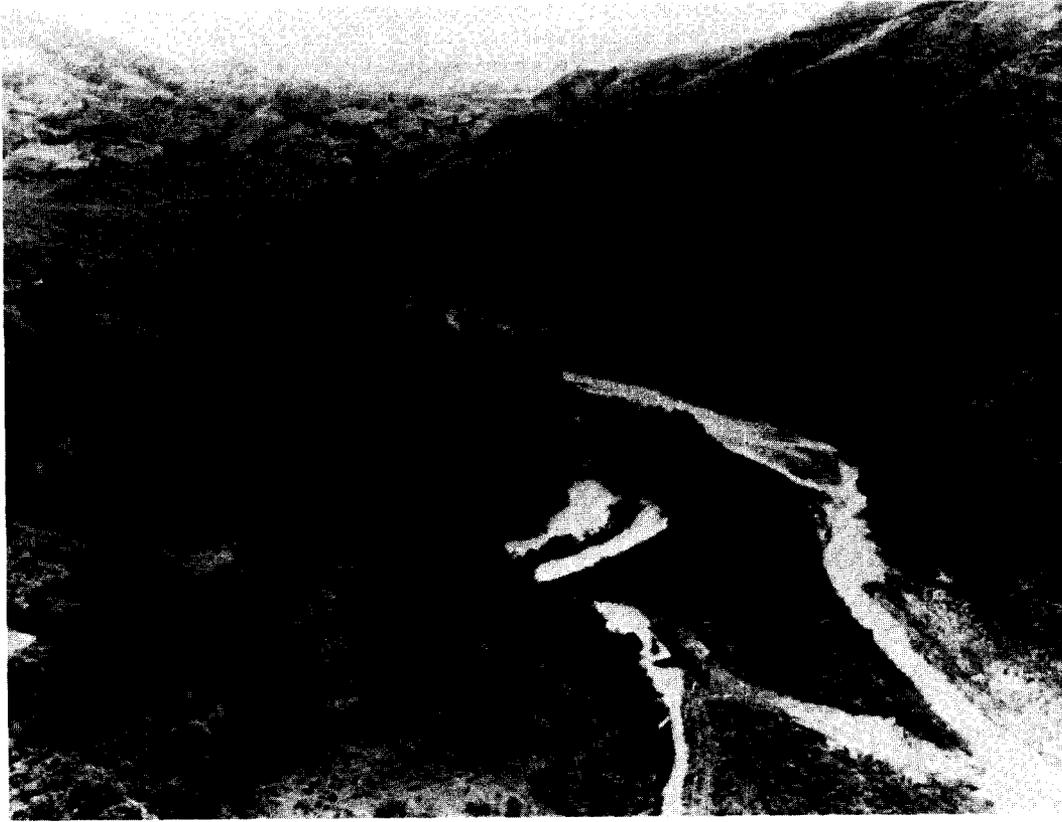


Fig. 5.3 Site du barrage et de la retenue de Toa Vaca (Bureau of Reclamation, Etats-Unis, 1969).

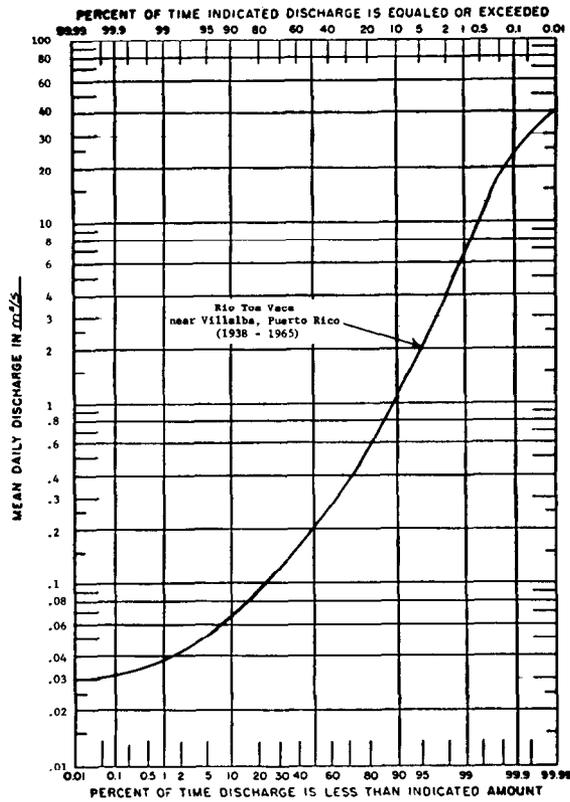


Fig. 5.4 Courbes des débits classés du Rio Toa Vaca de Villalba, Porto-Rico (Bureau of Reclamation, Etats-Unis).

pond à un apport spécifique de 650 tonnes par kilomètre carré et par an pour un bassin versant de 58 km². McHenry et Hawks (1965) ont déterminé une masse volumique de 880 kg/m³ pour les sédiments déposés à partir des échantillons prélevés dans la retenue de Guayabal à l'aval. Cette masse volumique a été utilisée pour convertir en volume la masse des sédiments transportés. Calculée par la méthode de la courbe d'étalonnage des débits solides, l'accumulation de sédiments dans la retenue projetée à Toa Vaca atteindrait 4,3.10⁶m³ en 100 ans.

5.1.4 Méthode par relevés de retenues :

Plusieurs retenues ont fait l'objet de relevés dans le centre de l'île de Porto-Rico avec les résultats respectifs suivants :

Retenue	Ancienneté au moment des relevés (ans)	Surface du bassin versant (km ²)	Apports de sédiments (m ³ /Km ² .an)
CAONILLAS	4,3	127	614
COAMA	34,0	124	887
COMERIO	21,0	350	1130
GUAYABAL	50,0	112	1850

La figure 5.5 présente la variation de ces apports en fonction de la superficie des bassins versants. Si on utilise la même masse volumique et si on trace une droite parallèle à celle de la figure 3.16, la relation apport solide-superficie du bassin versant serait à Porto-Rico :

$$Q_s = 3901 A^{-0,24}$$

Avec Q_s = apport de sédiment (m³/Km²;an)

A = superficie du bassin versant (Km²)

Cette relation appliquée au bassin versant du Rio Toa Vaca, en amont du barrage projeté (58 km²), donnerait un apport de 1470 m³/Km².an.

Avant d'admettre ce résultat, il est important d'examiner les caractéristiques des transports de sédiments dans les bassins versants des retenues utilisées aussi bien qu'à l'amont du site de Toa Vaca. Une reconnaissance de terrain fournit les éléments de comparaison des facteurs principaux de l'érosion et du transport des bassins versants tels que :

(1) Géologie de surface, (2) Sols, (3) Climat, (4) Ecoulement, (5) Topographie, (6) Couverture du sol, (7) Occupation des terres, (8) Erosion des parties hautes, (9) Erosion du lit et transport solide.

Ces facteurs sont estimés de façon à comparer les apports de sédiments dans les retenues étudiées avec ceux des bassins versants à l'amont des sites étudiés. Une carte de localisation des zones à comparer et une carte des isohyètes moyennes de Porto-Rico sont présentées par les figures 5.1 et 5.2. On doit ajouter à la liste ci-dessus un facteur complémentaire, à savoir les changements des méthodes de cultures ou de l'occupation des sols. On pense que toutes les données fournies par les réservoirs correspondent à des périodes de cultures intensives. Beaucoup de ces zones de cultures ont été transformées en pâturages. Un autre changement qui apparaît maintenant dans beaucoup de bassins versants est celui qui est lié à l'urbanisation. On construit nombre de nouvelles maisons et on trace de nouvelles routes aux flancs des collines. Tout cela est la cause d'une érosion très forte observée au début, résultats que l'on doit réduire avec l'amélioration éventuelle de la couverture du sol. La figure 5.6 donne un aperçu de l'occupation des sols et de la couverture végétale sur le Rio Toa Vaca.

Géologie de surface : La géologie de surface joue un rôle notable à Porto-Rico du fait de l'érosion des roches tendres. On observe sur les bassins versants une prédominance des tufs, des limons consolidés et des grès qui forment la couche géologique de surface. La seule différence notable entre les bassins versants, c'est l'existence de granites en amont de la retenue de CAONILLAS. L'altération de ces roches granitiques a pour résultats une augmentation de la proportion de sables dans ce bassin.

Tableau 5.1 - Calcul des charges en sédiments du Rio Toa Vaca près de Villalba, Porto Rico

Projet : Porto Rico Retenue : Toa Vaca
 Cours d'eau : Rio Toa Vaca Section :
 Période d'observation de l'écoulement : 1938-1965 Sédiments:1963-1967 Date: Mai 1968

1	2	3	4	5	6	7
BORNES %	INTERVALLE	MEDIANE	Q_w (m ³ /s)	Q_s (ton./jour)	$\frac{\text{Col.2} \times \text{Col.4}}{100}$	$\frac{\text{Col.2} \times \text{Col.5}}{100}$
0.00 - 0.02	0.02	0.01	40.0	30315	0.008	6.063
0.02-0.1	0.08	0.06	29.4	17707	0.024	14.166
0.1 -0.5	0.4	0.3	17.5	7156	0.070	28.624
0.5 - 1.5	1.0	1.0	7.1	1480	0.071	14.800
1.5 - 5.0	3.5	3.25	3.27	382	0.114	13.370
5 - 15	10	10	1.25	54.7	0.125	5.470
15 - 25	10	20	0.59	0.534	0.059	0.053
25 - 35	10	30	0.40	0.049	0.040	0.005
35 - 45	10	40	0.30	0.008	0.030	0.001
45 - 55	10	50	0.23	0.002	0.023	_____
55 - 65	10	60	0.18	_____	0.018	_____
65 - 75	10	70	0.13	_____	0.013	_____
75 - 85	10	80	0.10	_____	0.010	_____
85 - 95	10	90	0.068	_____	0.007	_____
95 - 96.5	3.5	96.75	0.048	_____	0.002	_____
98.5 - 99.5	1.0	99.0	0.038	_____	_____	_____
99.5 - 99.9	0.4	99.7	0.034	_____	_____	_____
99.9 - 99.98	0.08	99.94	0.030	_____	_____	_____
99.98 - 100	0.02	99.99	0.030	_____	_____	_____
Total					0.614	82.552

Calculs :

Charge annuelle de sédiments en suspension :

$$Q_s \text{ (annuel)} = Q_s \times 365 = 82,552 \times 365 = 30100 \text{ tonnes/an.}$$

Charge annuelle totale de sédiments :

$$\text{Total} = 30100 \times 1,25 = 37600 \text{ tonnes (voir 5.1.3).}$$

Concentration :

$$Q \text{ (annuel)} = Q_w \times 3,154 \times 10^7 = 0,614 \times 3,154 \times 10^7 = 1,936.10^7 \text{ m}^3/\text{an.}$$

$$C = Q_s / (Q_w \times 0,0864) = 82,552 / (0,614 \times 0,0864) = 1560 \text{ mg/l}$$

Sols : Les sols sont très variables sur les bassins versants. L'altération des matériaux de surface indiqués ci-dessus a produit des sols très limoneux et un peu argileux. Malgré ces variations des sols, il n'y a pas de différence fondamentale qui puisse influencer de façon notable sur l'érosion des sols.

Climat : Les pluies annuelles dans la région centrale de Porto-Rico varient de 1500 mm à près de 2800 mm. Les averses d'orages sont de très courte durée et très intenses. Bien que, comme on peut le voir sur la figure 5.1 représentant les isohyètes, il y ait quelques variations de la pluie, cela ne paraît pas influencer beaucoup sur l'érosion.

Écoulement : Du fait des très fortes averses de grande intensité auxquelles sont soumis les bassins versants, on observe des écoulements importants. Bien que certaines puissent avoir des débits spécifiques plus importants, cela n'a guère d'influence sur les apports solides des bassins comparables.

Topographie : Presque toutes les zones considérées sont des terrains extrêmement pentus qui portent soit des cultures, soit des pâturages et des exploitations forestières. Certaines de ces pentes cultivées atteignent en moyenne 50%. Dans les champs de tabac, les pentes varient de 70 à 120%. Pour la Coamo et le Rio Toa Vaca, à des altitudes plus basses, il y a des différences notables. Par exemple, dans la partie la plus basse du bassin versant du Rio Toa Vaca, il y a davantage de collines ondulées, actuellement utilisées pour la culture de la canne à sucre.

Couverture du sol : Dans cette partie centrale de Porto-Rico, la couverture du sol varie avec les pratiques culturales. Dans les bassins de l'ouest, il y a très peu de terres cultivées, les grandes futaies et les zones forestières prédominent. Il y a quelques plantations de bananiers et de citronniers. Dans certaines parties du bassin de Plata, on estime que 60% des terres sont couvertes de futaies ou d'herbages, 20% de bananiers et de citronniers et les 20% restants, de patates douces ou de tabac. La différence des couvertures du sol des bassins versants, essentiellement le pourcentage des terres sous cultures, est un facteur important pour la production de sédiments.

Occupation des terres : L'occupation des terres est en relation directe avec la couverture des sols comme indiqué dans la description préliminaire des facteurs. Les terres situées à l'est sont davantage cultivées avec quelques zones anciennement cultivées et maintenant utilisées comme pâturages. Dans la partie sud du bassin versant du Rio Toa Vaca, les hautes terres portent davantage de pâturages avec quelques plantations de caféiers et de tabac, mais la majeure partie de la zone collinaire plus basse est cultivée en canne à sucre. Les apports solides des bassins versants portant davantage de forêts et de pâturages sont nettement moins importants.

Erosion des hautes terres : La plus grande partie de l'érosion des flancs pentus des collines provient de l'érosion en nappe. Très peu de ravines ont été observées dans ces bassins versants où les sols prédominants sont des glaises argilo-limoneuses. On a noté quelques glissements de talus lorsqu'on a fait des tranchées pour des routes pentues et lorsque les sols contenaient une bonne proportion de sable. C'est sans doute dans certaines parties du bassin de Caonilla où les sols sont plus sableux que la plus forte érosion a été observée. Une reconnaissance de terrain plus détaillée serait nécessaire pour évaluer l'effet de ces zones sur les apports de sédiments.

Erosion du réseau hydrographique : Dans presque tous les chenaux observés prédominent les gros rochers ou les galets granitiques. On trouve des quantités notables de sables et graviers dans les affluents de la Caonillas au Nord et à l'Est et dans le Rio Toa Vaca au Sud. Il doit y avoir des transports de fond de ces sables et graviers dans les cours d'eau considérés.

5.1.4.1 Relevés de la retenue de Guayabal. Toute estimation des apports dans la retenue de Toa Vaca devra s'appuyer fortement sur les résultats des relevés faits en 1964 sur la retenue de Guayabal. Le barrage de Guayabal, construit en 1913, est situé à l'aval du site du barrage de Toa Vaca et contrôle un bassin versant de 112 km². Une perte de capacité de 8,85.10⁶m³ entre 1914 et 1964, due aux dépôts de sédiments, après correction pour les dragages effectués de 1940 à 1948 conduit, avec une efficacité du préageage des sédiments dans la retenue de 90%, à un apport annuel de 1850 m³/Km².

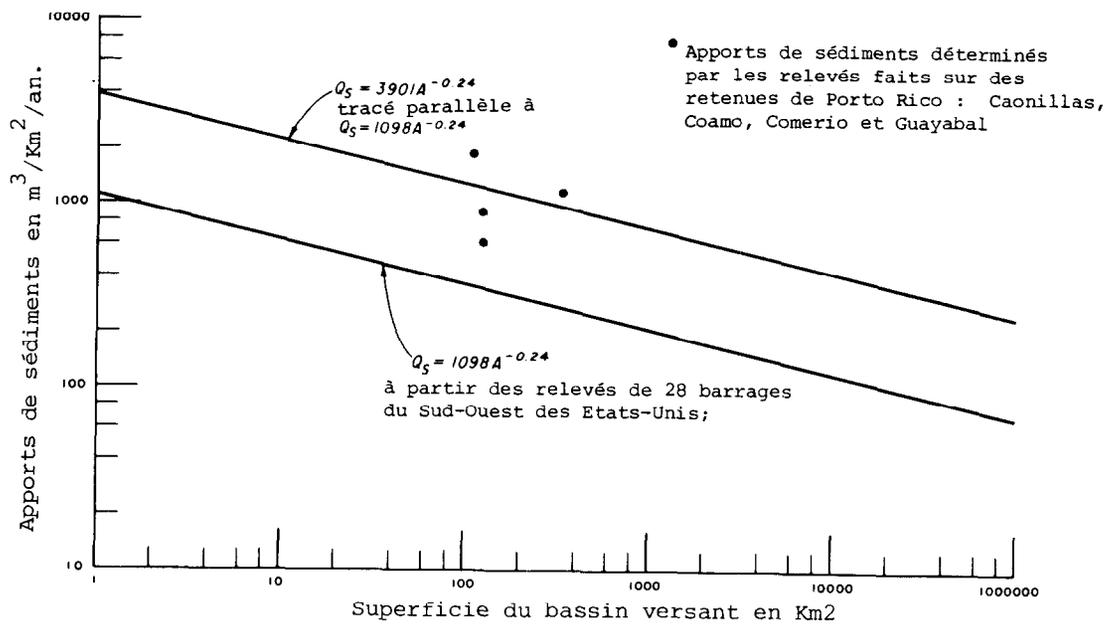


Fig. 5.5 Apports de sédiments d'après des relevés de retenues à Porto Rico (Bureau of Reclamation, Etats-Unis).



Fig. 5.6 Bassin versant du Rio Toa Vaca à l'amont du site de Toa Vaca. Photo W.M. Borland, 1962.

5.1.5 Conclusion

Les deux méthodes de base pour estimer les apports de sédiments en 100 ans, à la retenue de Toa Vaca, sont :

Méthode	Apports de sédiments en m ³ /Km ² .an
1. Par échantillonnage des débits solides	650
2. Par relevés de retenues	
a. Relation générale	1470
b. Retenue de Guayabal	1850

On a estimé les apports du bassin versant au site du barrage de Toa Vaca à 1620 m³/Km².an. Cette valeur a été déterminée en réduisant les apports à la retenue de Guayabal pour tenir compte d'un changement d'occupation des terres observé dans cette partie du bassin.

Une valeur quelque peu supérieure à celle basée sur les relevés faits en général sur les retenues de Porto Rico paraît justifiée par les caractéristiques observées des sédiments. La valeur provenant de l'échantillonnage des débits solides paraît anormalement faible, ce qui pourrait s'expliquer par un échantillonnage fait en basses eaux.

Calculée pour un apport annuel de 1620 m³/Km², le volume des sédiments déposés en 100 ans serait de 9,4.10⁶m³, valeur utilisée pour le choix de la capacité de la retenue.

5.2 PROBLEMES D'EROSION DES SOLS, DE TRANSPORT SOLIDE ET DE SEDIMENTATION LIES A LA CONSTRUCTION D'UNE RETENUE DE TAILLE MOYENNE DANS UNE ZONE SEMI-ARIDE*

5.2.1 Introduction

A Mtera, village de la Rift Valley dans l'Afrique de l'Ouest en Tanzanie, un barrage retenant les eaux de la Great Ruaha River est en construction. Le barrage doit être terminé en 1980. L'objectif principal de ce barrage est de retenir l'eau pour produire de l'électricité dans la centrale de Kidatu, 175 km à l'aval. Le barrage doit permettre de pousser la puissance de la centrale de 100 MW à 200 MW.

La Great Ruaha River est l'un des affluents de la Rufiji River qui vient juste après le Zambèze parmi les cours d'eau drainant la cote Est de l'Afrique. La superficie du bassin versant de la Great Ruaha River, en amont du site de Mtera, est d'environ 68 000 km². Il comprend trois sous-bassins, Great Ruaha, Little Ruaha et Kisigo, qui ont des régimes d'écoulement et de transport solide différents.

La retenue de Mtera est située dans une zone semi-aride. La hauteur de précipitation annuelle est plutôt faible, 450 mm concentrés dans la saison des pluies entre Novembre et Avril. La plus grande partie de la pluie tombe en Décembre et Janvier. La variabilité de la hauteur de pluie est grande et les précipitations surviennent souvent sous forme de violentes averses, provoquant un fort ruissellement et des crues brutales dans rivières et fleuves.

La végétation dans la région de Mtera comprend des forêts, des broussailles et des prairies. A l'origine, la végétation était adaptée au climat, au sol, à la topographie et aux processus géomorphologiques. Le paysage actuel cependant est fortement modelé par l'homme et ses activités. De nombreux animaux domestiques, principalement vaches et chèvres, ont sévèrement appauvri, et par endroit détruit, les prairies et les herbes constituant la couverture végétale. Les zones de sols nus prédominent en saison sèche.

Du fait de la platitude du terrain, le réservoir dans son ensemble sera plutôt peu profond et de grandes étendues autour de la retenue seront affectées par les variations du niveau de l'eau. Au plus haut niveau de la retenue, 698,5 mètres, la Ruaha River formera une retenue s'étendant approximativement sur 630 km². Le niveau le plus bas sera de 694,0 mètres avec une superficie du plan d'eau d'environ 240 km² seulement. De grandes étendues se transformeront alors en zones marécageuses sur le pourtour de la retenue durant des périodes plus ou moins longues au cours de l'année (voir figure 5.7).

* Les éléments de base pour cette étude de cas ont été fournis par le Dr. L. Stromquist, Département de Géographie Physique, Université d'Uppsala, Suède.



Fig. 5.7 Vue du bassin de Mtera et de la zone de la retenue projetée. A l'arrière plan il y a quelques grands baobabs. Des zones marécageuses étendues apparaîtront en bordure pendant les basses eaux. Photo L. Stromquist, 1976.

5.2.2 Programme d'étude

La création de la retenue de Mtera modifiera l'environnement du fait des interactions des différentes composantes de l'écosystème de la région, y compris les activités humaines. Afin de prévoir les impacts de la retenue sur l'environnement, on a entrepris une étude écologique de la région. Le programme comprend la cartographie de l'occupation des terres, des études sur l'érosion et la sédimentation dans les retenues, des études de la végétation, des forêts, de la faune, de la limnologie, des plantes aquatiques, des maladies endémiques, de la sociologie, ainsi que l'établissement de règles pour la planification à fins multiples. Les dernières études comprennent également une reconnaissance archéologique à cause de l'importance de la vallée du Rift pour l'étude de la Préhistoire.

Le programme d'étude des processus sédimentologiques est centré sur la détermination quantitative du taux d'érosion des sols et de la sédimentation dans la zone de la retenue et sur la mise en place de méthodes d'étude comparatives des conditions de l'érosion des sols après achèvement de la construction de la retenue. Il comprend les points suivants :

1. Reconnaissance des conditions actuelles de l'érosion des sols :
 - a) Cartographie du bassin versant en zones homogènes,
 - b) Cartographie géologique de la région de la retenue y compris l'évaluation des surfaces adjacentes à la retenue soumises à une forte érosion,
 - c) Pluviométrie, végétation et érosion des sols,
 - d) Description des processus actuels de l'érosion des sols par l'observation des conditions de terrain sous les arbres et les buissons comparativement avec les terres environnantes,
 - e) Utilisation de "perches d'érosion" pour étudier quantitativement le taux réel d'érosion.
2. Etude des transports de sédiments et estimation des futurs dépôts dans la retenue.

5.2.3 Cartographie par zones homogènes

La cartographie par zones homogènes consiste à subdiviser le terrain en régions où les caractéristiques physiques et les processus géomorphologiques sont, à divers points de vue, différents de ceux des régions voisines. C'est l'Organisation pour la Recherche Scientifique et Industrielle du Commonwealth (CSIRO) qui, la première, a utilisé cette méthode en Australie comme moyen de reconnaissance rapide de régions mal connues. Cette méthode a été ensuite utilisée par de nombreux pays, principalement en vue d'une prospective et d'une planification générale.

Toutes les données géologiques, géomorphologiques, pédologiques, climatiques et hydrologiques de la région de Mtera ont été relevées et analysées. La cartographie par zones homogènes a alors été fondée surtout sur des agrandissements de photos au 1/250 000 du satellite ERTS, chacune couvrant une surface de 160 km par 160 km (Images LANDSAT). L'interprétation des images de satellite a été complétée par celle de photos aériennes conventionnelles là où elles étaient disponibles, par une reconnaissance aérienne spéciale et par des contrôles sur le terrain.

Une division préliminaire a été faite à l'aide de ces images de satellite et les limites ainsi déterminées ont été précisées et contrôlées par l'interprétation des photos aériennes et par des études de terrain. Pour finir, on a réalisé une présentation cartographique des zones homogènes avec une notice explicative.

Selon les conditions locales, la superficie des zones homogènes varie de 10 à 100 km². Les cartes comprennent l'indication du type d'érosion réelle et de son taux et une estimation de l'érosion potentielle des sols après une modification éventuelle de l'occupation des terres après l'achèvement du barrage et de la retenue. On a également analysé l'importance relative des sous-bassins pour les apports de sédiments à la future retenue.

5.2.4 Carte géomorphologique de la région de la retenue

Une cartographie géomorphologique détaillée a été menée à bien à l'emplacement de la retenue et aux environs. Cette étude est basée sur la cartographie des zones homogènes comme ci-dessus, mais complétée par une photo-interprétation et des études de terrain plus soigneuses. Ces cartes définissent les principales unités géomorphologiques et les traits principaux : tectonique, sédiments, cônes de déjection, plaines alluviales argileuses (mbugas), cours d'eau transportant du sable, ravines, zones fortement érodées, etc... (figure 5.8). Les différents types d'occupation des sols et les aspects principaux sont définis d'après les formes du terrain, les matériaux (roches, matériaux non-cohérents et sols), régime hydrologique, végétation et processus géomorphologiques actifs.

5.2.5 Pluie, végétation et érosion des sols

Un problème majeur de la région de Mtera, c'est de connaître l'effet protecteur possible des arbres et des broussailles contre l'érosion d'impact de la pluie. Afin d'étudier l'importance de cet effet dans l'environnement local, on a mené des recherches dans des petits bois d'acacias (*Acacia circummarginata*). Des pluviomètres ont été disposés en ligne depuis un grand arbre jusqu'à un espace découvert partiellement occupé par des broussailles. Des lectures ont été faites quotidiennement et après chaque averse individualisée pendant la saison des pluies. L'intensité des averses était mesurée sur une base de 15 minutes à un pluviomètre de référence à 300 mètres du site expérimental. On peut résumer les principaux résultats de l'étude comme suit :

1. L'interception de la pluie était très efficace pour les faibles précipitations qui donnent de faibles pluies sous les arbres et les buissons.
2. Les averses de forte intensité donnaient presque les mêmes quantités de pluie sous les gros arbres qu'en terrain dégagé. Les gouttes de pluie ou bien se frayaient un chemin à travers la canopée ou se reconstituaient, regagnant ainsi la plus grande partie de leur vitesse de chute avant d'atteindre le sol. Le pouvoir érosif était très peu modifié par les arbres.
3. Les buissons bas donnent une meilleure protection que les arbres durant les averses de forte intensité.

5.2.6 Examen des processus actuels d'érosion des sols

La future retenue de Mtera est entourée par de vastes zones de pédiments, caractérisées par une végétation clairsemée d'arbres et de buissons, et localement aussi par une forte érosion des sols. Comme autour de la retenue, les données physiques locales, nécessaires aux méthodes conventionnelles de quantification de l'érosion des sols, sont peu nombreuses, on a essayé des méthodes simples pour évaluer les pertes en sols de cette zone.

Le taux d'érosion des sols a été estimé en mesurant le niveau de la surface du sol protégé par la canopée des arbres et par les buissons, comparé au niveau des terrains résiduels érodés à proximité. La différence de niveau entre ces deux surfaces permet, dans certaines conditions, de donner une approximation grossière de l'érosion totale après que les arbres et les buissons auront atteint une taille suffisante pour protéger le sol de l'érosion. De nombreuses causes d'erreur - par exemple l'incertitude concernant l'état de la surface originelle - imposent d'être prudent dans l'application de cette méthode.

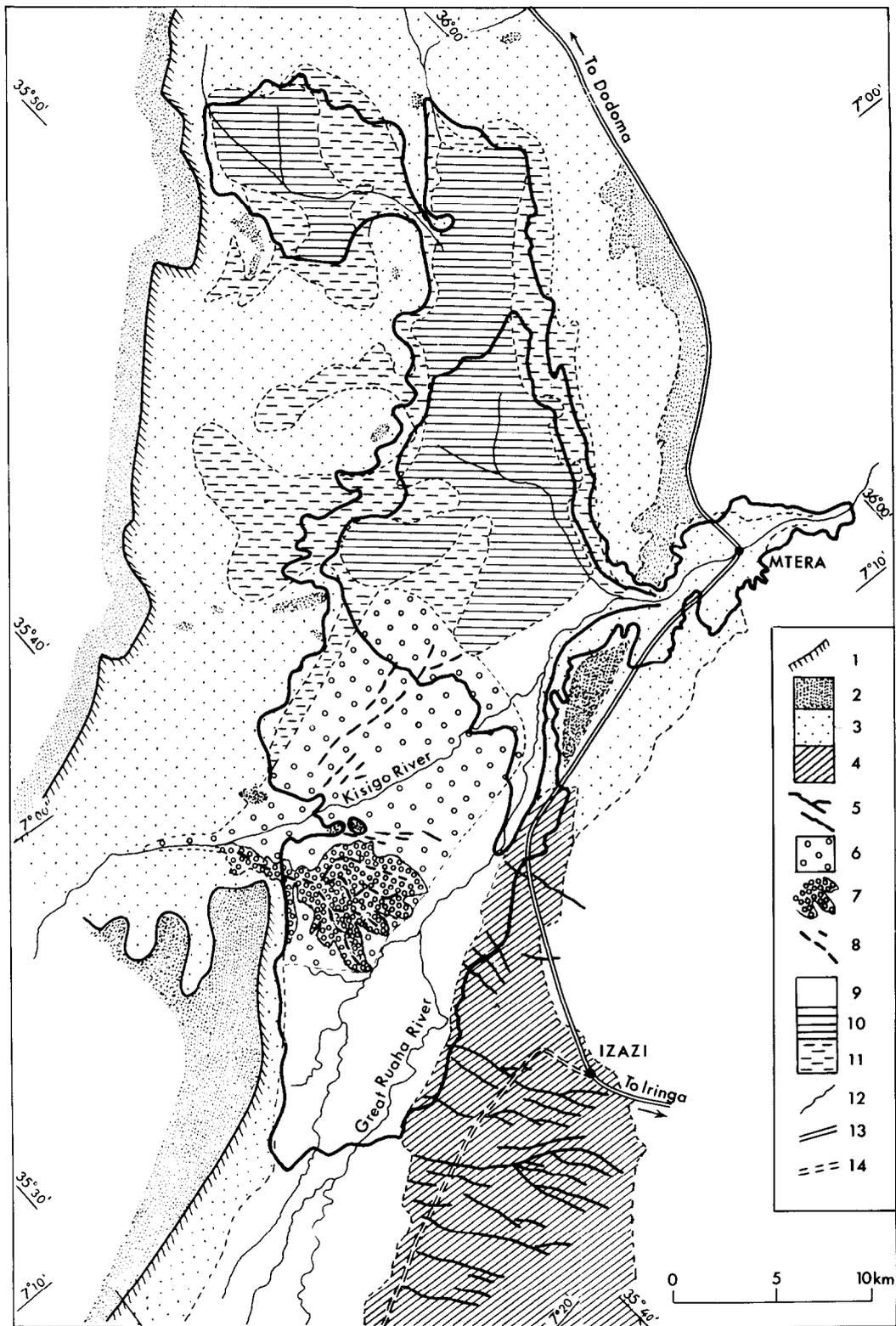


Fig. 5.8 La région de MTERA. Formes du terrain, érosion et sédimentation. 1. Falaises du Rift; 2. Collines tectoniques et plateaux inclinés; 3. Pédiments avec colluvions; 4. Pédiments érodés. 5. Ecoulements saisonniers sur les pédiments; 6. Cône de déjection de Kisigo; 7. Dépôts récents en doigts de gant; 8. Anciens lits du cours d'eau; 9. Dépôts d'alluvions de la Great Ruaha; 12. Cours d'eau; 13. Grande route; 14. Pistes. Les niveaux d'eau les plus hauts et les plus bas sont indiqués par des lignes continues (d'après D. Johnson, 1976).

Dans le but de surveiller ultérieurement l'érosion dans la zone de la retenue de Mtera, on a installé des "perches d'érosion" dans des sites représentatifs, choisis d'après les résultats de la cartographie géomorphologique (fig. 5.9). Les perches, faites dans la cornière de fer ordinaire, ont été disposées sur des profils transversaux dans des zones de drainage élémentaires. Cette installation s'est faite à la fin de la saison sèche 1976 et il était convenu que les relevés futurs devaient être faits à la même époque de l'année, de façon à éviter les erreurs dues, par exemple, au gonflement des argiles dans un sol humide. On a mesuré la hauteur des perches qui sert de référence pour les futurs relevés du sol en vue de déterminer les pertes en sols approximatives dans la région.

5.2.7 Transport de sédiments et sédimentation future probable dans la retenue

L'étude du transport en suspension des trois principaux cours d'eau de la région a été faite en 1976-1977. Le programme de prélèvement prévoyait l'intensification de l'échantillonnage en période de crue, car les crues brutales sont à l'origine de la plus grande part du transport en suspension.

Le transport de fond a été estimé d'après les données provenant de cours d'eau analogues. On a évalué le transport solide total à environ 4,1; 1,6 et 0,5 millions de tonnes par an respectivement pour les rivières Great Ruaha, Little Ruaha et Kisigo.

Les dépôts dans la retenue ont été estimés en faisant la somme des transports totaux dans les trois cours d'eau, en y ajoutant les sédiments fournis par les pédiments et autres surfaces dans la région de la retenue, en déduisant toutefois les exportations de sédiments fins hors de la retenue au cours des grandes crues. On peut réduire l'efficacité de piégeage de la retenue par une gestion appropriée.

5.2.8 Principales conclusions des études sédimentologiques

Outre les résultats quantitatifs concernant l'érosion des sols, le transport solide et les dépôts



Fig. 5.9 Site de mesure de l'érosion du sol dans le bassin de Mtera. On choisit les sites représentatifs et les perches en fer sont mises en place par rangées de 10. On utilise le sommet des perches comme niveau de référence et on fait des mesures à la fin de la saison sèche et pendant la saison humide. Les changements de la couverture végétale le long des transversales sont notées. Photo D. Johansson, 1976.

dans les retenues, le principal résultat de ces travaux c'est la prise de conscience de la nécessité de recherches écologiques générales et d'un programme d'études sédimentologiques qui tienne compte de la variété des faciès environnementaux dans le bassin versant.

5.3 UTILISATION D'UN MODELE MATHEMATIQUE POUR SIMULER LES CHANGEMENTS A LONG TERME DU NIVEAU DES FONDS DANS LES ESTUAIRES*

5.3.1 Introduction

Les projeteurs sont constamment confrontés au problème de la prédiction des effets des ouvrages de Génie Civil sur le régime des transports de sédiments dans les estuaires. Des erreurs dans cette prédiction à long terme peuvent avoir des conséquences sérieuses sur l'évacuation des crues ou sur le volume des dragages nécessaires pour maintenir la navigabilité des chenaux.

Le régime des transports solides est particulier à chaque estuaire puisqu'il dépend de la géométrie de l'estuaire, des marées, de la distribution saisonnière des écoulements, des sources des différentes fractions des sédiments et de leurs taux d'apport, et des propriétés physico-chimiques des boues.

Ces dernières années, on a développé une série de modèles de types variés destinés à simuler les processus de transport de sédiments dans les estuaires. Le terme de "modèle numérique" est utilisé dans le cas des estuaires pour décrire les calculs automatiques du mouvement de l'eau, des matières dissoutes, des matériaux fins ou des sables en suspension, calculs réalisés éléments par éléments le long de l'estuaire à des intervalles de temps successifs. Les caractéristiques principales du mouvement des marées sont connues et suivent des lois physiques de base simples. De même, les lois de conservation de la matière peuvent être appliquées au mouvement des sels dissous et des sédiments en suspension, mais certains aspects de leurs mouvements ne peuvent être définis jusqu'à ce jour que par des relations empiriques.

5.3.2 Estuaire du Great Ouse

L'estuaire du Great Ouse est l'exutoire d'un système de canaux artificiels et de déversoirs qui drainent un bassin versant de 8500 m² comprenant une surface étendue de basses terres agricoles. Les schémas d'aménagement étudiés comprennent la construction d'une réserve d'eau douce dans la zone soumise à la marée du Wash, qui serait rempli d'eau douce prélevée dans les cours d'eau s'écoulant dans l'estuaire. Le modèle numérique a servi à étudier les effets sur le transport des sédiments de prélèvements en quantités variables sur les apports d'eau douce, et du raccourcissement possible de la zone soumise à marée par la construction éventuelle d'un nouveau canal évacuateur.

Actuellement, le lit de l'estuaire est composé de sable fin qui se déplace en suspension alternativement dans un sens puis dans l'autre grâce au fort courant de marée. Le lit du chenal est soumis à un cycle irrégulier d'érosion - dépôt dû aux variations saisonnières de l'écoulement fluvial.

Dans les conditions typiques de l'été et de l'automne, il y a un mouvement de sable de la large partie aval de l'estuaire vers la partie amont étroite, mouvement causé par l'inégalité des quantités de sable transporté par le flux et le reflux de la marée. Les crues du cours d'eau renversent le processus et transportent en retour le sable de la partie amont vers la partie aval de l'estuaire, le déposant à l'amont du coin salé qui se forme près de l'embouchure de l'estuaire au jusant. Il en résulte que l'estuaire canalisé est presque un système clos en ce qui concerne le transport de sable.

Dans le cas inhabituel d'une série d'étés et d'hivers secs successifs, la partie amont de l'estuaire se remblaie progressivement sur une épaisseur atteignant jusqu'à trois mètres. La vitesse de dépôt du sable diminue lorsque le lit approche de ce que l'on peut appeler un profil d'équilibre supérieur. De même, le lit prend un profil d'équilibre inférieur à la fin d'une saison hivernale normale, profil déterminé en partie par la présence de couches non érodibles. Durant l'écoulement normal d'été, l'intrusion de l'eau de mer apporte du Wash, en grandes quantités, des matériaux fins d'origine marine. Ils se déplacent dans un sens puis dans l'autre avec la marée mais ils se déposent rarement sur le fond de l'estuaire, sauf pendant les périodes de mortes-eaux. Pendant une période prolongée d'écoulement fluvial très faible, il se forme sur le fond un dépôt davantage permanent près de la partie amont du bief soumis à la marée, là où

*

Les éléments de base de cette étude de cas ont été fournis par N.V.M. Odd de la Station de Recherches Hydrauliques, Wallingford, Angleterre.

les vitesses du jusant sont faibles. Dans ces conditions, il y a un arrangement longitudinal de la distribution des matériaux fins jusqu'à ce qu'un équilibre approximatif s'établisse entre l'influx net de matériaux fins à l'embouchure de l'estuaire et la quantité nette de matériaux fins déposés à l'amont.

5.3.3 Le modèle

On a admis que deux couches étaient suffisantes pour représenter le flot stratifié dans le Great Ouse. On a supposé que la limite théorique entre les deux couches était horizontale dans le sens de la largeur et située à l'endroit du gradient maximum de salinité appelé halocline. La couche inférieure à l'amont se termine en générale à l'intérieur du bief de l'estuaire.

Afin de simuler les transports de sédiments du Great Ouse, on a choisi de partager les sédiments en trois classes de tailles relativement étroites, comme suit :

Types de sédiments	Classe des particules mm	Taille représentative des grains
Matériaux fins cohérents	$D < 0,06$	-
Sables très fins	$0,06 < D < 0,15$	0,10
Sables fins	$0,15 < D < 0,30$	0,21

Transport des matériaux fins

On a supposé que les matériaux fins se mettent en suspension ou se déposent selon les vitesses d'érosion ou de dépôt. Le flux vertical net, à travers l'interface entre les couches inférieures et supérieures est la somme des flux advectifs dus aux transferts d'eaux à travers l'halocline, du flux des agrégats de sédiments fins descendants et du flux montant dû à la turbulence de Reynold. Le mouvement des sédiments a été calculé en résolvant les équations instables de l'advection-diffusion longitudinale.

Transport de sable

Les conditions de l'écoulement changent constamment dans l'estuaire. Le temps nécessaire pour qu'un profil de concentration atteigne un nouvel état d'équilibre après un changement de débit dépend du bilan net des mouvements des particules vers le haut ou vers le bas et de la distance que doivent parcourir les particules. Les particules fines ont une hauteur de suspension plus élevée et une vitesse de chute plus faible que les particules grossières, si bien qu'il leur faut davantage de temps pour retrouver l'équilibre. Dans le cas du Great Ouse, heureusement, il n'a pas été possible de détecter un décalage significatif entre le flux de sable en suspension et la vitesse moyenne sur la verticale de l'écoulement qui est la cause. Dans ces conditions, il était donc possible de considérer le flux des deux fractions sableuses à n'importe quel moment de la marée comme étant pratiquement stable.

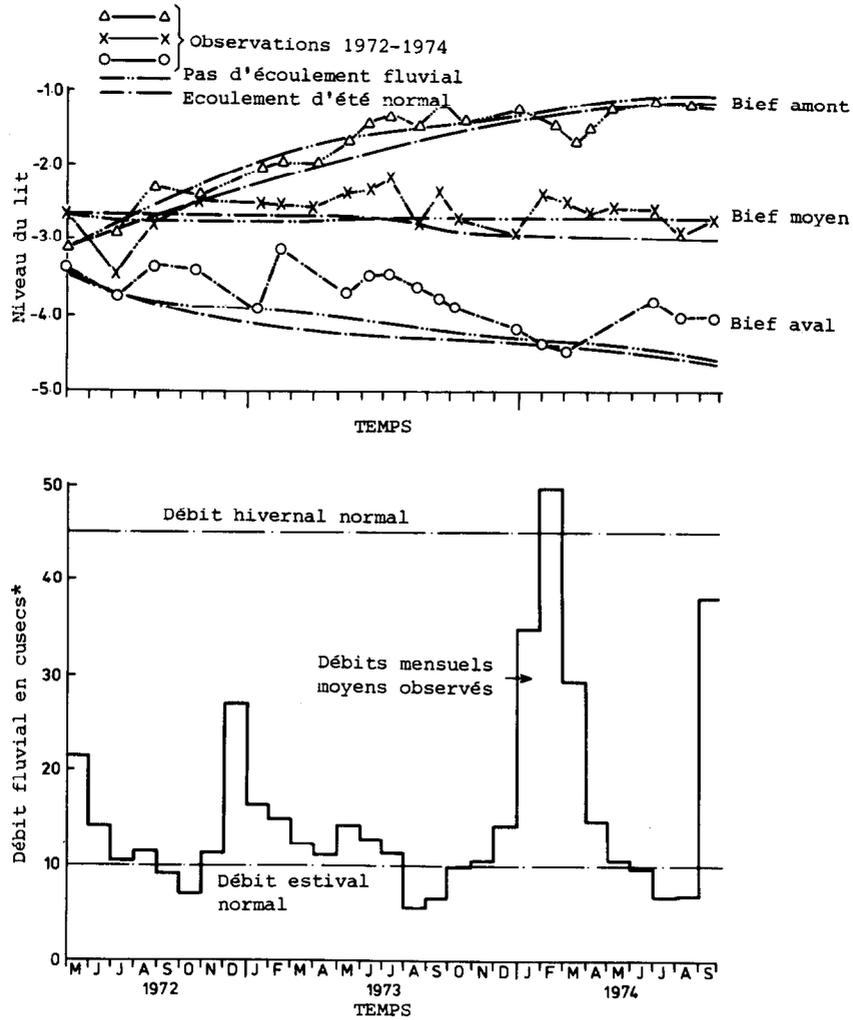
On ignorait les apports dus au transport du fond. La fonction transport de sable utilisée dans le modèle était capable de prédire le flux instantané de sable dans l'estuaire du Great Ouse avec un écart de $\pm 50\%$ des valeurs observées, à partir d'un seuil de suspension d'environ 0,3 m/s à plus de 2,00 m/s, sous réserve que les matériaux du fond soient un mélange de sables propres avec un échantillon granulométrique faiblement varié.

5.3.4 Résultats

La comparaison des valeurs calculées et observées durant la période de sécheresse, de Mai 1972 à Octobre 1974, est faite à la figure 5.10. En ce qui concerne les dépôts de sable dans l'estuaire, une sécheresse est caractérisée par un débit hivernal inférieur à la normale plus que par un débit estival spécialement bas. La figure montre les changements avec le temps des niveaux du lit pour les biefs aval, moyen et amont de l'estuaire. En Mars 1972, tout le lit de l'estuaire était entièrement sableux et il était proche du profil d'équilibre bas après un hiver humide.

Les deux résultats calculés se rapportent à des situations où le débit stable est de 10 m³/s et où il n'y a pas d'écoulement fluvial du tout. Ces calculs n'étaient comparables ni l'un ni l'autre avec les événements réels parce que le débit moyen mensuel du cours d'eau varie de 5 à 50 m³/s et que les niveaux du lit observés correspondaient à une valeur moyenne sur 1,6 km le long de la ligne médiane du chenal à comparer à des moyennes en travers et en long pour le modèle.

Les observations montraient une tendance générale au remblaiement dans le bief amont, peu de changement dans le bief moyen et de l'érosion dans le bief aval, processus tout à fait bien



* cusecs = pieds cubes par seconde.

Fig. 5.10 Niveaux du lit et débits du cours d'eau, comparaison entre le modèle et les observations. D'après HRS Annual Report 1975. Simulation numérique à long terme de l'évolution du niveau du lit dans les estuaires. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

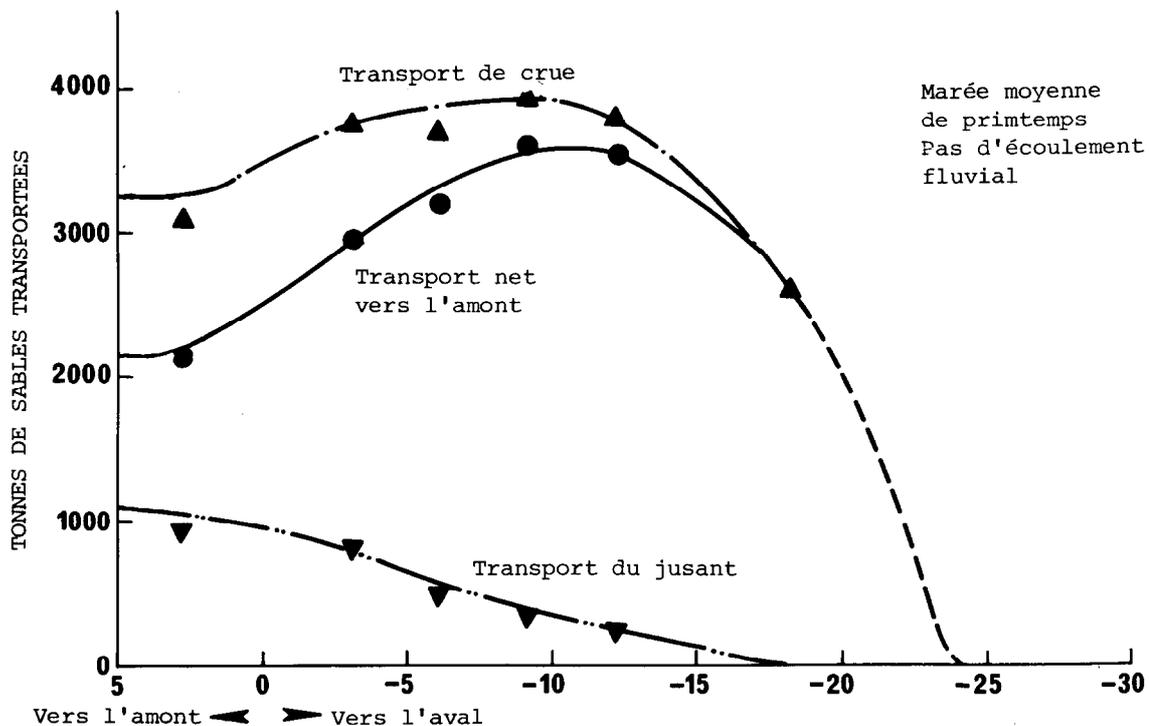


Fig. 5.11 Effet du raccourcissement du bief soumis à la marée. D'après HRS Annual Report 1975. Simulation numérique à long terme des niveaux du lit dans les estuaires (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

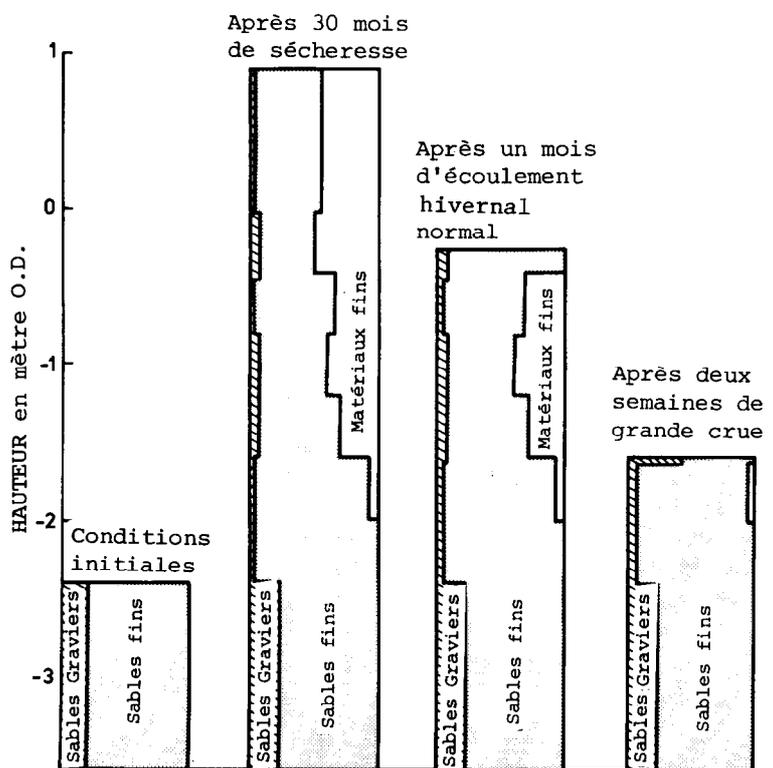


Fig. 5.12 Simulation numérique des dépôts au fond. D'après HRS Annual Report 1975. Simulation numérique à long terme des niveaux du lit dans les estuaires (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

simulé par le modèle. Le remblaiement du bief amont tend à diminuer pendant l'hiver 1972-1973 et approche d'un équilibre à l'été 1973, descend légèrement pendant l'hiver 1973-1974 et revient à l'équilibre à l'été 1974; le modèle montre que tant le taux de dépôt que le niveau supérieur du lit à l'équilibre dans le bief amont sont relativement insensibles au débit fluvial quand il est inférieur à 10 m³/s. En d'autres termes, le prélèvement de tout l'écoulement d'été n'aura pas d'effet significatif sur ce dépôt de sable dans l'estuaire.

L'effet de la coupure de la zone soumise à la marée sur le bilan net du transport vers l'amont, depuis le bief aval au début d'une sécheresse, est indiqué par la figure 5.11. Les symboles du diagramme indiquent les résultats d'essais à court terme avec le modèle numérique. Comme la zone soumise à la marée est réduite, la capacité du jusant à ramener des sédiments vers la mer est réduite. En même temps, la durée des périodes de vitesse de crue significative diminue aussi, mais les valeurs maximums sont accrues. Cet accroissement peut être dû à l'écoulement de la marée qui perd moins d'énergie en s'opposant à un mouvement de jusant plus faible et moins profond. Les ennuis à long terme ont montré que la coupure de la zone soumise à la marée dans les biefs moyen et amont de l'estuaire se traduisait par une redistribution des dépôts plutôt que par un accroissement du volume total de sable déposé.

Tous les canaux envisagés créent les conditions d'un écoulement direct vers la mer qui permettrait aux sédiments marins fins apportés du Wash de se déposer sur le fond durant une sécheresse. On ne peut utiliser le modèle pour prédire avec précision la vitesse de dépôt des sédiments fins parce que les concentrations à la mer ne peuvent être connues avec un degré de précision suffisant. Cependant les résultats indiquent qu'un canal de déversement situé dans le bief moyen créera les conditions du plus fort taux de dépôt. Rien n'indique que le taux de dépôt des sédiments fins diminuerait au cours d'une longue sécheresse. Un schéma donnant un débit d'eau de mer continue de 10 m³/s à la nouvelle sortie n'entraîne aucun effet significatif sur le dépôt de sables ou de sédiments fins avec un canal situé dans le bief moyen. Cependant, le modèle indique qu'avec ce débit et une nouvelle sortie dans le bief étroit à l'amont, on peut effectivement arrêter le dépôt de sédiments fins vers la mer mais que l'effet produit sur les dépôts de sable est bien moindre.

A condition de connaître la concentration en sédiments fins en suspension du flot de marée montante en bordure de mer et à condition que la distribution longitudinale des sédiments fins puisse atteindre un état d'équilibre dynamique, il serait possible d'accélérer le calcul des transports de sable et de sédiments fins en corrélation avec le calcul des débits liquides. Lorsqu'il s'agit du transport des sédiments fins on applique le facteur d'échelle à la quantité de sédiments fins arrachés par affouillement ou déposés dans le lit. La concentration de sédiments fins et le flux en suspension restent en rapport avec l'écoulement calculé. Il faut être prudent et vérifier que les situations transitoires ne donnent pas sur le modèle des résultats amplifiés de façon disproportionnée avec la réalité. La figure 5.12 donne un exemple de simulation à long terme des changements de structure des dépôts de sédiments.

5.4 UTILISATION D'UN MODELE REDUIT POUR L'ETUDE DES PROBLEMES TECHNIQUES QUE POSE LA CONSTRUCTION D'UN GRAND BARRAGE*

5.4.1 Introduction

Le barrage d'El Chocon barre le Rio Limay 80 km à l'amont de son confluent avec le Rio Neuquen dans le nord de la Patagonie en Argentine. Conjointement avec les aménagements de Cerros Colorados sur le Rio Neuquen, le barrage d'El Chocon protège des crues la vallée du Rio Negro et fournit en abondance de l'eau pour les irrigations et de l'énergie électrique. On a utilisé un modèle réduit pour étudier les problèmes hydrauliques y compris les affouillements et les dépôts qui peuvent survenir pendant la dérivation du cours d'eau et la construction du barrage. Par ces recherches, on évalue également l'efficacité du batardeau, de l'ouvrage de dérivation et des systèmes de protection contre les crues, facilitant leur optimisation. La figure 5.13 présente le schéma général du barrage protégé. C'est un barrage en graviers avec un noyau d'argile qui barre la vallée dans un rétrécissement de 800 m de large. La longueur du barrage est de 2300 mètres et sa hauteur est de 70 mètres au-dessus du lit. La centrale hydroélectrique est en rive gauche au pied du barrage. Chacun des six groupes a une puissance maximum de 200 MW pour un débit de 400 m³/s. Les six prises d'eau sont abritées dans une tour indépendante immédiatement à l'amont du barrage. En rive droite, un groupe de quatre vannes à surface libre, avec un débit maximum de 8000 m³/s déverse les débits de crue dans un évacuateur unique en béton.

*Les éléments de base de ce cas ont été fournis par W.R.White, Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Angleterre.

Le plan de la figure 5.14 montre les premières étapes de la construction. On a d'abord confiné l'écoulement dans un chenal étroit près de la rive gauche grâce à un batardeau provisoire fait de graviers et protégé de l'érosion par un enrochement de blocs de grès. Une partie du barrage principal a été construite à l'intérieur du batardeau d'où on a extrait une fraction des matériaux nécessaires à la construction. Dans le même temps, on construisait les ouvrages de dérivation en rive gauche. Ces ouvrages comportent un court canal d'aménée creusé dans la rive gauche, deux galeries de dérivation de 11,2 mètres de diamètre et un bassin de tranquillisation à l'extrémité aval, conçu pour abriter plus tard deux turbines. Ces constructions ont pu se faire à sec grâce à des batardeaux provisoires à l'amont et à l'aval.

Quand la première tranche du barrage - la portion protégée par le batardeau de la rive droite - a atteint une hauteur de 50 Mètres environ au-dessus du bed-rock et que les ouvrages de dérivation ont été opérationnels, on a fermé le lit du cours d'eau, à l'amont et à l'aval du barrage entre le batardeau rive droite et la rive gauche, par des enrochements. On a pu alors achever la construction de la partie principale de l'ouvrage.

5.4.2 Description du modèle

On a construit un modèle à une échelle non distordue du 1/100 sur une surface de 1600 mètres de large s'étendant sur 650 m à l'amont du barrage et 1350 mètres à l'aval. Les berges du cours d'eau ont été modelées dans un mortier de sable et ciment. Le lit du Rio Limay est composé essentiellement de graviers, représentés sur le modèle par du sable de même masse volumique et de mêmes formes géométriques. Le barrage a été construit avec un noyau en bois étayé et modelé avec du gravier. Le déversoir de crue et les autres structures sont faits de bois et les galeries de dérivation et les ouvrages provisoires annexes en plastique moulé.

5.4.3 Protection des batardeaux pendant la construction

La construction du batardeau en rive droite a rétréci la section jusqu'à 200 mètres. On a fait des essais avec des débits atteignant 6000 m³/s pour examiner l'allure de l'écoulement et les vitesses dans la section rétrécie, et aussi pour déterminer la taille et la forme des protections nécessaires pour les batardeaux. La taille maximum des matériaux nécessaires était de 80 kg en rochers. On mesurait les niveaux d'eau en cinq points le long du batardeau afin de donner une hauteur de sécurité pour les ouvrages de protection.

5.4.4 Dérivation du cours d'eau

On a dérivé le cours d'eau à l'aide de digues aux extrémités protégées par des enrochements placées en amont et en aval du barrage, comme indiqué sur la figure 5.14. La contrainte principale était la brièveté de l'intervalle de temps disponible entre les saisons des pluies pour fermer le cours d'eau et achever la construction du barrage principal jusqu'à une hauteur qui ne puisse être atteinte pendant la période de crue suivante. Il fallait donc assurer la fermeture à une cote correspondant au plus fort débit possible.

Les essais sur modèle ont montré que l'on pouvait réussir la dérivation jusqu'à un débit de 1000 m³/s avec des matériaux atteignant 250 kg. Les pertes étaient minimums et l'érosion à l'aval de l'ouvrage de dérivation était acceptable.

5.4.5 Déversoir

Le déversoir s'étend en ligne droite sur 350 mètres depuis la tête de l'ouvrage en suivant au mieux les courbes de niveau. Au-delà, le déversoir s'élargit jusqu'à 200 m de largeur à l'embouchure aval, suivant un virage incliné tout en s'éloignant vers le fleuve.

Le déversoir s'écoule à travers une embouchure aval horizontale située à une cote légèrement supérieure à la cote maximum du cours d'eau. Le projet à l'origine comportait une rangée simple de blocs dissipateurs d'énergie fixés à l'embouchure, chaque bloc ayant 15 mètres de long et 5 mètres de haut, la face amont inclinée par rapport à l'écoulement avec une pente de 5 sur 2. L'écoulement était projeté haut dans l'air et perdait son énergie dans les chocs sur les blocs grâce à des influences mutuelles des jets, de l'air et de la turbulence dans le bassin creusé par le jet.

On a essayé différentes modifications de ces blocs pour finir avec un arrangement de deux rangées de blocs dissemblables. Les blocs étaient disposés avec des espaces à peu près égaux entre eux, la seconde rangée couvrant les vides avec des blocs de 11 mètres de long sur 4 m de haut avec une inclinaison de 4 sur 3. La réduction de la hauteur de la deuxième rangée permettait de réduire la largeur de la base et d'avoir un espace suffisant le long de l'embouchure

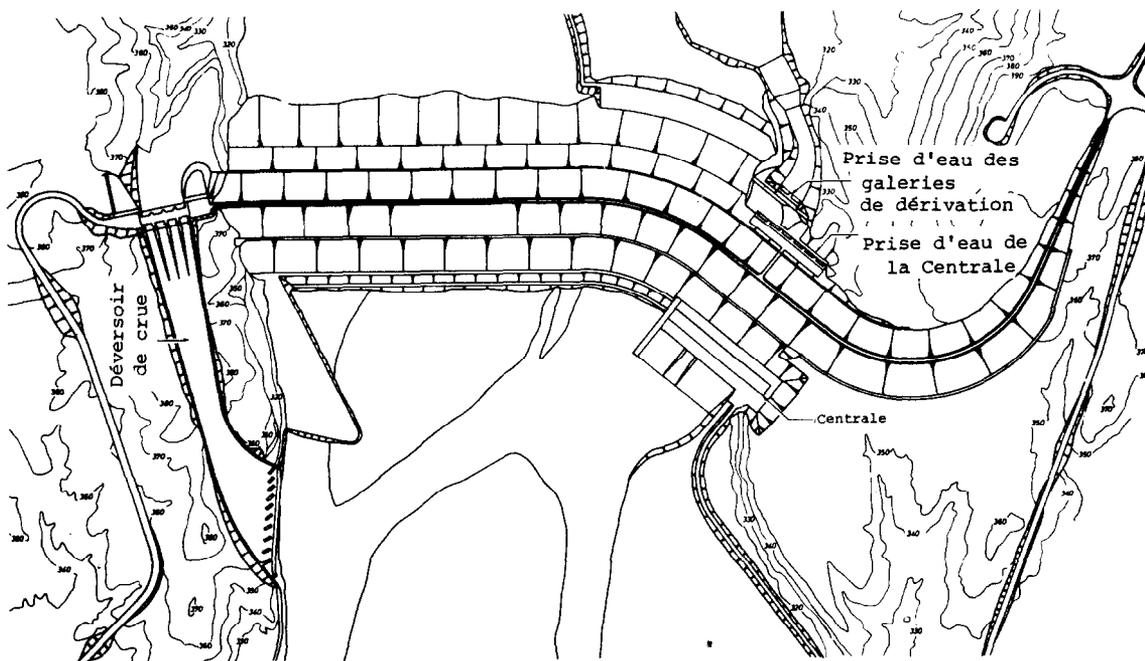


Fig. 5.13 Barrage d'El Chocon, Rio Limay, Argentine. Plan général du barrage. D'après HRS Annual Report 1969. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

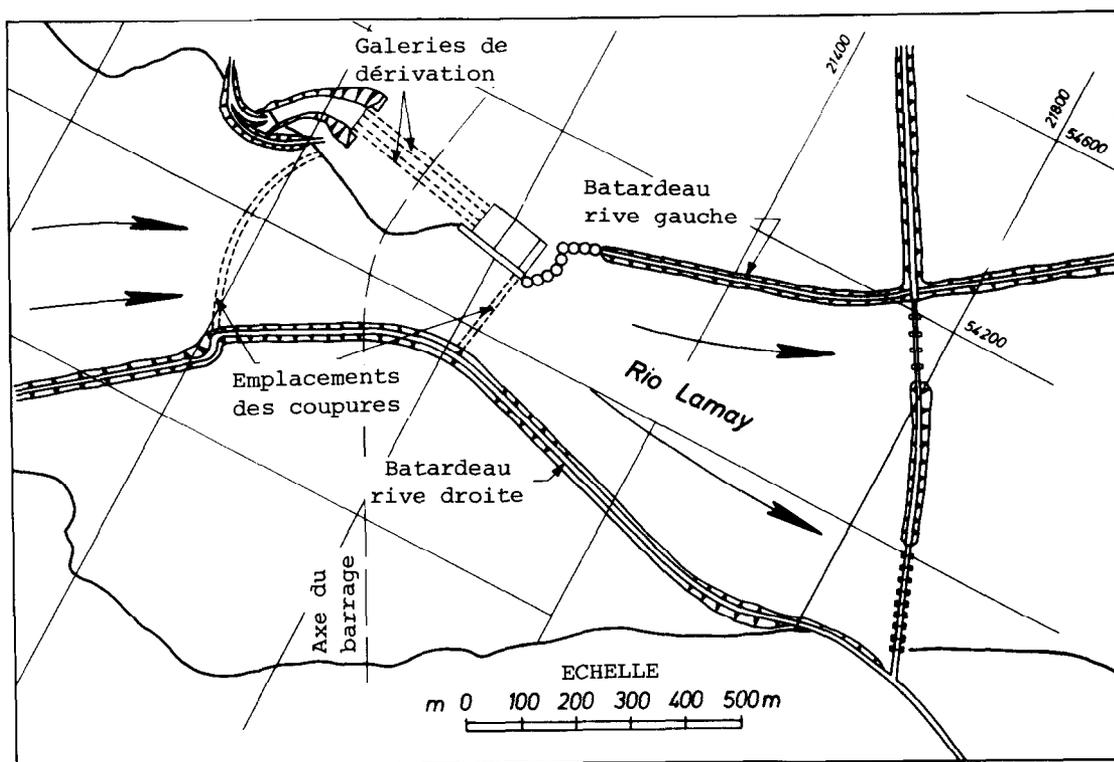


Fig. 5.14 Barrage d'El Chocon, Rio Limay, Argentine. 1ère étape: Batardeaux. D'après HRS Annual Report 1969. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSC et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

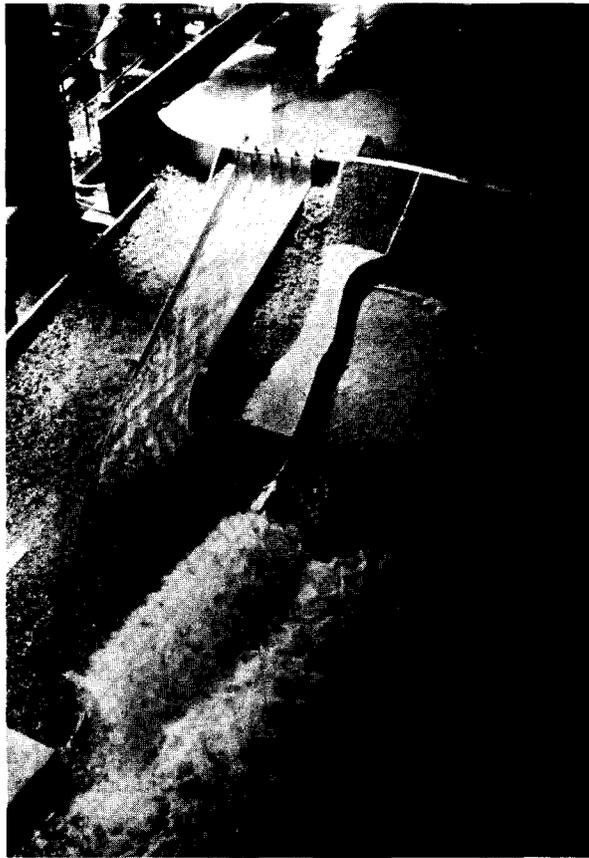


Fig. 5.15 Modèle du déversoir d'El Chocon. (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).



Fig. 5.16 Déversoir d'El Chocon. D'après El Chocon Dam. Field observations of the performance of the spillway (HRS INT 124), par W.R. White et E. Whitehead, 1974 (Copyright de la Couronne, reproduit avec l'autorisation du Contrôleur HMSO et de la Station de Recherche Hydraulique, Wallingford, Royaume-Uni).

du déversoir pour permettre l'accès de véhicules routiers.

Comme c'est fréquent avec ce genre de déversement, l'impact du jet sur l'eau du bassin creuse la surface de l'eau sous le bord aval du déversoir et provoque des tourbillons à l'amont et à l'aval de la zone d'impact. La direction du jet était orientée en gros vers l'aval; de plus, le jet tombait près de la rive à l'aval mais était dégagé à l'amont. Ceci avait pour conséquence qu'à l'aval les tourbillons étaient faibles et bien maîtrisés, mais qu'à l'amont les tourbillons étaient forts et provoquaient un affouillement grave sous l'extrémité aval du déversoir. On a résolu ce problème à l'aide d'épis de protection en enrochements et d'un revêtement ajustable en béton à l'aval immédiat du déversoir.

Les figures 5.15 et 5.16 montrent le fonctionnement du déversoir sous forme de modèle et dans la réalité. De façon générale, les observations faites sur le déversoir réel ont montré que les prédictions du modèle étaient d'une précision convenable et que son coût était justifié par les améliorations apportées au projet définitif.

5.5 EVALUATION QUANTITATIVE DE L'EROSION DES SOLS OU DU TRANSPORT DE SEDIMENTS DUS A DES ORAGES ISOLES EN REGION SEMI-ARIDE*

Situé dans la péninsule de la basse Californie au Mexique, sur la cote du Golfe de Californie, il y a une ville minière appelée Santa Rosalia qui possède un petit port. Sa population est d'environ 5000 habitants. Une des caractéristiques de cette ville c'est que des maisons y ont été bâties sur le lit étroit d'une rivière. Dans cette région de la péninsule, il pleut très peu, une ou deux perturbations isolées seulement survenant dans l'année, on peut même observer deux ou trois ans sans pluie, et par conséquent il n'y a pas d'écoulement pérenne. Le bassin versant de la rivière de Santa Rosalia avec ses 15 km² est un des plus petits de la région; les pentes y sont moyennes et la végétation inexistante. Le lit du cours d'eau et la plus grande partie du bassin versant sont couverts de sables, graviers et galets (voir figure 5.17).

Le lit de la rivière est mal délimité, ce qui fait que la plus grande partie de la vallée est inondée quand il pleut. Cette vallée a une largeur moyenne de 100 mètres. Du fait de la rareté des pluies, la ville s'est construite dans le lit du cours d'eau, l'eau pouvant s'écouler à travers les rues, les maisons étant protégées par des murs de béton afin de résister aux écoulements à fortes vitesses. Le cours d'eau se jette dans le port où tous les sédiments se déposent et il est nécessaire de draguer tous les 3 à 5 ans pour enlever sables et graviers accumulés. A cause des problèmes que cela crée, on a décidé de construire un bassin de décantation à l'embouchure de la rivière ou une série de petits barrages ou digues pour retenir les sédiments.

Les dimensions à donner à ces ouvrages dépendent de la fréquence des écoulements et des volumes de sédiments qu'ils transportent. On disposait de données indiquant qu'en 1969 on avait dragué 5700 tonnes de sédiments. Cependant, il n'y avait pas d'information sur les précipitations dans le bassin, bien que l'on eût quelques enregistrements pour un bassin voisin. En 1969, on a observé une perturbation et on a décidé de la rapprocher des données des dragages pour obtenir ainsi un facteur de correction à utiliser dans une formule de transport solide ou d'érosion des sols.

La séquence des calculs des dimensions de petits barrages ou d'un bassin de décantation et de leur durées de vie utile est la suivante:

- a) Déterminer la quantité de sédiments dragués dans l'année;
- b) Utiliser les données pluviométriques de bassins versants voisins pour calculer l'intensité de la pluie de l'unique averse de l'année;
- c) Partant de cette pluie calculée, obtenir un hydrogramme du cours d'eau à la traversée de la ville;
- d) Avec cet hydrogramme et les relevés des hauteurs d'eau maximums dans la rue principale de Santa Rosalia, obtenir une courbe de tarage à cet emplacement (on a admis un coefficient de rugosité et on l'a vérifié);
- e) A partir des résultats c) et d) et des caractéristiques des matériaux du lit (taille, masse volumique), en utilisant la formule de Meyer-Peter et Muller pour la charge de fond, on a calculé le transport de fond;
- f) Connaissant l'intensité de la pluie, la couverture végétale, les caractéristiques du sol, la pente du lit, etc... on a pu estimer l'érosion du sol. Son volume pouvait être considéré comme égal à celui des sédiments transportés par la rivière;
- g) On a comparé les volumes de sédiments obtenus par e) et f) avec celui du dragage du

* Les éléments de base de cette étude de cas ont été fournis par J.A.Maza, Université de Mexico, Mexique.

port. On a choisi la méthode donnant les meilleurs résultats pour l'appliquer à des précipitations plus rares.

5.5.1 Données disponibles

Les données disponibles les plus importantes étaient : la quantité de sédiments déposés dans le port l'année précédente; la taille et la masse volumique des matériaux du lit, la pente du lit et la taille du bassin versant, les relevés des pluies des 20 dernières années sur le bassin voisin de la rivière Mulege, les sections en travers de la rivière de Santa Rosalia et de la rue où elle s'écoule et, pour finir, les traces des hautes eaux d'hiver à Santa Rosalia.

5.5.2 Résultats

On trouvera ci-après les principaux résultats obtenus par le schéma de calcul ci-dessus. On savait que les sédiments dragués représentaient 5700 tonnes ou 3700 m³. On a déduit de l'étude du bassin versant moyen que l'intensité de la pluie avait atteint dans l'année 16 mm en 30 minutes. A partir de ce fait, on a obtenu les intensités de la pluie pour différentes périodes de retour et pour différentes durées. On a ensuite utilisé ces données pour calculer les transports de sédiments pour les précipitations les plus fortes, ces résultats servant à établir les projets des ouvrages d'arrêt du transport solide. Avec les courbes intensité-durées des pluies, on a obtenu deux hydrogrammes pour la rivière de Santa Rosalia, l'un pour une durée d'une heure, l'autre pour une durée de deux heures. Le débit maximum dans le premier cas a atteint 91 m³/s et, dans le deuxième cas, 40 m³/s. On a obtenu les profondeurs et les vitesses moyennes dans le lit jusqu'à 100 m³/s. Les hydrogrammes permettent alors de déterminer les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement pour chaque crue considérée.

Ensuite, on a calculé le transport de fond pour chaque évènement à l'aide de la formule de Meyer-Peter et Muller :

$$\left(\frac{n'}{n}\right)^{\frac{3}{2}} \gamma^{RS} = 0,047 \left(\gamma_s - \gamma\right) D + 0,25 \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^{\frac{2}{3}} q_s^{\frac{2}{3}} \quad (5.1)$$

où n' est la rugosité du lit d'après la taille des particules du fond.

n est la rugosité totale selon la formule de Manning.

Comme il y a du gravier et des galets on admet que $\frac{n'}{n} = 1$

γ_s est la masse volumique des matériaux du lit (kg/m³).

γ est la masse volumique de l'eau (kg/m³).

D est le diamètre moyen des matériaux du lit en mètres.

g est l'accélération de la pesanteur = 9,81 m/s².

R est le rayon hydraulique de la section en travers en mètres.

S est la pente de la ligne d'eau.

q_s est le transport de fond par unité de largeur (kg/m.s).

Si $\gamma_s = 2500$ kg/m³, $\gamma = 1000$ kg/m³, $g = 9,81$ m/s².

Le débit total de fond est :

$$Q_S = B \left(1023 \frac{n'}{n} R_S - 85D\right)^{\frac{3}{2}}$$

où B est la largeur moyenne de la section en travers.

Q_S est le débit solide total de fond (Kg/s).

Pour calculer le volume des sédiments transportés, on leur a attribué une masse volumique de 1600 kg/m³.



Fig. 5.17 Bassin versant et lit de la rivière de Santa Rosalia

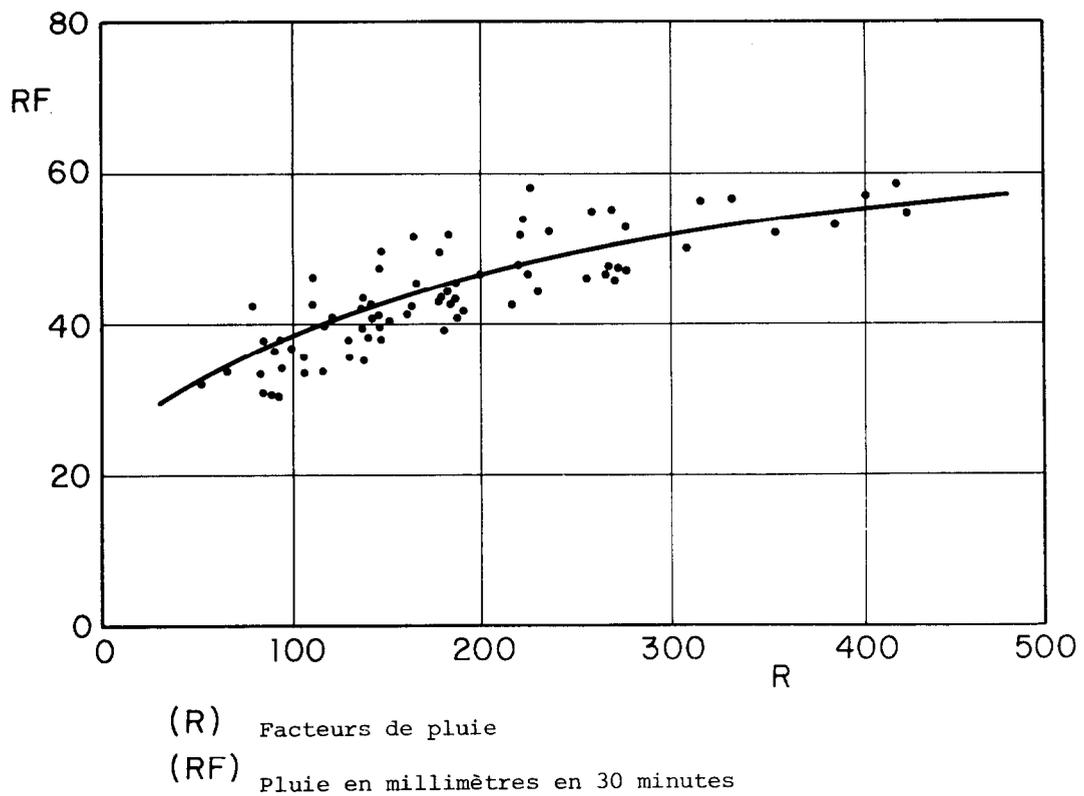


Fig. 5.18 Valeur moyenne annuelle du facteur pluie R.

En tenant compte de la géométrie de la section en travers de la rue et en utilisant la formule de Meyer-Peter et Muller, le transport solide de fond total annuel calculé était de 1180 tonnes pour une durée d'écoulement maximum de une heure et 2300 tonnes pour deux heures (en supposant qu'il n'y a qu'une averse par an).

Par ailleurs, on a utilisé la formule universelle de Wischmeier et Smith (1965) pour calculer la perte en sol. Cette formule s'écrit pour des unités métriques :

$$V_s = (224,2 \text{ RFK C P}) A_c = (R^1 \text{KF C P}) A_c$$

- où V_s Perte en sol annuelle
 R Facteur d'érosivité de la pluie
 K Facteur d'érodibilité du sol
 F Facteur topographique
 C Facteur d'utilisation des terres
 P Facteur des mesures protectrices des sols
 A_c Superficie du bassin versant

Facteur d'érosivité de la pluie R : on a observé une certaine corrélation entre ce facteur et la pluie maximum en 30 minutes. Avec les données recueillies dans l'Est des Etats-Unis, on a obtenu la relation suivante:

$$R = \left(\frac{RF}{1634} \right)^{3,745} \quad (5.2)$$

où RF est la pluie maximum atteinte en 30 minutes pour une période de retour de 10 ans. Le coefficient de corrélation est égal à 0,85 (voir figure 5.18).

On peut calculer R d'une autre façon avec la formule suivante :

$$R^1 = (210 + 89 \text{ Log RFo}) \text{ RFo} \quad (5.3)$$

où $R^1 = 224,2 R \quad (5.4)$

$\text{RFo} =$ intensité de la pluie en cm/heure.

Avec ces équations, on a obtenue les résultats suivants :

$$R = 3,63 \text{ par l'équation 5.2 avec } RF = 16 \text{ mm}$$

soit, en multipliant par le facteur de conversion (5.4)

$$R^1 = 813,4$$

La second formule (5.3) donne :

$$R^1 = 816 \text{ avec } \text{RFo} = 3,2 \text{ cm/heure.}$$

Facteur d'érodibilité du sol K : On a estimé sa valeur égale à 0,1 du fait que le bassin est couvert de sable et de graviers.

Facteur topographique F : La pente du bassin versant a été estimée à 0,2, par conséquent on a obtenue $F = 6,2$.

Facteur d'occupation des sols C : Comme le bassin versant porte une végétation clairsemée, on a situé le facteur C entre deux valeurs extrêmes 0,5 et 1,0.

Facteur de mesures de protection des sols P : Comme il s'agit d'un bassin versant naturel sans travaux de protection, P a été pris égal à 1.

Surface du bassin versant A_c : Elle est égale à 15 km².

On obtient aussi les résultats suivants :

$$V_s = 7560 \text{ tonnes/an avec } C = 1$$

$$V_s = 3780 \text{ tonnes/an avec } C = 0,5$$

5.5.3 Conclusion

En comparant les résultats avec la quantité de sédiments dragués dans le port, on en a conclu que la formule de Meyer-Peter et Muller donnait un résultat sous-évalué de 50% tandis que l'équation de perte en sol pouvait fournir un meilleur résultat en prenant $C = 0,75$ (pour le bassin de Santa Rosalia).

Par conséquent, c'est l'équation universelle de perte en sol qui a été appliquée aux autres averses pour calculer les ouvrages de rétention des sédiments. On a ainsi constaté la possibilité d'utiliser l'équation universelle de perte en sol en zone semi-aride en dépit du manque d'information sur ce genre de région. Ceci n'est pas forcément valable pour d'autres bassins versants d'aspect différent.

REFERENCES

Bureau of Reclamation. 1967. Commonwealth of Puerto Rico. Feasibility Design Report Toa Vaca Dam. U.S. Dept. Interior.

Johansson, D. (ed.) 1976. Ecological studies of the Mtera Basin, Great Ruaha Power Project, Tanzania. Stockholm, SWECO.

Johansson, D.; Strömquist, L. 1977. Studies of soil erosion, vegetation and fluvial transport of Mtera reservoir region, Tanzania. Stockholm, SWECO.

McHenry, J.R.; Hawks, P.H. 1965. Co-operative sedimentation Survey for Puerto Rico Water Resources Authority and Bureau of Reclamation, U.S. Department Interior.

Maza, J.A. 1976. Solid material contributed by a watershed and its variation when modified. Commission Internationale des Grands Barrages. Douzième Congrès. Mexico, 1976.

6 Bibliographie

- A S C E. 1975. Sedimentation engineering. New York, American Society of Civil Engineers. (Manual no. 54).
- Bagnold, R.A. 1965. The physics of blown sand and desert dunes. London, Methuen.
- Blench, T. 1969. Mobile-bed fluviology. Edmonton, Alberta, Univ. Alberta Press.
- Bogardi, J.L. 1974. Sediment transport in alluvial streams. Budapest, Akademiai Kiado Press.
- Einstein, H.A. 1950. The bed load of sediment transportation in open channel flow. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Ser. (Tech. bull. 1026).
- FAO. 1976. Conservation Guide 2. Hydrological techniques for upstream conservation. Rome FAO.
- FAO. 1976. Conservation Guide 3. Conservation in arid and semi-arid zones. Rome, FAO.
- FAO. 1976. Soils Bulletin 30. Soil conservation for developing countries. Rome, FAO.
- Goncharov, V.N. 1962. Dinamika rouslovih protokov (Dynamics of open channel flow). Leningrad, Gidrometeoizdat, p. 373.
- Graf, W.H. 1971. Hydraulics of sediment transport. New York, McGraw Hill.
- Hudson, N. 1971. Soil conservation. London, Batsford.
- Jakubov, T.F. 1955. Soil wind erosion and ways to prevent it, (in Russian). Moscow, Selkhozgiz.
- Jansen, P.Ph.; van Bendegom, L.; vanden Berg, J.; de Vries, M.; Azanen. 1979. Principles of river engineering. London, Pitman.
- Karaushev, A.V. 1969. Rechnaya gidravlika (River hydraulics). Leningrad, Gidrometeoizdat, p.416.
- Kozmenko, A.S. 1954. Borba s eroziei pochv (Soil erosion protection). Moscow, Selkhozgiz, p.229.
- Kondratev, N. 1962. River flow and river channel formation. Trans. from Russian (1959). National Science Foundation and U.S. Dept. of the Interior.
- Leopold, L.B.; Wolman, M.G.; Miller, J.P. 1964. Fluvial processes in geomorphology. San Francisco and London, Freeman.
- McGinnies, W.G.; Goldman, B.J.; Paylore, P. (eds.) 1968. Deserts of the world. An appraisal of research into their physical and biological environment. Tucson Univ. Arizona Press.
- Proc. Third Federal Inter-agency Sedimentation Conference. 1976. Denver U.S. Interagency, Sedimentation Committee.
- Rapp, A.; Berry, L.; Temple, P.; (eds.) 1973. Studies on soil erosion and sedimentation in Tanzania. Geogr. Ann. Stockholm, 54A.
- Raudkivi, A.J. 1967. Loose boundary hydraulics. Oxford, Pergamon.
- Shen, H.W. (ed. and pub.) 1971. Sedimentation. Symposium to honour Professor H.A.Einstein, Colorado State University.

- Simons, D.B.; Senturk, F. 1977. Sediment transport technology. Fort Collins, Col. Water Resources Pub.
- Surmach, G.P. 1976. Wodnaya erozia : borba s nei (Soil erosion and protection against it). Leningrad, Gidrometeoizdat, p.254.
- Svebs, G.I. 1974. Formirovanie vodnoi erozii stoka nanosov : ikh otsenka (Formulation of water erosion sediment discharges and their evaluations). Leningrad, Gidrometeoizdat, p. 184.
- U.S. Interagency Committee on Water Resources. 1963. Determination of fluvial sediment discharge. Report No.14, Subcommittee on Sedimentation. Minneapolis, Min. Interagency Committee on Water Resources, St.Anthony Falls Hydraulic Laboratory.
- U.S. Interagency Sedimentation Committee on Water Resources. 1963. Proc. Federal Interagency Sedimentation Conf. Agr. Res. Surv. (Misc. publ.)
- Yalin, M.S. 1972. Mechanics of sediment transport. Oxford, Pergamon.
- Znamenskaja, N.S. 1975. Grijadovoe dvigienie nanosov, (Dune movement of the bed load). Leningrad, Gidrometeoizdat.

7 Annexes

7.1 TECHNIQUES DE CALCUL POUR LES INTERFLUVES

7.1.1 Objectif

On désire déterminer l'érosion annuelle en nappe et en rigoles pour une petite parcelle de terrain près de Farmington, dans le Nord-Ouest du Nouveau Mexique, Etats-Unis. Le climat du Nouveau Mexique aux environs de Farmington est semi-aride avec une pluviométrie moyenne annuelle de 400 mm. La parcelle secondaire étudiée, présentée plus loin (fig. 7.1) a 200 mètres de largeur sur 100 mètres de longueur. Une carotte de sondage au trou DH-2 montre un sol de sable brun fin, limoneux, non cohérent. On a déterminé ce sol dans la classification Unified Soil comme étant un sol fin sablo-limoneux. On a établi ultérieurement sa composition: 30% de limons fins, 65% de sables et 5% de matière organique. La pente est d'environ 8%, la végétation est clairsemée.

7.1.2 Prédiction de l'érosion en nappe et en rigoles

L'Equation Universelle de Perte en Sol est un outil largement utilisé pour la prédiction des pertes par érosion en nappe et rigole. Cette équation peut s'écrire:

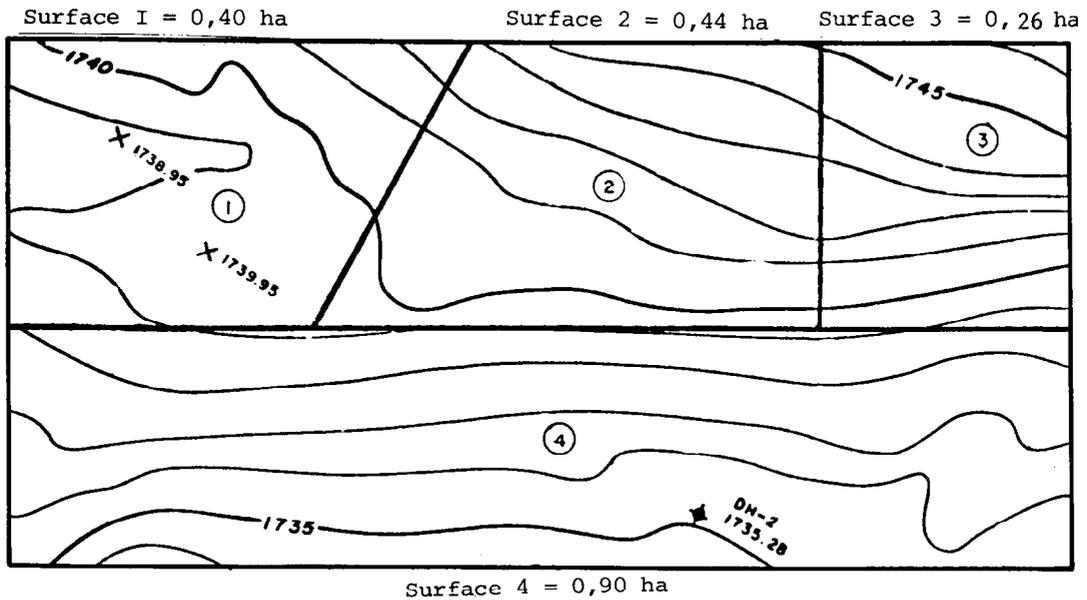
$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

- où
- A = Perte annuelle moyenne en sol, en tonnes par hectare.
 - R = Facteur d'érosivité de la pluie, habituellement égal à l'index (EI), local d'érosion pluviale pour une période donnée.
 - K = Facteur d'érodibilité du sol, qui est une mesure quantitative du taux d'érosion du sol exprimé en tonnes par hectare.
 - LS = Facteur topographique qui permet d'ajuster l'équation selon la longueur de la pente et son gradient.
 - C = Facteur agricole, rapport de l'érosion d'un site protégé par un mulch ou par des plantations à celle d'un site perturbé et laissé exposé aux actions érosives.
 - P = Facteur de protection qui prend en compte les techniques de lutte contre l'érosion telles que la culture en bandes, la culture selon les courbes de niveau, l'utilisation de terrasses.

Le produit A donne la prédiction de la perte en sol en unité de K, tonnes par hectare, rapportée à l'unité de temps représentée par R. La valeur de R est une mesure du potentiel érosif de la pluie. Il est égal à la moyenne annuelle de EI, sauf lorsqu'il y a un écoulement important dû à la fonte des neiges ou au dégel (on doit alors augmenter la valeur de EI pour obtenir R, en tenant compte de la fonte des neiges et du dégel). On peut déterminer R pour différentes régions aux Etats-Unis grâce à la figure 7.2 (Wischmeier et Smith, 1978). Pour les endroits où les cartes de l'index d'érosion ne sont pas disponibles, on peut obtenir une valeur de EI en se reportant à la page 100 du Guide no. 1 de la FAO pour les méthodes de protection (1977)

Pour des régions extérieures aux Etats-Unis, il est possible d'utiliser la figure 7.2 lorsqu'on y trouve des endroits ayant des conditions climatiques semblables à celle de la région étudiée. Dans cet exemple, R = 46.

La facteur d'érodibilité K est fonction de quatre caractéristiques des sols:



Espacement des courbes de niveau : 1 mètre

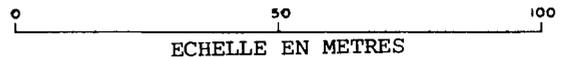


Fig. 7.1 Parcelles secondaires de 2 hectares. (Bureau of Reclamation, Etats-Unis).

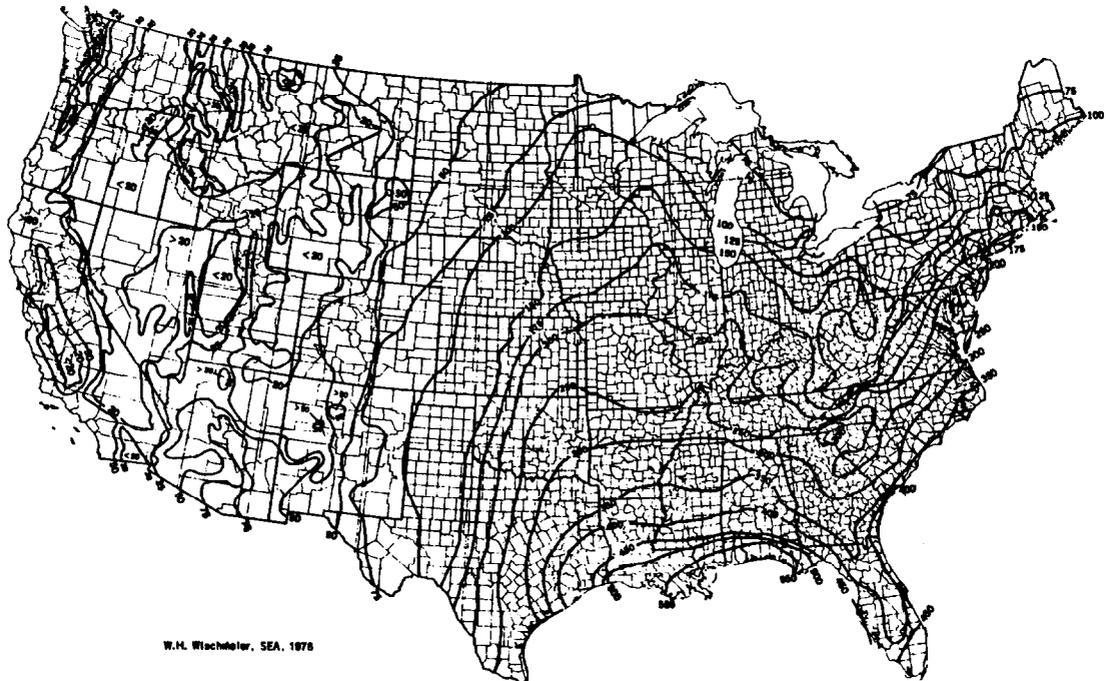


Fig. 7.2 Courbes d'égal index d'érosion (EI) pour les Etats-Unis. Le facteur d'érodibilité des sols est une fonction de 4 caractéristiques importantes des sols:

1. Le pourcentage de limon et de sable très fin (0,002 à 0,10 mm)
2. Le pourcentage de matière organique.
3. La structure du sol.
4. La perméabilité.

(d'après W.H. Wischmeier et Smith, S.E.A., U.S. Department of Agriculture, 1978)

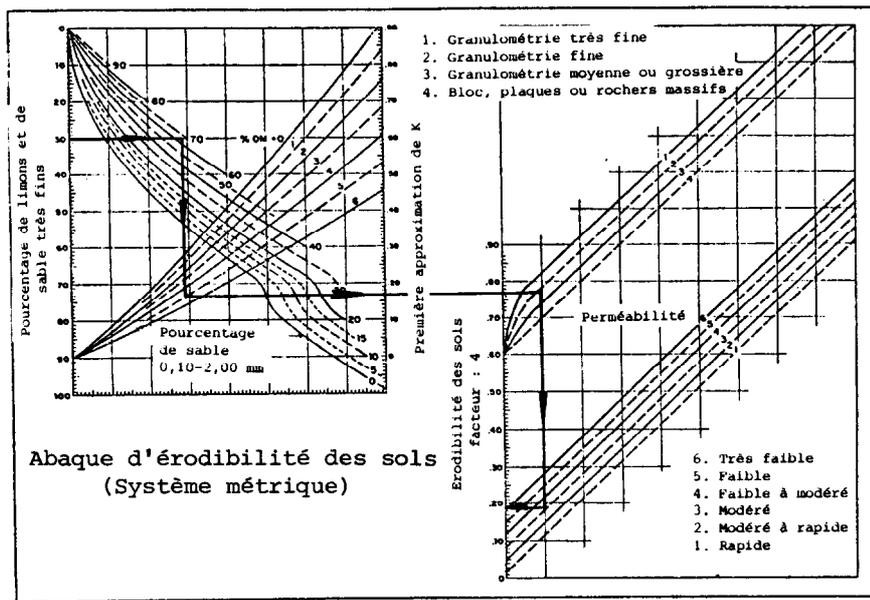


Fig. 7.3 Abaque d'érodibilité des sols (d'après W.H. Wischmeier and Smith, S.E.A., U.S. Department of Agriculture, 1978).

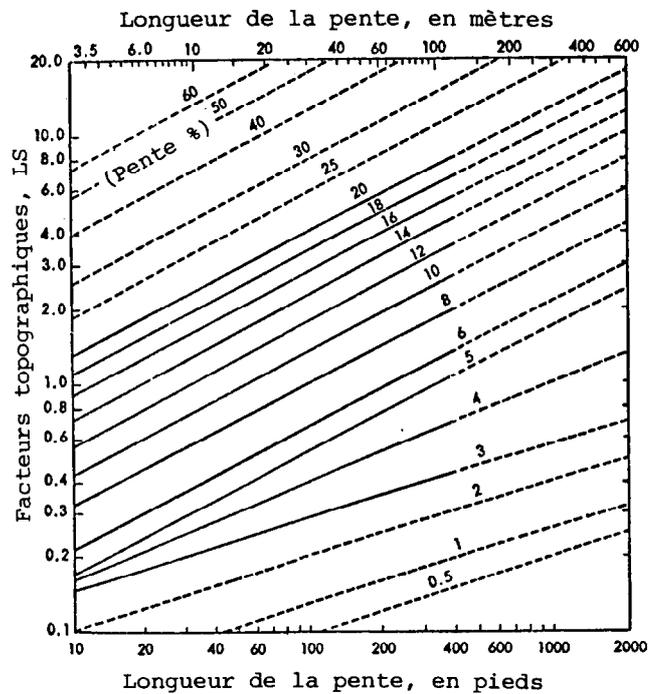


Fig. 7.4 Abaque du facteur de pente pour des conditions d'humidité des sols et de température propres à l'Ouest des Etats-Unis.
 Remarque : les lignes en tiretés correspondent à des extrapolations pour les pentes dépassant celles pour lesquelles on possède des données. Dans cet exemple, la zone étudiée était divisée en quatre zones secondaires ayant des caractéristiques de pente comme indiqué au tableau 7.1.
 (d'après W.H. Wischmeier et Smith, S.E.A., U.S. Department of Agriculture, 1978).

1. Pourcentage de limon et de sable fin.
2. Pourcentage de matière organique.
3. Structure du sol.
4. Perméabilité.

On peut obtenir la valeur de K avec l'abaque de la figure 7.3. On commence par l'échelle de gauche, en partant des pourcentages de limon et sables très fins, puis on utilise dans l'ordre le pourcentage de sables (0,10 à 2 mm), le pourcentage de matière organique, la structure des sols et la perméabilité. On interpole entre les courbes.

Pour l'exemple choisi: le pourcentage des limons et sables très fins est de 30%; celui de sable 65% et celui de matière organique 5%. La structure du sol est de classe 2 et la perméabilité de classe 3. Le facteur K résultant est de 0,19 tonnes par hectare.

Les effets topographiques de la longueur de pente et de son inclinaison sont pris en compte à l'aide du facteur adimensionnel LS que l'on peut obtenir avec la figure 7.4. Lorsqu'on détermine LS, la longueur de pente ne devrait guère dépasser 60 à 75 mètres, sinon il y a formation d'un réseau de drainage ou rupture de pente sur des longueurs supérieures.

Pour cet exemple, la zone étudiée a été subdivisée en 4 zones secondaires ayant les caractéristiques de pente indiquées dans le tableau 7.1.

Tableau 7.1
Caractéristiques de pente de la zone donnée en exemple

Subdivision de zone	Pente	Longueur de pente	Facteur LS
1	5	60	0,75
2	9	60	1,65
3	13	55	2,70
4	9	45	1,45

Le facteur agricole C est sans dimension, car c'est le rapport de la perte en sol d'un site protégé par la végétation à celle d'un site sans protection. Le tableau 7.2 fournit la valeur de C.

Le facteur adimensionnel P de technique de protection est introduit dans l'Equation Universelle de Perte en Sol pour tenir compte des travaux qui tendent à réduire la vitesse de ruissellement ou la longueur de la pente. Ces techniques comprennent les cultures en bandes, le long des courbes de niveau, la mise en place de terrasses. Le facteur P est compris entre 0,25 et 1,0 selon l'inclinaison de la pente et les travaux réalisés. On peut choisir P à l'aide du tableau 7.3. Pour l'exemple cité, la valeur 1 convient pour P.

Tableau 7.2

Valeur de C pour des pâturages permanents,
des terres d'élevage, ou des terres en friche a)

Canopée Type et hauteur de la canopée b)	Taux de couverture de la canopée (%) c)	Type d)	Couvert à la surface du sol Pourcentage de sol couvert					
			0	20	40	60	80	95-100
Pas de canopée appréciable		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.090	0.043	0.011
Canopée de mauvaises herbes de hautes tailles ou de broussailles basses (hauteur de chute de 0,5 m)	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.082	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.075	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.031	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.067	0.038	0.011
Broussailles notables ou buissons (hauteur de chute de 2 m)	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.085	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.085	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.081	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.077	0.040	0.011
Arbres mais pas de broussailles appréciables (hauteur de chute de 4 m)	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.085	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011

- a) toutes les valeurs indiquées supposent : (1) une répartition aléatoire de mulch ou de la végétation et (2) un mulch d'épaisseur notable là où il existe
- b) hauteur moyenne de chute des gouttes d'eau de la canopée à la surface du sol, en mètres
- c) portion de la surface totale qui serait cachée à la vue par la canopée dans une projection verticale
- d) G - la surface est couverte d'herbe, de plantes herbacées, de débris végétaux en décomposition et compactés ou de litière d'au moins 5 cm d'épaisseur (2 pouces)
W - la surface est couverte de mauvaises herbes avec un réseau racinaire peu développé en surface et/ou de résidus non décomposés.

Tableau 7.3 - Valeur de P pour différentes techniques de protection contre l'érosion des terres agricoles

Pente	Cultures selon la ligne de plus grande pente	Cultures en travers de la pente sans bandes	Cultures suivant les courbes de niveau	Cultures en travers de la pente avec bandes	Cultures en bandes selon les courbes de niveau
2.0-7	1.0	0.75	0.50	0.37	0.25
7.1-12	1.0	0.80	0.60	0.45	0.30
12.1-18	1.0	0.90	0.80	0.60	0.40
18.1-24	1.0	0.95	0.90	0.67	0.45

7.1.3 Solution

Le tableau 7.4 présente les résultats du calcul de l'érosion en nappe et rigoles de cet exemple.

Tableau 7.4 - Résumé du Calcul de la Perte en Sol

Sous Zones	Superficie (hectares)	R	K	LS	C	P	Tonnes par hectare A	Pertes par sous zones
1	0.40	30	0.19	0.76	0.24	1.0	1.04	0.4
2	0.44	30	0.19	1.65	0.24	1.0	2.26	1.0
3	0.26	30	0.19	2.70	0.24	1.0	3.69	1.0
4	0.90	30	0.19	1.45	0.24	1.0	1.98	1.8
Total	2.00							4.2

La perte en sol moyenne pour la zone dans son ensemble est de 2,1 tonnes/hectares/an.

7.2 Terminologie et définitions

Note : Le lecteur trouvera entre parenthèses le terme anglais. La liste qui suit constitue donc également un lexique Anglais-Français.

(Accelerated erosion) Erosion accélérée : Erosion se faisant à un taux supérieur à la normale pour un site donné et causée par l'homme en général par réduction de la couverture végétale.

(Accretion) Remblaiement : Processus d'accumulation des sédiments par l'écoulement des eaux, y compris par inondation (voir remblaiement latéral et vertical).

(Aggradation) Surélévation : Elévation du niveau du lit d'un cours d'eau, d'une plaine d'inondation, de bas-fonds ou d'autres compartiments fluviaux par remblaiement ou dépôt de matériaux d'érosion transportés depuis d'autres zones. C'est l'opposé de (dégradation) creusement.

(Alluvial) Alluvial : Qui se rapporte aux alluvions déposées par un courant ou un écoulement.

(Alluvial channel) Chenal alluvial : Voir (Alluvial stream).

(Alluvial deposit) Dépôt alluvial : Argiles, limons, sables, graviers et autres sédiments déposés par l'eau s'écoulant ou se retirant.

(Alluvial fans) Cônes de déjection : Dépôts en vrac de matériaux rocheux en forme de segment de cône qui se forme par suite d'une diminution soudaine de pente sur un cours d'eau en particulier au débouché d'un affluent dans la plaine d'inondation du cours d'eau principal. Connus aussi sous la dénomination de (Alluvial cones).

(Alluvial plain) Plaine alluviale : Plaine formée par le dépôt de matériaux alluvionnaires.

(Alluvial river) Cours d'eau alluvial : Cours d'eau qui a formé son lit par des processus de creusement et de dépôt. Les sédiments qu'il transporte (sans la charge solide due au ruissellement ou "wash load") sont analogues à ceux de son lit.

(Alluvial stream) Cours d'eau à lit mobile : Cours d'eau dont le lit est composé de quantités notables de sédiments transportés par l'écoulement, changeant en général de forme selon les variations de l'écoulement.

(Alluviation) Alluvionnement : Processus d'accumulation de dépôts de sédiments par endroits dans les cours d'eau, les plaines d'inondation, les lacs ou les estuaires, là où l'écoulement est ralenti. Voir remblaiement (Accretion).

(Alluvium) Alluvions : Terme général désignant tout dépôt détritique résultant du transport (récent) de sédiments par les cours d'eau, c'est-à-dire les sédiments déposés dans le lit des cours d'eau, dans les plaines d'inondation et les cônes de déjection des torrents au pied des montagnes.

(Antidunes) Antidunes : Forme du lit apparaissant à une vitesse supérieure à celle qui forme des dunes et des fonds plats. Les antidunes se déplacent en général vers l'amont accompagnées en phase par des vagues à la surface de l'eau.

(Armouring) Pavage : Formation d'une couche résistante de particules relativement grandes par suite du départ des particules fines par érosion.

(Avulsion) Détournement naturel : Modification soudaine et naturelle du lit d'un cours d'eau telle que l'eau est détournée de son trajet précédent.

(Bank) Berge, rive : Elévation de terrain bordant un cours d'eau, un lac ou la mer.

(Bar) Banc : Dépôt de sédiment (sable ou graviers) sous forme de banc dans le lit d'un cours d'eau ou à son embouchure et faisant obstacle à l'écoulement ou à la navigation.

(Barrage, voir aussi : Barrier, Dam, Weir) Barrage : (1) Barrage en travers d'un cours d'eau, muni de vannes ou d'autres systèmes de régulation pour maîtriser la hauteur du plan d'eau à l'amont,

pour régulariser l'écoulement, ou pour dériver des volumes d'eau dans un canal, (2) voir aussi barrage pour eaux souterraines, aménagement empêchant l'intrusion d'eau salée dans un cours d'eau soumis à l'influence de la marée.

(Basin) Bassin versant : Région drainée par un cours d'eau ou un lac.

(Beach) Rivage : Accumulation de matériaux non cohérents que l'on trouve entre la terre ferme et l'eau, identifié en général à la zone qui s'étend entre le niveau de basses eaux et celui des hautes eaux, formée par l'action des vagues (ESTRAN quand il s'agit de la mer).

(Bed load) Charge de fond : Matériaux se déplaçant sur ou près du fond par roulage, glissement et s'élevant parfois, brièvement, au-dessus du lit sur une hauteur égale à quelques diamètres (charriage et saltation).

(Bed load discharge) Transport de fond : Quantité de matériaux de fond traversant une section en travers par unité de temps.

(Bed load sampler) Préleveur de sédiments de fond : Appareil servant à mesurer les sédiments se déplaçant sur ou près du fond.

(Bed material) Matériaux en fond : Mélange des sédiments dont le lit est composé. Les particules des matériaux de fond peuvent se déplacer momentanément ou dans des conditions d'écoulement futures.

(Bed-material load) Charge en matériaux de fond : Partie de la charge totale d'un cours d'eau qui est composée de particules de tailles rencontrées en quantités notables dans les parties mouvantes du lit. Le débit solide en matériaux de fond sera la charge de matériaux au fond transitant dans la section par unité de temps.

(Bed-material sampler) Préleveur de matériaux de fond : Appareil permettant de prélever des échantillons des matériaux composant le lit d'un cours d'eau.

(Bed-movable) Fond mobile : Lit d'un cours d'eau dont les matériaux sont facilement déplacés par le courant.

(Bend) Courbe : Changement de direction d'un cours d'eau.

(Bottom current) Courant de fond, courant de densité : Mouvement d'une eau très dense près du fond d'une retenue.

(Bottomset bed) Lit de décantation : Matériaux fins (généralement limons et argiles) se déposant lentement au fond dans une eau calme et qui peuvent à la longue être recouverts par les matériaux d'un lit sableux intermédiaire ou par les dépôts les plus récents en surface.

(Boulder) Rocher, bloc roulé : Voir l'échelle des tailles des particules, tableau 7.5 et figure 7.5.

(Braided river) Cours d'eau anastomosé : Chenal large, peu profond et instable où l'écoulement se fait à travers de nombreux petits chenaux anastomosés séparés par des bancs ou des hauts-fonds.

(Catchment) Bassin versant : Surface de drainage alimentant un lac, un cours d'eau, à l'amont d'un site de mesure (voir Basin) et (Watershed).

(Channel) Chenal : Lit naturel ou artificiel qui contient de l'eau périodiquement ou de façon continue (voir Watercourse).

(Channel-fill deposits) Dépôts de remblayage : Dépôts de sédiments dans un chenal le remplissant partiellement ou complètement. De tels matériaux s'accumulent lorsque la capacité de transport est insuffisante pour évacuer les matériaux aussi vite qu'ils ont été apportés.

(Channel, regime) Chenal stable : Chenal qui, en moyenne, est en équilibre transversalement et longitudinalement. Chenal stable, canal stable. Chenal dans lequel les remblaiements compensent en moyenne les affouillements.

(Clay) Argile : Voir échelle des tailles des particules, tableau 7.5 et figure 7.5.

(Cobbles) Galets : Voir échelle des tailles des particules, tableau 7.5 et figure 7.5.

(Cohesive sediments) Sediments consolidés, cohérents : Sédiments dont la résistance à la mise en mouvement initiale, ou érosion, est influencée par l'existence de liens de cohésion entre les particules, s'ajoutant à leurs propriétés physiques et à leurs positions relatives par rapport aux particules voisines. Au sens large, ce terme concerne également les sols liés par un réseau racinaire et protégés par un couvert végétal.

(Colluvial deposits) Colluvions : Dépôts non triés, ou peu triés, accumulés le long des vallées par le lessivage des pentes et par différents types de mouvements de masse sur les flancs des collines adjacentes.

(Concentration of sediment by weight) Concentration en poids des sédiments : Rapport du poids de matière sèche d'un mélange eau-sédiments au poids du mélange. Lorsque cette concentration en poids a été déterminée d'abord en parties par million (ppm), on peut la convertir en milligramme par litre (mg l^{-1}) grâce au tableau 7.6.

(Concentration of sediment by volume) Concentration des sédiments en volume : Rapport du volume des matières sèches dans un mélange eau-sédiments au volume du mélange.

(Critical trative force) Force tractrice critique : Force minimum nécessaire pour entraîner les particules de sédiment dans le lit du cours d'eau.

(Degradation) Creusement, abaissement par érosion : Abaissement du fond des cours d'eau, des plaines d'inondation et du fond des systèmes aquatiques par érosion des matériaux du fond. C'est le contraire du remblaiement (aggradation).

(Density) Masse volumique : Masse de matière par unité de volume.

(Density current) Courant de densité : Mouvement d'un fluide par dessous, à travers ou au-dessus d'un autre fluide de densité différente de la sienne.

(Denudation) Dénudation, mise à nu : (1) Erosion de la terre par la pluie, le gel, le vent ou le ruissellement. Signifie souvent la dénudation totale jusqu'au bedrock. (2) Mise à nu. Suppression naturelle ou artificielle de toute végétation et de la matière organique.

(Deposition) Dépôt : Processus chimiques ou mécaniques par lesquels s'accablent par places les sédiments.

(Depth-integrating sediment sampler) Préleveur de sédiment par intégration sur une verticale : Appareil que l'on déplace verticalement à une vitesse à peu près constante de la surface jusqu'à quelques centimètres au-dessus du fond. Il recueille un échantillon pondéré par le débit du mélange eau-sédiments puisqu'il se déplace sur la verticale à une vitesse sensiblement constante.

(Depth integration) Intégration verticale : Méthode permettant d'obtenir des échantillons de débits solides pondérés par le débit sur des verticales dans un cours d'eau, les mesures ne se faisant pas dans la zone proche du fond. On fait une sommation continue de fractions du mélange eau-sédiments pendant que le préleveur parcourt la verticale à une vitesse à peu près constante.

(Detritus) Matériaux détritiques : (1) Petits fragments de roche arrachés d'une masse rocheuse par l'eau ou la glace (usure ou cassure), ou (2) débris minéraux les plus lourds transportés par des cours d'eau naturels, en général sous forme de transport de fond.

(Diameter, fall (standard)) Vitesse de chute standard : Voir "Standard fall diameter".

(Diameter, sedimentation) Diamètre équivalent : Diamètre d'une sphère de même masse volumique et ayant la même vitesse limite de chute que la particule considérée dans le même fluide. On peut considérer la vitesse limite de chute dans n'importe quel fluide, à n'importe quelle température et elle peut être influencée par des particules voisines.

(Diameter, sediment (standard)) : voir Standard sedimentation diameter.

(Discharge-weighted concentration) Concentration pondérée par le débit : Poids sec de sédiment par unité de volume du débit ou rapport du débit en poids sec de sédiment au débit en poids du mélange eau-sédiment.

Tableau 7.5 - Echelles des tailles des particules

		Echelle AGU*		Echelle URSS	
Grandes dimensions	Nom de la classe	mm	Nom de la classe	mm	
Grandes dimensions	Rochers : Très grands	4000 - 2000	Rochers : Grands	1000 - 500	
			Moyens	500 - 200	
			Petits	200 - 50	
	Galets : Gros	250 - 130	Galets : Gros	100 - 50	
			Moyens	50 - 20	
			Petits	20 - 10	
	Graviers : Très grossiers	64 - 32	Graviers : Grossiers	10 - 5	
			Moyens	5 - 2	
			Petits	2 - 1	
	Petites dimensions	Nom de la classe	mm	Nom de la classe	mm
Petites dimensions	Sable : très grossier	2.000 - 1.000	Sable : Grossier	1 - 0.5	
			Moyen	0.5 - 0.2	
			Fin	0.2 - 0.1	
			Très fin	0.1 - 0.05	
	Limon : Grossier	0.062 - 0.031	Limons : Très grossiers	0.1 - 0.05	
			Moyens	0.05 - 0.01	
			Petits	0.01 - 0.005	
	Limon : Moyen	0.031 - 0.016	Limon : Normal	0.01 - 0.005	
			Fin	0.005 - 0.001	
			Très fins	< 0.001	
	Argile : Grossière	0.004 - 0.0020	Argile :		
			Moyenne	0.0020 - 0.0010	
		Fine	0.0010 - 0.0005		
		Très fine	0.0005 - 0.00024		

* AGU : American Geophysical Union

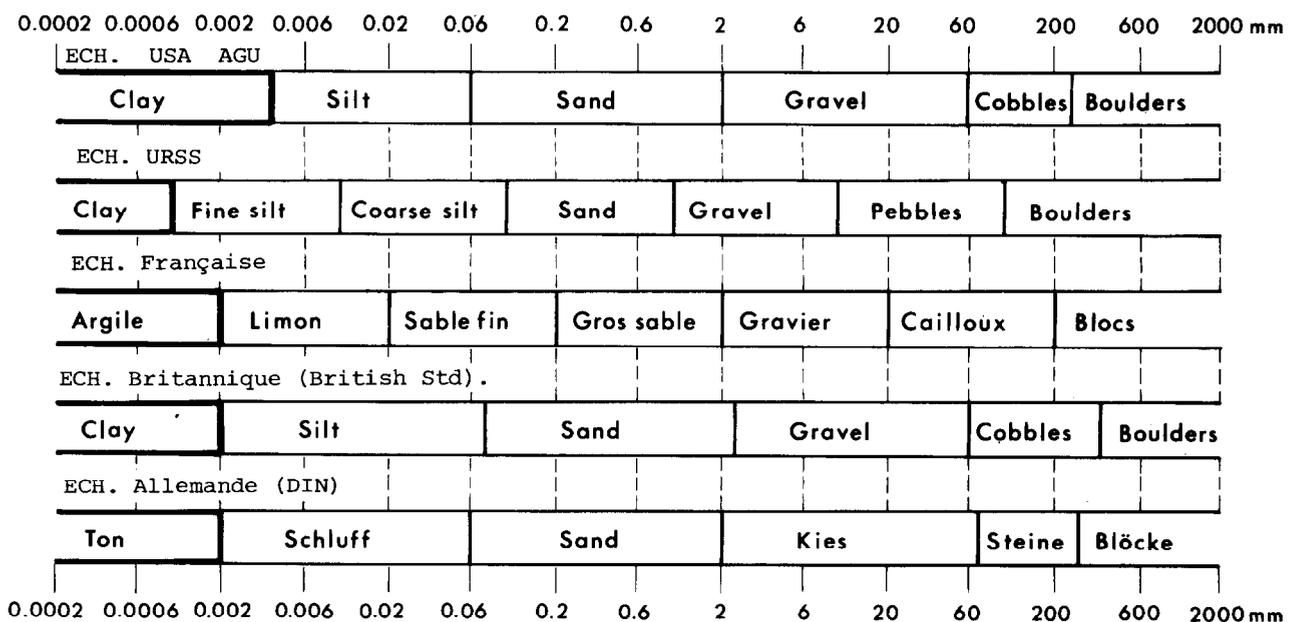


Fig. 7.5 - Comparaison des échelles nationales des tailles des particules (d'après différentes sources, A. Sundborg, 1980).

Tableau 7.6 - Facteurs de conversion de la concentration en parties par million (ppm) en milligrammes par litre*

Gamme de concentration en 1000 ppm	Facteur de conversion	Gamme de concentration en 1000 ppm	Facteur de conversion	Gamme de concentration en 1000 ppm	Facteur de conversion
0 - 7.95	1.00	153 - 165	1.11	362 - 380	1.30
8.0 - 23.7	1.01	166 - 178	1.12	381 - 398	1.32
23.8 - 39.1	1.02	179 - 191	1.13	399 - 416	1.34
39.2 - 54.3	1.03	192 - 209	1.14	417 - 434	1.36
54.4 - 69.2	1.04	210 - 233	1.16	435 - 451	1.38
69.3 - 83.7	1.05	234 - 256	1.18	452 - 467	1.40
83.8 - 97.9	1.06	257 - 278	1.20	468 - 483	1.42
98.0 - 111	1.07	279 - 300	1.22	484 - 498	1.44
112 - 125	1.08	301 - 321	1.24	499 - 513	1.46
126 - 139	1.09	322 - 341	1.26	514 - 528	1.48
140 - 152	1.10	342 - 361	1.28	529 - 542	1.50

*La densité de l'eau est prise égale à 1000 kg/m³ et la densité relative des sédiments à 2,65. Multiplier la concentration en ppm par le facteur de conversion

(Drainage bassin) Surface de drainage : voir bassin versant.

(Dunes) Dunes : Formes du lit à profil triangulaire avec une faible pente amont, avançant par la progression des sédiments sur cette pente amont et par leur dépôt sur la pente abrupte aval. Les dunes se déplacent vers l'aval à une vitesse faible comparativement avec celle du courant.

(Echo sounder) Echo sondeur : Instrument permettant de déterminer la profondeur en mesurant le temps mis par un signal sonore pour faire un aller-retour entre la surface et le fond.

(Entrainement) Entraînement : Processus d'arrachement et de transport, comme la mise en mouvement des sédiments et leur transport par les courants sous forme de transport de fond ou en suspension.

(Equal-discharge-increments (EDI)) Secteurs d'égal débit : Méthode pour obtenir la concentration de matière en suspension pondérée par le débit dans un écoulement à une section en travers, dans laquelle (1) on procède à une intégration verticale au centre de trois secteurs ou plus d'égal débit en (2) utilisant des vitesses verticales d'intégration qui fournissent des volumes égaux de prélèvement pour tous les secteurs.

(Equal-width-increments (EWI)) Secteurs d'égales largeurs : Méthode pour obtenir la concentration de matière en suspension pondérée par le débit dans un écoulement à une section en travers dans laquelle on procède (1) à une intégration verticale sur une série de verticales également espacées dans la section et (2) pour laquelle on utilise la même vitesse d'intégration verticale pour toutes les mesures.

((Erosion) Erosion : (1) Processus naturel par lequel les roches et les terres sont pulvérisées au sens large et déplacées ou (2) le décapage de la surface des terres par le détachement et le transport de matériaux des sols et des roches sous l'action de l'eau en déplacement ou sous l'action d'autres agents géologiques.

(Fall velocity) Vitesse de chute : Vitesse de chute ou de décantation dans un milieu donné, à distinguer de la vitesse de chute standard. Egalement, vitesse de décantation.

(Fine material) Matériau fin : Particule de plus petite taille que celles présentes en quantités appréciables dans les matériaux du lit, normalement limons et argiles (particules plus petites que 0,062 mm).

(Fine-material load) Charge en matériaux fins : Partie de la charge totale en sédiments composée de particules plus petites que celles présentes en quantités appréciables dans les matériaux du lit. En général, la charge en matériaux fins est composée de particules plus petites que 0,062 mm.

(Fluvial) Fluvial : (1) Qui se rapporte aux cours d'eau, (2) poussant ou vivant dans des cours d'eau ou des étangs (3) produit par l'action d'un cours d'eau, par exemple plaine fluviale.

(Fluvial sediment) Sédiments fluviaux : Matériaux transportés ou en suspension dans les cours d'eau ou déposés par les cours d'eau.

(Foreset bed) Lit intermédiaire : Couches inclinées de matériaux sableux déposés sur ou le long d'une pente frontale relativement forte s'avancant et couvrant progressivement le lit et qui est recouverte à son tour par la couche supérieure du lit.

(Froude number) Nombre de Froude : Nombre sans dimension exprimant le rapport de forces d'inertie aux forces de gravité.

v = vitesse du courant
g = accélération de la pesanteur
= longueur caractéristique

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \ell}}$$

(Gauging station) Station de mesure : Section choisie dans le chenal d'un cours d'eau dans laquelle une ou plusieurs variables sont mesurées en continu ou périodiquement comme indicateur du débit et d'autres paramètres.

(Geological erosion) Erosion géologique : Processus d'érosion sur ou dans un type de paysage non perturbé par l'activité de l'homme.

(Graded stream) Cours d'eau stable : Cours d'eau dans lequel on a atteint un état d'équilibre tel que, dans une période donnée, le débit et la charge solide entrant dans le système sont compensés par le débit et la charge solide le quittant.

(Grading) Mode de répartition granulométrique : Degré de mélange des classes granulométriques dans les sédiments. (Well graded) Bien réparti signifie une distribution plus ou moins continue depuis les éléments grossiers jusqu'aux éléments fins. (Poorly graded) Mal réparti signifie que les sédiments sont de tailles peu variées ou réparties de façon discontinue.

(Gravel) Gravier : Voir échelle des tailles des particules, tableau 7.5 et figure 7.5.

(Gross erosion) Erosion totale : Total de l'érosion en nappe, en ravines et dans le réseau de drainage d'un bassin versant, exprimé en général en tonnes mais parfois en volume.

(Gully erosion) Erosion en ravine : Processus d'érosion du sol par incision avec une profonde entaille ou un chenal à bords francs faisant suite à un bief non incisé et créant une rupture soudaine de la pente.

(Instantaneous sampler) Préleveur instantané : Appareil permettant de recueillir instantanément un échantillon représentatif de sédiments en suspension dans un cours d'eau en un point donné et à l'instant désiré.

(Interfluvial) Interfluve : Toute la surface du bassin versant excepté le réseau de drainage.

(Isokinetic sampling) Prélèvement à vitesse conservée : Prélèvement fait de telle façon que le mélange eau-sédiments pénètre dans l'ajutage du préleveur sans accélération par rapport au courant ambiant.

(Lacustrine sediment) Sédiment lacustre : Sédiment déposé dans un lac.

(Lag deposits) Dépôts sélectifs : Dépôts dans le lit d'un cours faits des particules les plus grandes et les plus lourdes qui sont triées et laissées en arrière, tandis que les particules plus petites et plus légères sont emportées plus loin et plus vite vers l'aval.

(Lateral accretion deposits) Dépôts par remblaiement latéral : Dépôts de sédiments qui se forment le long de la rive interne (convexe) dans une courbe (voir point bar).

(Mean particle size or diameter) Taille ou diamètre moyen d'une particule : Moyenne pondérée des tailles des sédiments classés par poids.

(Meander) Méandre : Élément d'une série de sinuosités, coudes ou boucles qui se forment dans un cours d'eau développé.

(Meander scrolls) Bourrelets de méandre : Dépressions et levées de sédiments qui se forment sur la rive convexe d'une courbe lorsque le méandre migre vers l'aval de la vallée en se déplaçant vers la rive concave.

(Measured sediment load) Charge de sédiments mesurée : La part de la charge totale en sédiments qui peut être mesurée avec les appareils de prélèvement.

(Mechanical analysis) Analyse granulométrique : Détermination de la distribution des tailles des particules par triage, tamisage ou d'autres moyens de séparation mécanique.

(Median size or diameter) Taille ou diamètre médian : Taille de sédiment au-dessous de laquelle 50% du total en poids est composé de particules plus petites. Elle est obtenue graphiquement en relevant le diamètre correspondant au milieu de la distribution granulométrique.

(Morphology fluvial) Morphologie fluviale : Science de la formation des lits, des plaines d'inondation et des formes des cours d'eau sous l'action de l'eau.

(Mudflow) Coulée de boue, lave torrentielle : Masse d'eau hyperconcentrée en sédiments. Du fait d'une forte viscosité et d'une faible fluidité, se déplace plus lentement que l'eau.

(Naturel levee) Bourrelet de berge : Bourrelet surélevé ou crête sur la plaine d'inondation adjacente au chenal. Contient généralement des matériaux plus grossiers déposés par les eaux de crue débordant par-dessus la berge. Très souvent, ils sont situés sur la rive concave. Lorsque les sédiments transportés sont à grain fin, les bourrelets de berge peuvent être absents ou presque imperceptibles.

(Nominal diameter) Diamètre nominal : Diamètre d'une sphère qui a le même volume que la particule de sédiment.

(Non cohesive sediments) Sédiments meubles : Sédiments composés de particules indépendantes dont les mouvements, pour des forces d'érosion données, dépendent uniquement de leurs propriétés physiques : forme, taille, densité et aussi de leur position relative par rapport aux particules voisines.

(Oxbow lake) Bras mort : Portion isolée de la courbe d'un méandre.

(Particles, roundness of) : voir Roundness.

(Particule size) Taille d'une particule : Diamètre d'une particule déterminé par décantation, tamisage, mesure au micromètre ou par des méthodes de mesure directes (voir tableau 7.5 et figure 7.5).

(Particule size, average) Moyenne de la taille des particules : On peut calculer la taille moyenne des particules d'un échantillon de sédiments à partir des moyennes des tailles D_{10} , D_{50} , D_{90} (voir particle size distribution : distribution granulométrique).

(Particle size distribution) Répartition granulométrique : Quantité relative d'un échantillon de sédiments ayant une taille donnée, exprimée en général en pourcentage des sédiments en poids plus petits qu'une taille donnée D_g .

(Particle size, intermediate axis) Diamètre caractéristique : Taille d'un bloc ou d'une particule de sédiment définie par la mesure directe de l'axe perpendiculaire à un plan défini par le plus grand axe et le plus petit.

(Particule size sorting) Classement par taille des particules : Mesure de la gamme des tailles dans une distribution granulométrique comme par exemple l'écart $D_{90}-D_{10}$.

(Particule size, standard deviation) Ecart-type des tailles des particules : Mesure obtenue par la formule $1/2 (D_{84}/D_{50} + D_{50}/D_{16})$.

(Parts per million) Parties par million, ppm : Une partie en masse de sédiments dans un million de parties du mélange eau-sédiment.

(Plane bed) Lit plat : Lit sédimentaire sans élévation ni dépression plus grande que la taille maximum des matériaux du lit. Ceci est caractéristique des parties les plus basses des régimes stables de hautes eaux.

(Point bar) Banc localisé : Dépôt localisé de sédiments sur la rive convexe dans le coude d'un cours d'eau (voir Lateral accretion).

(Point-integrating sediment sampler) Préleveur de sédiment par intégration ponctuelle : Instrument servant à prélever un échantillon représentatif du mélange eau-sédiment à une profondeur choisie sur une verticale pendant un temps déterminé.

(Point-integrated sample (point sample)) Echantillon obtenue par intégration ponctuelle : Mélange eau-sédiment prélevé de façon continue à une vitesse proche de la vitesse du courant, pendant un temps déterminé, par un appareil préleveur suspendu en un point relativement fixe d'une verticale.

(Point integration) Intégration ponctuelle : Méthode de prélèvement servant à obtenir la concentration moyenne en sédiment en un point d'un cours d'eau.

(Point sample) Echantillon ponctuel : Echantillon du mélange eau-sédiments prélevé en un seul point avec un appareil à prélèvement, soit instantané, soit par intégration.

(Pollution) Pollution : Etat de fait ayant pour cause la présence de substances de telle nature et en telle quantité que la qualité de l'environnement est altérée (voir Water pollution).

(Pumpingsampler) Préleveur par pompage : Préleveur de sédiments en suspension dans lequel le mélange eau-sédiments est aspiré par un tuyau ou une durite dont l'embouchure est placée au point de prélèvement désiré.

(Rating curve, sediment) Courbe de tarage en débit solide : Relation dans une section d'un cours d'eau entre débit liquide et débit solide.

(Reach) Bief : Portion de chenal entre deux sections en travers déterminées.

(Regimen of a stream) Régime d'un cours d'eau : Caractéristiques d'un cours d'eau en ce qui concerne les débits classés, la forme et les changements du lit, la compétence (capacité de transporter des sédiments), le volume de sédiments transportés.

(Relative density) Densité relative : Rapport du poids d'un volume d'une substance au poids du même volume d'eau à 4°C.

(Relative density of sediment deposits) Teneur en matière solide d'un dépôt de sédiment : Poids de sédiments secs par unité de volume du dépôt en place (Densité apparente, volume weight, bulk density).

(Reservoir) Retenue : Retenue d'eau ou lac régularisé dans lequel l'eau est recueillie et stockée.

(Rill erosion) Erosion en rigoles : Erosion des terres sous forme d'incision du terrain, petites mais bien définies, de moins de 30 cm de profondeur. C'est un processus intermédiaire entre l'érosion en nappe et l'érosion en ravines.

(Ripple) Rides : Formes de section triangulaire et de petite dimension sur le fond du lit, analogues aux dunes mais avec de petites amplitudes et des périodes bien plus fiables.

(River) Cours d'eau, fleuve : Cours d'eau important qui sert de drain naturel à un bassin versant de grande taille. L'emploi de ce terme est tout relatif quant à la taille. Un cours d'eau appelé "river" en zone aride prendra à peine le nom de "creek" en zone humide. L'emploi de ce mot varie beaucoup selon les usages locaux (voir Water course).

(Riverbed) Lit : Partie la plus basse d'une vallée fluviale façonnée par l'écoulement et dans laquelle s'écoule la plus grande part du débit liquide et des débits solides entre les crues.

(Roundness) Sphéricité : Rapport du rayon de courbure moyen des côtés d'une particule au rayon du cercle inscrit maximum à l'intérieur de la particule.

(Runoff) Ecoulement : Partie des précipitations retrouvée dans les cours d'eau, parfois séparée en ruissellement, écoulement des nappes, drainage.

(Sampling vertical) Verticale de prélèvement : Voir "vertical".

(Sand) Sable : Voir échelle des tailles des particules, tableau 7.5 et figure 7.5.

(Scale of particule size) Echelle des tailles des particules : Voir tableau 7.5 et figure 7.5.

(Scour) Affouillement : Elargissement d'une section par enlèvement des matériaux des berges sous l'action de l'eau en mouvement.

(Sediment) Sédiment : Particules solides, provenant des roches, ou du milieu biologique, qui sont ou ont été transportées par l'eau.

(Sediment concentration) Concentration en sédiments : Rapport du poids de matière sèche au poids de l'échantillon eau-sédiment.

(Sediment delivery ratio) Taux d'apport de sédiment : Rapport de la masse de sédiments apportés à la masse de l'érosion globale exprimée en pourcentage.

(Sediment discharge) Débit solide : Masse ou volume de sédiments passant dans une section en travers pendant une unité de temps. On peut préciser le terme par des qualificatifs : débit solide en suspension, débit solide de fond ou débit solide total.

(Sediment load) Charge solide : Quantité de matières solides transportées à travers une section en travers par unité de temps. Charge de fond plus charge de ruissellement.

(Sediment particle) Particule de sédiment : Fragment de matière minérale ou organique érodée ou agglomérée avec d'autres particules.

(Sediment sample) Echantillon de sédiment : Quantité du mélange eau-sédiments prélevée afin d'estimer : (1) la concentration moyenne de sédiments en suspension, (2) la distribution granulométrique moyenne de sédiments en suspension ou déposés, (3) la masse volumique des sédiments déposés ou (4) d'autres caractéristiques des sédiments.

(Sediment yield) Apport de sédiments : Afflux total de sédiments dans un bassin versant ou à un endroit donné pendant une certaine période. Cela concerne aussi bien le transport du fond que les matières en suspension. S'exprime généralement en poids par unité de temps.

(Sedimentation) Erosion, transport solide et sédimentation : Terme recouvrant les cinq processus fondamentaux responsables de la formation des sédiments (1) altération, (2) arrachement, (3) transport, (4) dépôt et (5) diagenèse.

(Sedimentology) Sédimentologie : Science des sédiments, des roches sédimentaires et de leurs processus de formation.

(Settling) Décantation : Processus de dépôt par gravité des matières en suspension apportées par l'eau, ou d'autres liquides. Ce phénomène a généralement pour cause la réduction de la vitesse du fluide au-dessous de la vitesse limite qui lui permet de transporter les matières en suspension.

(Sheet erosion) Erosion en nappe : Arrachement plus ou moins uniforme sur une surface du sol par le splash des gouttes de pluie et le ruissellement superficiel en l'absence de chenaux d'écoulement de plus de 30 cm de profondeur. On inclut cependant avec l'érosion en nappe les petites rigoles nombreuses et remarquables qui sont causées par de petites concentrations de l'écoulement. On peut facilement effacer les rigoles par les pratiques agricoles habituelles. La profondeur maximum d'une rigole est de 30 cm. Les chenaux de plus grande taille sont des ravines.

(Sieve diameter) Diamètre de tamisage : Dimension minimum de la maille d'un tamis à travers lequel la particule peut passer.

(Silt) Limon : Particules minérales individualisées dont les diamètres vont de 0,004 mm à 0,062 mm. Voir échelle des tailles des particules tableau 7.5 et figure 7.5.

(Sloughs) Bras-morts : Zones d'eau dormantes qui se forment entre les bourrelets des méandres et le long des vallées dans les dépressions creusées par les écoulements d'inondation.

(Soil) Sol : Matériaux minéraux et organiques recouvrant les surfaces qui ont été suffisamment modifiées et altérées par les agents physiques, chimiques et biologiques pour autoriser la croissance des plantes.

(Sorting) Triage : Processus dynamique par lequel les particules sédimentaires présentant des caractéristiques particulières (telles que des tailles, des formes, des masses volumiques semblables) sont sélectionnées naturellement et séparées des particules associées mais dissemblables par l'action des eaux courantes.

(Sphericity) Sphéricité (Shape factor) Facteur de forme : La sphéricité véritable est le rapport de l'aire de la surface d'une sphère qui a le même volume que le grain considéré à l'aire de la surface du grain. On exprime cela plus commodément par le rapport du diamètre d'un cercle dont l'aire est égale à celle de la projection du grain, quand il repose sur son plus grand côté au diamètre du plus petit cercle circonscrit à cette projection.

(Splay) Délaié ou laisse de crue : Dépôts de débris laissés par les crues, généralement du sable grossier, sont la forme de dépôts épars dans les plaines d'inondations.

(Standard fall diameter) Diamètre standard : Diamètre d'une sphère de densité égale à 2,65 et qui a la même vitesse standard de chute que la particule.

(Standard fall velocity) Vitesse de chute standard : Vitesse de chute moyenne limite qu'atteindrait une particule isolée tombant dans de l'eau distillée immobile d'étendue infinie à 24°C.

(Standard sedimentation diameter) Diamètre standard de sédimentation : Diamètre d'une sphère qui a la même densité et la même vitesse de chute que la particule considérée.

(Streambank erosion) Erosion des berges : Entraînement des matériaux des berges du chenal d'un cours d'eau sous l'effet de la force du courant et des affouillements des berges.

(Stream discharge) Débit d'un cours d'eau : Volume s'écoulant dans une section en travers par unité de temps (les eaux naturelles contiennent à la fois des matériaux dissous et en suspension).

(Suspended-sediment concentration by weight) Concentration en poids de sédiment en suspension : Voir (concentration of sediment).

(Suspended-sediment discharge) Débit solide en suspension : Quantité de matières en suspension traversant une section en travers par unité de temps.

(Suspended-sediment load) Charge solide en suspension : Poids de particules en suspension porté en permanence par l'eau.

(Suspended-sediment sample) Echantillon de matières en suspension : Volume du mélange eau-sédiment, représentatif pour la concentration et la répartition granulométrique.

(Suspended-sediment sampler) Préleveur de sédiments en suspension : Appareil recueillant un échantillon représentatif de l'eau et de sa charge en suspension.

(Texture) Texture : Aspects géométriques des particules composant un dépôt de sédiments ou de rochers, dont la taille, la forme et la disposition.

(Terminal velocity) Vitesse limite : Vitesse limite atteinte asymptotiquement par une particule tombant sous l'effet de la gravité dans un liquide au repos à une température déterminée.

(Thalweg) Thalweg : Ligne joignant les points les plus bas ou les plus profonds le long du lit d'un cours d'eau ou dans une vallée, sous l'eau ou non.

(Topset bed) Lit supérieur : Couche de sédiments déposés à la surface du fond d'un delta progressant de façon continue à partir de la plaine alluviale à l'amont.

(Total sediment discharge) Débit solide total : Quantité totale de sédiments passant par une section en travers par unité de temps.

(Total sediment load (total load)) Charge solide totale : Totalité des sédiments en mouvement dans un cours d'eau. Partie se déplaçant en suspension, augmentée de la charge de fond.

(Traction) Traction : Terme général pour désigner le transport de débris par les eaux courantes, transport dans lequel les particules sont balayées près du fond du cours d'eau par roulement, glissement et saltation (voir bed load, charge de fond).

(Tractive force) Force tractrice : Force exercée par l'écoulement sur les particules de sédiments au repos sur le lit du cours d'eau pour initier le déplacement.

(Transect) Transect : Section en travers utilisée comme échantillon pour estimer une caractéristique ou plusieurs de la zone.

(Trap efficiency) Efficacité du piégeage : Proportion des sédiments entrant qui se déposent dans le lac ou le réservoir, en %.

(Transportation) Transport : Processus complexes du déplacement, d'un endroit à l'autre des particules de sédiments sous l'effet de l'eau. Les facteurs principaux qui influencent le transport sont : la turbulence, le rapport des vitesses de décantation à la vitesse du courant,

la forme, la taille, la densité, la saltation et la masse de sédiments.

(Turbidity) Turbidité : Un effet des propriétés optiques d'un échantillon qui entraîne la dispersion des rayons lumineux et leur absorption plutôt que leur transmission en ligne droite à travers cet échantillon. La turbidité de l'eau est causée par la présence de matières en suspension et dissoutes telles que argiles, limons, matières organiques finement divisées, le plancton, d'autres organismes microscopiques, acides organiques, et des polluants colorés.

(Turbidity current) Courant de densité : Courant de densité dû à une forte concentration.

(Turbulence) Turbulence : Mouvement irrégulier d'un fluide.

(Unit weight (sediment deposits)) Densité, masse volumique : Poids de sédiments secs, humides ou complètement saturés par unité de volume de dépôt en place.

(Unmeasured sediment discharge) Débit solide non mesuré : Différence entre le débit solide total et le débit solide en suspension mesuré.

(Unsampled zone) Zone non soumise à l'échantillonnage : Partie non sujette à mesure sur une verticale; en général se trouve jusqu'à 9 à 15 cm au-dessus de la surface du fond selon le type de préleveur.

(Valley tranching) : Erosion en ravines survenant dans les plaines d'inondation.

(Vertical) Verticale : Droite approximativement verticale de la surface au fond, le long de laquelle on prélève un ou plusieurs échantillons pour estimer la concentration en sédiments ou sa distribution.

(Vertical accretion deposits) Remblais verticaux : Dépôts de plaine d'inondation par dépôt des sédiments en suspension lorsque les crues débordent.

(Volume weight) Poids spécifique : Poids spécifique, densité apparente, "dry-bulk" densité sont synonymes.

(Wash load) Wash load, charge du ruissellement : Partie des sédiments d'un cours d'eau composée des particules les plus petites (généralement moins de 0,062 mm) qui se trouvent en quantité relativement faibles dans le lit. Pratiquement tout le wash load est transporté en suspension presque permanente et son importance dépend avant tout de la quantité des particules fines disponibles pour le cours d'eau hors du réseau de drainage.

(Water course) Cours d'eau : Cours d'eau naturel ou artificiel de taille variant d'un chenal relativement peu profond à un grand fleuve qui contient de l'eau en mouvement de façon intermittente ou permanente.

(Water discharge) Débit : Quantité d'eau traversant une section en travers par unité de temps (l'eau naturelle contient à la fois des matières dissoutes et des sédiments) (voir débit des cours d'eau, "stream discharge").

(Water pollution) Pollution aquatique : Rejet dans un cours d'eau de produits ou matériaux nuisibles et interdits en quantités suffisantes pour nuire à son usage.

(Watershed) Bassin versant : L'ensemble des terres encerclées par une limite au sommet du bassin et s'étendant à l'amont d'un point déterminé d'un cours d'eau (voir Drainage bassin).

(Weathering) Altération : Processus de désagrégation des roches les plus faibles ou les plus tendres pour l'effet des activités atmosphériques et de la gravité.

(Well graded) Dont la granulométrie est bien répartie : Distribution granulométrique continue des tailles des grains depuis les éléments les plus grossiers jusqu'aux plus fins, de telle façon que les grains les plus petits remplissent juste les vides entre les grains les plus gros (Identique à Poorly sorted).

cusec : Pied cube par seconde.

REFERENCES

- Battelle Columbus Laboratories. 1978. Review of the state-of-the-art in nonpoint source controls in the U.S., 1978.
- Lane, E.W. et al. 1947. Report of the Subcommittee on Sediment Terminology, Trans. Am. Geophys. Un., vol. 28 no. 6.
- FAO. 1977. Conservation Guide 1. Guidelines for Watershed Management. Rome, Food and Agriculture Organisation of the United Nations.
- Toy, T.J. et al. 1977. Erosion: Research Techniques, Erodibility and Sediment Delivery. Geo. Abstracts Limited, Norwich, England.
- U.S. Department of Agriculture. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. Agr.Res.Serc. Publ. ARS-S-40. June 1975.
- U.S. Environmental Protection Agency. Loading Functions for Assessment of Water Pollution from Nonpoint Sources. October 1973.
- Wischmeier, W.H.;Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. SEA, U.S. Dept. of Agriculture. (Agriculture Handbook no. 537).