

PROGRAMME  
D' ACTIONS  
PRIORITAIRES



PLAN D' ACTION POUR  
LA MEDITERRANEE



PNUE

En coopération avec



# DIRECTIVES

pour la cartographie et la mesure des  
processus d'érosion hydrique dans  
les zones côtières méditerranéennes

---

PROGRAMME D' ACTIONS PRIORITAIRES  
CENTRE D' ACTIVITES REGIONALES  
SPLIT, 1998

*Note:*

Ce document a été préparé par le Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAP/CAR) du Plan d'action pour la Méditerranée – PNUE, en collaboration avec la Direction générale de la conservation de la nature (DGCONA) du ministère espagnol de l'Environnement et la Division de la mise en valeur des terres et des eaux (AGL) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Les auteurs du document sont: J.C. Griesbach, J.D. Ruiz Sinoga, A. Giordano, O. Berney, F. Gallart et L. Rojo Serrano. M. A. Pavasovic, ex-directeur du PAP/CAR, a également contribué à la conception du document et à la revue de sa première version, et a préparé l'Annexe I relatif à la gestion intégrée des zones côtières.

© 1998 Programme d'actions prioritaires  
Split, Croatie

ISBN 953-6429-21-7

Cette publication peut être reproduite intégralement ou partiellement à des fins pédagogiques et non lucratives sans autorisation spéciale de la part du propriétaire des droits d'auteur, à condition que sa source soit proprement mentionnée. Le PAP serait reconnaissant de recevoir un exemplaire de toutes les publications qui ont utilisé ce matériel comme source.

Cette publication ne peut être vendue ni utilisée à quelque fin commerciale que ce soit sans autorisation préalable de la part du PAP.

*A des fins bibliographiques, citer le présent document comme suit:*

PAP/CAR: *Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes*. PAP-8/PP/GL.1. Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec la FAO. 1998. pp xii+72.



## SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX .....	iii
LISTE DES ENCADRES.....	iii
REMERCIEMENTS .....	v
PREFACE.....	vii
RESUME.....	ix
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1. CONTEXTE ET ANTECEDENTS .....	1
2. ETAT DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LES ZONES COTIERES MEDITERRANEENNES.....	2
3. LIENS ENTRE LA CARTOGRAPHIE ET LA MESURE DES PROCESSUS D'EROSION ET LA GESTION INTEGREE DES ZONES COTIERES.....	4
4. CONDITIONS PREALABLES ET ASPECTS INSTITUTIONNELS .....	5
<b>PARTIE I: CARTOGRAPHIE DES PROCESSUS D'EROSION HYDRIQUE .....</b>	<b>7</b>
1. CONTEXTE GENERAL .....	7
1.1 Bilan de l'expérience acquise en cartographie de l'érosion hydrique des sols dans la région méditerranéenne.....	7
1.2 Justification d'une méthodologie commune et consolidée .....	8
2. METHODOLOGIE COMMUNE CONSOLIDEE .....	9
2.1 Description générale .....	9
2.2 Légende.....	10
3. APPROCHE METHODOLOGIQUE .....	13
3.1 Schéma méthodologique général.....	13
3.2 Première phase: Approche prédictive.....	13
3.3 Deuxième phase: Approche descriptive.....	22
3.4 Troisième phase: Intégration .....	23
4. ASPECTS PRATIQUES DE LA MISE EN APPLICATION.....	23
4.1 Composantes techniques.....	23
<b>PARTIE II: MESURE DES PROCESSUS D'EROSION HYDRIQUE.....</b>	<b>25</b>
1. CONTEXTE GENERAL .....	25
1.1 Expérience acquise en matière de mesure des processus d'érosion hydrique dans la région méditerranéenne.....	25
1.2 Justification d'un programme de mesures des processus d'érosion .....	27
2. ORGANISATION DES MESURES .....	28
2.1 La séquence érosion-sédimentation .....	28
2.2 Phénomènes d'érosion hydrique.....	29
2.3 Sites de mesure .....	30
2.4 Dispositifs et instruments de mesure des sédiments .....	32
3. PROGRAMME DE MESURES.....	39
3.1 Introduction .....	39
3.2 Organisation recommandée des mesures .....	40
3.3 Equipement .....	41

3.4	Installation de stations de mesure.....	44
3.5	Visites sur le terrain.....	45
3.6	Travaux de laboratoire .....	48
4.	TRAITEMENT ET PRESENTATION DES DONNEES.....	48
4.1	Utilité du programme de mesures.....	48
4.2	Aspects généraux de la gestion des données.....	49
4.3	Traitement et enregistrement des données.....	53
4.4	Interprétation et présentation des résultats.....	56
<b>CONCLUSIONS.....</b>		<b>59</b>
1.	LE PRODUIT FINAL: UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION.....	59
1.1	Présentation des résultats à des fins pratiques .....	59
2.	RECOMMANDATIONS ET ACTIONS PROPOSEES AUX RESPONSABLES .....	60
2.1	Mise au point de stratégies .....	61
2.2	Rôle de catalyseur des programmes régionaux.....	61
2.3	Coordination des actions internationales.....	61
ANNEXE I: ROLE DES PROGRAMMES D'EVALUATION DE L'EROSION DANS LE CADRE DE LA GESTION INTEGREE DES ZONES COTIERES.....		63
ANNEXE II: GLOSSAIRE DE TERMES TECHNIQUES .....		68
BIBLIOGRAPHIE .....		71

## LISTE DES FIGURES

Figure I-1:	Séquence générale des méthodologies de cartographie et de mesure de l'érosion .....	10
Figure I-2:	Principale séquence opérationnelle des travaux de cartographie de l'érosion.....	14
Figure I-3:	Identification des lignes de partage des eaux .....	15
Figure I-4:	Cartographie préliminaire des polygones de pente continue .....	16
Figure I-5:	Carte de la mosaïque topographique.....	16
Figure I-6:	Longueur et valeur des sections inclinées.....	17
Figure I-7:	Carte des pentes .....	18
Figure I-8:	Elaboration de la carte d'érodibilité.....	19
Figure I-9:	Séquence méthodologique pour la cartographie de l'occupation actuelle du sol et du couvert végétal.....	20
Figure I-10:	Elaboration de la carte de protection des sols .....	21
Figure I-11:	Elaboration de la carte des états érosifs .....	21
Figure II-1:	Fosse à sédiment intégrale.....	35
Figure II-2:	Partiteur à fentes multiples.....	35
Figure II-3:	Echantillonneur à roue de Coshocton .....	36
Figure II-4:	Echantillonneur à aspiration .....	36
Figure II-5:	Turbidisonde .....	37
Figure II-6:	Jauge des sédiments en suspension par technique nucléaire .....	37
Figure II-7:	Echantillonneur de sédiments en suspension à niveaux déterminés.....	38
Figure II-8:	Echantillonneurs de la charge de fond .....	38
Figure II-9:	Echantillonneur de charge de fond à différence de pression.....	38
Figure II-10:	Relation débit solide-débit liquide instantanés obtenus par échantillonnage à la station de Çenger (Turquie) .....	50
Figure II-11:	Relation linéaire débit solide-débit liquide instantanés obtenus par échantillonnage à l'échelle linéaire à la station de Çenger (Turquie).....	50
Figure II-12:	Hydrogramme et concentrations de sédiments obtenus à la station d'El Maleh (Tunisie) pendant l'événement du 15 mars 1993. ....	51
Figure II-13:	Exemple de tableur pour données d'échantillonnage.....	55
Figure II-14:	Exemple de tableur pour la présentation des données provenant d'enregistreur de données chronologique.....	55
Figure A-1:	Organigramme concernant la gestion intégrée des zones côtières (source: PNUE, 1995) .....	65

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1:	Valeurs des pentes .....	17
Tableau I-2:	Classes de pentes .....	18
Tableau I-3:	Classes de lithofaciès .....	18
Tableau I-4:	Matrice: Pente vs. lithofaciès .....	19
Tableau I-5:	Degrés d'érodibilité .....	19
Tableau I-6:	Classes d'occupation du sol .....	20
Tableau I-7:	Classes du degré de couvert végétal.....	20
Tableau I-8:	Matrice: Occupation du sol vs. couvert végétal.....	21
Tableau I-9:	Matrice: Degré de protection des sols vs. degré d'érodibilité .....	21
Tableau II-1:	Estimations du volume de sédiments pendant l'événement du 15 mars 1993 à la station d'El Maleh .....	52
Tableau A-I:	Etapes, phases, activités et résultats du processus de gestion intégrée.....	64
Tableau A-II:	Rôle des activités de lutte anti-érosive dans le cadre de la gestion intégrée des zones côtières .....	67

## LISTE DES ENCADRES

Encadré 1:	Légende: Cartographie prédictive et descriptive .....	11
Encadré 2:	Echelle cartographique .....	15
Encadré 3:	Méthodologie développée.....	19



## REMERCIEMENTS

---

Le Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAP/CAR) du Plan d'action pour la Méditerranée (PAM) – PNUE et les auteurs de ce document remercient tous les experts des pays méditerranéens, de l'Union européenne (UE) et de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) qui ont pris part à la réalisation de l'action prioritaire relative à la protection des sols dans la période 1985-1996. Sans leur concours, il n'aurait pas été possible de concevoir ni de réaliser le projet de cartographie et de mesure des processus d'érosion dans les zones côtières méditerranéennes.

Des remerciements vont également à la Division de la mise en valeur des terres et des eaux de la FAO, dont l'appui scientifique et professionnel a été essentiel pour la conception et la mise en oeuvre du projet et la rédaction du présent document.

Le PAP/CAR remercie particulièrement la Direction générale de la conservation de la nature (Dirección General de Conservación de la Naturaleza – DGCONA) et le ministère espagnol de l'Environnement pour leur appui professionnel et financier, le pays hôte et l'institution d'accueil du projet, et les autorités et institutions tunisiennes et turques, qui ont rendu possible la mise en oeuvre des exercices de cartographie et de mesure dans leurs pays.

Enfin, le PAP/CAR évoque avec gratitude la contribution apportée à la composante mesure du projet par l'Institut des sciences de la terre "Jaume Almera" du Conseil supérieur des recherches scientifiques (Consejo Superior de Investigaciones Científicas – CSIC) de Barcelone, Espagne.



## PREFACE

---

Les Directives ont été préparées sur la base des résultats du projet de coopération "Cartographie et mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes" réalisé par le Programme d'actions prioritaires du Plan d'action pour la Méditerranée – PNUE et la Direction générale de la conservation de la nature (DGCONA) – Madrid, en collaboration avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

Une des principales raisons qui ont motivé la décision de mettre en oeuvre ce projet de coopération reposait dans le fait qu'une grande diversité de méthodologies et de démarches, bien souvent peu comparables les unes avec les autres, étaient utilisées pour cartographier et mesurer les processus d'érosion dans les zones côtières méditerranéennes. C'est pourquoi la nécessité a été ressentie de développer une méthodologie consolidée et de la tester à travers des études de cas avant de la proposer pour usage général.

Ce projet a été réparti en deux composantes: la première, dédiée à la cartographie, a été réalisée dans la période 1991-1992 (avec une prospection supplémentaire de la zone de Vallcebre en 1995-1996), et la seconde, dédiée à la mesure des processus d'érosion, dans la période 1993-1996. La composante cartographie a été appuyée par des exercices cartographiques réalisés dans les zones d'Adra et Vallcebre (Espagne), Essen (Turquie) et Oued Ermel (Tunisie). La composante mesure a été appuyée par des mesures effectuées dans les zones pilotes de Vallcebre (Espagne), Caybogazi (Turquie) et El Khairat (Tunisie). Les résultats de ces exercices ont été présentés par les équipes nationales d'experts sous forme de rapports nationaux (voir PAP/CAR-PNUE, 1997).

Sur la base des résultats obtenus, une première version de ces Directives a été rédigée et présentée à l'occasion d'un atelier de travail tenu à Barcelone du 13 au 16 octobre 1996. La version finale de ces Directives a été préparée sur la base des recommandations et suggestions faites lors de cet atelier.

Les objectifs de ces Directives sont de:

- contribuer à une meilleure gestion des sols et des autres ressources naturelles, et à la lutte contre l'érosion dans les zones côtières méditerranéennes;
- présenter la méthodologie de cartographie et de mesure des processus d'érosion, ses fondements et les conditions préalables à sa mise en application; et
- fournir des instructions de base pour son application.

Ces Directives s'adressent en priorité aux:

- spécialistes en érosion des sols et hydrologie possédant déjà une certaine expérience en matière de cartographie et/ou de mesure appliquée des processus d'érosion;
- professionnels dans les domaines de l'utilisation et de la gestion des sols, de l'agriculture et dans d'autres domaines connexes de planification et d'aménagement du territoire – en guise d'information et de connaissance plus globale (une formation supplémentaire serait nécessaire pour la mise en oeuvre);
- décideurs dans les domaines concernés – pour information et une meilleure définition de leurs responsabilités (en particulier le Résumé, les chapitres 1, 2.1 et 4 de la Partie I, le chapitre 1 de la Partie II, les Conclusions et l'Annexe I).

En raison de la nature complexe des phénomènes d'érosion et des difficultés que peut poser leur mesure, il pourrait s'avérer nécessaire de recourir à des consultations avec la FAO, la DGCONA ou le PAP-PAM lors de l'application de la méthodologie proposée.

Ces Directives doivent être considérées comme un document-cadre dont l'utilisation n'est pas obligatoire et qui peut exiger une approche flexible et une adaptation aux conditions spécifiques.

Outre les processus d'érosion hydrique mentionnés dans le titre du document, la méthodologie présentée aborde l'érosion éolienne et les autres types de dégradation causés par l'aménagement des terres.

Les résultats obtenus et les enseignements tirés des exercices présentés dans les rapports nationaux confirment la flexibilité et l'adaptabilité de la méthodologie de cartographie et de mesure telle qu'elle a été appliquée dans trois types différents de bassins versants méditerranéens.

Bien que cette méthodologie ait été conçue, testée et plus particulièrement adaptée à l'environnement méditerranéen, elle pourra, le cas échéant, s'appliquer dans des versions modifiées et adaptées à d'autres régions bioclimatiques.

## RESUME

---

Le présent document est un des produits résultant d'efforts conjugués de la part du PAP/PAM/PNUE, du ministère espagnol de l'Environnement/DGCONA (Madrid), de la Division de la mise en valeur des terres et des eaux (AGL) de la FAO, des institutions professionnelles et des autorités espagnoles, tunisiennes et turques, dans les domaines de la cartographie et de la mesure des processus d'érosion hydrique en Méditerranée.

Il est destiné aux:

- spécialistes, professionnels et institutions impliqués dans la lutte anti-érosive en région méditerranéenne, à des fins d'application pratique;
- professionnels dans les domaines de l'utilisation et de la gestion des sols, de la gestion des ressources en eau, de l'agriculture et dans d'autres domaines connexes – en guise d'information et de connaissance plus globale (une formation supplémentaire serait nécessaire pour la mise en oeuvre);
- décideurs dans les domaines concernés – pour information et une meilleure définition de leurs responsabilités (en particulier le Résumé, la Partie I: chapitres 1, 2.1 et 4, la Partie II: chapitres 1, 5 et 6, et l'Annexe I); et
- spécialistes, institutions et décideurs impliqués dans la gestion intégrée des zones côtières en Méditerranée (en particulier le Résumé, la Partie I: chapitres 1, 2.1, la Partie II: chapitre 1 et l'Annexe I) pour leur faciliter la compréhension des impacts de l'érosion sur l'économie, les conditions sociales et l'environnement, et celle du rôle de la cartographie et de la mesure de l'érosion dans le cadre de la gestion intégrée des zones côtières.

Les processus d'érosion des sols dans les zones côtières méditerranéennes ont de graves conséquences sur l'utilisation rationnelle des ressources et sur l'environnement côtier. La fragilité des écosystèmes méditerranéens, une population en constante augmentation dans les zones côtières, l'importance de l'agriculture méditerranéenne et la nécessité d'augmenter la productivité, associées à une pollution accrue,

imposent une analyse et une évaluation intégrées des phénomènes d'érosion. La cartographie et la mesure de l'érosion dans les zones affectées fournissent des bases à la conception et à la mise en oeuvre des programmes de lutte anti-érosive et de gestion des sols dans le cadre du schéma plus large de gestion intégrée des zones côtières.

Compte tenu de ce qui précède, les états côtiers méditerranéens, dans leur rôle de parties contractantes à la Convention de Barcelone et de participants au Plan d'action pour la Méditerranée (PAM), ont confié au Programme d'actions prioritaires (PAP) du PAM la mise en oeuvre d'une action prioritaire intitulée "Protection des sols en tant que composante essentielle de la protection de l'environnement méditerranéen". Après une période initiale (1984-1988), cette action a été centrée sur les processus d'érosion hydrique. Déjà dans la phase d'enquête, il a été constaté que les activités menées par les différents pays étaient basées sur des méthodologies de cartographie et de mesure très diversifiées et bien souvent peu comparables les unes avec les autres. C'est pourquoi un projet de coopération PAP-FAO-DGCONA a été formulé et mis en oeuvre, avec la participation de l'Espagne, de la Tunisie et de la Turquie. La composante cartographie a été réalisée au cours de la période 1991-1992, avec une prospection supplémentaire en 1995-1996, et avec 3 exercices nationaux de cartographie et la Partie I de ces Directives comme principaux produits. La composante mesure a été réalisée dans la période 1993-1995, dans trois zones expérimentales en Espagne, Tunisie et Turquie, et avec la Partie II des Directives comme principaux produits.

Dans la **partie d'introduction** des Directives sont présentés les différents types d'érosion hydrique, avec une référence particulière aux conditions méditerranéennes, ainsi que les liens entre la cartographie et la mesure de l'érosion et le processus de gestion intégrée des zones côtières.

Dans la **Partie I** est présentée une méthodologie commune et consolidée de cartographie des

processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. Cette méthodologie est innovatrice, car elle permet de présenter sur une seule carte intégrée aussi bien les états érosifs que la dynamique de l'érosion. Comparée aux systèmes de cartographie traditionnels, elle présente des avantages considérables pour le contrôle des processus d'érosion et la gestion des zones côtières méditerranéennes. Suivant cette méthodologie, la démarche cartographique comporte trois phases:

- a) Une cartographie **prédictive** consistant en l'identification, l'évaluation et l'intégration des facteurs physiques de base, tels que la physiographie (pentes), la lithologie et/ou les sols, et le couvert végétal, dans le but d'établir des hypothèses de départ concernant le risque d'érosion (érodibilité – érosion potentielle).
- b) Une cartographie **descriptive** consistant à décrire et à faire une évaluation qualitative des processus d'érosion actuels et actifs. Cette cartographie systématique des aspects qualitatifs et dynamiques de l'érosion distingue deux grandes catégories de milieux géographiques: milieux stables, non affectés par l'érosion d'un côté, et milieux instables, affectés par divers processus d'érosion, de l'autre.
- c) Une phase de **consolidation** et d'**intégration**, qui fournit le produit cartographique final identifiant et évaluant aussi bien le potentiel d'érosion (états érosifs) que les processus d'érosion actuels, leur intensité et tendance évolutive.

La démarche cartographique proposée est décrite en détail dans ces Directives, incluant des cartes générées par les différentes phases de la séquence méthodologique.

Les méthodes générales de mesure de l'érosion, présentées et commentées dans la **Partie II**, ont servi de base à la conception d'activités spécifiques de mesure qui doivent nécessairement être adaptées aux conditions prévalant dans les différents pays ou sous-régions et aux objectifs particuliers que l'on se propose d'atteindre.

Un programme spécifique de mesures et un cadre pour le traitement de données sont présentés en détail et recommandés comme modèles à suivre lors de la mise en oeuvre de projets de mesure de l'érosion dans les zones côtières méditerranéennes.

Le schéma adopté recommande un groupe d'au moins trois bassins versants adjacents de différentes tailles, jusqu'à 20 km<sup>2</sup>. Les grands

bassins versants devraient englober des bassins plus petits pour comprendre les règles des changements d'échelles dans les processus de transport de sédiments, ce qui est d'une importance primordiale pour l'évaluation des impacts de l'érosion sur les zones côtières. Des instructions précises sont données concernant le choix des bassins versants et les points de mesure.

L'instrumentation à installer dans le bassin versant se compose des éléments suivants:

- **Ouvrage de contrôle du débit.** Canal ou déversoir suivant les conditions de transport de la charge de fond.
- **Enregistreur électronique de données.** Deux pistes d'enregistrement.
- **Limnimètre.** Dispositif électronique permettant de convertir le niveau de l'eau en impulsion électronique directement lisible par l'enregistreur de données. Il est recommandé d'utiliser un capteur capacitif dans les conditions semi-arides.
- **Instrument d'échantillonnage de sédiments en suspension.** Il est recommandé d'utiliser simultanément deux dispositifs:
  - a) un instrument programmable à aspiration, déclenché par l'enregistreur de données ou un autre mécanisme lié au niveau d'eau;
  - b) un échantillonneur à siphon se composant d'une batterie de bouteilles disposées à des hauteurs différentes, qui prélèvent des échantillons à divers niveaux à mesure que l'hydrogramme monte.
- **Stations pluviographiques.** Il faut au minimum un pluviographe par station hydrométrique. Il est recommandé d'utiliser les pluviomètres à augets basculants reliés à l'enregistreur de données.

Les programmes de visites de terrain et d'analyses de laboratoire sont aussi exposés en détail.

Le traitement et l'exploitation des données présentent une importance critique pour la réussite du programme de mesures. Les sources d'erreurs potentielles – procédures d'interpolation et d'extrapolation, analyse des événements et intégration dans le temps – sont étudiées avec une attention particulière.

Les étapes du traitement des données, ainsi que les méthodes de leur présentation numérique et graphique, sont décrites en utilisant des matériels informatiques et des logiciels les plus courants,

comme les programmes de gestion de bases de données, les tableurs et les programmes graphiques intégrés.

Enfin, dans la **Partie III (Conclusions)**, il est recommandé d'adapter la présentation des résultats obtenus aux différents niveaux concernés, notamment: milieu professionnel/scientifique, décideurs et grand public. Les principaux produits d'un programme combiné de cartographie et de mesure de l'érosion sont: les cartes et leur interprétation; les résultats de mesures et leur interprétation; les conclusions faites sur la base des résultats des exercices de cartographie et de mesure; et les recommandations concernant les activités de suivi et les mesures de gestion/protection.

Le document contient deux annexes: l'Annexe I sur le rôle de la cartographie de l'érosion dans le cadre du processus de gestion intégrée des zones côtières; et l'Annexe II contenant un glossaire de termes techniques.

Le cadre de cartographie et de mesure présenté a été appliqué et testé avec succès dans différents contextes géographiques sous-régionaux et nationaux. Les préliminaires à son application peuvent être remplis sans efforts particuliers dans presque tous les pays méditerranéens. Toutefois, des consultations et/ou une formation préalable peuvent être nécessaires et, dans ce cas, il est recommandé de contacter la FAO/AGL, le ministère espagnol de l'Environnement/DGCONA ou le PAP/CAR.

Il est recommandé d'utiliser les deux parties du document conjointement lors de la formulation et de la mise en oeuvre de programmes ou projets de lutte contre l'érosion hydrique.

Enfin, il est très probable que le concept de base et l'approche méthodologique présentée de la cartographie et de la mesure de l'érosion puissent être transférables et s'appliquer dans d'autres régions sujettes à l'érosion.



# INTRODUCTION

---

## 1. CONTEXTE ET ANTECEDENTS

Le Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAP/CAR), agissant dans le cadre du Plan d'action pour la Méditerranée (PAM) du PNUE, a entrepris depuis 1984 une action prioritaire intitulée "Promotion de la protection des sols en tant que composante essentielle de la protection de l'environnement dans les zones côtières méditerranéennes". Presque tous les pays méditerranéens, la FAO et le Centre arabe d'étude des zones arides et des terres sèches (ACSAD) – Damas, ont pris une part active dans ce programme.

A la suite d'une phase d'enquête, le PAP, la FAO et l'ACSAD ont formulé une proposition d'un **projet de coopération en matière de cartographie et de mesure de l'érosion** dans les zones côtières méditerranéennes, et l'ont soumise à la V<sup>e</sup> réunion ordinaire des Parties contractantes à la Convention de Barcelone (Athènes, 1987). Cette proposition a été acceptée, et l'Espagne a offert d'accueillir le projet. Les autorités espagnoles ont désigné l'Institut national de conservation de la nature – ICONA (actuellement Direction générale de la conservation de la nature – DGCONA) à Madrid comme institution d'accueil du projet, tandis que la FAO a accepté d'y contribuer en fournissant son appui scientifique et professionnel.

Par la suite, le projet a été défini et subdivisé en deux parties, notamment:

- un **projet pilote de cartographie et de mesure de l'érosion** à exécuter de 1991 à 1995, dans des zones représentatives en Espagne, Tunisie et Turquie; et
- un **projet plus important à exécuter plus tard**, à une échelle plus large, avec la participation de tous les autres pays méditerranéens intéressés, et de préférence dans le cadre du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD).

La proposition de ce projet reformulé a été discutée lors d'une réunion d'experts tenue à Malaga, en décembre 1989. Approuvé par les parties contractantes à la Convention de Barcelone, le projet a démarré en 1991, divisé

en deux composantes: **cartographie** et **mesure** des processus d'érosion.

La **composante cartographique**, réalisée par le PAP, la DGCONA et la FAO, en collaboration avec l'Espagne, la Tunisie et la Turquie, a été close fin 1992 (pour la zone de Vallcebre en 1995-1996). Les résultats de cette activité, ainsi que la méthodologie de cartographie développée dans son cadre, ont été présentés et discutés lors d'un séminaire tenu à Malaga, en décembre 1992, qui a accueilli des représentants de 10 pays méditerranéens et de la CE. Ce séminaire a jugé favorablement la méthodologie développée et a recommandé que des directives pour son application soient préparées. Des "termes de référence" pour la rédaction de la partie des Directives relative à la cartographie ont été formulés à l'occasion de deux réunions d'experts (Rome, avril 1993 et Alméria, juin 1993). Les auteurs ont ébauché leurs contributions fin 1993. La première version du document a été revue à Rome, en mars 1994, et la seconde en janvier 1996.

La **composante mesure**, réalisée depuis 1993 par le PAP, la DGCONA et la FAO, a été terminée en 1996. Les résultats de cette activité ont été analysés et discutés lors d'une réunion d'experts tenue à Barcelone, en juillet 1996. Les "termes de référence" pour la rédaction de la partie des Directives relative à la mesure des processus d'érosion ont été formulés à l'occasion d'une réunion d'experts tenue à Madrid, en novembre 1993. La première version du document a été revue à Barcelone, en juillet 1996.

Ces deux textes ont été présentés, discutés et amendés lors d'un atelier de travail organisé à Barcelone du 13 au 16 octobre 1996. Les suggestions et les commentaires faits lors de l'atelier ont été pris en compte lors de la rédaction du texte final des Directives.

Un chapitre particulier sur le rôle et la place de la cartographie et de la mesure des processus d'érosion dans le cadre de la gestion intégrée des zones côtières méditerranéennes est contenu dans l'Annexe I des Directives.

Vu la complémentarité des procédures de cartographie et de mesure, il est recommandé de les appliquer conjointement partout où cela est possible.

## 2. ETAT DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LES ZONES COTIERES MEDITERRANEENNES

Le paysage méditerranéen est l'aboutissement d'interactions longues et intenses entre les activités humaines et le milieu naturel. Le sol constitue l'une des principales interfaces de ces rapports qui ont donc eu un profond effet sur lui.

L'érosion des sols est grave dans le bassin méditerranéen, notamment sur des sections importantes des côtes. Il est difficile d'évaluer l'ampleur de ce phénomène mais elle a été étudiée, surtout au niveau national, et des estimations ont été établies.

Dans les pays méditerranéens de l'Union européenne une superficie de 202.000 km<sup>2</sup> présente un risque élevé d'érosion (Giordano et al, 1992). D'autres données rassemblées par les Nations Unies font penser que pas moins de 200.000 km<sup>2</sup> pourraient être exposés à la désertification en région méditerranéenne.

D'après les cartes d'érosion établies par l'ICONA, 57% (104.000 km<sup>2</sup>) des bassins méditerranéens d'Espagne accusent des taux d'érosion supérieurs à 12 t/ha/an, dont 25.700 km<sup>2</sup> enregistrent des taux très intenses de plus de 50 t/ha/an.

Certaines recherches (CEMAGREF, 1988) dans le bassin versant de Bléone, situé entre Digne et Draix (Alpes Maritimes, France), montrent que deux petits bassins, l'un entièrement couvert de plantations artificielles et l'autre comportant des terres dénudées, présentent des taux d'érosion de 0,01 t/ha/an et 30 t/ha/an respectivement.

En Turquie, 22,3% des terres sont gravement érodées (Topraksu Koyisler, 1981).

En Tunisie, les principaux facteurs physiques qui provoquent l'érosion sont l'irrégularité des précipitations d'une année et d'une saison à l'autre et le relief montagneux. D'après la carte de l'érosion du nord du pays, qui couvre 120.000 km<sup>2</sup> sur un territoire national de 164.000 km<sup>2</sup>, 70.000 km<sup>2</sup> sont directement menacés par l'érosion.

Gazzolo et Bassi (1966) indiquent pour l'Italie une érosion spécifique moyenne de 0,15 mm/an, la plus élevée étant dans les bassins de Marecchia et Savio (tous les deux en Emilie-Romagne), avec une perte annuelle en sol de 1,4 mm (environ 23 t/ha/an). L'explication de cette situation peut être trouvée dans des sols particulièrement érodibles et soumis à une culture extrêmement intensive.

Le fleuve Drini en Albanie a une des charges de sédiments en suspension les plus élevées pour l'ensemble du bassin méditerranéen: 1.082 t/km<sup>2</sup>/an.

En Syrie, au Liban et en Israël, les effets de l'érosion hydrique et éolienne sont associés et cumulatifs. L'érosion hydrique excède rarement 50 t/ha/an (FAO/PNUE/UNESCO, 1980).

En Egypte, l'érosion pluviale est nulle ou négligeable, mais dans certaines zones désertiques (erg), sur une bande étroite bordant le delta du Nil et sur la côte égyptienne occidentale, elle peut mobiliser plus de 200 t/ha/an. En Libye, l'érosion pluviale est modérée dans la chaîne montagneuse bordant la mer (Jebel Akdhar et Jebel Nefhusa), alors que d'autres parties sont sujettes à une érosion éolienne généralisée.

Des relevés de la sédimentation effectués dans six réservoirs se trouvant dans divers bassins versants du Maroc ont révélé que l'érosion varie de 2 à 59 t/ha/an.

Les principaux facteurs physiques influant sur les processus d'érosion des sols dans la région méditerranéenne sont les suivants:

- la très forte variabilité du climat caractérisé par des périodes fréquentes de sécheresse et des périodes de pluies abondantes;
- la présence de sols hautement érodables à cause de leur structure faible, de leur manque de profondeur et de l'absence de matières organiques; et
- le relief inégal présentant des pentes raides et des paysages très divers.

Les principaux facteurs socio-économiques influant sur l'érosion des sols dans la région méditerranéenne sont:

- la crise de l'agriculture traditionnelle avec, en conséquence, l'abandon des terres et la dégradation des ouvrages de conservation des sols et des eaux;
- les pertes considérables de forêts et de végétation naturelle dues aux incendies fréquents;
- le surpâturage des parcours qui a un effet particulièrement marqué sur l'environnement dans un climat semi-aride; et
- la surexploitation des terres agricoles.

L'érosion a des effets très importants pour l'environnement et l'économie. Elle entraîne sur les terres affectées une perte de productivité des sols et une réduction des rendements agricoles.

Elle a aussi des effets considérables en dehors des terres directement touchées: accroissement de la sédimentation dans les cours d'eau et les réservoirs qui compromet la qualité de l'eau et la capacité de drainage des cours d'eau.

Ces deux sortes d'effets – locaux et extérieurs – ont une incidence négative notable sur le cycle de l'eau et diminuent la capacité naturelle des terres en ce qui concerne la régulation des rivières dans une région où l'eau est un facteur critique qui limite le développement socio-économique.

Pour étudier les causes et les conséquences de l'érosion des sols, il est important de souligner le degré élevé d'intégration et de rapports mutuels entre les phénomènes physiques et le contexte socio-économique.

Les plans de lutte contre l'érosion ont, pour la plupart, été axés sur les symptômes plutôt que sur les causes réelles de ce phénomène. Ils ont tenté de régler directement les problèmes de surexploitation agricole, de surpâturage, de déboisement etc. sans aborder les pressions socio-économiques qui sont à l'origine de ces symptômes (Lean, 1995).

Il est indispensable de bien comprendre les causes qui expliquent le comportement des êtres humains face à l'érosion. La Convention sur la lutte contre la désertification des Nations Unies, approuvée en 1994, adopte une approche intégrée en soulignant que les pays touchés doivent *"s'attaquer aux causes profondes de la désertification et accorder une attention particulière aux facteurs socio-économiques qui contribuent à ce phénomène"*. Or, l'érosion est le principal mécanisme direct de désertification au niveau mondial.

Par ailleurs, le contexte socio-économique de l'érosion varie selon qu'il s'agit du nord ou du sud de la Méditerranée.

Dans le sud, ce phénomène est principalement lié à l'accroissement démographique. Depuis 1950, la population a triplé dans cette zone alors qu'elle s'est accrue de 30% à peine dans le nord. Comme la superficie irriguée reste inchangée, il a été nécessaire d'accroître très fortement la pression de l'agriculture sur les terres marginales pour faire vivre la population. En conséquence, des terres sont surexploitées pour les cultures ou le pâturage de sorte que les rendements sont irréguliers et l'érosion se diffuse. La superficie des forêts recule d'environ un à deux pour cent et celle des steppes et des pâturages naturels d'un pour cent par an.

Dans le nord du bassin méditerranéen, l'évolution technique, économique et sociale du milieu rural depuis 1950 a abouti à concentrer l'activité économique sur le littoral; les zones intérieures peu productives se vident et la population se regroupe très fortement sur le littoral. L'accroissement très rapide des terres marginales abandonnées qui sont exposées aux incendies de forêt etc., a provoqué la dégradation des terres, puis l'érosion (Puigdefàbregas, 1995).

Tous ces processus mettent une fois encore en lumière le rapport critique liant les zones côtières aux bassins versants qui les dominent. La réussite de la gestion des zones côtières requiert une vue intégrée de tout le bassin versant, espace dans lequel se déroulent les cycles hydrique, écologique et géologique. Tout déséquilibre apparaissant dans les parties élevées du bassin peut avoir des conséquences sur les zones côtières basses.

Le phénomène d'érosion peut être considéré comme un exemple de cette interdépendance. L'existence d'écosystèmes et d'une agriculture durables échappant à l'érosion dans les zones élevées est critique pour la régulation et la qualité de l'approvisionnement en eau, qui est si important, et la protection contre les inondations qui menacent particulièrement les zones côtières. En outre, le déséquilibre socio-économique des zones d'altitude affecte l'équilibre des zones côtières et réciproquement. La concentration de l'activité économique sur le littoral mentionnée plus haut offre un bon exemple de cette interdépendance.

Il convient de remarquer que, dans tous ces processus, le phénomène d'érosion intervient en tant que mécanisme, mais constitue aussi un indicateur de la durabilité et de la bonne intégration socio-économique des zones côtières et des zones plus élevées des bassins versants méditerranéens.

Les mesures directes qui permettent d'atténuer et de prévenir l'érosion sont bien connues et certaines ont été largement appliquées dans le bassin méditerranéen.

La planification et la conception des mesures d'atténuation reposent sur la notion de restauration et de gestion des bassins versants, c'est-à-dire sur une analyse intégrée des ressources en terres du bassin et de son degré de dégradation qui doit servir de base pour formuler une proposition d'utilisation durable des terres du point de vue de la protection des sols et des eaux (Rojo Serrano, 1996).

La proposition d'utilisation des terres doit satisfaire les exigences socio-économiques des habitants à l'intérieur et à l'extérieur du bassin. La mise en oeuvre du projet de restauration et de gestion du bassin comporte une série d'activités visant à remettre en état les terres érodées et à prévenir la poursuite de l'érosion, notamment: reboisement au moyen d'espèces méditerranéennes, traitements sylvicoles en vue d'améliorer et de favoriser le couvert végétal naturel; gestion des forêts visant à renforcer et à améliorer la qualité écologique des peuplements existants; gestion du pacage en vue d'assurer la durabilité de l'exploitation des pâturages; mesures de conservation des terres agricoles conçues spécialement pour prévenir l'érosion; enfin, ouvrages de stabilisation des torrents, principalement barrages de retenue pour stabiliser les ravines et éviter le creusement des "ramblas" qui peuvent aboutir à une érosion par ravinement généralisée.

Le projet de restauration et de gestion constitue non seulement un instrument de planification des mesures techniques mais aussi un outil permettant d'intégrer la lutte contre l'érosion dans le contexte socio-économique. L'information du public au sujet du projet et la promotion officielle des mesures prévues sont nécessaires pour assurer cette intégration.

Les expériences acquises en matière de cartographie et de mesure de l'érosion fournissent les connaissances de base indispensables pour évaluer le phénomène et élaborer les actions correctrices nécessaires. La complexité du phénomène de l'érosion dans lequel interviennent de multiples facteurs physiques, ainsi que la complexité des effets extérieurs, imposent l'utilisation de bonnes bases scientifiques qui ne peuvent être obtenues que grâce à un programme expérimental de terrain approprié.

Pour bien aborder les problèmes d'érosion, et formuler correctement les plans d'atténuation et de prévention, on doit comprendre toute la complexité du phénomène et ses implications. Il est indispensable d'éviter les idées simplistes qui aboutiraient à de fausses solutions ayant parfois des effets accessoires peu souhaitables. C'est dans un tel contexte que les mesures effectuées sur le terrain constituent réellement un outil précieux pour orienter l'aménagement.

### **3. LIENS ENTRE LA CARTOGRAPHIE ET LA MESURE DES PROCESSUS D'ÉROSION ET LA GESTION INTÉGRÉE DES ZONES CÔTIÈRES**

L'érosion est un facteur essentiel qui doit être pris en compte dans l'aménagement du territoire, car le degré d'érosion est un indicateur majeur de la durabilité d'un schéma d'aménagement du territoire.

La cartographie de l'érosion est un outil fondamental pour connaître la répartition et l'ampleur géographique du phénomène, ainsi que pour sa caractérisation qualitative. La méthodologie commune et consolidée de cartographie de l'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes, établie dans le cadre de la première composante de ce projet de coopération, permet une cartographie aussi bien prédictive que descriptive des phénomènes d'érosion.

Grâce à la cartographie de l'érosion, il est possible d'incorporer ce phénomène comme facteur dans le processus d'aménagement du territoire, et plus particulièrement dans le processus de gestion intégrée des zones côtières.

La capacité de intégrer les deux méthodologies, la cartographie de l'érosion et la gestion intégrée des zones côtières, dans les systèmes d'informations géographiques (SIG) facilite l'application de ces deux éléments comme outil perfectionné pour orienter les décisions en matière d'aménagement du territoire dans les zones côtières méditerranéennes.

La carte d'érosion fournit des informations synthétiques et systématiques sur la nature, l'intensité et la répartition spatiale du phénomène, et permet donc d'identifier les zones les plus affectées et les types d'érosion dominants. Plus en détail, la mesure des phénomènes d'érosion dans certains milieux particulièrement intéressants apporte les données quantitatives et qualitatives précises, qui sont indispensables à la gestion intégrée des zones côtières et constituent une base sûre pour la planification et la conception des activités requises de lutte anti-érosive.

La zone de mesure doit préalablement être étudiée et cartographiée à l'échelle du paysage comme à celle plus spécifique des unités de terre, où les processus érosifs identifiés peuvent être considérés comme représentatifs.

Les opérations et les expérimentations de mesure sont destinées à compléter ou à compenser le manque d'évaluations quantitatives au sein de la démarche systématique de cartographie.

La cartographie de l'érosion sert à identifier et décrire les processus dynamiques de manière qualitative, incluant les situations extrêmes telles que la dégradation irréversible d'une part, et les zones stables, non-affectées, d'autre part. Les données issues des mesures expérimentales seront d'une importance particulière pour tous ces cas intermédiaires et typiques, où la dégradation, et plus spécifiquement l'érosion des sols, doivent être quantifiées et évaluées en termes de priorité, après leur identification et localisation au moyen d'une cartographie systématique.

Les parcelles de mesure et les parcelles expérimentales qui n'ont pas fait l'objet d'une cartographie systématique doivent être considérées d'utilité réduite, particulièrement si elles doivent être intégrées dans un plan de gestion. Les expérimentations de mesure et de cartographie de l'érosion sur des parcelles d'essai et des bassins versants devraient être intégrées dans la stratégie générale de contrôle de l'érosion. Les résultats obtenus devraient être utilisés dans la détermination des priorités d'action et la conception des solutions techniques d'un plan d'aménagement. L'identification des corrélations entre les différentes unités cartographiques identifiées et les données provenant des parcelles expérimentales et des bassins versants correspondants, concoure fortement à cet objectif. En conséquence, l'association et une interaction étroite entre les travaux de mesure et de cartographie de l'érosion ont été reconnues comme des conditions-clés d'une gestion des sols écologiquement rationnelle.

Par ailleurs, la mesure de l'érosion peut être utilisée pour la caractérisation systématique des milieux sujets à l'érosion en Méditerranée. Cet exercice comprend une description détaillée des mécanismes particuliers d'érosion et les rangées de données quantitatives associées. Il peut être intéressant de faire une sorte d'inventaire systématique des paysages, qui sera utilisé comme référence primaire pour la gestion intégrée des zones côtières et l'aménagement du territoire en général.

En conclusion, une association et une interaction étroite entre la mesure de l'érosion, sa cartographie et la gestion intégrée des zones côtières a été reconnue comme une des conditions clés d'une gestion des sols écologiquement rationnelle.

#### 4. CONDITIONS PREALABLES ET ASPECTS INSTITUTIONNELS

L'application d'une méthodologie commune par les divers pays offre de grands avantages quant aux possibilités d'échanges d'informations, d'assistance, de transfert de connaissances, de réalisation d'études comparatives, de recherches et de programmes/projets techniques communs. Par ailleurs, la méthodologie commune consolidée, comme toute autre méthodologie, exige qu'un certain nombre de conditions préalables soient remplies. S'agissant de la méthodologie proposée, les conditions préalables les plus importantes sont les suivantes:

- La **volonté politique**: Les autorités politiques et exécutives concernées doivent développer et afficher une volonté positive de définir et mettre en oeuvre des activités concertées et des instruments institutionnels adéquats pour la protection des sols et le contrôle de l'érosion en tant que composante essentielle de la politique nationale en matière de développement/environnement.
- Les **capacités institutionnelles**: Les autorités, institutions et professionnels impliqués (le gouvernement et l'administration aux échelles nationale et locale; les départements et les institutions universitaires de recherche, les autorités responsables de la gestion des terres) doivent avoir une capacité organisationnelle, scientifique et/ou professionnelle adéquate, et posséder une certaine expérience en matière de protection des sols.
- La **capacité d'intégration**: Du fait du caractère pluridisciplinaire et plurisectoriel des phénomènes d'érosion, la volonté et la capacité d'une intégration/coordination/coopération horizontale et verticale, y compris l'intégration dans un cadre plus large de la gestion intégrée des zones côtières, sont indispensables.
- La **connaissance des problèmes d'érosion**: un certain niveau d'informations et de connaissance scientifique des phénomènes d'érosion les plus représentatifs; la prise de conscience des impacts des processus d'érosion sur l'économie nationale et l'environnement et des avantages tirés de l'application d'une méthodologie commune consolidée; et enfin, la reconnaissance des priorités.
- L'**existence d'un programme national de lutte contre l'érosion**, comme partie intégrante de la politique et stratégie de développement national.

- L'**existence d'un programme de lutte anti-érosive spécifique à chaque site individuel**, comme partie du programme national.
- La **conscience publique** à développer par le biais de l'éducation, l'information et la sensibilisation des bénéficiaires (vulgarisation).

L'expérience acquise par le PAP au cours de la mise en oeuvre du programme indique que les conditions préalables précitées peuvent être remplies de manière adéquate dans presque tous les pays méditerranéens. Même si certaines de ces conditions n'existent pas ou qu'elles ne sont pas entièrement satisfaites, il est recommandé que des exercices de cartographie pilote soient organisés et réalisés dans le but d'atteindre le niveau nécessaire de capacité et d'expérience. En outre, une formation préparatoire, particulièrement celle sur le tas, est recommandée avant de procéder à l'application de la méthodologie présentée.

# PARTIE I:

## CARTOGRAPHIE DES PROCESSUS D'ÉROSION HYDRIQUE

---

### 1. CONTEXTE GENERAL

#### 1.1 Bilan de l'expérience acquise en cartographie de l'érosion hydrique des sols dans la région méditerranéenne

Pour mettre au point une méthodologie commune de cartographie de l'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes, il a d'abord fallu examiner l'état des connaissances actuelles. L'objectif a été d'étudier et d'analyser les méthodologies et/ou les cartographies existantes de l'érosion, afin de trouver des éléments communs et des corrélations, et d'identifier les méthodologies et les cartographies les plus appropriées à une diversité d'échelles et de problèmes.

Cet examen a été effectué sur la base des renseignements collectés par la FAO, A. Giordano et L. Rojo (1988), ou fournis directement par les équipes techniques nationales.

Vingt-neuf cartes d'érosion ont été analysées. Elles ont été groupées suivant l'approche adoptée et les objectifs fixés. Les taux actuels d'érosion hydrique, ainsi que les potentiels d'érosion, ont fait l'objet d'analyses particulières, déterminées sur la base de sept exemples de levés cartographiques.

Les autres 15 cartes couvraient les aspects suivants:

- l'évaluation de l'érosion des sols à partir des taux de sédimentation ..... 2 cartes
- les données sur l'érosion hydrique et éolienne (évaluation qualitative) ..... 2 cartes
- l'érosion des sols, les glissements de terrain et les mouvements de masse actuels ..... 6 cartes
- le risque d'érosion éolienne ..... 1 carte
- la désertification ..... 1 carte
- la protection des ressources naturelles et des écosystèmes ..... 1 carte
- l'utilisation des techniques de télédétection ..... 2 cartes

Exemples de cartographie quantitative de l'érosion hydrique:

- "Carte provisoire des taux actuels de dégradation (t/ha/an)" (FAO/PNUE/UNESCO, 1980), concernant le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord (au 1:5.000.000<sup>e</sup>);
- "Carte des états érosifs (t/ha/an)" (ICONA, 1988) à l'échelle du 1:400.000<sup>e</sup>.

Les deux cartes précitées sont basées sur l'utilisation de l'équation universelle de pertes en sols (USLE) modifiée, plus particulièrement en ce qui concerne l'érosivité pluviale; cette méthode exige toujours un calibrage progressif.

Les autres cartes indiquant le taux actuel d'érosion hydrique sont celles de l'ICONA (1982), Gazzolo et Bassi (1966), Gavrilovic (1962), Lazarevic (1985) et Michaelides (1989).

Pour ce qui est de l'approche qualitative à l'érosion potentielle, il convient de mentionner la carte "Erosion potentielle des sols et importantes ressources terrestres dans les pays méridionaux de la CE" (DG XI, EC, 1989 Programme CORINE). L'objectif du programme CORINE est de créer un système modèle d'informations (SIG) sur l'état de l'environnement et des ressources naturelles dans les communautés européennes. Le projet "Erosion potentielle" n'est qu'une composante, quoiqu'importante, du programme CORINE qui traite des questions telles que les biotopes, la qualité de l'air, le couvert végétal, l'érosion côtière, etc. La méthodologie consiste en l'évaluation de deux indices, différents mais liés, de risque d'érosion, à savoir le "risque d'érosion potentiel" et le "risque d'érosion actuel".

Une analyse comparative des classes de risques d'érosion pour les principales ressources exploitables fournit une information actualisée sur les zones à protéger en priorité.

Pour une description complète et une analyse critique des documents cartographiques, voir Giordano et Marchisio (1992).

Les deux approches (érosion actuelle et érosion potentielle) utilisent la méthode USLE comportant un certain nombre de modifications. Une

approche fondée sur le concept de risque est intéressante: elle doit être considérée comme "prédictive" et, par conséquent, quelque peu statique. La combinaison des méthodes prédictive et descriptive, mettant l'accent sur les processus d'érosion actifs, peut fournir une base cartographique solide pour un site expérimental. A l'exception de CORINE, qui est à très petite échelle, il n'existe pas de cartes à moyenne ou grande échelle pour l'évaluation ni quantitative ni qualitative de l'érosion.

L'analyse globale de l'état des connaissances actuelles en matière de cartographie de l'érosion dans les zones côtières méditerranéennes mène à deux conclusions fondamentales:

- les cartes élaborées jusqu'ici fournissent des données sur les aspects soit prédictifs soit descriptifs des processus d'érosion;
- la grande diversité d'approches, de méthodes et d'échelles utilisées jusqu'ici a rendu impossible une corrélation systématique et intégrée.

En conséquence, l'objectif principal du projet PAP/ICONA/FAO "Cartographie de l'érosion dans les zones côtières méditerranéennes" sera de fournir un nouvel outil consolidé et adéquat de cartographie à moyenne et grande échelle, applicable dans l'ensemble des pays méditerranéens.

## **1.2 Justification d'une méthodologie commune et consolidée**

Dans le vaste domaine des sciences de la terre, la nécessité a toujours été ressentie d'une présentation graphique des paysages et de la dynamique géomorphologique, c'est-à-dire d'une cartographie systématique à utiliser comme outil aussi bien descriptif que d'étude thématique.

On a progressivement mis au point des modalités cartographiques en fonction de critères de base, tels que le thème de référence, l'échelle, la précision, la légende et les symboles; les principaux domaines d'application étaient la topographie, la géologie, la classification des sols, et des aspects plus dynamiques tels que le couvert végétal, l'occupation du sol, les contraintes agronomiques et l'érosion anthropique.

Les frontières d'un état ou d'un pays avaient presque toujours servi de référence spatiale car, jusqu'à un certain point, les modalités originelles et locales de cartographie étaient destinées à assurer et protéger les territoires spécifiques et à aider à préserver l'identité nationale.

Avec le renforcement des communications, des échanges et de la coopération entre les pays, la nécessité s'est accrue d'avoir des stratégies de

gestion de plus en plus intégrées et élargies aux échelles sous-régionale, régionale et, même, continentale. Ces processus d'ouverture impliquaient des outils et langages techniques et scientifiques communs, standardisés et homogénéisés, parmi lesquels le levé, la cartographie et les classifications étaient essentiels. Cela concernait particulièrement le levé et la cartographie des sols, car au moins trois écoles et approches différentes ont produit une quantité importante de matériaux cartographiques et statistiques, qui exigent des sommes d'argent et des efforts considérables si l'on veut les mettre en corrélation et les rendre plus universels.

Pour ce qui est du domaine spécifique de la cartographie de l'érosion des sols, nombreux sont les pays méditerranéens qui ont élaboré une quantité de systèmes et de légendes cartographiques, utilisant une diversité de critères et paramètres mais aboutissant toujours à deux approches principales: prédiction des états érosifs et description des processus d'érosion.

Jusqu'ici, il n'y a que très peu de cartes d'érosion à petite échelle qui intègrent l'érosion potentielle et les processus d'érosion active, tandis que la nécessité est de plus en plus évidente de dresser des cartes d'érosion intégrées et à grande échelle pour satisfaire aux besoins régionaux et sous-régionaux, ainsi que pour identifier les priorités et améliorer les mesures préventives (sur la base des états érosifs potentiels) et curatives (en fonction des problèmes actuels d'érosion). Une action commune dans ces domaines, qui intéresserait l'ensemble des zones côtières méditerranéennes, est entravée par le manque de corrélation et de normalisation des concepts cartographiques extrêmement diversifiés à l'intérieur des zones géographiques plutôt restreintes.

La méthodologie proposée ici a été élaborée pour éviter ce type de contraintes et de restrictions, notamment en fournissant des critères communs qui rendent possible l'utilisation des échelles communes d'intensité de l'érosion et aboutissent à des priorités telles qu'elles ont été identifiées sur la base des données et des diagnostics finaux de la cartographie. Les inventaires et les diagnostics standard des problèmes devraient également aboutir à des politiques ou stratégies de planification et gestion communes, capables de passer au-delà des frontières nationales et culturelles au profit d'unités géographiques plus larges, telles les zones côtières méditerranéennes.

## 2. METHODOLOGIE COMMUNE CONSOLIDEE

### 2.1 Description générale

Le schéma de la cartographie commune consolidée de l'érosion est le résultat de deux approches complémentaires, combinant les avantages d'une diversité de techniques de levé, traitement et cartographie. Dans cet exercice, les contributions-clés ont été apportées par la DGCONA en tant que chef de file, et la FAO qui a assuré les conseils scientifiques et techniques.

Deux approches principales ont été prises en compte, notamment:

- l'approche **prédictive**, consistant à identifier, évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux, tels la physiographie (pentes), la lithologie et/ou les sols, la terre, le couvert végétal, dans le but de déterminer des hypothèses préliminaires concernant le risque d'érosion (érodibilité – érosion potentielle);
- l'approche **descriptive**, consistant à décrire et à faire une évaluation qualitative des processus actuels et actifs sur un site donné.

Ce schéma consolidé est mis en parallèle avec des opérations de mesure destinées à évaluer la perte actuelle en sol, grâce à la mesure du débit solide dans les parcelles et/ou sous-bassins expérimentaux affectés par des contraintes spécifiques et représentatives de l'érosion locale.

Une présentation schématique des différentes séquences opérationnelles des travaux de mesure et de cartographie est donnée dans la figure I-1.

L'approche prédictive présente des avantages considérables dans la phase initiale des prospections, tels la vitesse d'exécution, les coûts relativement bas et les besoins restreints en personnel expérimenté.

L'étude descriptive doit être considérée comme complémentaire à la démarche prédictive, car elle fournit la "vérité de terrain" qui doit, soit consolider, soit partiellement rectifier les diagnostics concernant l'érosion active et potentielle.

L'approche consolidée finale exige des opérations méthodologiques variées à l'intérieur d'une séquence générale, dont les phases principales consistent en cartographie fondamentale des **états érosifs**, traitement et ajustement de la carte intermédiaire des états érosifs, et cartographie **descriptive des processus d'érosion sur un site donné**.

Les grilles et les cartes de référence devraient être élaborées à moyenne ou grande échelle, pour fournir des informations topographiques explicitées par les courbes de niveau.

Pour ce qui est de la carte de base des états érosifs, les facteurs et paramètres spécifiques suivants sont pris en compte:

- Les **unités et classes topographiques de pentes**, exprimées en degrés ou pour cent.
- La **lithologie/roche mère/sols** où l'accent est mis sur la résistance mécanique et le degré de cohésion des différents "lithofaciès", roches ou sédiments meubles plutôt que sur leurs particularités pétrographiques ou minéralogiques; la légende différencie les roches dures et compactes, non-érodées, du matériel modérément ou fortement érodé, ou des sédiments meubles, non cohésifs.
- L'**occupation actuelle du sol et le couvert végétal** sont principalement identifiés par la photo-interprétation; leurs superposition et corrélation déterminent le degré de protection du sol.
- Les **degrés d'érodibilité** sont déterminés par la superposition de la carte des pentes et de la carte lithologique (voir chapitre 3.2 Approche prédictive – Etape 3).

La carte finale des **états érosifs** est le résultat de la superposition et de la corrélation des cartes de degrés de protection des sols et de degrés d'érodibilité.

Le **processus de description de l'érosion** sur un site donné, son étude et cartographie, se font en combinant la photo-interprétation et le contrôle sur le terrain, en utilisant la carte réajustée des états érosifs élaborée à l'échelle intermédiaire comme canevas cartographique de référence, ce qui signifie que les zones et unités affectées par l'érosion active et spécifique doivent être délimitées par des sous-limites au sein de la grille et des limites des unités d'érosion.

La cartographie systématique des traits qualitatifs et dynamiques de l'érosion permet d'identifier deux grandes catégories de milieux géographiques: **milieux morphologiquement stables, non affectés par l'érosion**, et **milieux instables, affectés par l'érosion**.

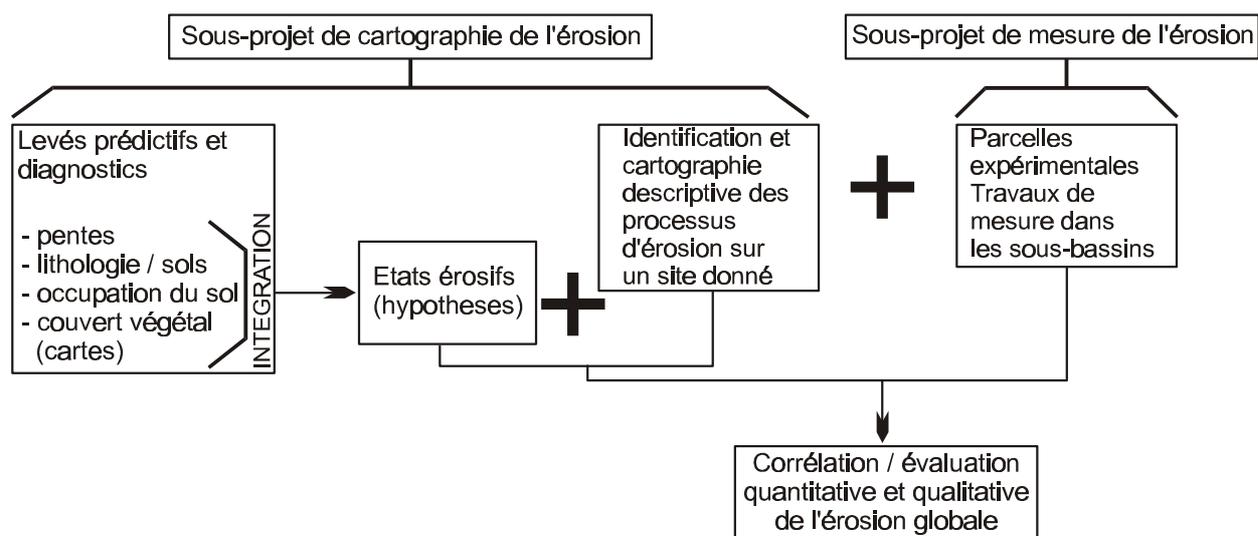


Figure I-1: Séquence générale des méthodologies de cartographie et de mesure de l'érosion

Pour ce qui est de la première catégorie, une évaluation qualitative est faite du **risque d'érosion** ou de **l'érosion potentielle**, identifiant les différents paramètres pris en compte lors de l'élaboration de la carte prédictive des états érosifs et évaluant leur force déstabilisante comparative. Cette dernière devrait permettre, pour chaque cas particulier, l'identification des principaux facteurs causaux des risques d'érosion, de moyen à élevé, grâce à l'application de codes et symboles présentés plus en détail dans la légende (chapitre 2.2).

S'agissant des zones affectées par l'érosion, la cartographie descriptive et qualitative permet d'identifier la nature des processus d'érosion spécifiques, où leur importance comparative est exprimée en termes de surfaces affectées, de dimension et de profondeur de la marque érosive (rigole, ravin, sapement ...) ou du volume du matériel arraché, et leur taux d'expansion ou tendance évolutive est basé sur les observations de terrain indiquant soit la régression ou stabilisation, soit, au contraire, le renforcement de l'activité érosive.

## 2.2 Légende

La légende de la carte consolidée d'érosion doit être suffisamment ouverte et souple pour répondre et s'adapter à une variété raisonnable de conditions géographiques spécifiques à la Méditerranée, qui appartiennent toutes aux milieux côtiers, tout en étant caractérisées par des microclimats et des variables lithologiques et d'occupation du sol différents. Une attention particulière doit être accordée aux aspects suivants:

- le zonage agro-écologique ou bio-géographique pour les différentes échelles cartographiques et conditions d'étude;
- l'évaluation de l'état de la surface du sol (encroûtement et imperméabilisation) et des conséquences sur la dynamique du ruissellement et de l'infiltration de l'eau<sup>1</sup>;
- les changements mécaniques et/ou chimiques subis par les sols comme conséquence de l'utilisation des techniques spécifiques de culture et d'occupation du sol (tassement)<sup>1</sup>;
- l'identification et l'évaluation spécifiques des zones affectées par l'érosion en raison de la dégradation de l'infrastructure (routes, terrasses, petits barrages, etc.).

Les milieux géographiques peuvent être subdivisés en deux grandes catégories:

- milieux **stables**, non affectés par l'érosion, et
- milieux **instables**, affectés par l'érosion.

La légende de la carte d'érosion telle qu'elle est décrite dans l'encadré 1 a été préparée suivant le classement des paysages cité, qui a servi de cadre de référence et de guide pour les diagnostics prédictif et descriptif.

<sup>1</sup> Traits à considérer comme parties des paramètres lithologie/roche mère à intégrer dans la phase de cartographie des états érosifs.

## Encadré 1

### Légende

#### **A. CARTOGRAPHIE PREDICTIVE: EROSION POTENTIELLE / RISQUE D'EROSION**

##### **Symboles**

(0)	nul (Equivalent de l'unité 01 de la cartographie descriptive: milieux stables sans vocation agricole)
(1)	très faible
(2)	faible
(3)	moyen
(4)	élevé
(5)	très élevé

#### **B. CARTOGRAPHIE DESCRIPTIVE: DEGRE DE STABILITE / PROCESSUS D'EROSION ACTUELLE <sup>1</sup>**

##### **I. Milieux stables, non affectés par l'érosion (\*)**

00	milieux stables sans vocation agricole (affleurements rocheux, falaises, zones sablonneuses)
01	milieux stables, non exploités avec potentiel forestier
02	milieux stables, non exploités avec potentiel agricole (culture et pâturage)
03	milieux stables, exploités à des fins forestières
04	milieux stables, exploités à des fins agricoles (culture et pâturages)
• <b>Milieux stabilisés par:</b>	
05	végétalisation naturelle ou artificielle
06	aménagements physiques et mécaniques (terrasses, barrages régulateurs, travaux d'aménagement des cours d'eau)

##### **\* Degré de risque d'instabilité**

Le **risque d'instabilité** pour tous les milieux stables (00 à 04) ou **réhabilités** (05 et 06, ou présentant un risque au cours des premières années de réhabilitation) s'exprime par un indice (de 0 à 3) complémentaire au symbole des **unités stables** identifiées:

0: Nul (= le degré le plus élevé de **stabilité**)

1: Faible à modéré

2: Elevé

3: Zones menacées/précaires/critiques (Seuil de stabilité = le degré le plus élevé de **risque d'instabilité**)

**Exemple** : 03 = milieux **stables** exploités  
: 032 = milieux **stables** exploités avec risque d'érosion élevé

##### **\* Identification des principaux facteurs causaux**

L'évaluation du risque d'**instabilité** peut être renforcée par l'identification des **facteurs causaux** les plus probables/prédominants, inhérents aux paramètres de base du **paysage**, tels que:

**t**: Topographie

**g**: Géologie

**v**: Végétation

**h**: Activité humaine

**a**: Impact des animaux (piétinement, pieds-de-vache)

D'autres codes peuvent être librement affectés aux symboles cartographiques selon les spécificités géographiques locales.

**Exemple**: 023g = milieux stables exploités avec risque d'érosion dû principalement aux facteurs géologiques.

##### **II. Milieux instables (\*\*)**

###### • **Erosion pluviale**

A1	localisée (<30% de la zone est affecté)
A2	dominante (30-60%)
A3	généralisée (>60%)

###### • **Erosion en nappe**

L1	localisée
L2	dominante
L3	généralisée avec décapage du sol
Lx	= milieux irrécupérables par décapage total du sol

###### • **Erosion linéaire / en rigoles**

D1	localisée
D2	dominante
D3	généralisée

###### • **Erosion concentrée / ravinement**

C1	ravins individualisés
C2	réseaux localisés de ravins
C3	ravinements dominants
C4	ravinements généralisés
Cx	= milieux irrécupérables par généralisation des bad-lands

<sup>1</sup> Pour la définition des termes, consulter le glossaire.

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Erosion éolienne</u></b></li> </ul>	<p><b>** Tendance (taux) d'expansion de l'érosion</b></p> <p>Evaluation du taux/tendance d'érosion pour tous les milieux <b>instables</b>, affectés par l'érosion, à exprimer par un indice complémentaire (de 0 à 3) au symbole des <b>unités instables</b> identifiées:</p> <p>0: Tendance à la <b>stabilisation</b>, à la <b>régression</b> ou à la <b>limitation de l'expansion spatiale</b> du processus d'érosion</p> <p>1: Tendance localisée à l'<b>expansion</b> ou à l'<b>intensification</b></p> <p>2: Tendance généralisée à l'<b>expansion</b> ou à l'<b>intensification</b></p> <p>3: Tendance de la <b>dégradation généralisée</b> vers une <b>situation irréversible</b></p> <p><b>Exemple:</b></p> <p>L2 = érosion en nappe dominante</p> <p>L23 = érosion en nappe dominante avec tendance à la généralisation et à une situation irréversible (unités du type Lx)</p> <p><b>Note:</b> Tous les processus d'érosion multiples ou mixtes, s'ils sont clairement identifiables, peuvent être cartographiés grâce à l'association ou la combinaison des symboles correspondants (la séquence des symboles doit être établie suivant l'importance relative des processus: le premier symbole se rapporte au processus le plus important):</p> <p>Exemple: L<sub>11</sub>/C<sub>12</sub> = Erosion en nappe localisée, combinée avec les réseaux de ravins dendritiques et avec une tendance à l'expansion ou à l'intensification généralisée.</p>
<p>E1 décapage superficiel/déflation/saupoudrage localisés</p> <p>E2 déflation dominante</p> <p>E3 déflation généralisée</p> <p>Ex = milieux irrécupérables par ablation ou ensablement total du sol</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Mouvements de masse</u></b></li> </ul>	
<p>M1 solifluxion/éboulis de gravité localisés</p> <p>M2 glissement de terrain/lave torrentielle localisés</p> <p>M3 dominants</p> <p>M4 généralisés</p> <p>MX = milieux irrécupérables par affaissement total des versants</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Excès d'eau ou de sédiment</u></b></li> </ul>	
<p>W1 zones périodiquement inondées et/ou alluvionnées</p> <p>W2 zones inondées et/ou alluvionnées en permanence / zones hydromorphes</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Dégradation due à l'utilisation des terres</u></b></li> </ul>	
<p>S1 compactation</p> <p>K1 encroûtement</p> <p>Z1 piétinement/pieds-de-vache</p> <p>H1 salinisation</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Processus associés</u></b></li> </ul> <p>Voir "Note" (**)</p> <p><b>Processus multiples</b></p> <p>P1, P2, P3, etc. (pour la description des processus érosifs mixtes, difficilement identifiables et interactifs)</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Formes d'érosion ponctuelles/linéaires (processus d'érosion individualisés)</u></b></li> </ul> <p> <b>canyons rocheux</b></p> <p> <b>ravinement localisé et/ou tête de ravin</b></p> <p> <b>glissements de terrain / laves torrentielles localisés</b></p> <p> <b>éboulis de gravité</b></p> <p> <b>sapements de berges</b></p> <p> <b>ligne d'érosion littorale</b></p>

### 3. APPROCHE METHODOLOGIQUE

#### 3.1 Schéma méthodologique général

Comme indiqué dans la description générale de la méthodologie (chapitre 2.1), la démarche méthodologique fondamentale consiste en 3 phases clairement définies:

- la **phase predictive** qui aboutit à la cartographie des unités homogènes des **états érosifs**, fournissant le canevas pour la cartographie du potentiel et des tendances générales d'érosion;
- la **phase descriptive** consistant à identifier et évaluer les processus actuels d'érosion sur le site, ainsi que les différents degrés d'exposition à l'érosion et les tendances évolutives;
- la **phase d'intégration** dont le résultat principal est la carte finale consolidée d'érosion hydrique, obtenue par la superposition et l'intégration des informations qualitatives issues des phases prédictive et descriptive.

La phase prédictive consiste principalement en un traitement de données selon une séquence de 7 opérations différentes:

- Opérations 1 et 2: Elaboration des cartes des classes de pentes et de lithofaciès;
- Opération 3: Carte d'érodibilité par superposition des cartes des pentes et des lithofaciès;
- Opérations 4 et 5: Elaboration des cartes d'occupation du sol et de couvert végétal;
- Opération 6: Carte de protection des sols par superposition des cartes d'occupation du sol et de couvert végétal;
- Opération 7: Carte des états érosifs par superposition des cartes d'érodibilité et de protection des sols.

La phase descriptive est en principe réalisée par l'observation directe et le contrôle sur le terrain, en utilisant la carte prédictive des états érosifs comme canevas cartographique et thématique de référence. L'observation sur le terrain doit être appuyée par la photo-interprétation, particulièrement au cours des étapes préliminaires qui consistent en l'identification des degrés de stabilité, des processus érosifs dominants et des tendances évolutives à l'intérieur des différentes unités d'érosion.

Le produit de la phase d'intégration est la carte finale consolidée d'érosion, obtenue grâce à la consolidation de toutes les données prédictives et descriptives.

Le diagramme de la figure I-2 résume la séquence méthodologique dans son ensemble et identifie clairement les différentes phases cartographiques, y compris l'intégration finale aboutissant à la carte consolidée d'érosion.

Pour toutes les phases de superposition et d'intégration, il est recommandé d'utiliser le SIG comme un outil efficace et hautement approprié au processus de prise de décisions.

Il est à souligner que l'objectif de la carte et ses usagers finaux doivent être précisés avant de procéder à l'exercice cartographique. La cartographie de l'érosion n'est pas un but en soi; elle doit permettre l'identification des besoins et des possibilités en matière de conservation des sols par le biais de la planification des mesures curatives à court terme et des politiques de prévention à plus long terme. Les étapes de planification respectives comporteront l'identification des situations extrêmes, ainsi que la définition des priorités d'action et des mesures curatives/préventives requises.

#### 3.2 Première phase: Approche prédictive

##### Etape 1: Elaboration de la carte des pentes à partir de la carte topographique

La démarche commence par la délimitation de tous les thalwegs identifiables sur la base de la carte topographique de référence en courbes de niveau, qu'il s'agisse des cours d'eau sporadiques ou permanents. Cette approximation nous permet de délimiter tous les espaces en pente, étant donné que le thalweg coïncide avec le pied d'un versant et le début d'un autre (figure I-2). La plupart des thalwegs coïncident avec des cours d'eau sur la carte topographique; donc, lorsque ces derniers ne sont pas marqués ils correspondent à des cours mineurs, qui doivent être rajoutés à l'ensemble du réseau des thalwegs.

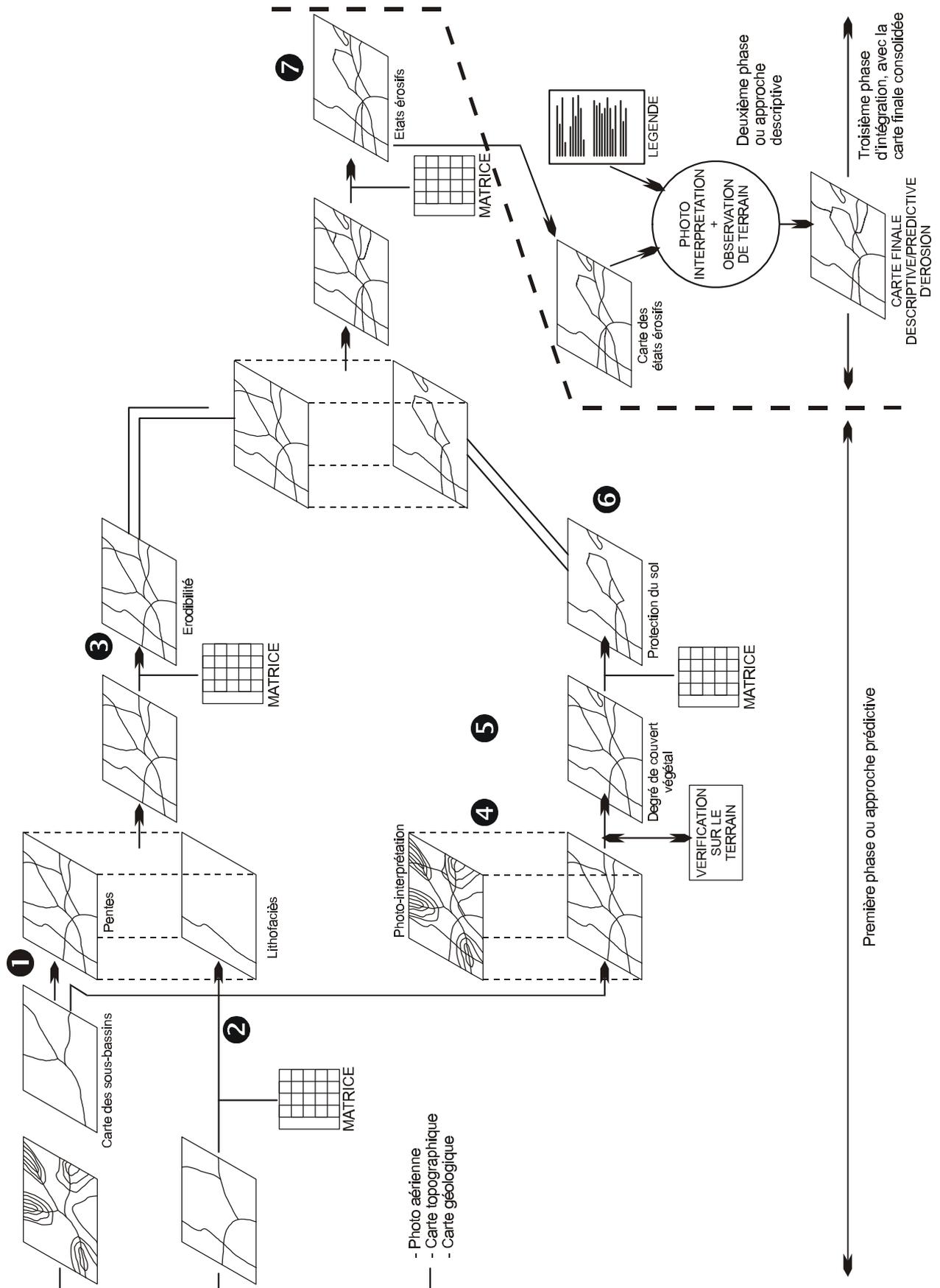


Figure I-2: Principale séquence opérationnelle des travaux de cartographie de l'érosion

## Encadré 2

### Echelle cartographique

Les levés cartographiques de l'érosion, qu'ils soient prédictifs, descriptifs ou intégrés, doivent être adaptés à l'échelle choisie, ce qui implique que les diagnostics cartographiques escomptés seront calibrés en fonction de la résolution réelle de l'échelle et du degré de détail de la légende cartographique. La résolution de base de la carte est déterminée par la dimension linéaire minimum (1 cm) ou la zone minimum (1 cm<sup>2</sup>) des processus d'érosion, quelque soit l'échelle de la carte (par exemple, 100 m/1 ha au 100.000<sup>e</sup>; 50 m/0,25 ha au 1:50.000<sup>e</sup>; etc.).

Les échelles les plus appropriées peuvent être cataloguées comme suit:

- au niveau d'un terrain familial, d'une ferme ou d'une parcelle, les très grandes échelles, comprises entre le 1:5.000<sup>e</sup> et le 1:10.000<sup>e</sup>, principalement pour les besoins de la planification ou d'études de l'aménagement des terres très détaillées;
- au niveau de petits sous-bassins et bassins versants, les échelles grandes à moyennes, comprises entre le 1:25.000<sup>e</sup> et le 1:50.000<sup>e</sup>;
- au niveau régional, l'échelle de reconnaissance (1:150.000<sup>e</sup> et 1:250.000<sup>e</sup>);
- au niveau d'un pays de dimension moyenne, les petites échelles comprises entre le 1:600.000<sup>e</sup> et le 1:1.000.000<sup>e</sup>.

Pour le présent programme, une échelle du 1:50.000<sup>e</sup> a été retenue, avec la possibilité d'une réduction ultérieure des données d'origine à des échelles plus petites, destinées à être utilisées pour l'identification des priorités et l'élaboration des cartes de conservation des sols et des terres (1:100.000<sup>e</sup> ou 1:200.000<sup>e</sup>).

Une fois complété le réseau des thalwegs, il convient d'identifier et de tracer les lignes de partage des eaux (voir figure I-3). L'objectif est d'identifier les versants des reliefs sans se soucier des changements physiographiques mineurs le long de la pente.

C'est dans cette étape que l'on élabore la carte des sous-bassins. Cette carte servira de canevas et de carte de référence pour la photo-interprétation de l'occupation du sol. Toutes les

cartes et copies doivent être dessinées sur calque en polyester indéformable.

Une fois les thalwegs et les lignes de partage des eaux tracés, il faut identifier les portions de pentes continues, qui constituent les principaux traits topographiques des sous-bassins considérés (voir figure I-4).

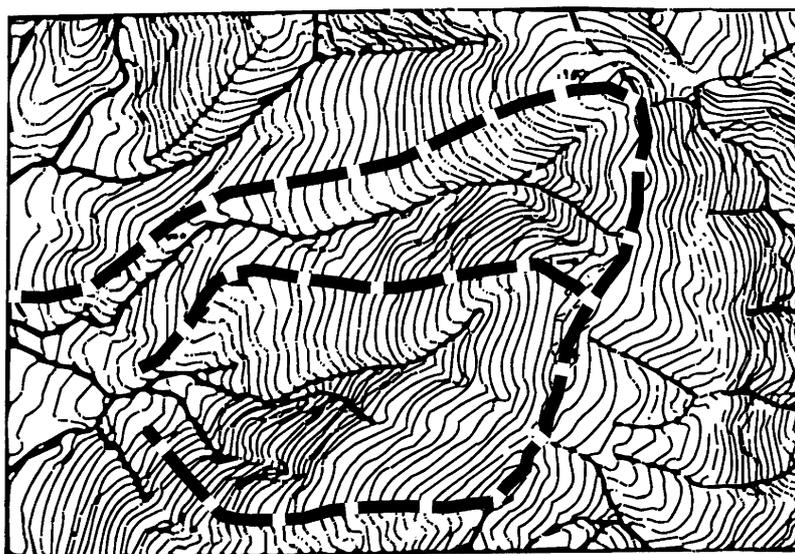
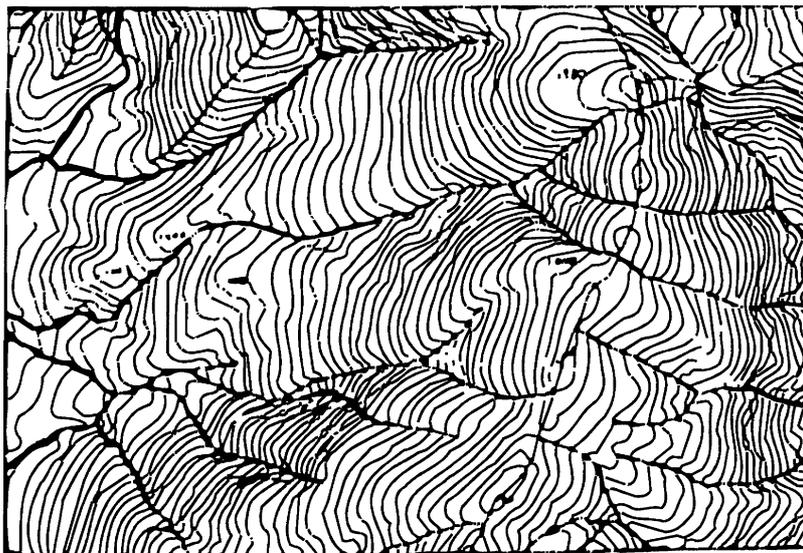


Figure I-3: Identification des lignes de partage des eaux



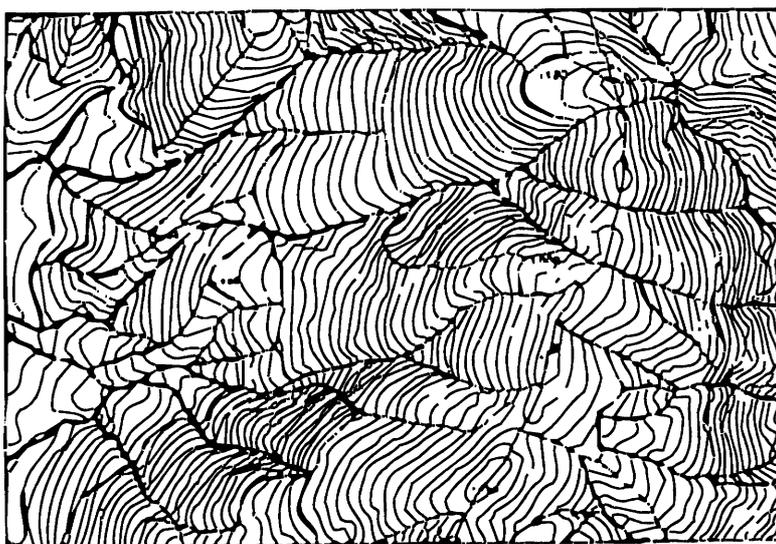
**Figure I-4: Cartographie préliminaire des polygones de pente continue**

Après avoir localisé et cartographié les polygones de pente continue, on procède à l'identification et à la cartographie des ruptures topographiques et des changements de pente à l'intérieur de ces polygones. Le résultat de cette opération est la carte de la mosaïque topographique, qui montre des unités topographiques homogènes (voir figure I-5).

Une fois établie la carte de la mosaïque topographique, les valeurs des pentes pour chacune des unités identifiées doivent être

déterminées. Pour ce faire, on compte le nombre de courbes de niveau contenues dans la section de pente de référence mesurée en millimètres et l'on se reporte au tableau I-1, où les inclinaisons des pentes sont exprimées en pour cent pour chaque catégorie de pente définie en longueur et en nombre d'intervalles (voir tableau I-1 et exemples appliqués dans les figures I-6 et I-7).

La direction de la plus grande pente par unité peut être représentée par une ligne descendant à partir de la ligne de partage des eaux.



**Figure I-5: Carte de la mosaïque topographique**

Nombre d'intervalles	Longueur des sections inclinées exprimée en mm													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	40
1	40	20	13,0	10	8	6,0	5,7	5	4,4	4	2,6	2	1,3	1
2	80	40	26,6	20	16	13,3	11,4	10	8,8	8	5,3	4	2,6	2
3	-	60	40,0	30	24	20,0	17,1	15	13,2	12	8,0	6	3,9	3
4	-	80	53,3	40	32	26,6	22,5	20	17,6	16	10,6	8	5,2	4
5	-	100	66,6	50	40	33,3	28,5	25	22,0	20	13,3	10	6,5	5
6	-	-	80,0	60	48	40,0	34,2	30	26,4	24	16,0	12	7,8	6
7	-	-	93,3	70	56	46,6	39,9	35	30,8	28	18,6	14	9,1	7
8	-	-	-	80	64	53,3	45,6	40	35,2	32	21,3	16	10,4	8
9	-	-	-	90	72	60,0	51,3	45	39,6	36	24,0	18	11,7	9
10	-	-	-	100	80	66,6	57,0	50	44,0	40	26,6	20	13,0	10
11	-	-	-	-	88	73,3	62,7	55	48,4	44	29,3	22	14,3	11
12	-	-	-	-	96	80,0	68,4	60	52,8	48	32,0	24	15,6	12
13	-	-	-	-	104	86,6	74,1	65	57,2	52	34,6	26	16,9	13
14	-	-	-	-	-	93,3	79,8	70	61,1	56	37,3	28	18,2	14
15	-	-	-	-	-	100,0	85,5	75	66,0	60	40,0	30	19,5	15
16	-	-	-	-	-	-	91,2	80	70,4	64	42,6	32	20,8	16
17	-	-	-	-	-	-	96,9	85	74,8	68	45,3	34	22,1	17
18	-	-	-	-	-	-	102,6	90	79,2	72	48,0	36	23,4	18
19	-	-	-	-	-	-	-	95	83,6	76	50,6	38	24,7	19
20	-	-	-	-	-	-	-	100	88,0	80	53,3	40	26,0	20
Inclinaison de la pente en pour cent (%)														

Tableau I-1: Valeurs des pentes

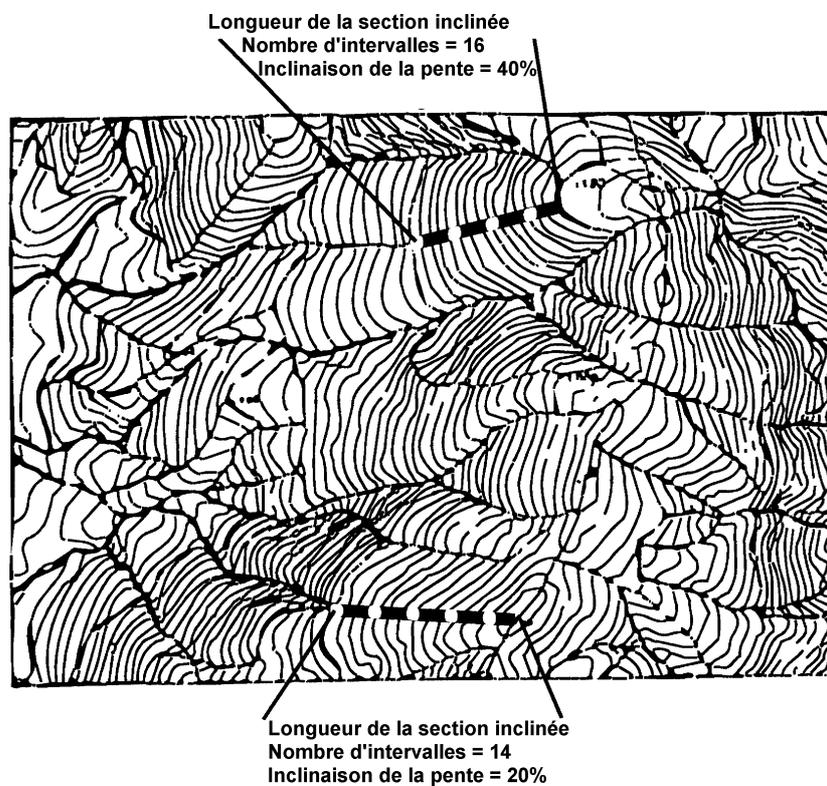


Figure I-6: Longueur et valeur des sections inclinées

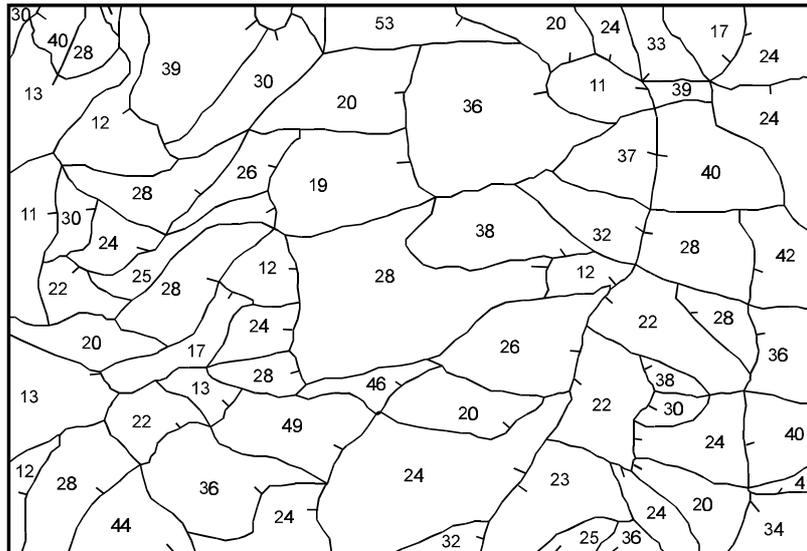


Figure I-7: Carte des pentes

Les classes de pentes sont présentées dans le tableau I-2.

Classe	Type de pente
1.	Nulle à faible (0-3%)
2.	Modérée (3%-12%)
3.	Abrupte (12%-20%)
4.	Très abrupte (20%-35%)
5.	Extrême (>35%)

Tableau I-2: Classes de pentes

Etape 2: Elaboration de la carte des lithofaciès

Cette carte est préparée à partir des données géologiques, lithologiques et pédologiques; elle identifie les différents types de roches ou de sédiments/sols de surface, classés selon leur degré relatif de cohésion et de résistance mécanique et technique à l'érosion.

Par ailleurs, certaines caractéristiques propres aux sols, telles que la structure, l'imperméabilité, la teneur en argile, la capacité de stockage de l'eau, doivent également être prises en compte.

La légende de la carte des lithofaciès prend en compte les classes présentées dans le tableau I-3.

Les zones à affleurements rocheux et pierrosité de surface élevés (40-80%) à dominants (>80%) doivent être identifiées et classées comme zones stables à vocation non agricole (classe /a/ du tableau I-3), au même titre que les plans d'eau,

les carrières, les falaises rocheuses, les plages, les secteurs urbains ou industriels, etc.

Classes de lithofaciès	Type de matériel
(a)	Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, croûtes, affleurements de grès ferrugineux (calcaires massifs, sols fortement rocheux, roches ignées ou éruptives, sols localement encroûtés).
(b)	Roches ou sols cohésifs fracturés ou modérément altérés.
(c)	Roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schiste, marne, etc.).
(d)	Roches et/ou sols peu résistants ou fortement/profondément altérés (marne, gypse, ardoise argileuse, etc.).
(e)	Sédiment ou sol meuble, non cohésif et matériel détritique.

Tableau I-3: Classes de lithofaciès

Etape 3: Elaboration de la carte d'érodibilité

La carte d'érodibilité est le résultat de la superposition de la carte des pentes et de la carte des lithofaciès (voir figure I-8).

Les polygones résultant de la superposition des deux cartes de référence sont classés suivant la matrice montrée au tableau I-4.

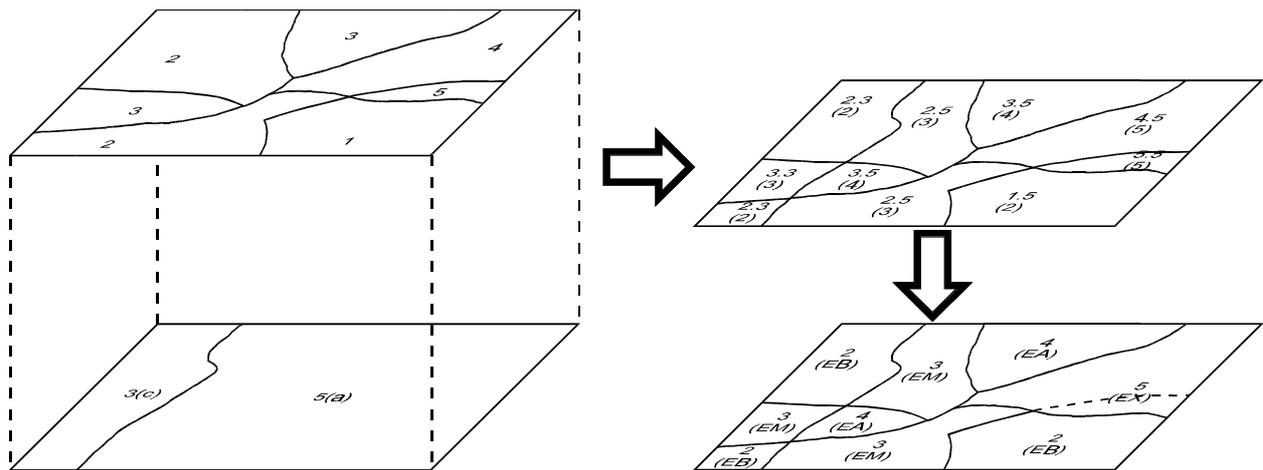


Figure I-8: Elaboration de la carte d'érodibilité

Classe de pente	Classe de lithofaciès				
	1(a)	2(b)	3(c)	4(d)	5(e)
1.	1(EN)	1(EN)	1(EN)	1(EN)	2(EB)
2.	1(EN)	1(EN)	2(EB)	3(EM)	3(EM)
3.	2(EB)	2(EB)	3(EM)	4(EA)	4(EA)
4.	3(EM)	3(EM)	4(EA)	5(EX)	5(EX)
5.	4(EA)	4(EA)	5(EX)	5(EX)	5(EX)

Tableau I-4: Matrice: Pente vs. lithofaciès

Classes	Erosion potentielle
1.	Faible (EN)
2.	Modérée (EB)
3.	Moyenne (EM)
4.	Forte (EA)
5.	Extrême (EX)

Tableau I-5: Degrés d'érodibilité

Etapes 4 et 5: Elaboration de la carte d'occupation du sol et de couvert végétal

Aussi bien l'occupation du sol que le couvert végétal sont d'abord identifiés au moyen de la photo-interprétation et, ensuite, transférés à la carte du sous-bassin. Les classes d'occupation du sol et de couvert végétal figurent dans les tableaux I-6 et I-7.

Il convient de rappeler que l'échelle de la photo aérienne ne coïncide pas toujours avec l'échelle choisie pour la cartographie selon les critères signalés dans l'encadré 2. Dans ces conditions, il sera nécessaire de procéder à un ajustement des échelles dans l'opération de transfert des résultats de la photo-interprétation sur le canevas cartographique de base.

**Encadré 3**

**Méthodologie développée**

La recommandation générale est que le cadre méthodologique ne doit pas être considéré comme un schéma rigide, mais plutôt comme une série de directives dont les concepts, unités et symboles cartographiques doivent être facilement adaptables aux caractéristiques géographiques spécifiques à chaque pays ou région.

Dans la phase prédictive, le contenu (qualifications) des tableaux à double entrée (matrices) peut être adapté aux conditions spécifiques à chaque pays ou région. En particulier, les différentes classes de couvert végétal et leurs qualifications dans les tableaux doivent être définies conformément aux conditions locales spécifiques.

Dans la phase descriptive, l'adaptation peut se faire en formant de nouvelles catégories de processus ou de caractéristiques, outre celles proposées dans la légende originelle au paragraphe "Processus multiples", où les symboles P1, P2, P3 ... sont disponibles pour les formes ou tendances d'érosion nouvellement identifiées.

Classes	Occupation du sol
1.	Culture sèche (herbacée)
2.	Culture en ligne (oliviers, amandiers, arbres fruitiers, vignobles)
3.	Irrigation
4.	Forêts
5.	Arbustes denses
6.	Arbustes clairsemés, pâturages

Tableau I-6: Classes d'occupation du sol

Classes	Degré de couvert végétal
1.	Inférieur à 25%
2.	25% - 50%
3.	50% - 75%
4.	Supérieur à 75%

Tableau I-7: Classes du degré de couvert végétal

La séquence de la procédure de photo-interprétation et de cartographie pour les besoins de l'identification de l'occupation du sol et du couvert végétal est montrée dans la figure I-9.

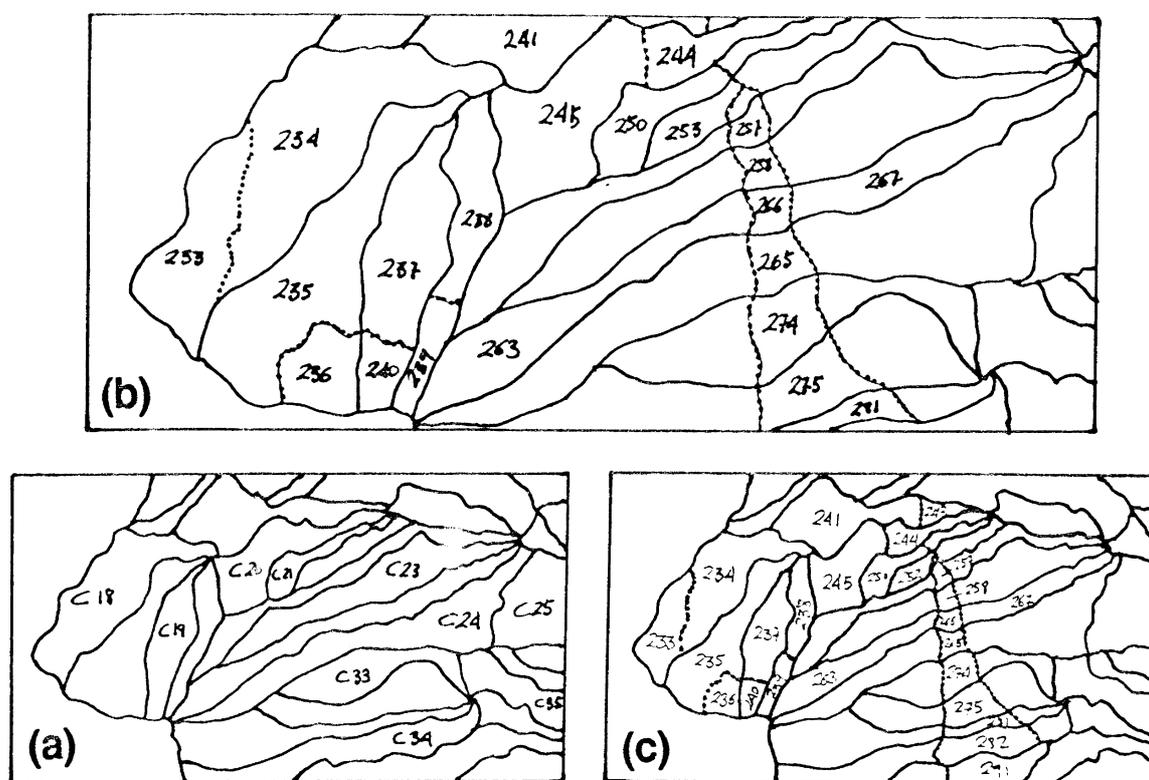
Si possible, des photo aériennes récentes doivent être utilisées, prises dans les différentes périodes de l'année, pour assurer la prise en compte des changements/modifications du couvert végétal et de l'occupation du sol tout au long de l'année.

La photo-interprétation doit être vérifiée par des visites de terrain et corrigée le cas échéant. La carte des pentes fournit une référence utile pour l'identification des polygones sur le terrain.

Etape 6: Elaboration de la carte de protection des sols

La carte de degrés de protection des sols est obtenue grâce à l'application de la matrice présentée dans le tableau I-8.

L'application de la matrice et de la légende présentées dans le tableau I-8 permet d'effacer les limites séparant les polygones avec le même degré de protection des sols (voir figure I-10).



- (a) Carte de référence des sous-bassins (1:50.000<sup>e</sup>)
- (b) Photo-interprétation de l'occupation du sol et du couvert végétal et les polygones résultants ( $\cong$  1:30.000<sup>e</sup>)
- (c) Carte finale d'occupation du sol et de couvert végétal dans la carte de référence des sous-bassins (1:50.000<sup>e</sup>)

Figure I-9: Séquence méthodologique pour la cartographie de l'occupation actuelle du sol et du couvert végétal

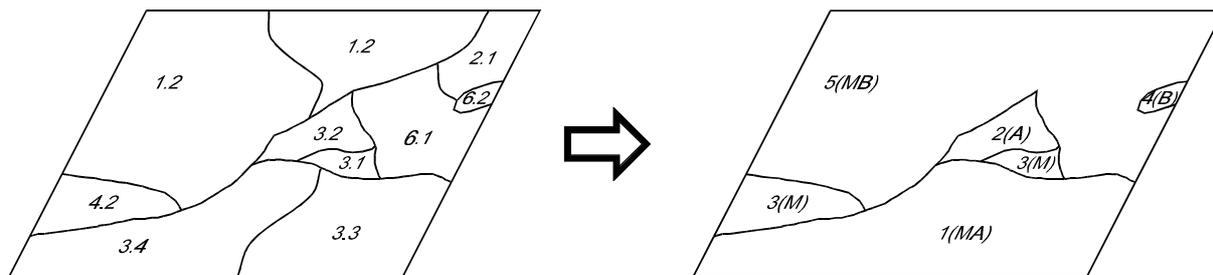


Figure I-10: Elaboration de la carte de protection des sols

Occupation du sol	Couvert végétal			
	1	2	3	4
1	5(MB)	5(MB)	4(B)	4(B)
2	5(MB)	5(MB)	4(B)	3(M)
3	3(M)	2(A)	1(MA)	1(MA)
4	4(B)	3(M)	2(A)	1(MA)
5	5(MB)	4(B)	3(M)	2(A)
6	5(MB)	4(B)	3(M)	2(A)

Degrés de protection des sols (Légende):

1. Très élevé (MA)
2. Elevé (A)
3. Moyen (M)
4. Faible (B)
5. Très faible (MB)

Tableau I-8: Matrice: Occupation du sol vs. couvert végétal

Degré de protection des sols	Degré d'érodibilité				
	1(EN)	2(EB)	3(EM)	4(EA)	5(EX)
1(MA)	1	1	1	2	2
2(A)	1	1	2	3	4
3(M)	1	2	3	4	4
4(B)	2	3	3	5	5
5(MB)	2	3	4	5	5

Légende (codification) des états érosifs:

5. très élevé
4. élevé
3. notable
2. faible
1. très faible

Tableau I-9: Matrice: Degré de protection des sols vs. degré d'érodibilité

#### Etape 7: Elaboration de la carte des états érosifs

La carte des états érosifs est le produit final de la phase prédictive, résultant de la superposition de la carte d'érodibilité et de la carte des degrés de protection des sols.

La superposition se fait en appliquant la matrice présentée dans le tableau I-9.

Les séquences de l'étape 7 sont montrées dans la figure I-11, et le produit final en est la carte des états érosifs.

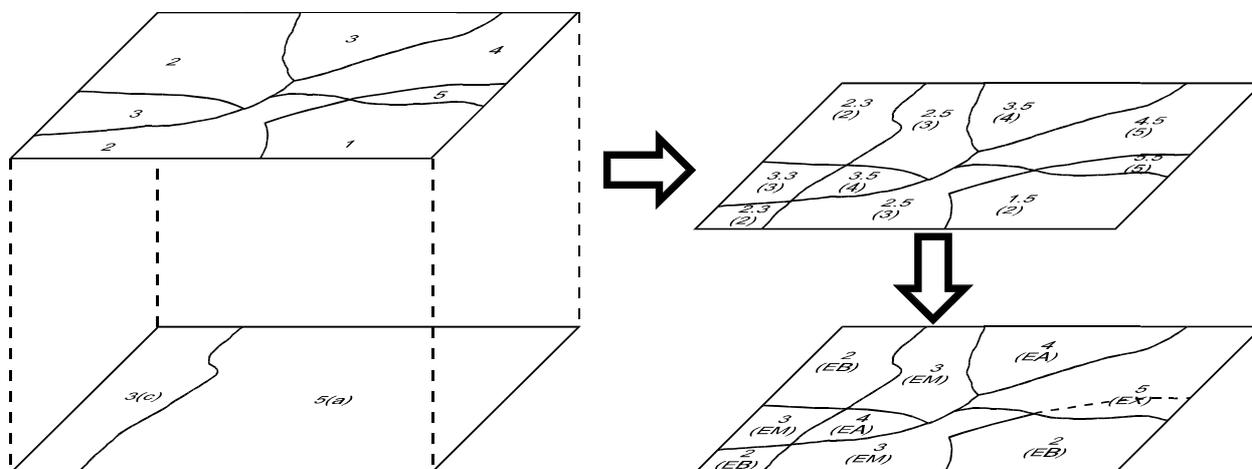


Figure I-11: Elaboration de la carte des états érosifs

### 3.3 Deuxième phase: Approche descriptive

L'approche descriptive s'applique selon les définitions et critères proposés dans la légende présentée dans le chapitre 2.2 et l'encadré 1 – rubrique B (cartographie descriptive par sites) et sur la base du canevas des polygones de la carte des états érosifs résultant de la première phase (approche prédictive).

Pour les levés cartographiques, deux procédés différents mais complémentaires sont utilisés: la photo-interprétation et les observations de terrain.

La photo-interprétation permet l'identification et la délimitation cartographiques des situations et processus érosifs les plus extrêmes et les plus contrastés, tels que les terres en friche (affleurements de roches, falaises, zones pierreuses ou sableuses), certains types de reboisement, les structures physiques (par exemple, terrasses), les ravinements profonds et/ou généralisés (bad-lands), certains cas de mouvements de masse et de dépôts sédimentaires.

L'ensemble des milieux géographiques se subdivisent en 2 grandes catégories: les milieux **stables**, non affectés par l'érosion, et les milieux **instables**, affectés par divers processus d'érosion; la procédure combinée d'observation de terrain et d'identification des processus se déroulera en plusieurs opérations:

1. Définition des degrés de **risque/potentiel** d'érosion des milieux **stables/stabilisés**;
2. Définition des types de **processus érosifs** dominants, de leur **intensité** relative et des **tendances évolutives** pour les milieux **instables**;
3. Identification et évaluation des particularités locales telles que les principales zones sujettes à l'érosion ou les facteurs causaux plus spécifiques.

Il s'agit principalement d'évaluations qualitatives qui doivent être considérées comme complémentaires à la phase prédictive.

#### Opération 1: Définition du degré de risque/potentiel d'érosion

- Cette procédure ne concerne que les milieux **stables**, non affectés par l'érosion, définis comme milieux où les indices d'érosion sont rares ou peu évidents, avec des horizons de surface bien développés et une bonne structure du sol. Ces milieux sont dans la plupart des cas non occupés ou faiblement exploités par l'homme: le couvert végétal est

dense, les conditions topographiques et de sol peu favorables au déclenchement des processus érosifs.

- Les différents types de milieux stables et/ou réhabilités sont identifiés en fonction de leur exploitation, aménagement et degré de risque d'érosion: le **risque** d'érosion varie entre 0 (sans risque = le degré le plus élevé de stabilité) et 3 (seuil de stabilité = le degré le plus élevé de risque).
- Dans la plupart des cas, les principaux facteurs causant l'érosion sont aisément identifiables; il peuvent être indiqués par des indices complémentaires décrits dans l'encadré 1 – Légende.

#### Opération 2: Identification et définition des processus d'érosion prédominants

- Tous les milieux **instables** sont affectés par un ou plusieurs processus d'érosion d'intensité variant de faible à modérée et grave, pouvant s'évaluer, pour chaque processus spécifique, en termes d'**intensité** (profondeur des ravins, masse de sols ou sédiments enlevés) ou d'**espace affecté** (localisé, dominant ou généralisé): les symboles correspondants figurent dans la légende.

Certains indicateurs pratiques pour l'observation de terrain peuvent être facilement identifiés:

- L'érosion faible se manifeste par un lessivage superficiel localisé, dû à une érosion en nappe avec un taux de perte en sols légèrement supérieur à celui de sa formation;
- L'érosion modérée se traduit par la perte de terre arable localisée, due principalement à l'action combinée de l'érosion en nappe et de l'érosion en rigoles, surtout dans les zones cultivées ou celles avec une faible densité de couverture végétale;
- L'érosion grave aboutit généralement à l'ablation d'une grande partie des terres arables par l'érosion en nappe et/ou en rigoles; les ravins commencent à se former, la fertilité et l'aptitude des sols sont gravement affectées;
- Dans les zones gravement affectées par le ravinement, presque tous les horizons de surface des sols sont décapés, plus de 50% de l'espace est creusé de ravins, et la majeure partie des terres est dépourvue de tout couvert végétal; ces zones, appelées "bad-lands" et devenues inutilisables, sont classées dans la légende comme zones **irrécupérables** (LX, CX);

- Des indicateurs supplémentaires de la **dynamique d'érosion** peuvent être fournis par le biais de l'identification et de l'évaluation de la **tendance évolutive de l'érosion** exprimée par des indices indiqués dans la légende (la stabilisation ou l'expansion et/ou l'intensification des processus érosifs identifiés – voir encadré 1).

Opération 3: Identification des particularités locales, tels les facteurs causaux du risque d'érosion pour les milieux stables, les processus d'érosion multiples et/ou associés, et leurs tendances principales évolutives (voir encadré 1 – Légende).

### 3.4 Troisième phase: Intégration

La carte finale est une carte qualitative, combinant les données descriptives et prédictives, et contenant des informations complètes sur les différents aspects des phénomènes d'érosion.

- La carte finale consolidée d'érosion est le résultat de l'association et de l'intégration des données prédictives et descriptives, qui utilise la carte des **états érosifs** comme canevas cartographique de référence et fournit une grille d'unités homogènes pouvant être affectées par une grande variété de processus d'érosion. La description et la cartographie de l'érosion active et des risques d'érosion plus spécifiques (mieux identifiables à travers leurs principaux **facteurs causaux**) sont complémentaires aux données fournies par la cartographie prédictive, ce qui implique que le diagnostic final d'érosion doit s'exprimer par un symbole unique et intégré.
- Dans les milieux **stables**, le degré de stabilité et de risque d'érosion est identifié au moyen des symboles **descriptifs**, sans référence aux **états érosifs**.  
Exemple: 032g = Zones exploitées stables avec risque élevé d'érosion dû aux facteurs géologiques.
- Dans les milieux **instables**, les unités affectées par l'érosion sont indiquées par des symboles consolidés, intégrant les **états érosifs** (exprimés par un chiffre entre parenthèses) et les processus érosifs (figurés par le symbole descriptif correspondant, exprimant la nature, l'intensité, l'ampleur et la tendance évolutive du processus); il n'est pas nécessaire d'identifier les facteurs causaux pour les zones actuellement instables.

Exemple: (2) L21 = Unité **instable** avec **état érosif** de niveau (2), affectée par l'**érosion en**

**nappe dominante** avec tendance à l'**expansion locale** ou l'**intensification**.

La recommandation générale est que la méthodologie développée et la légende cartographique ne doivent pas être considérées comme un schéma rigide mais plutôt comme une série de directives pratiques, où les concepts, les unités et les symboles cartographiques doivent être flexibles et adaptables aux caractéristiques géographiques prévalant dans un pays ou une région.

Dans la partie descriptive de la légende, l'adaptation est possible grâce à la création de nouvelles catégories de processus ou de caractéristiques, telles qu'elles sont décrites dans la légende originelle au paragraphe "Processus multiples", où les symboles P1, P2, P3 ... sont disponibles pour les formes ou tendances d'érosion nouvellement identifiées.

## 4. ASPECTS PRATIQUES DE LA MISE EN APPLICATION

### 4.1 Composantes techniques

L'application de la méthodologie proposée de cartographie exige des équipes techniques pluridisciplinaires, qui doivent être composées comme suit:

- 1 spécialiste en télédétection (images satellitaires et traitement de données, photo-interprétation) et en cartographie pour les phases d'enquête et de prospection;
- 1 géomorphologue chargé de l'analyse, de l'identification et de la classification des unités de paysage et de leurs traits morphogéniques;
- 1 biogéographe et/ou spécialiste en sols chargé de l'identification et de l'évaluation des différents types d'occupation du sol et de couvert végétal;
- 1 chef d'équipe expérimenté en matière d'érosion des sols et de techniques de cartographie intégrées. Il sera responsable de l'élaboration d'une légende adaptée aux conditions locales et de la carte finale d'érosion, intégrant les résultats des phases prédictive et descriptive.

La formation au niveau de l'équipe devrait être graduelle, organisée suivant les séquences méthodologiques décrites dans les présentes Directives. Une seconde phase de formation pourrait consister en cartographie pratique d'une zone réduite, préparation de la séquence

complète de cartes, et évaluation finale des résultats obtenus et des problèmes rencontrés.

Les données et les matériels techniques de base consistent normalement en:

- La couverture complète de la zone d'étude par les photographies aériennes et/ou les images satellitaires, de préférence en agrandissements à moyenne et grande échelle (du 1:50.000<sup>e</sup> au 1:10.000<sup>e</sup>);
- Les cartes topographiques/hypsométriques (courbes de niveau) à des échelles aussi proches que possible de l'échelle des photographies aériennes et/ou images satellitaires agrandies;
- Les cartes géologiques/lithologiques existantes ou dérivées et interprétées, couvrant la zone d'étude aux échelles pouvant être plus petites que celle du canevas de la carte topographique de base;
- Le matériel et les outils de photo-interprétation pour le travail de bureau et sur le terrain (table et stéréoscopes portables);
- Des visites de terrain dans les différentes périodes de l'année peuvent être organisées pour prendre en compte les variations dans le couvert végétal et l'occupation du sol, ainsi que les événements extrêmes (crues, glissements de terrain, etc.).

Un exemple d'application pratique de la méthodologie proposée est celui présenté dans l'étude du bassin versant d'Adra (726 km<sup>2</sup>), où les activités ont été organisées comme suit (h/s=homme/semaine):

1. Préparation des données et du matériel de base
2. Elaboration de la carte des **pent**es et de la carte dérivée d'**érodibilité**

1 géomorphologue	
• Carte des pentes	3 h/s
• Matrice des lithofaciès	1 h/s
• Carte d'érodibilité	1 h/s
<b>TOTAL</b>	<b>5 h/s</b>
3. Elaboration de la carte d'occupation du sol et de couvert végétal

• Photo-interprétation	8 h/s
• Contrôle sur le terrain	2 h/s
• Carte de protection des sols	1 h/s
<b>TOTAL</b>	<b>11 h/s</b>

Les opérations 2 et 3 peuvent être réalisées simultanément par différents membres de l'équipe.

4. Elaboration de la carte des états érosifs par la superposition des cartes d'érodibilité et de protection des sols 2 h/s

5. Elaboration de la carte finale (descriptive et prédictive) d'érosion

- Photo-interprétation

préliminaire	globale:
identification des processus érosifs les plus évidents et planification de l'étude de terrain	1 h/s
- Etude de terrain. Application de la légende descriptive 4 h/s
- TOTAL** **5 h/s**
- GRAND TOTAL** **21 h/s**

#### *Utilisation des couleurs*

Les couleurs suivantes doivent être utilisées pour les cartes en couleurs:

- les zones stables, non affectées par l'érosion doivent être présentées en bleu ou en vert,
- les zones instables sont présentées en jaune ⇒ orange ⇒ rouge clair ⇒ rouge foncé, en augmentant progressivement la densité de la couleur choisie (des points à la couleur pleine).

## PARTIE II: MESURE DES PROCESSUS D'ÉROSION HYDRIQUE

---

### 1. CONTEXTE GENERAL

#### 1.1 Expérience acquise en matière de mesure des processus d'érosion hydrique dans la région méditerranéenne

La nature complexe des phénomènes d'érosion conditionne dès l'abord toutes les activités de mesures: sur quelle partie du processus d'érosion doivent porter les mesures? Faut-il étudier avant tout le processus d'enlèvement des particules de sol sur place et le début du transport? Faut-il au contraire s'intéresser au transport des matériaux détachés par le réseau de drainage? Essaie-t-on de surveiller l'érosion en rigoles caractérisée par les séquences d'affouillement du thalweg et des berges et de dépôt ou bien s'intéresse-t-on à l'ensemble du cycle d'érosion?

Chacune de ces questions doit recevoir une réponse spécifique et concrète, formulée en fonction du projet de recherche qui est lui-même caractérisé par un programme particulier d'expériences de terrain et d'acquisition de données. Il est indispensable de déterminer clairement dès le début quelle est la partie du cycle d'érosion qui retient l'intérêt et pourquoi elle le retient.

C'est naturellement l'objectif de la recherche, exprimé par la question pratique particulière à résoudre, qui détermine la partie du cycle de l'érosion qui sera mesurée.

En conséquence, il n'existe pas de règles uniformes pour déterminer la conception des moyens expérimentaux et le programme d'acquisition des données, qui sont en outre fortement conditionnés par les caractéristiques naturelles de la zone étudiée.

L'expérience et la théorie des mesures de l'érosion permettent cependant d'identifier deux catégories de mesures de ce phénomène:

- a) **Mesures de l'érosion sur le site**, et
- b) **Mesures au niveau du système**.

Les **mesures sur le site** consistent à surveiller le phénomène d'érosion au niveau des processus

du sol de façon à mesurer l'érosion pluviale, en nappe et en rigoles.

La parcelle constitue le cadre expérimental habituel de mesure. On emploie les instruments suivants: dispositif de mesure des précipitations (pluviomètre ou pluviographe) et dispositif de mesure des sédiments qui recueille les sédiments produits sur la parcelle et en conserve généralement une partie connue qui sera mesurée et éventuellement analysée. Les dispositifs les plus largement utilisés sont le partiteur à fentes multiples et l'échantillonneur à roue de Coshocton.

Des piquets d'érosion et des microrepères sont également utilisés comme référence fixe du profil du sol et indiquent par soustraction le volume de matériaux enlevé et éventuellement déposé dans d'autres secteurs de la parcelle avant d'être collectés à l'orifice de sortie.

Les **mesures au niveau du système** consistent à surveiller le cycle de l'érosion au niveau du bassin versant. On peut avoir recours, pour ce faire, à divers programmes de mesures plus ou moins détaillées et complètes du cycle d'érosion qui se déroule dans le bassin sélectionné. Il existe plusieurs possibilités allant d'un programme minimum, qui consiste simplement à enregistrer les sédiments en suspension apportés à la sortie du bassin, à un programme expérimental complet qui comporte la surveillance des processus locaux, parfois sur plusieurs groupes de parcelles à l'intérieur du bassin, et la mesure des sédiments en suspension (charge de ruissellement, et en suspension) et d'affouillement (charge de fond).

Les instruments requis pour la mesure au niveau du système, qui sont très variés, sont présentés au chapitre 3.

Le programme ne devrait naturellement faire l'objet d'aucune appréciation a priori. Les programmes les plus complexes et les plus précis ne sont pas nécessairement les meilleurs. La qualité d'un programme expérimental est étroitement liée à l'objectif de recherche à atteindre et à la capacité de répondre clairement aux questions pratiques formulées. Les travaux doivent être organisés en conséquence. On peut trouver la réponse à certaines questions au

moyen de parcelles (par exemple érosion en nappe et en rigoles associée à un type particulier d'utilisation des terres et d'état du site) tandis que dans d'autres cas, un réseau complexe de bassins expérimentaux est nécessaire pour obtenir simplement une réponse approximative (par exemple modélisation de la production du volume de sédiments pour prévoir la quantité totale de sédiments produits par l'érosion atteignant un secteur côtier).

Des travaux expérimentaux de mesure de l'érosion sont en cours dans plusieurs zones de la Méditerranée. Indépendamment de celles qui sont directement liées au projet (Vallcebre – Espagne; Esen – Turquie; et Oued Ermel – Tunisie) et sont décrites en détail dans le document PAP/CAR-PNUE, 1997, d'autres aires sont actuellement étudiées avec les objectifs scientifiques et les instruments les plus modernes; citons Rambla Honda, Almería (Espagne), gérée par l'EEZA (Estacion Experimental de Zonas Aridas, Consejo Superior de Investigaciones Cientificas – CSIC); El Ardal, Murcie (Espagne), gérée par l'Université de Murcie; Lanaja, Saragosse (Espagne), gérée par l'Université de Saragosse; Var et Roussillon (France) gérée par le BRGM; Draix (France) gérée par le CEMAGREF; Santa Lucia, Cagliari, Sardaigne (Italie), gérée par l'Université de Cagliari; Araba, Vénétie (Italie) gérée par l'Université de Padoue; Spata, Athènes (Grèce), gérée par l'Université d'Agriculture d'Athènes.

Certains sites de recherche font partie de réseaux comme RESEL (Réseau espagnol de mesure et de surveillance de l'érosion et de la désertification), projet coopératif visant à entretenir, coordonner et homologuer les parcelles expérimentales existantes. Ce réseau est coordonné par la Direction générale de la conservation de la nature du ministère de l'Environnement d'Espagne et se compose de 47 parcelles expérimentales réparties dans le pays et gérées par 11 universités et 7 centres CSIC (Conseil espagnol de la recherche scientifique).

On a pu constater en pratique que plusieurs problèmes apparaissent assez fréquemment pendant les phases d'organisation et d'application. Il s'agit soit de problèmes de caractère général soit de problèmes techniques spécifiques liés à la conception des expériences, à l'utilisation des instruments et à la conservation, au traitement et à l'interprétation des données. Ces problèmes techniques sont exposés en détail dans les chapitres 2, 3 et 4 ci-après.

Certains problèmes d'ordre général qui peuvent se poser pendant l'installation et l'exploitation

de l'aire d'expérimentation présentent une importance particulière.

Pour établir une aire d'expérimentation, il est nécessaire de s'assurer la disponibilité du terrain pendant toute la durée de l'expérience grâce soit à la propriété, soit à un accord juridique. C'est là un facteur critique pour une activité de longue à moyenne durée comme la mesure de l'érosion. Il est indispensable que la propriété de la terre, publique ou privée, soit durable. La propriété des terres à l'Etat ne garantit pas toujours la stabilité, surtout si deux ou plusieurs organismes publics concurrents se déclarent juridiquement compétents; la concurrence est souvent due à des objectifs mal établis, des justifications faibles ou un soutien insuffisant.

Des problèmes peuvent également se poser à propos de la personne responsable de l'expérience. Souvent, le chercheur qui organise et amorce une expérience ne reste malheureusement pas assez longtemps sur place pour la terminer, de sorte qu'il doit laisser en partant des exposés clairs des méthodes et des protocoles. Il est en outre important qu'un organisme et une personne uniques bien précis soient désignés comme responsables de l'aire d'expérimentation. Les expérimentations conçues et exécutées par des comités interdépartementaux sans organisme ou chef de projet clairement désigné n'atteignent jamais leurs objectifs parce que les conflits d'objectifs inévitables entre organismes créent la confusion en ce qui concerne les responsabilités et les obligations (Hewlett, 1982).

Les dimensions du bassin d'expérimentation présentent également une grande importance et doivent elles aussi être liées aux objectifs de la recherche et à la question pratique à laquelle il faut répondre.

En effet, la surveillance complète du cycle d'érosion exige une superficie assez vaste pour contenir au moins le principal cours d'eau permanent. Cette superficie peut parfois atteindre des dizaines de milliers d'hectares dans certains milieux méditerranéens ou être impossible à établir. A titre de compromis, le bassin versant devrait comporter au moins un cours d'eau intermittent bien défini permettant de suivre la phase en canal du cycle d'érosion.

Cette question de la dimension du bassin à étudier est liée à ce qui est sans doute le problème le plus difficile posé par la mesure de l'érosion sur des terres arides et semi-arides comme celles qui caractérisent une grande partie du paysage méditerranéen. Il s'agit de l'irrégularité des précipitations et du fait que

l'érosion est d'autant plus forte que l'intensité des précipitations est plus élevée. En d'autres termes, les tempêtes violentes avec une période de retour très longue présentent une importance cruciale pour expliquer le cycle d'érosion et sont aussi les plus difficiles à mesurer. Il faut trouver une solution à ce problème dans le contexte de chaque expérimentation. Il est fréquemment nécessaire d'identifier la gamme d'écoulements qui sont significatifs pour la réponse scientifique recherchée.

Il est évidemment moins difficile de déterminer la dimension des parcelles. Ici encore, la solution doit être adaptée aux objectifs de l'expérimentation. Il est souhaitable que cette dimension corresponde si possible aux dimensions habituelles de ce genre d'installations. La parcelle USLE constitue certainement une référence "universelle".

La conservation, le traitement et l'exploitation des données peuvent devenir un véritable cauchemar pour le chercheur si celui-ci n'a pas établi lui-même l'aire d'expérimentation et si les anciens responsables ont organisé les données "à leur manière" et qu'il n'existe pas de documentation permettant de comprendre leur "organisation".

Un système de conservation et de gestion des données clair, sûr, tenu à jour, accessible et parfaitement connu est absolument indispensable pour que les recherches réussissent.

Evoquons, enfin, un problème plutôt technique: la mesure de la charge de fond. Ce problème est difficile à résoudre dans les "ramblas" méditerranéennes, les torrents de montagne et les grands cours d'eau. Si la mesure de la charge de fond est l'un des objectifs prioritaires de l'expérience, elle conditionne toute la conception de l'expérience, d'autant plus que le bassin hydrographique et le chenal sont vastes.

Parmi les diverses installations réalisées en pratique, le bassin d'amortissement (Hewlett, 1982) et la station torrentielle d'Araba sont considérés comme offrant les meilleures solutions pour mesurer la charge totale.

## **1.2 Justification d'un programme de mesures des processus d'érosion**

Le sol est la ressource de base où convergent la plupart des processus écologiques et socio-économiques. Cette simple affirmation justifie en soi que le sol soit considéré comme prioritaire du point de vue de la conservation des ressources naturelles comme de la planification du développement économique.

Il faut au sol des siècles, des millénaires, voire des périodes encore plus longues pour se constituer, tandis que quelques années, quelques mois, quelques jours ou même quelques secondes suffisent pour le détruire. C'est là une durée négligeable par rapport au temps nécessaire pour restaurer le sol, lorsque cela est possible.

L'évaluation de la dégradation des sols à l'échelle mondiale (GLASOD) des Nations Unies qui date de 1990, fait apparaître l'ampleur de cette dégradation: près du sixième de la superficie du monde portant une végétation a souffert d'une dégradation plus ou moins poussée depuis 50 ans; cette dégradation est imputable pour plus des trois quarts à l'agriculture et à l'élevage ou à la mise en culture des terres boisées.

Les processus de dégradation sont très variés: salinisation et engorgement des terres irriguées mal gérées, compactage provoqué par l'utilisation de matériel lourd et pollution due à l'application excessive de pesticides ou d'engrais. Cependant l'érosion reste de loin le type le plus répandu de dégradation des terres et frappe 84% des superficies affectées d'après l'étude des Nations Unies.

Dans ce contexte, des mesures claires et exactes de l'érosion sont indispensables pour servir de base aux plans de prévention et de restauration, d'autant plus que l'érosion est un phénomène silencieux et complexe dû à la combinaison de multiples facteurs.

En raison de cette complexité, il est difficile d'appliquer les modèles mathématiques si les conditions particulières existant là où ils ont été élaborés ne sont pas réalisées.

La mesure de l'érosion des sols constitue aussi une base solide pour la conservation et la planification des ressources hydriques car l'érosion a une incidence profonde sur la qualité et le régime des eaux. Les particules fines de sol qui sont transportées en suspension dans l'eau le plus loin sont les agents polluants les plus largement répandus et servent de vecteur à d'autres contaminants organiques et à des produits chimiques. L'érosion est si intimement liée aux inondations notamment dans la zone méditerranéenne, que toute étude des causes des inondations et de prévention, doit prendre en compte les phénomènes d'érosion et a donc besoin de données de terrains sûres à ce sujet.

On a déjà indiqué que la lutte efficace contre l'érosion repose sur la connaissance des taux et des mécanismes de ce phénomène, d'autant

plus qu'il s'agit d'un phénomène complexe auquel on applique fréquemment des "solutions" mal conçues, qui peuvent avoir des effets imprévus. Ainsi, la mesure de l'érosion est un outil précieux pour la conception des actions anti-érosives, grâce à l'évaluation précise de l'efficacité des méthodes d'aménagement appliquées pour la protection et la restauration des sols.

Bien que la mesure de l'érosion ait assez largement retenu l'attention, l'homologation et la normalisation des mesures sont tout à fait insuffisantes. Or, ces opérations sont indispensables pour que les mesures soient comparables et vraiment applicables au niveau national ou international.

L'un des objectifs fondamentaux du projet est d'offrir un exemple pratique, concret et en vraie grandeur pour contribuer à surmonter le manque de mesures de l'érosion normalisées et coordonnées au niveau international. Un tel exemple serait utile dans le contexte de l'environnement mondial affecté par des processus mondiaux qui doivent faire l'objet d'un suivi coordonné et normalisé au niveau mondial, seul moyen de formuler la réponse coordonnée qu'exige la situation actuelle.

Enfin, les préalables fondamentaux pour l'organisation de mesures d'érosion existent dans tous les pays méditerranéens: du cadre institutionnel aux capacités techniques, tous les éléments nécessaires peuvent facilement être identifiés dans la région.

## 2. ORGANISATION DES MESURES

### 2.1 La séquence érosion-sédimentation

Le terme générique "érosion" recouvre une série d'événements naturels dont chacun est la conséquence de l'événement précédent et qui affecte tous les paramètres à retenir pour la gestion des bassins versants. Ces événements, qui se suivent chronologiquement, sont les suivants:

- les **causes de l'érosion**: action chimique, variations de température, gel, topographie, couvert végétal, interventions humaines telles que construction de routes ou de voies ferrées, projets industriels, mines, eaux usées, dépôts de déchets, mauvaise utilisation des sols, des eaux et des terres agricoles. Tous ces facteurs provoquent isolément ou en combinaison, l'usure et la dégradation des couches superficielles de sol qui sont progressivement érodées sous l'effet des

précipitations, enlevées et transportées ailleurs;

- l'**érosion** qui se manifeste sous de nombreuses formes: formation de ravines, mouvements massifs de sol ou glissements de terrain, érosion due aux crues, érosion du lit en nappe, érosion des cours d'eau, etc.;
- le **transport de sédiments**, à partir du site érodé, par un vecteur comme l'eau, le vent, la neige, un glacier, etc. jusqu'au réseau de drainage et en aval, par l'écoulement dans les rivières;
- le **dépôt de sédiments**, la sédimentation ou l'alluvionnement sur la terre, dans un cours d'eau, un lac, la mer, etc.; ce dernier événement peut à son tour provoquer une nouvelle séquence d'érosion, par exemple due à un changement de conditions climatiques.

Chacun des événements caractérisant la séquence d'érosion est un phénomène qui se déroule dans un espace ayant 0 à 3 dimensions: ponctuel à 0-D (dépôt de sédiments), ligne à 1-D (transport de sédiments), superficie à 2-D (érosion en nappe) et volume à 3-D (glissement de terrain). Chaque événement est la conséquence d'événements antérieurs. Il est donc bien compréhensible que la mesure de l'"érosion" soit une opération compliquée, difficile et donne des résultats peu sûrs. Contrairement à d'autres grandes variables hydrologiques comme la pluie, le débit des cours d'eau, la neige etc., la séquence d'érosion est un processus unique dans le temps à l'échelle humaine et ne peut donc provoquer deux événements analogues puisque les sources de matériaux sédimentaires ne sont pas renouvelables après avoir été érodés. Ainsi, la séquence d'érosion est naturellement irrégulière et porte en soi la cause de sa transformation puisqu'à longue échéance l'érosion transforme la morphologie et la topographie du site en cause et donc son érodibilité. C'est précisément ce qui se produit à un rythme très rapide lorsque la pression de la population humaine sur les terres entraîne une destruction massive du couvert végétal protecteur: l'érosion s'accroît de façon spectaculaire ainsi que le transport de sédiments dans les cours d'eau, les matériaux d'érosion s'accumulent en gros dépôts de sédiments en aval, enfin l'érosion diminue lorsque la roche mère est dénudée et que tous les matériaux superficiels érodables ont été enlevés, et la zone devient impropre à l'agriculture.

En présence d'une telle chaîne de phénomènes complexes et variables dans le temps comme dans l'espace, on peut se demander ce qu'il faut mesurer, comment et quand? Les sections ci-après tentent de donner une réponse précise à ces questions.

## 2.2 Phénomènes d'érosion hydrique

La séquence érosion-sédimentation constitue un phénomène complexe en raison du grand nombre d'éléments physiques, fonction à la fois du temps et de l'espace, qui conditionnent chacune de ses étapes. Dans les zones méditerranéennes, la complexité est encore plus grande car ces éléments sont en général plus variables que dans les zones plus tempérées.

### 2.2.1 Taux d'érosion

Les épisodes de ruissellement extrêmes présentent une importance fondamentale pour les processus d'érosion-sédimentation. Par exemple, un canal de drainage peut constituer un système important de dépôt des sédiments pendant une période assez longue lorsque des pics modérés de ruissellement entraînent une élévation progressive du profil longitudinal du réseau de drainage. Les sédiments affluent à un rythme tel que les flux "normaux" ne sont plus capables de les absorber à un taux suffisant pendant une période variable pouvant atteindre plusieurs années. Lorsque le ruissellement atteint des taux exceptionnels, une grande partie des sédiments accumulés peut être emportée d'un seul coup et le fond peut même être affouillé et s'abaisser; il apparaît ainsi qu'une corrélation entre les taux d'érosion et le transport des sédiments dans un cours d'eau en aval ne peut être significative sur des périodes brèves et qu'il existe un décalage variable entre les deux événements. De même, les rapports dégagés sont beaucoup trop compliqués pour être exprimés par de simples proportions.

Le calcul du taux d'érosion à l'intérieur d'un bassin versant a fait l'objet de recherches et de collectes de données intensives depuis de longues années, mais les travaux se sont déroulés principalement sur de petites parcelles expérimentales, souvent avec simulation des précipitations. Plusieurs équations et méthodes de calcul ont été mises au point, dont l'équation universelle des pertes de sol (USLE) qui permet de calculer empiriquement le volume de matériaux érodés, exprimé habituellement en poids par unité de superficie et par an, en fonction d'une série de facteurs:

- **Climat:** intensité, durée et fréquence des précipitations, variations saisonnières et journalières des températures, cycles de gel et de dégel, cycles de temps sec et humide, etc.
- **Hydrologie:** type et intensité du ruissellement, capacité de transport de sédiments entre le point d'impact des gouttes de pluie et un cours d'eau du réseau hydrographique du bassin.
- **Géologie:** formations rocheuses, degré d'usure, propriétés hydrodynamiques.
- **Topographie:** pentes, relief, altitude, etc.
- **Couvert végétal:** nature et densité des espèces, variabilité saisonnière.
- **Facteurs humains:** agriculture, urbanisation, travaux publics, déboisement.

Les analyses n'ont pas permis jusqu'ici de dégager des rapports mathématiques satisfaisants entre les taux d'érosion et leurs causes, mais des tendances significatives apparaissent cependant dans certaines régions du monde.

Dans des conditions de climat, de topographie, d'hydrographie et de sols analogues, les petits bassins versants où l'utilisation des terres a tendance à être très variée enregistrent de plus fortes variations des taux de production de sédiments que les grandes aires. A mesure que la superficie du bassin versant augmente, les différences marquées d'utilisation des terres et, en conséquence, la gamme de taux de production de sédiments tend à se réduire. De façon générale, plus l'aire de drainage est grande, plus le pourcentage de sédiments déposés de façon permanente est élevé et plus le taux moyen de production de sédiments par unité de superficie, mesuré à la sortie du bassin versant, est faible.

### 2.2.2 Taux d'apport de sédiments

Le taux d'apport de sédiments qui est exprimé sur une période longue, est défini comme le pourcentage de la quantité de sédiments transportés par un cours d'eau et la quantité totale de matériaux d'érosion en mouvement, spécifiques pour une superficie de drainage à une section particulière. Les mesures effectuées dans les réservoirs existants montrent que le taux d'apport de sédiment diminue lorsque la superficie du bassin versant augmente; à titre indicatif, ce taux varie de 20 à 90 pour cent dans les très petits bassins ayant moins de 2 km<sup>2</sup> de superficie à 3-15 pour cent dans les bassins de 100 à 1000 km<sup>2</sup>.

Les sédiments qui ne sont pas transportés par le cours d'eau du bassin versant jusqu'à la section de mesure de sédiments, sont déposés dans les canaux, les plaines d'inondation, les terrasses et les dépôts d'alluvions. Il n'est pas possible à l'heure actuelle de chiffrer le rapport entre le processus d'érosion et l'apport de sédiments de façon assez précise pour utiliser ces chiffres en vue de la conception de projets.

### 2.2.3 Efficacité de piégeage

La notion de "taux d'apport de sédiments" ne doit pas être confondue avec "l'efficacité de piégeage", c'est-à-dire le pourcentage total des sédiments pénétrant dans un réservoir qui est "piégé" à l'intérieur de ce réservoir. Il est nécessaire de connaître ce pourcentage pour estimer le taux de sédimentation d'un réservoir au moyen de l'écoulement et des sédiments transportés dans le réseau de drainage sur le site. L'efficacité de piégeage dépend des facteurs suivants:

- la répartition granulométrique des sédiments qui détermine la vitesse de chute des matériaux en suspension, vitesse qui s'accroît avec la dimension des particules;
- le temps nécessaire à un volume unitaire d'eau contenant des sédiments en suspension pour être transporté de l'entrée à la sortie du réservoir;
- la variabilité dans le temps du courant dans le réservoir.

Plusieurs auteurs ont proposé des rapports empiriques fondés sur des données provenant de relevés qui ont été effectués dans des réservoirs existants. Cependant, ces rapports sont étroitement liés aux caractéristiques du site car ils ne tiennent pas compte de la répartition des particules par dimension.

### 2.2.4 Capacité de transport

La séquence érosion-sédimentation se caractérise par:

- un processus d'érosion superficiel sur les versants qui fournit des matériaux sédimentaires détritiques et colluviaux transportés à l'axe de drainage principal; et
- les processus hydro-dynamiques qui évacuent les particules selon la capacité de transport du réseau de drainage.

Les caractéristiques des matériaux transportés (poids spécifique, granulométrie, forme des particules, etc.) et ceux du lit (rugosité, pente,

profil en travers, etc.) déterminent la capacité de transport d'un cours d'eau. Cette capacité varie selon les tronçons du cours d'eau car la vitesse varie elle-même d'un tronçon à l'autre. Elle varie également dans le temps à une section donnée en fonction du débit. Lorsque la concentration de sédiments est inférieure à la capacité de transport du cours d'eau dans un tronçon donné, le courant dispose d'une réserve d'énergie qui sert à affouiller le lit du cours d'eau à condition que les caractéristiques des matériaux provenant de ce lit soient adaptées aux conditions de transport. Au contraire, si pour une section déterminée la capacité de transport est inférieure à la concentration effective de sédiments, une partie des matériaux se dépose. En général, le cours d'eau a tendance à affouiller le lit si le débit est fort et à déposer des sédiments s'il est faible; en effet, la capacité de transport varie selon le débit comme le montre en pratique le fait que l'eau est extrêmement trouble pendant les crues et limpide lorsque le débit est faible.

Un cours d'eau est considéré en équilibre hydromorphologique lorsque l'affouillement du lit est approximativement compensé par les dépôts de sédiments; en revanche, il est instable lorsqu'il cherche à atteindre l'équilibre soit par affouillement, soit par dépôt de sédiments. Ainsi, en Italie du Nord par exemple le Pô est devenu instable en raison de l'élévation de son lit en plaine, avant de déboucher dans la mer Adriatique. Ce phénomène est apparu lorsque le lit du fleuve a été corrigé et que des digues ont été construites sur les deux rives pour lutter contre les inondations. Dans certaines parties du cours inférieur, le lit a été relevé par des dépôts de sédiments au point de surplomber en certains endroits la plaine d'inondation.

## **2.3 Sites de mesure**

Divers sites – types peuvent être identifiés dans un bassin naturel en fonction de la mesure spécifique d'un élément de la séquence érosion-sédimentation qui doit être effectuée. Deux principaux types d'emplacements sont à retenir suivant le phénomène à mesurer:

- Processus superficiels comme l'érosion dans les zones des versants et dans les phénomènes qui génèrent du matériel détritique et des débris;
- Processus au niveau des principaux cours d'eau et des axes de drainage dans lesquels les matériaux détritiques provenant des versants sont transités et ensuite déposés par le processus dynamique fluvio-alluvial.

Nombre d'instruments et de techniques ont été élaborés pour mesurer sur le terrain les processus des séquences érosion-sédimentation, principalement l'érosion, le transport des sédiments et le dépôt des sédiments:

- mesure des sédiments enlevés de parcelles expérimentales ou de petits bassins équipés sur une partie d'une pente par le ruissellement superficiel;
- mesure du transport de sédiments dans les cours d'eau en suspension ou par ripage sur le fond;
- mesure du volume et de la densité des dépôts de sédiments.

Les emplacements appropriés pour mesurer ces divers phénomènes sont étudiés ci-après.

### 2.3.1 Parcelles expérimentales et petits bassins versants

De petites parcelles de quelques centaines de mètres carrés ou de petits bassins versants naturels de quelques hectares sont utilisés pour étudier les taux d'érosion de divers types de sols, représentatifs d'une aire dotée d'une topographie et d'un couvert végétal spécifiques. Les superficies étudiées vont de la petite parcelle rectangulaire au bassin naturel. Leur longueur doit représenter la longueur de la pente sur laquelle se produisent les pertes de sols; elle varie généralement de 10 à 100 m et la largeur de 2 à 10 m. Des tôles métalliques épaisses peuvent être utilisées pour délimiter les petites parcelles et sont facilement enlevées lorsque celles-ci doivent être travaillées pour les cultures. Des bourrelets de terre peuvent être dressés sur les parcelles assez larges pour qu'on y utilise l'équipement agricole ordinaire.

Les petits bassins versants naturels n'ont généralement pas besoin de bordures, à l'exception de bourrelets à la limite inférieure pour diriger l'écoulement vers le point de mesure.

Les parcelles sont, quelle que soit leur taille, équipées d'une auge ou d'un autre dispositif permettant de recueillir le mélange terre-eau dans l'échantillonneur. Cette auge est construite en tôle métallique sur les petites parcelles. On peut utiliser un canal de béton ou une digue de terre sur les grandes parcelles et les petits bassins versants.

### 2.3.2 Stations de prélèvement d'échantillons de sédiments sur les cours d'eau naturels

Les stations hydrologiques servant à mesurer le débit liquide dans les cours d'eau naturels permettent également de mesurer les sédiments en suspension. Indépendamment des conditions habituelles d'accès et de disponibilité, il est souhaitable d'utiliser un tronçon rectiligne où la répartition des sédiments et la vitesse sont uniformes. Il faut aussi envisager la construction de téléphériques et de ponts et l'installation de l'équipement requis pour prélever des échantillons permettant d'étudier la concentration de sédiments en suspension. Il n'existe, à l'heure actuelle, pas d'équipement permettant de prélever de tels échantillons sur toute la profondeur d'un cours d'eau. Les échantillonneurs permettent seulement de prélever de l'eau entre la surface et environ 10 cm au-dessus du lit. Cette hauteur minimum peut toutefois représenter une part importante de la hauteur totale de l'eau en cas de débit faible. Ainsi, les sections à forte turbulence naturelle ou artificielle, dans lesquelles les sédiments en suspension sont répartis uniformément, peuvent faciliter l'étude de la charge totale. En outre, sur les petits cours d'eau, de nombreux ouvrages de mesure du débit comme les déversoirs et les canaux de jaugeage peuvent être dotés d'un trop-plein, de façon à collecter un échantillon de la charge totale de sédiments directement dans un récipient de grande taille. Les ponceaux routiers et les autres ouvrages hydrauliques peuvent également être utilisés pour étudier la concentration de sédiments d'un cours d'eau au moyen d'échantillons.

### 2.3.3 Réservoirs artificiels

Les réservoirs artificiels existants sont souvent utilisés pour étudier la sédimentation car ils sont habituellement représentatifs de l'état de l'érosion des terres caractéristiques du bassin versant. Les études visent généralement à déterminer le volume, les caractéristiques et la répartition des dépôts de sédiments qui sont mesurés au moyen de relevés topographiques périodiques du fond du réservoir. Des mesures classiques des entrées et des sorties de sédiments sont également nécessaires pour déterminer la capacité de piégeage du réservoir. Les facteurs les plus importants sont les suivants: dimension, forme, capacité, taux et volumes d'entrée et de sortie du réservoir, et caractéristiques du bassin versant.

Afin de déterminer le volume de sédiments déposé dans le réservoir pendant une période donnée (un an par exemple), il faut vider le réservoir si on veut utiliser des instruments

topographiques classiques (niveau, théodolite). On peut aussi employer une embarcation équipée d'un sonar ou d'un ruban lesté gradué à condition que la position du bateau soit déterminée exactement, soit à bord même, soit depuis le rivage. Après les relevés, la topographie présente du fond est comparée à la topographie antérieure à la construction de façon à déterminer par soustraction le volume total de sédiments accumulés depuis la construction du réservoir.

## 2.4 Dispositifs et instruments de mesure des sédiments

Un grand nombre d'appareils et d'instruments ont été mis au point pour mesurer chaque processus de la séquence érosion-transport de sédiments mais aucun ne s'est révélé jusqu'ici pleinement satisfaisant, sûr et exempt de phénomènes secondaires gênants. Il est toujours souhaitable qu'un spécialiste procède à l'interprétation critique de l'analyse des échantillons.

### 2.4.1 Fosses à sédiments intégrales

**Une fosse à sédiment intégrale** (figure II-1) peut être utilisée pour mesurer l'érosion sur les petites parcelles expérimentales. Elle doit être assez grande pour contenir tout le débit (eau et sédiments) prévu pendant une période de 24 ou 48 heures. Le volume du mélange liquide-solides est alors déterminé et un échantillon de sédiments solides est prélevé en vue d'effectuer des analyses de laboratoire et de calculer son poids et son volume.

Il est souvent impossible de collecter tout le volume écoulé s'il est trop élevé. En outre, les aires de drainage très petites ne sont en général pas représentatives de la situation réelle sur le terrain.

### 2.4.2 Échantillonneurs à fentes

Pour éviter les inconvénients de la collecte intégrale, il est préférable d'utiliser des échantillonneurs à fentes qui recueillent un pourcentage déterminé à l'avance du mélange eau-sédiments car ils sont adaptés aux plus grandes parcelles expérimentales. On obtient ainsi un échantillon du mélange eau-sédiments utilisable en pratique.

Les échantillonneurs à fentes peuvent être utilisés pour toutes les études d'érosion, qu'il s'agisse de petites parcelles d'essai ou de véritables bassins versants de plusieurs kilomètres carrés de superficie. Ils fonctionnent automatiquement et sans surveillance pendant le prélèvement d'échantillons. En outre, ils continuent de

fonctionner même en cas de débit très abondant.

Il existe deux principaux types d'échantillonneurs: le partiteur fixe à fentes multiples et l'échantillonneur à roue de Coshocton équipé d'un orifice tournant:

**Partiteur à fentes multiples** (figure II-2): le volume écoulé est amené par un canal du collecteur à une cuve de sédimentation où les particules sédimentaires les plus lourdes se déposent. Le trop-plein de la cuve traverse ensuite le partiteur à fentes multiples et un échantillon est prélevé à un seul orifice et transporté à une cuve d'entreposage. Une deuxième ou une troisième cuve d'entreposage peut être raccordée à la première s'il est nécessaire de conserver un volume supplémentaire d'échantillons.

**L'échantillonneur à roue de Coshocton** (figure II-3) recueille l'écoulement d'une parcelle expérimentale ou d'un bassin versant naturel dans un collecteur situé à la limite de la parcelle où il pénètre dans un canal. L'eau provenant de ce canal tombe sur une roue légèrement inclinée qui tourne sur elle-même. Une fente surélevée montée sur la roue extrait un échantillon représentatif du mélange eau-sédiments.

### 2.4.3 Échantillonneurs de sédiments en suspension

Plusieurs types ont été mis au point: pièges, aspiration directe, échantillonneurs-intégrateurs, etc. Toutefois, ces dispositifs sont rarement conçus de façon à ce que la vitesse d'entrée dans l'échantillonneur soit égale à la vitesse effective du courant. Or, c'est là une condition indispensable pour que les échantillons prélevés soient vraiment représentatifs de la concentration de sédiments en suspension dans le cours d'eau au point de mesure. Un échantillonneur bien conçu doit être installé face au courant et les prélèvements doivent se faire en amont de la zone de perturbation due à la présence même de l'échantillonneur.

Les échantillons instantanés sont habituellement prélevés au moyen de **pièges** qui se composent d'un cylindre horizontal équipé à chaque extrémité de soupapes qui peuvent se fermer brusquement pour retenir un échantillon au moment et à la profondeur souhaités.

**L'échantillonneur à aspiration** (figure II-4) prélève un mélange eau-sédiments par succion dans un tuyau dont l'entrée se trouve au point d'échantillonnage. L'opérateur peut, en réglant la vitesse d'entrée de l'eau de façon à ce qu'elle soit égale à celle du courant, obtenir un

échantillon représentatif de la concentration de sédiments au point de mesure.

La **turbidisonde** (figure II-5) se compose d'un corps métallique de forme aérodynamique doté d'ailettes de queue pour s'orienter selon le courant. Un tuyau collecteur de diamètre approprié émerge de la tête du moulinet. Un tuyau d'échappement orienté vers l'aval permet d'évacuer l'air du récipient qui se trouve dans le corps métallique. L'opérateur commande électriquement des soupapes placées en tête pour déclencher et interrompre l'échantillonnage.

L'utilisation de **jauges optiques, à ultra-sons ou nucléaires** (figure II-6) constitue une méthode nouvelle de détermination sur place de la concentration de sédiments en suspension. Le faisceau de rayons lumineux, de rayons-X, d'ultra-sons ou de radiations nucléaires émis par une source d'intensité constante est dispersé et/ou absorbé par les particules en suspension. La diminution de l'intensité du faisceau mesurée par un détecteur ou capteur approprié situé à une distance constante de la source est proportionnelle à la concentration des sédiments à condition que les autres caractéristiques de l'eau et des sédiments (composition chimique, minérale), restent inchangées.

L'**échantillonneur automatique de sédiments en suspension** est un mécanisme qui prélève automatiquement des échantillons d'eau et de sédiments dans l'eau courante et peut conserver jusqu'à 24 échantillons différents. Il peut être utilisé pour la surveillance ordinaire et pour l'enregistrement des variations des charges de sédiments pendant les crues de brève durée.

La collecte manuelle d'échantillons de sédiments en suspension est un moyen d'obtenir des données pour l'étude du transport des sédiments qui exige beaucoup de main-d'oeuvre et est souvent peu sûr de sorte que les échantillonneurs automatiques sont particulièrement bien adaptés si les sites sont éloignés ou si le personnel qualifié manque. L'échantillonneur automatique peut prélever des sédiments en suspension dans l'eau courante au moyen de tuyaux d'une longueur maximum de 10 m sans modifier la concentration des sédiments ni la répartition des particules par dimensions. Le rythme de prélèvement peut varier allant d'un par minute à un par jour. On peut également programmer le déclenchement des prélèvements lorsque le niveau de l'eau monte de façon à assurer l'enregistrement pendant les crues de brève durée.

Les échantillonneurs automatiques ont été utilisés pour surveiller l'érosion du sol dans les petits bassins versants, pour étudier la sédimentation dans les canaux en prélevant quotidiennement des échantillons à différentes profondeurs de façon à calculer la charge totale de sédiments.

L'**échantillonneur de sédiments en suspension à niveaux déterminés** (figure II-7) est fondé sur le principe du siphon. Il permet de collecter automatiquement des échantillons de sédiments en suspension en cas de crue soudaine de cours d'eau intermittents situés dans des endroits peu accessibles. L'appareil se compose de bouteilles ou d'autres récipients appropriés, équipés de tubulures de cuivre de 5 mm de diamètre environ qui forment des siphons et sont insérés dans des bouchons fermant hermétiquement les bouteilles. Plusieurs bouteilles sont montées à des profondeurs différentes sur un support fixé d'un côté du cours d'eau de sorte que l'appareil prélève des échantillons à plusieurs niveaux à mesure que le niveau de l'eau monte.

L'expérience pratique fait penser que les concentrations de sédiments obtenues grâce aux échantillonneurs de ce genre ne sont pas parfaitement représentatives de celles du cours d'eau car chacun des échantillons est prélevé près de la surface pendant la montée de l'eau et l'échantillon original peut être altéré lorsqu'il est ensuite submergé. Les vitesses d'entrée ne sont pas nécessairement égales à la vitesse du courant. Les données tirées de ces échantillons doivent donc être utilisées avec prudence.

#### 2.4.4 Echantillonneurs de la charge de fond

Il est difficile de mesurer la charge de fond sur le terrain en raison des mouvements erratiques des sédiments qui prennent la forme d'ondulations, de dunes, de barres mobiles, etc. Aucun instrument ne s'est révélé apte à retenir les particules sédimentaires grandes et petites avec la même efficacité tout en restant stable et orienté contre le courant sur le lit du cours d'eau, sans perturber l'écoulement et le mouvement naturel des sédiments.

En raison des diverses incertitudes que présente le prélèvement d'échantillons de la charge de fond, il est nécessaire de déterminer un coefficient d'efficacité pour chaque type d'échantillonneur. Les instruments sont généralement étalonnés dans un canal de laboratoire où la charge de fond peut directement être mesurée dans une cuve à l'extrémité du canal, bien qu'il soit difficile d'assurer des conditions uniformes de transport sur toute la longueur et la largeur de

celle-ci. Même dans de bonnes conditions, il n'est pas facile de déterminer les coefficients d'efficacité car ils varient selon la répartition par tailles de la charge de fond, le taux de remplissage de l'échantillonneur etc. En tout état de cause, un coefficient de 60 à 70 pour cent seulement peut être considéré comme satisfaisant.

Les échantillonneurs existants peuvent être classés en trois types: à nasse, à plateau et à sélecteurs de pression.

Les **échantillonneurs à nasse** (figure II-8) sont généralement construits en mailles métalliques, avec un ouverture en amont par laquelle entre le mélange eau-sédiments. La maille laisse passer les matériaux en suspension mais retient les sédiments qui se déplacent sur le fond.

Les **échantillonneurs à plateau** sont généralement en forme de coin et sont placés de façon à ce que l'arrête du coin coupe le courant. Ils sont équipés de déflecteurs et de fentes pour retenir les matériaux en mouvement.

Les **échantillonneurs à différence de pression** (figure II-9) sont conçus de façon à provoquer à l'orifice de sortie une baisse de pression suffisante pour compenser les pertes d'énergie de façon à ce que la vitesse d'entrée soit égale à celle du cours d'eau non perturbé. Un diaphragme perforé doté d'un échantillonneur oblige l'eau courante à abandonner les sédiments dans la chambre de retenue et à ressortir par l'orifice supérieur.

La charge de fond est déterminée sur la base du volume de sédiments retenu par unité de temps dans un échantillonneur installé à un ou plusieurs points du fond du cours d'eau. Il faut généralement prévoir 3 à 10 points de mesure par section. Pour répartir les points d'échantillonnage, il ne faut pas oublier que, sauf pendant les période de crue, le transport des matériaux de fond ne s'effectue que sur une partie de la largeur du cours d'eau.

On peut calculer la charge de fond en continu en établissant un rapport entre l'écoulement de matériaux de fond et le débit d'eau. Etant donné qu'il est difficile de mesurer cette charge, on a fréquemment recours à des calculs de rapport fondés sur la théorie et sur l'expérience pour compléter ou vérifier les mesures effectives, tout au moins pour évaluer leur cohérence. Dans la plupart des cours d'eau, les sédiments en suspension représentent la plus grande partie de la charge totale. En générale, la charge de fond représente environ 15 pour cent de la charge de matériaux en suspension.

Les **détecteurs acoustiques** offrent un moyen nouveau de déterminer indirectement la charge de fond transportée. Ces détecteurs, placés dans l'eau à proximité du fond, perçoivent le "cliquetis" des graviers en mouvement qui signale le mouvement de matériaux de fond à un point particulier. En outre, l'intensité du son et celle du transport de sédiments peuvent être reliées à la dimension des particules et à leur vitesse.

**Note:** La source des figures II-1, II-2, II-3, II-4, II-5, II-7, II-8 et II-9 est Hudson, N.W.: *Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface*. Bulletin pédologique de la FAO No. 68, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 1993. La source de la figure II-6 est Crickmore, M.J., Tazioli, G.S., Appleby, P.G., Oldfield, F.: *L'application des techniques nucléaires aux problèmes de transport de sédiments et de sédimentation*. Documents techniques d'hydrologie. Unesco, Paris, 1990.

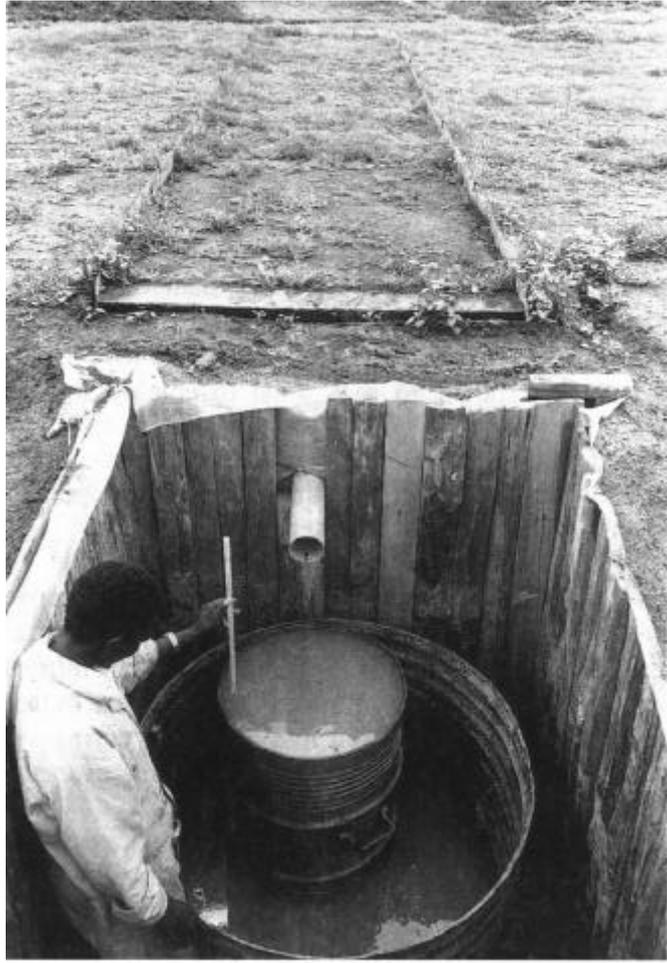


Figure II-1: Fosse à sédiment intégrale

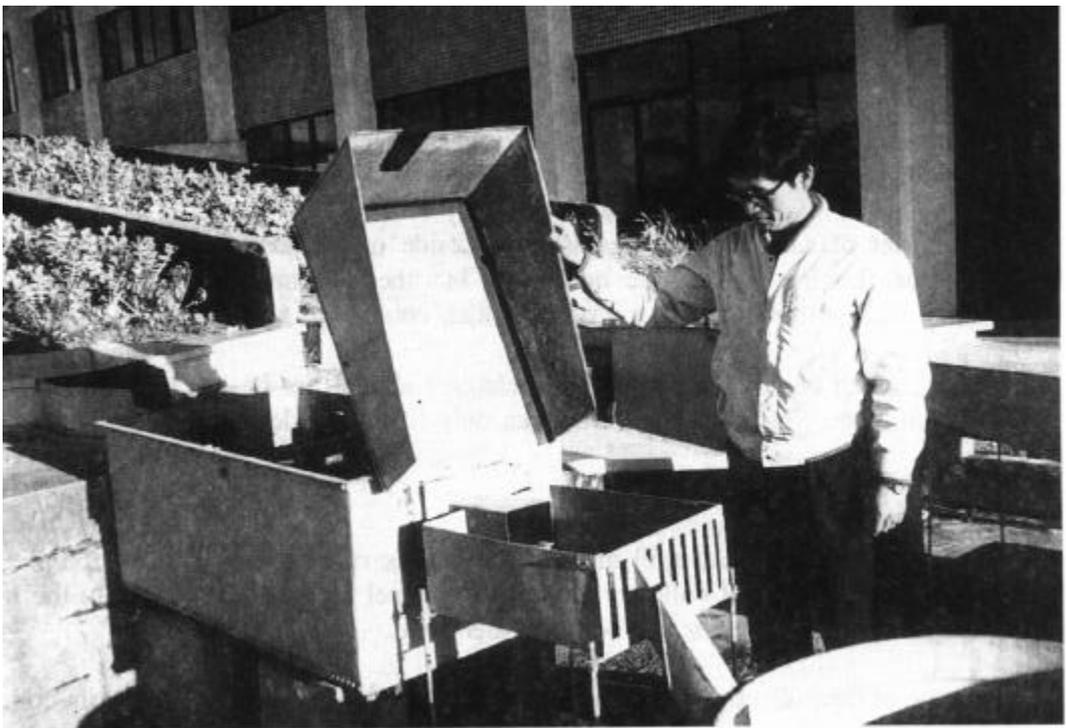


Figure II-2: Partiteur à fentes multiples



Figure II-3: Echantillonneur à roue de Coshocton

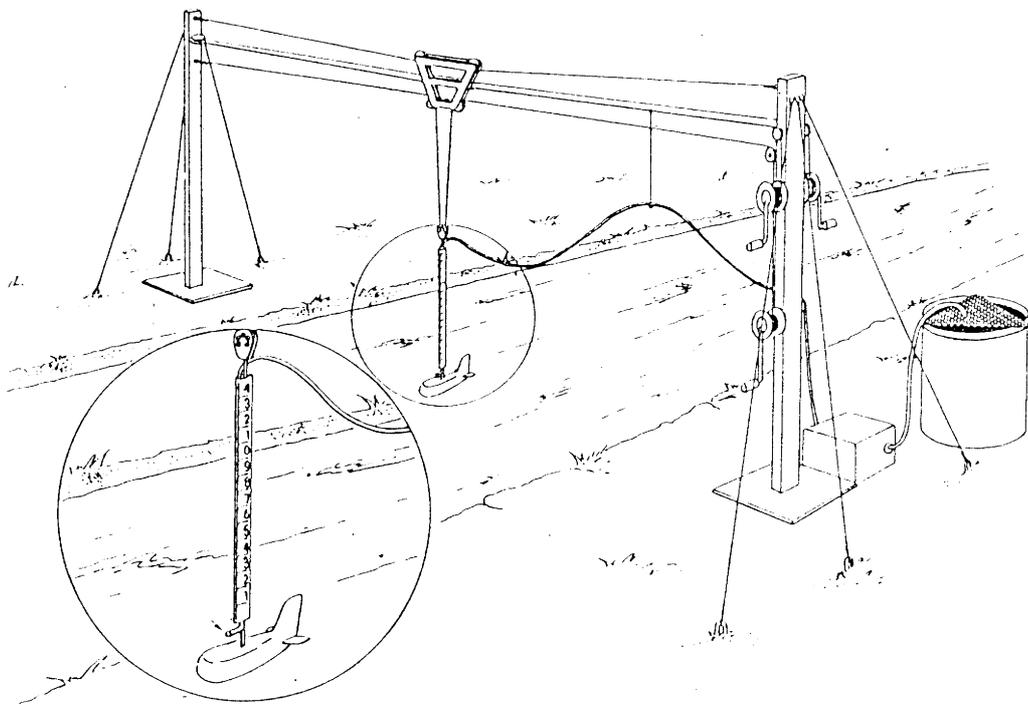


Figure II-4: Echantillonneur à aspiration

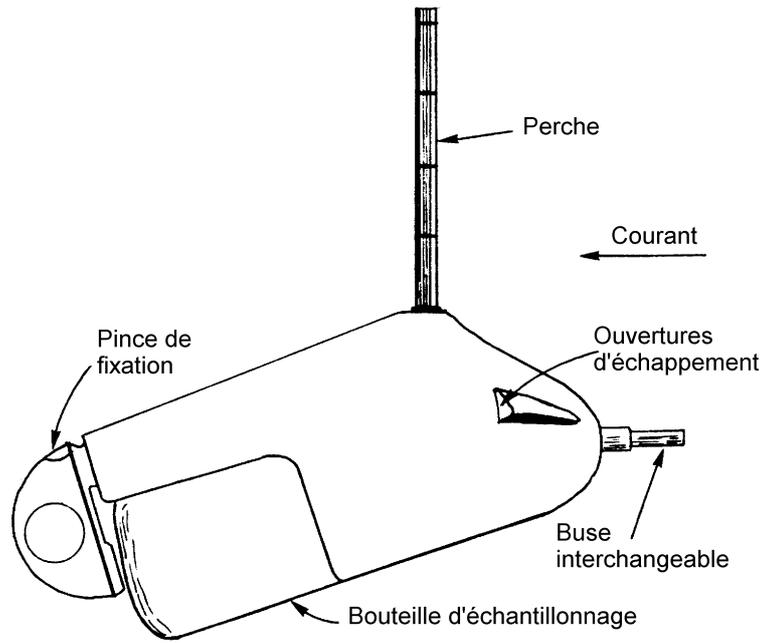


Figure II-5: Turbidisonde

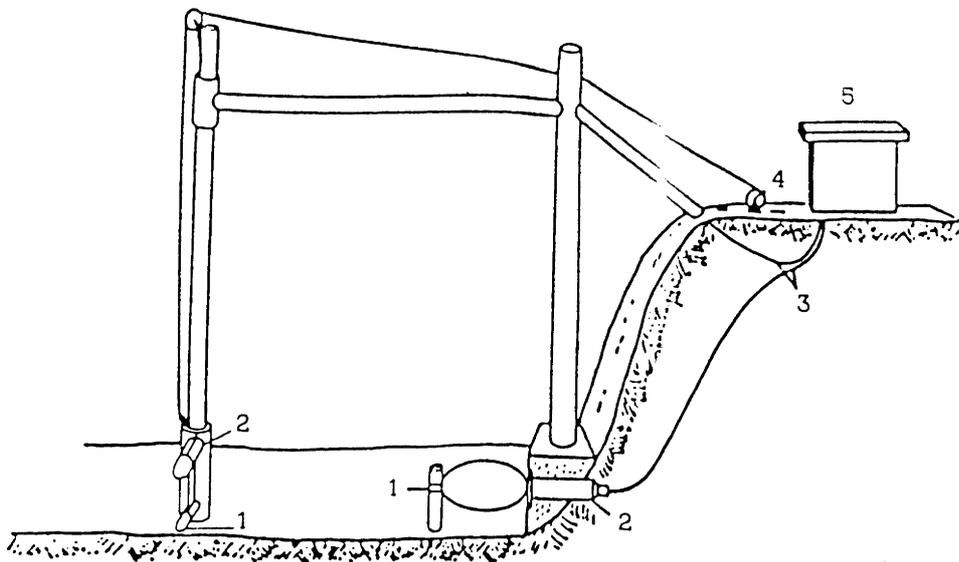


Figure II-6: Jauge des sédiments en suspension par technique nucléaire

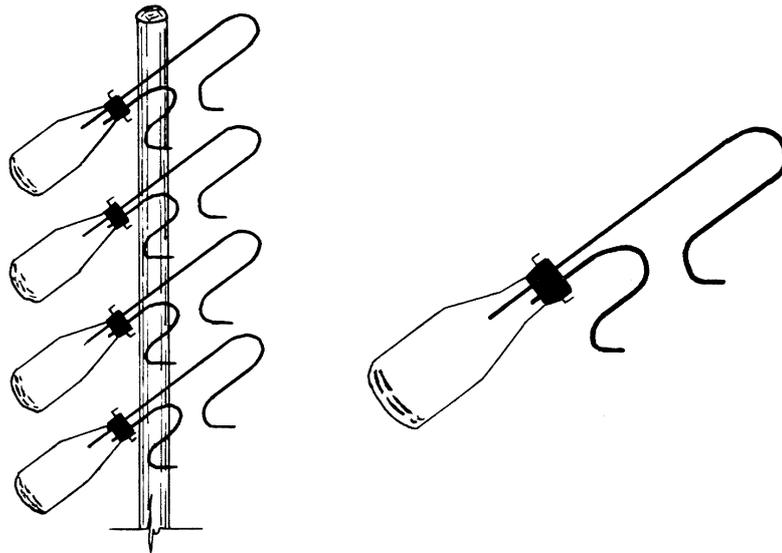


Figure II-7: Echantillonneur de sédiments en suspension à niveaux déterminés

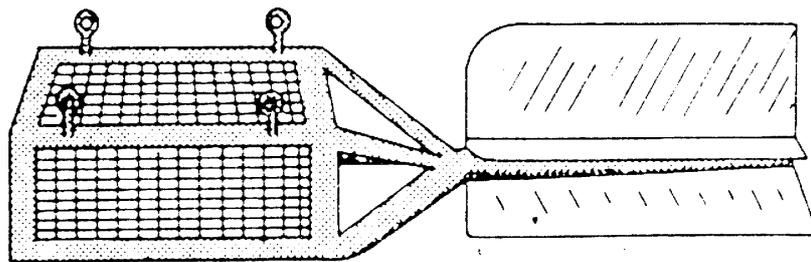


Figure II-8: Echantillonneurs de la charge de fond

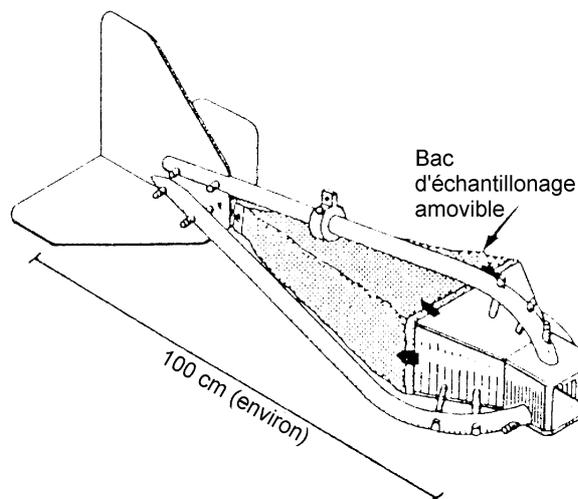


Figure II-9: Echantillonneur de charge de fond à différence de pression

### 3. PROGRAMME DE MESURES

#### 3.1 Introduction

On trouvera dans le présent chapitre la description du programme de mesures retenu pour la mise en oeuvre du présent projet qui comporte la liste des instruments nécessaires ainsi que les informations pratiques sur l'installation, l'entretien du matériel et l'obtention des données.

##### 3.1.1 Conception

Le programme est conçu compte tenu des caractères hydrologiques et géoécologiques des zones côtières méditerranéennes, notamment:

- Les petites dimensions des unités géo-écologiques uniformes imputables à l'extrême diversité de la géologie et de la topographie (pentes abruptes et micro-climats contrastés suivant l'orientation) malgré la faible altitude.
- L'utilisation très ancienne des terres par l'homme (végétation dégradée, micro-topographie modifiée, réseau de ravines dues à l'intervention humaine).
- Episodes brefs de pluies intenses qui peuvent être précédés et suivis de longues périodes de sécheresse.

L'équipement est conçu de façon à mesurer le taux de sédiments en suspension ou la fraction de sédiments de moins de 2 mm. Cette fraction constitue habituellement la majeure partie de l'apport total de sédiments produit par les petits bassins (plus de 80 pour cent) et est également liée à la perte de fertilité physique et chimique du sol, ainsi qu'à la dégradation de la qualité de l'eau (Gregory & Walling, 1973; Hadley & Walling, 1984; Walling, 1988). Néanmoins, cet équipement ne permettrait pas de mesurer convenablement la production de sédiments de certains environnements méditerranéens particuliers comme les zones granitiques altérées.

Le transport de la charge de fond dans les cours d'eau présente deux aspects importants:

- Les sédiments de fond n'ont généralement pas la même origine que les matériaux fins; ils proviennent en majeure partie de l'érosion des berges du cours d'eau et non de l'érosion des sols.
- Il est encore plus difficile de mesurer le transport de charge de fond que le débit de matières en suspension; cette opération requiert des installations relativement coûteuses qui doivent être nettoyées et entretenues après chaque événement.

Si la charge de fond transportée paraît importante d'après les observations de terrain, il faut mettre en place un dispositif complémentaire de mesure.

##### 3.1.2 Technologie

Sur la base de l'expérience acquise pendant le projet pilote, on a convenu que la meilleure solution consisterait à choisir des instruments de mesure faisant appel à la technique digitale électronique la plus moderne. Cette solution présente toutefois aussi des inconvénients liés surtout au manque probable d'expérience du personnel, mais ces inconvénients sont largement compensés par l'autonomie et la rapidité supérieure des instruments et par les énormes économies de temps de travail que permet l'exploitation informatisée des données par rapport à l'analyse manuelle traditionnelle.

##### 3.1.3 Durée

Un programme de mesures visant à obtenir des estimations quantitatives fiables des taux d'érosion et de transport de sédiments doit être conçu pour couvrir une période très longue car il est nécessaire d'étudier des événements de grande ampleur et de faible fréquence. Néanmoins, comme le programme a pour objectif principal d'établir des bases scientifiques en vue d'un meilleur aménagement des terres et non d'obtenir des chiffres absolus, il peut être organisé en deux étapes:

- **Une phase initiale de 3 ans au maximum**, pour la sélection des sites, l'acquisition des instruments et la mise en place de tout le dispositif de mesures. Cette phase requiert de larges appuis scientifiques afin que les investissements en travail et en moyens financiers soient ensuite exploités au mieux.
- **Un programme ordinaire de 3-4 ans**, qui pourrait être mis en oeuvre par des techniciens qualifiés mais a aussi besoin d'un appui scientifique pour assurer la bonne interprétation des résultats et contrôler la mise en oeuvre.

Un programme ainsi conçu devrait assurer le prélèvement d'échantillons concernant une gamme appropriée d'événements permettant de comprendre les processus d'érosion et de transport de sédiments dans la zone étudiée afin d'orienter les stratégies d'aménagement. Les taux d'érosion et de transport de sédiments à long terme pourraient être calculés grâce à la prolongation de la période de mesures ou à l'établissement de modèles des relations ampleur-fréquence.

### 3.2 Organisation recommandée des mesures

#### 3.2.1 Dimension des bassins hydrographiques

Le programme de mesures est fondé sur la surveillance des débits d'eau et de sédiments dans une série de **petits bassins versants** (0,5-20 km<sup>2</sup>), solution qui constitue un compromis entre l'étude d'un versant entier (parcelles d'écoulement) et une méthode purement hydrologique (bassins de drainage de grande ou moyenne taille).

La **méthode des parcelles** est bien adaptée pour étalonner les modèles d'érosion ou analyser les effets de pratiques de culture ou de conservation des sols, mais elle serait trop coûteuse s'il s'agissait d'obtenir des informations valables sur les taux d'érosion effectifs dans les zones étudiées. Les études au niveau des parcelles peuvent fournir des informations sur les processus d'érosion qui sont utiles pour comprendre le comportement des systèmes mais il serait très difficile de relier les taux d'érosion à l'échelle des parcelles aux taux d'apport de sédiments, du fait surtout que la plupart des sédiments enlevés par l'érosion dans les parcelles se déposent avant d'arriver aux cours d'eau.

En revanche, le transport de sédiments dans les **grands bassins** est peu relié aux processus sur les pentes en raison de la discontinuité des mouvements de sédiments: une part non négligeable des sédiments provenant des pentes se dépose dans des dépressions temporaires ou permanentes. Le réseau de drainage devient alors lui-même la principale source de sédiments transportés. Les stratégies de conservation des sols fondées sur des mesures des volumes de sédiments provenant de grands bassins peuvent donc négliger les véritables zones d'origine des sédiments (Walling, 1983).

#### 3.2.2 Nombre et disposition des bassins versants

Il est recommandé d'utiliser au minimum un groupe de trois bassins de dimensions différentes. Les bassins doivent être voisins les uns des autres de façon à présenter des caractéristiques comparables de climat et à permettre des comparaisons au niveau des événements.

Il est souhaitable d'utiliser plusieurs bassins de superficie analogue dans les zones présentant de fortes différences d'utilisation des terres ou de taux d'érosion; mais il ne faut pas oublier que

le programme de mesures prévoit certaines généralisations à partir de phénomènes ponctuels.

Dans la plupart des cas, certains petits bassins doivent être "emboîtés" dans les plus grands. Ce type de disposition aide à comprendre les règles de changement des processus de transport de sédiments selon l'échelle.

L'utilisation de parcelles "emboîtées" est fortement recommandée dans les zones à taux d'érosion élevé afin d'analyser les discontinuités des mouvements de sédiments (dépôts et sources) qui risquent de dissimuler les phénomènes réels d'érosion et pourraient être exploités de façon à renforcer les moyens naturels de gestion des sédiments.

#### 3.2.3 Caractéristiques géoécologiques des bassins versants

Il est recommandé de choisir des bassins représentatifs des principaux problèmes d'érosion de la zone à étudier. Les petits bassins doivent être sélectionnés de façon à représenter des aires d'un taux d'érosion homogène élevé ou bas, tandis que les bassins plus vastes peuvent englober des terrains hétérogènes de façon à permettre de comprendre le comportement d'un système dans son ensemble.

Les cartes établies dans le cadre du programme cartographique doivent être utilisées comme indicateur pour sélectionner les bassins. Toutefois, il n'est pas possible de mettre en correspondance exactement les deux activités de cartographie et de mesures. En outre, il ne faut pas oublier qu'il est impossible d'étudier des caractéristiques isolées pures quelle que soit l'échelle, car le comportement des bassins versants découle toujours de l'ensemble de leurs caractéristiques (dimension, forme, topographie, géologie, sols, utilisation des terres...).

Des paires de bassins "jumeaux" présentant des caractéristiques analogues pourraient être étudiées à titre expérimental. Il faut prévoir une période d'étalonnage pour évaluer le comportement d'un bassin par rapport à l'autre et une période expérimentale pour évaluer les résultats en ce qui concerne l'hydrologie et l'érosion résultant de pratiques d'aménagement des terres qui sont appliquées à un des bassins par comparaison avec l'autre bassin "témoin" laissé tel quel. La période d'étalonnage pourrait couvrir toute la durée du programme de mesures et il faudrait ensuite poursuivre les mesures pendant une période complémentaire (Toebes & Ouryvaev, 1970).

### 3.2.4 Sélection des points de mesure

L'emplacement des stations de mesure doit être choisi compte tenu des critères suivants:

- **Accessibilité:** Outre les travaux nécessaires pour la mise en place des instruments, plusieurs centaines de visites aux stations de mesures devront être effectuées pendant l'exécution du programme.
- **Protection contre les risques naturels** (incendies, glissements de terrain) et aussi contre le vol et le vandalisme.
- **Adéquation hydraulique:** Il est nécessaire d'éviter les points où les débits faibles ne sont pas enregistrés (remblais alluviaux épais) ou bien où les débits élevés évitent la station (canaux de diversion ou plaines d'inondation). Il faut autant que possible sélectionner une section de cours d'eau rectiligne et à pente constante. Il est particulièrement important de remplir ces conditions s'il s'agit d'évaluer le bilan hydrique.
- **Stabilité du fond et des berges des cours d'eau:** Les sections de cours d'eau exposées à des modifications importantes en raison de l'affouillement du dépôt de la charge solide de fond ou de l'érosion des berges doivent être évitées.

Il est hautement souhaitable d'utiliser, en les améliorant éventuellement, les stations de jauge existantes déjà afin de profiter des informations déjà obtenues (données d'étalonnage, archives hydrologiques couvrant une période longue) et des programmes d'entretien habituels.

## **3.3 Equipement**

Les mesures sont rassemblées grâce à la surveillance permanente du débit des eaux ainsi qu'à des observations ponctuelles des concentrations de sédiments au moyen d'échantillons. On doit donc disposer d'**instruments permanents automatiques installés dans les stations** pour mesurer l'écoulement et prélever des échantillons, d'**instruments portatifs** pour entretenir les instruments permanents, et effectuer des mesures de débit et prélever des échantillons pendant les visites de terrain, et enfin d'**instruments de laboratoire** pour mesurer les concentrations de sédiments dans les échantillons prélevés dans les cours d'eau.

### 3.3.1 Instruments installés dans les stations

- **Contrôle de l'écoulement:** Ouvrage (en béton ou en acier) ou resserrement naturel du lit qui assure une relation particulière

entre le débit et le niveau de l'eau. On trouvera des renseignements plus détaillés à la section 3.4.

- **Enregistreur de données:** Instrument électronique conçu pour lire et stocker les informations suivant un programme adaptable avec une capacité minimum de deux pistes d'enregistrement (marques de précipitations et d'échantillonnage d'événements intermittents) et d'une piste analogique (niveau de l'eau). L'instrument doit être doté d'une mémoire suffisante pour avoir un mois d'autonomie avec enregistrement à intervalle de 5 minutes. Il est recommandé d'utiliser un instrument qui puisse être directement interrogé par un ordinateur portatif et consomme peu d'énergie, étant alimenté par des piles alcalines d'une durée supérieure à 12 mois. Tous les accessoires nécessaires pour mettre en place ou récupérer les données de l'enregistreur doivent être prévus (logiciel, câbles et interfaces). L'horloge interne de l'enregistreur doit être réglée sur l'heure solaire afin d'éviter des erreurs dues aux changements saisonniers d'heure officielle dans le pays.
- **Capteur de niveau de l'eau:** Capteur électronique qui convertit le niveau d'eau en signal électrique. Il doit être directement alimenté et lu par l'enregistreur de données lui-même sans recours à d'autres dispositifs ou interfaces. Il existe plusieurs sortes de capteurs:
  - Les *potentiomètres* sont des instruments électroniques reliés à des mécanismes classiques de flotteurs et poulies qui permettent de mesurer le niveau d'eau dans les puits de mesure.
  - Les *jauges capacitives de profondeur de l'eau* sont des instruments électroniques qui utilisent la différence de propriétés diélectriques entre l'air et l'eau pour mesurer le niveau de l'eau. Ils sont solides et n'ont besoin d'être nettoyés que si l'eau est très sale.
  - Les *piézomètres* mesurent les différences de pression hydrostatique présentées par les colonnes hydriques. Ce sont des instruments peu coûteux qui fonctionnent bien. Ils présentent principalement l'inconvénient de mal fonctionner ou d'être en mauvais état après les longues sécheresses.
  - Les *instruments à ultrasons* permettent de mesurer le niveau de l'eau à distance. Ce sont les instruments les mieux adaptés aux eaux à forte charge de sédiments car ils n'ont pas besoin de puits de mesure, mais

ils sont plus coûteux et consomment davantage d'énergie électrique que les autres instruments.

Il est recommandé d'utiliser une jauge capacitive si des périodes de sécheresse prolongées sont prévisibles (petits cours d'eau en climat semi-aride). Le modèle de jauge doit être choisi de façon à couvrir toute la gamme de niveaux d'eau prévisible et à donner des informations offrant le degré de précision approprié.

- **Instrument d'échantillonnage:** Il est très important de noter que les concentrations de sédiments varient très fortement dans le temps dans les cours d'eau intermittents qui drainent les petits bassins et que les lacunes ou fautes d'échantillonnage sont la principale source d'erreurs, celles-ci pouvant aller jusqu'à un ordre de magnitude (Walling, 1988). En raison du caractère intermittent du ruissellement en zone méditerranéenne, ainsi que des erreurs que peuvent entraîner les prélèvements d'échantillons à la main, il faut utiliser des instruments automatiques d'échantillonnage d'une ou des deux catégories ci-après, selon les impératifs économiques et les besoins de sécurité:

- *Echantillonneur à aspiration programmable.* Cet instrument doit être déclenché par l'enregistreur de données lui-même ou par un mécanisme lié au niveau de l'eau et doit émettre des signaux permettant à l'enregistreur d'inscrire le moment exact de prélèvement des échantillons. Si l'instrument est commandé par un déclencheur à niveau d'eau, le programme doit être de type séquentiel (prélèvement d'un échantillon à chaque pas de temps), l'intervalle étant adapté à la durée prévue de l'événement (ainsi qu'à la dimension du bassin versant).

Si l'échantillonneur est déclenché par l'enregistreur de données lui-même, il doit avoir un programme séquentiel et l'enregistreur doit être programmé de façon à fournir des informations sous forme d'impulsions à l'échantillonneur suivant les niveaux d'eau enregistrés (*échantillonnage intelligent*). Il est également possible d'établir un programme d'échantillonnage proportionnel au débit; un tel programme offrirait le meilleur moyen d'obtenir un échantillonnage représentatif des sédiments transportés mais les informations sur les processus pendant les événements risqueraient malheureusement d'être perdues.

Un petit panneau solaire (250 mA) est nécessaire pour charger les batteries de façon

à ce que celles-ci assurent l'échantillonnage sans entretien hebdomadaire.

- Les *échantillonneurs à siphon* prélèvent des échantillons à plusieurs hauteurs à mesure que le niveau de l'eau monte. Ces instruments sont peu coûteux, n'ont presque pas besoin d'entretien et fournissent des échantillons de la partie supérieure du flux qui échappent habituellement aux instruments à aspiration automatiques ou aux prélèvements manuels.

Ces instruments se composent d'une série de bouteilles (nombre recommandé: 12 unités), dont chacune est reliée à deux tubulures. La tubulure d'entrée de chaque bouteille est incurvée de façon à former un siphon dont la hauteur est la caractéristique la plus importante car la hauteur de la surface de l'eau pouvant remplir la bouteille est fonction de celle du siphon. Les tubulures d'évacuation permettent à l'air de sortir des bouteilles lorsque celles-ci se remplissent d'eau; elles doivent avoir un orifice libre plus élevé que le niveau le plus élevé possible de l'eau, de façon à éviter la remise en circulation des échantillons déjà prélevés. Les deux orifices (entrée et sortie) doivent être protégés de l'entrée d'insectes par un filet à mailles de 2 mm (Brakensiek et al., 1979; Walling, 1988).

Si possible, les siphons d'entrée doivent être placés à la même verticale que l'échelle destinée à mesurer la hauteur de l'eau de façon que les débits atteints lorsque les diverses bouteilles se remplissent soient bien connus. Si la courbe hauteur-débit caractéristique de la station est connue, on doit diviser le débit le plus élevé par le nombre de bouteilles et calculer la hauteur de chacun des siphons qui correspond à une augmentation égale de débit; si cette courbe n'est pas encore connue, on applique des augmentations égales de hauteur. La solution la plus simple consiste à attacher les siphons d'entrée à un poteau de bois qui est ensuite fixé dans la section de contrôle. Il est recommandé d'utiliser des tubulures souples de 8 mm de diamètre interne (approximativement) pour l'entrée et des tubulures plus fines pour la sortie. Il est souhaitable de ménager un écart de 5 à 10 cm de hauteur entre l'ouverture et le point le plus élevé du siphon, selon l'ampleur des oscillations de niveau de l'eau qui sont prévues.

On peut utiliser des bouteilles en matière plastique d'un litre numérotées à partir du bas et placées dans une armoire en treillis fermant à clé de façon à être protégées du vandalisme. Les bouteilles doivent être fixées à plus de 20 cm au dessous du siphon correspondant et protégées du courant d'eau principal. Il faut disposer de bouteilles supplémentaires munies de bouchons pour le transport des échantillons jusqu'au laboratoire.

S'il s'agit de sections de cours d'eau relativement larges et calmes, il est nécessaire de connaître le rapport entre les concentrations de sédiments en suspension dans les échantillons et la concentration moyenne du flux total (voir section 5.3 concernant le prélèvement direct d'échantillons).

- *Enregistrement des précipitations*: Il faut au moins un pluviographe par station hydro-métrique. Il s'agit d'appareils de mesure magnétiques par augets basculants qui peuvent être reliés à l'enregistreur de données utilisé pour les mesures d'écoulement. Il est recommandé de prévoir des augets qui correspondent à 0,2 mm de précipitations.

### 3.3.2 Equipement portatif

On trouvera ci-après, à titre d'exemple, une liste des instruments et fournitures nécessaires pour effectuer les visites d'entretien et de prélèvement d'échantillons dans les stations de mesures:

- 
- Carnets de terrain, crayons, stylos résistant à l'eau, marqueurs permanents (feutres);
  - série de bouteilles munies de bouchons pour transporter les échantillons d'eau, pour chaque échantillonneur;
  - flacon de nettoyage avec eau distillée, brosse pour nettoyer les flacons;
  - seau de 10-12 litres;
  - pelle, panier;
  - balance manuelle de 5 kg (à ressort);
  - horloge et chronomètre;
  - trousse d'outils (tourne-vis, tenailles, ciseaux, mètre-ruban, etc.);
  - multimètre (voltmètre – ampèremètre – ohmmètre);
  - thermomètre pour mesurer la température de l'eau;
  - cylindre en plastique gradué de 0,5 l;

- turbisonde pour sédiments en suspension avec accessoires (tige ou câble, enrouleur et grue);
  - ordinateur portable (*notebook*) avec batteries et sac imperméable;
  - câbles avec prises ou interfaces pour connexion avec l'enregistreur de données;
  - disquettes pour copies de réserve;
  - un moulinet avec accessoires (tige) peut également être nécessaire si la station de mesure de l'écoulement n'est pas étalonnée à l'origine.
- 

L'ordinateur portable doit être compatible avec les logiciels et les transmissions des enregistreurs de données (des ordinateurs portables compatibles AT sont suffisants dans la plupart des cas). La marge d'autonomie, le poids, la robustesse et la régularité présentent plus d'importance que la qualité de l'affichage, la rapidité ainsi que la mémoire et la capacité du disque dur, qui sont généralement les principaux facteurs de coût.

### 3.3.3 Equipement de laboratoire

Les laboratoires doivent être équipés pour déterminer régulièrement la concentration en sédiments des échantillons d'eau.

On trouvera ci-après la liste du matériel de laboratoire et des fournitures qui sont indispensables:

- 
- Filtre à eau, composé de deux ampoules (entrée et sortie), d'un porte filtre, et d'une pompe à vide (électrique ou manuelle), avec tubulures en caoutchouc;
  - pinces pour manipuler les filtres;
  - balance de précision (1mg);
  - plaque chauffante électrique avec thermostat;
  - thermomètre à eau;
  - appareil de mesure de la conductivité électrique de l'eau (portatif si possible);
  - filtres à membrane cellulosique (pores de 0,45 microns);
  - lames de Pétri ou récipients pour filtres individuels;
  - bols de verre d'un litre résistant à la chaleur;
  - cylindre gradué d'un litre;
  - flacons de nettoyage, brosses de nettoyage pour flacons;
  - eau distillée, HCl dilué.
-

### 3.4 Installation de stations de mesure

Les stations de mesure se composent d'un ouvrage de contrôle du débit sur lequel les instruments de mesure et d'échantillonnage décrits plus haut sont installés. Les résultats obtenus à une station sont limités avant tout par le comportement; en effet, un dispositif permanent est bien plus difficile à modifier ou à remplacer.

Pour le contrôle de l'écoulement, on utilise un rétrécissement artificiel ou naturel du cours d'eau qui assure une relation bi-unique entre le débit du cours d'eau et le niveau de l'eau; il peut s'agir d'un canal ou d'un déversoir selon la gamme de débits à mesurer, le volume de charge de fond transporté et d'autres considérations techniques. Il est hautement souhaitable de prévoir un dispositif de contrôle des sédiments autonettoyant.

Les dimensions du dispositif de contrôle doivent être calculées avant tout pour mesurer les événements de fréquence décennale au maximum, car ces événements, d'ampleur moyenne, sont plus importants que les débits faibles pour le transport des sédiments. L'installation de dispositifs de contrôle adaptés aux événements catastrophiques n'est justifiée que s'il y a au moins deux événements exceptionnels par an à mesurer correctement.

Dans le cadre du projet, il n'est raisonnable d'avoir recours à un point de contrôle naturel que si une station de jaugeage du cours d'eau est déjà existante dans un bassin large et si l'étalonnage a été effectué (relation niveau-débit). L'acquisition de données concernant une gamme de débits est habituellement une tâche de longue haleine qui peut même dépasser la durée du projet lui-même, de plus, c'est une tâche difficile dans le cas des petits bassins en raison de leur réaction de brève durée.

Chaque fois que possible, l'ouvrage de contrôle du débit doit avoir une formule ou un barème d'étalonnage connu (formule ou barème fourni dès la conception). Si le site ne le permet pas, on doit procéder à l'étalonnage en mesurant les débits liquides au moyen de machinets ou de méthodes chimiques habituelles sur une gamme de débits aussi large que possible.

L'ouvrage doit être protégé des pannes causées par le transport des sédiments, notamment de la charge de fond. La protection peut être assurée par un dispositif d'autonettoyage ou un piège à sédiments installé en amont de l'ouvrage et ayant une taille suffisante pour retenir la charge de fond transportée par un événement

d'importance moyenne. Le piège doit être vidé le plus souvent possible, surtout après les gros écoulements. Les dispositifs autonettoyants sont vivement recommandés parce qu'il est plus important, pour évaluer les sédiments, que l'ouvrage fonctionne bien pendant les événements modérés ou majeurs que d'obtenir des données très précises pendant les petits événements.

Le niveau de l'eau doit être mesuré dans un puits ou un tube de mesure équipé d'un robinet pour évacuer les sédiments. Dans les cours d'eau permanents, on peut aussi installer un manomètre convenablement protégé des sédiments de fond sur le lit de l'ouvrage de contrôle de l'écoulement. L'emplacement du capteur indiquant le niveau de l'eau doit être choisi selon le type d'ouvrage de contrôle.

Une conduite graduée doit être installée près de l'orifice d'entrée du puits de mesure ou du manomètre afin de pouvoir vérifier les chiffres de l'enregistreur de données en les confrontant aux niveaux réels d'eau observés par l'opérateur.

Les instruments d'échantillonnage doivent être placés de façon à modifier le moins possible l'écoulement au droit de l'ouvrage de contrôle. Il est recommandé de choisir des emplacements où le courant présente une forte turbulence afin d'obtenir le meilleur mélange possible de l'eau, à condition toutefois que les appareils ne risquent pas d'être détruits pendant les fortes crues.

L'enregistreur de données doit être placé dans un abri pour être protégé du mauvais temps et du vandalisme. Certains enregistreurs sont équipés d'une enveloppe imperméable qui est suffisante si le vandalisme n'est pas à craindre. Si la station est équipée d'un échantillonneur automatique, la meilleure solution consiste à installer l'enregistreur de données et l'échantillonneur lui-même dans un abri d'acier ou de maçonnerie et à placer le panneau solaire sur le toit; cet abri peut aussi servir à garder d'autres instruments dans les endroits isolés.

En résumé, les stations de mesures devraient comporter les éléments suivants:

- un contrôle d'écoulement:
  - artificiel (canal ou déversoir) dont l'écoulement est donné par une formule ou un barème d'étalonnage;
  - de dimension moyenne (par rapport à celle du bassin);
  - autonettoyant (ou équipé d'un piège à sédiments approprié);

- équipé d'une conduite graduée pour la lecture du niveau de l'eau;
- un puits de mesure ou une protection au fond pour le capteur de niveau d'eau; et
- un abri en acier ou en maçonnerie pour protéger les instruments d'enregistrement et d'échantillonnage.

### 3.5 Visites sur le terrain

Ce programme a été établi en vue de l'utilisation des instruments ci-après:

- a) un pluviomètre et un limnigraphe branchés à un enregistreur de données;
- b) un échantillonneur à plusieurs niveaux (bouteilles à siphon);
- c) un échantillonneur automatique (ISCO 2700 ou analogue); et
- d) un échantillonneur intégrateur de sédiments en suspension (turbidisonde).

#### 3.5.1 Une fois par semaine ou plus fréquemment en période pluvieuse: entretien des échantillonneurs

L'équipement nécessaire est le suivant:

- carnet de terrain et stylo résistant à l'eau;
- marqueur permanent (stylo feutre);
- série de bouteilles pour l'échantillonneur à plusieurs niveaux;
- série de bouteilles pour le transport des échantillons d'eau prélevés par l'échantillonneur automatique;
- montre, thermomètre pour mesurer la température de l'eau;
- flacon de nettoyage avec de l'eau distillée;
- pelle, panier;
- peseur manuel de 5 kg; et
- clés.

La méthode recommandée est la suivante:

- a) Noter sur une nouvelle page du carnet de terrain:
  - date et heure solaire;
  - nom de la station visitée;
  - nom de l'opérateur, des assistants et des visiteurs;
  - niveau de l'eau au point de contrôle; et
  - température de l'eau.

- b) Ouvrir l'armoire protégeant l'échantillonneur et voir s'il y a des bouteilles pleines. S'il y a des bouteilles pleines, les prendre dans l'ordre, les boucher et écrire clairement au stylo indélébile sur la bouteille:
  - nom de la station;
  - N+n° de la bouteille correspondant au niveau (N1 pour la bouteille la plus basse); et
  - date.

- nom de la station;
- N+n° de la bouteille correspondant au niveau (N1 pour la bouteille la plus basse); et
- date.

Noter dans le carnet de terrain les numéros des bouteilles retirées (écrire NO si aucune bouteille n'a été enlevée).

Vérifier les siphons et les tubulures, les rincer si nécessaire mais laisser les bouteilles vides sèches et propres. Contrôler le filet de protection contre les insectes.

Remplacer les bouteilles pleines par des bouteilles vides propres.

- c) Ouvrir le couvercle de l'échantillonneur automatique et vérifier sur l'écran s'il fonctionne et s'il a prélevé des échantillons.

Enlever le dispositif de contrôle et voir s'il y a des bouteilles pleines (une unité de moins que le numéro affiché sur l'écran). S'il y en a, agiter avec soin le contenu de chaque bouteille, le transvaser dans une bouteille de transport, boucher cette dernière et écrire au stylo indélébile:

- nom de la station;
- A+n° de la bouteille à la date d'échantillonnage; et
- date.

Rincer les bouteilles et les replacer sur l'échantillonneur.

Noter dans le carnet de terrain les numéros des bouteilles retirées (écrire A0 si aucune bouteille n'a été retirée).

Remettre le dispositif de contrôle en place.

Remettre à zéro le programme d'échantillonnage.

Refermer le couvercle de l'échantillonneur.

Vérifier les câbles et les tubulures.

Vérifier le voltage du panneau solaire.

- d) Nettoyer et peser les sédiments de fond provenant du piège ou du dispositif de contrôle, noter dans le carnet de terrain le poids et la nature des sédiments (galets, graviers, sable ou boue).

Nettoyer le dispositif de contrôle et le limnimètre pour qu'aucune obstruction ne perturbe l'écoulement de l'eau ou le fonctionnement des instruments.

Noter dans le carnet de terrain tout incident survenu, le cas échéant.

- e) Vérifier le bord du pluviomètre, le nettoyer si nécessaire mais sans utiliser d'eau.
- f) Fermer avec soin toutes les portes et serrures.

### 3.5.2 Une fois par mois: récupération des données

L'équipement nécessaire est le suivant:

- carnet de terrain et stylo résistant à l'eau;
- marqueur permanent (stylo feutre);
- montre;
- clés;
- ordinateur portable (si aucun n'est disponible, on doit transporter l'enregistreur de données jusqu'à l'ordinateur de bureau, procéder à la transmission des données et replacer l'enregistreur à la station le plus vite possible pour réduire au minimum les pertes de données); et
- disquettes pour copies de réserve.

La méthode recommandée est la suivante:

- a) Noter sur une nouvelle page du carnet de terrain:
  - nom de la station visitée;
  - date et heure solaire;
  - nom de l'opérateur, des assistants et des visiteurs;
  - hauteur de l'eau au point de contrôle (conduite); et
  - température de l'eau.
- b) Ouvrir le boîtier imperméable de l'enregistreur de données (l'enlever et le transporter si nécessaire):
  - mettre l'ordinateur en marche;
  - vérifier l'exactitude de l'heure et de la date de l'horloge interne (heure solaire);
  - connecter l'enregistreur de données à l'ordinateur au moyen du câble approprié;
  - déclencher le programme de transfert;
  - sélectionner le nom de la station;
  - vérifier le fichier en le confrontant aux données récupérées;
  - remettre l'enregistreur à zéro;

- contrôler le bon fonctionnement des jauges connectées;
- interrompre le programme de transfert;
- préparer une copie de réserve du fichier obtenu;
- interrompre la connexion entre l'enregistreur et l'ordinateur et éteindre ce dernier; et
- noter tous les incidents dans le carnet de terrain.

### 3.5.3 Prélèvement direct d'échantillons pendant les crues

Il ne s'agit pas d'une tâche de routine et le travail doit s'adapter aux conditions particulières du terrain et de l'événement à étudier et doit donc être confié à un personnel plus expérimenté. L'opération devant être exécutée pendant les crues, il est encore plus important de préparer toutes les étapes à l'avance pour éviter au personnel de prendre des risques.

Si des échantillonneurs automatiques et à plusieurs niveaux sont en service à la station, il faut tout d'abord déterminer le rapport entre les concentrations de sédiments des échantillons fournis par ces appareils et le débit effectif total moyen. En absence d'échantillonneur automatique en service, c'est là le principal moyen d'obtenir des données sur les sédiments en suspension.

Dans les deux cas, la première étape consiste à obtenir des mesures des concentrations de sédiments en suspension caractéristiques de toute une gamme de débits, (crue ou décrue); **l'intervalle d'échantillonnage doit ensuite être fondé sur les variations de débit plutôt que sur le temps.** Une autre stratégie consiste à obtenir un grand nombre de données sur les concentrations de sédiments pendant les événements.

L'équipement nécessaire est le suivant:

- carnet de terrain et stylo résistant à l'eau;
- marqueur permanent (stylo feutre);
- série de bouteilles pour transporter les échantillons;
- montre, thermomètre pour mesurer la température de l'eau;
- seau de 10-12 litres;
- échantillonneur intégrateur pour sédiments en suspension avec accessoires (tige ou câble, enrouleur et grue); et
- flacon de nettoyage et eau distillée.

La méthode recommandée est la suivante:

### Sections de cours d'eau étroites (moins de 2 m de large) et turbulentes, ou eaux limpides

Dans ces cas, on prélève au moyen d'un seau un ou deux échantillons considérés comme représentatifs de toute la charge de sédiments en suspension, on secoue énergiquement et on transvase un échantillon dans une bouteille aux fins d'analyse de laboratoire, on bouche la bouteille et on écrit clairement et de façon durable sur ce récipient:

- S (échantillon prélevé au moyen d'un seau);
- nom de la station;
- date;
- heure; et
- hauteur de l'eau au point de contrôle.

Noter dans le carnet de terrain pour chaque échantillon:

- échantillon prélevé dans un seau;
- nom de la station;
- date;
- heure;
- hauteur de l'eau au point de contrôle;
- hauteur de l'eau à l'échantillonneur multiple (si différente);
- crue ou décrue;
- température de l'eau; et
- nom de l'opérateur.

### Sections de cours d'eau plus larges (plus de 2 m) ou à faible turbulence

Dans les cas de ce genre, les concentrations de sédiments en suspension peuvent varier de façon notable selon la profondeur et le point de la section du cours d'eau. Une opération assez complexe est nécessaire pour obtenir un échantillon représentatif.

Plusieurs méthodes d'échantillonnage peuvent être appliquées selon les besoins et l'expérience de l'équipe de mesures; la méthode la plus facile qui donne des résultats appropriés est celle de la vitesse de déplacement uniforme (voir Etude de cas de Turquie dans PAP/CAR-PNUE, 1997). Elle est fondée sur le fait que la vitesse d'entrée de l'eau dans l'échantillonneur est proportionnelle à la vitesse du courant; ainsi, si l'échantillonneur est déplacé le long de plusieurs verticales séparées par des distances égales, à la même vitesse, on peut obtenir un échantillon unique représentatif de la concentration moyenne de sédiments en suspension.

- a) Choisir une section du cours d'eau près de la section de mesure où le cours d'eau est assez étroit et d'une profondeur assez uniforme. Déterminer un certain nombre de verticales sur la largeur du cours d'eau séparées par des distances égales, le nombre de verticales dépendant de cette largeur (en général 6 à 12).
- b) Placer l'échantillonneur sur la verticale centrale et le déplacer de façon uniforme de la surface de l'eau jusqu'au fond du chenal et inversement. Ouvrir l'appareil pour contrôler l'échantillon prélevé: si la bouteille est remplie à moitié ou aux trois quarts, la vitesse de déplacement est satisfaisante; déplacer la bouteille plus rapidement pour la remplir davantage ou moins rapidement pour la remplir moins.
- c) Déplacer la bouteille le long de chacune des verticales à la vitesse sélectionnée et verser chaque échantillon prélevé dans le seau (on peut également changer la bouteille).
- d) Agiter énergiquement le contenu du seau et remplir une bouteille de transport avec l'échantillon moyen d'eau ainsi obtenu. Ecrire au stylo indélébile sur la bouteille:

- I (échantillon intégré);
- nom de la station;
- date;
- heure; et
- hauteur de l'eau à la section de contrôle.

Noter dans le carnet de terrain:

- échantillon intégré;
- nom de la station;
- date;
- heure;
- hauteur de l'eau au point de contrôle;
- hauteur de l'eau à l'emplacement de l'échantillonneur multiple (si différente);
- crue ou décrue;
- température de l'eau;
- nombre de verticales; et
- nom de l'opérateur.

- e) Si on désire étalonner l'échantillonneur automatique, on doit ouvrir le couvercle, noter le numéro de la bouteille à remplir dans le carnet de terrain, appuyer sur le bouton "ARRET DU PROGRAMME", puis sur le bouton "ECHANTILLONNAGE MANUEL", attendre que l'opération de prélèvement se termine et appuyer sur le bouton "REPRISE DU PROGRAMME". On doit enfin refermer le couvercle de l'échantillonneur.

### 3.6 Travaux de laboratoire

Il est nécessaire de soumettre les échantillons obtenus suivant les méthodes exposées plus haut au minimum aux opérations suivantes (Hadley & Walling, 1984).

#### 3.6.1 Concentration totale de sédiments en suspension

Les sédiments retenus par un filtre de 0,45 µm sont pesés. Les filtres doivent être pesés avant et après le filtrage, séchés à température modérée (40° C maximum), puis pesés de nouveau.

Si l'eau est limpide, il est nécessaire de filtrer tout l'échantillon prélevé mais il suffit d'en filtrer une fraction (bien mélanger) dans le cas d'échantillons plus chargés en sédiments pour éviter la saturation du filtre.

Le résultat doit être exprimé en milligrammes par litre (poids net des sédiments filtrés divisé par le volume d'eau total filtré). Les filtres déjà utilisés sont étiquetés et conservés dans un endroit frais et sec en vue d'analyses ultérieures, le cas échéant.

#### 3.6.2 Concentration totale de sédiments dissous

La conductivité électrique de l'eau est mesurée au moyen d'un appareil ordinaire; il est nécessaire de mesurer la température de l'échantillon et simultanément de convertir la conductivité électrique sur la base de la température standard de 25° C habituels.

Pour traduire les résultats de l'appareil en concentrations de sédiments dissous, il est nécessaire tout d'abord d'établir la relation entre ces deux facteurs en obtenant les concentrations de sédiments dissous grâce à la pesée du résidu sec à température modérée (40° C maximum) de l'eau obtenu auparavant par filtrage.

Le résultat doit être exprimé en milligrammes par litre (résidu sec net divisé par le volume d'eau).

#### 3.6.3 Autres analyses

Si le laboratoire dispose de l'équipement voulu, il est également souhaitable d'exécuter les analyses suivantes:

- analyse des sédiments en suspension pour connaître la taille des grains (dispersion au laser, pipette ou densimètre);
- analyse minéralogique et chimique des sédiments filtrés (diffraction aux rayons X et fluorescence aux rayons X);
- pH, alcalinité et concentration des ions dissous les plus importants.

## 4. TRAITEMENT ET PRESENTATION DES DONNEES

### 4.1 Utilité du programme de mesures

On a affirmé que le manque d'informations fiables sur les taux d'érosion et de production de sédiments dans de nombreuses parties du monde est très gênant pour évaluer les effets de l'érosion sur l'environnement et concevoir des stratégies appropriées de lutte contre l'érosion (Lal, 1988).

Ce manque d'informations fiables est dû au fait que la mesure des taux d'érosion se heurte à plusieurs facteurs d'incertitude importants, notamment en climat semi-aride où l'écoulement est éphémère ou hautement variable. Cette incertitude pèse sur tout le programme de mesures, du prélèvement des échantillons dans les cours d'eau au calcul du volume annuel de sédiments.

La qualité des données obtenues dans le cadre du programme dépend avant tout de l'adéquation et de la bonne exécution de l'échantillonnage, mais aussi des méthodes de traitement des données utilisées. On a montré que l'application de méthodes de calcul différentes aux mêmes séries de données peut aboutir à des volumes de sédiments variant du simple au double (Walling, 1988). Le présent chapitre formule donc une série de recommandations concernant le traitement des données de terrain et de laboratoire en vue d'évaluer le volume de sédiments pour les événements isolés et pour toute la période de mesures; des instructions sont aussi données pour préparer les rapports techniques et d'aide à la décision.

Il est important de souligner que le programme de mesures vise à obtenir des informations fiables sur les taux d'érosion et de sédimentation de petits bassins versants qui permettent de comprendre les processus d'érosion en cours dans ces zones et d'orienter les stratégies d'aménagement des terres et les mesures de lutte contre l'érosion. La mise en oeuvre de ce programme fournira des informations sur les caractéristiques des événements et une évaluation des taux de production de sédiments, ainsi qu'une idée du degré d'incertitude de cette estimation. Le programme ne permettra sans doute pas d'obtenir des taux d'érosion "officiels" faisant autorité, mais il devrait donner des informations fiables et donc utiles.

## 4.2 Aspects généraux de la gestion des données

### 4.2.1 Sources d'erreur

L'évaluation des taux d'érosion et de transport de sédiments se heurte à de graves difficultés et donne lieu à des erreurs considérables **qui peuvent aller du simple au double**, voire davantage. Il existe trois principales causes d'erreur en ce qui concerne l'estimation du volume de sédiments transporté dans les cours d'eau:

- a) **Qualité des échantillons:** Pendant le transport, les sédiments suivent leur propre dynamique qui n'est pas exactement la même que celle de la masse d'eau: ils sont constamment attirés vers le bas par la gravité et soulevés par la turbulence du courant. Ainsi, les concentrations peuvent fortement varier dans une même section de l'écoulement. De plus, tout instrument placé dans le courant modifie la dynamique locale. En outre, le processus d'échantillonnage, la manipulation ou la division de l'échantillon obtenu peuvent provoquer une dilution ou une concentration des sédiments (Hadley & Walling, 1984).
- b) **Représentativité des échantillons:** A un même emplacement, les concentrations de sédiments présentent habituellement de fortes variations dans le temps. Ces variations sont généralement liées aux variations du débit d'eau mais la relation est habituellement non linéaire et est sujette à des phénomènes d'hystérésis. Les variations dans le temps de la concentration de sédiments et le caractère non linéaire de la relation de cette concentration avec le débit d'eau, s'accroissent lorsque la superficie du bassin diminue (Walling, 1988).
- c) **Interpolation et extrapolation à partir des échantillons:** Etant donné que la concentration de sédiments est calculée à partir d'échantillons instantanés, il est nécessaire d'avoir recours à une procédure d'interpolation ou d'extrapolation pour estimer la concentration constante de sédiments qui, multipliée par le débit d'eau, permet de calculer la charge de sédiments (Walling, 1988; Walling & Webb, 1981).
- d) **Intégration dans le temps des débits solides:** L'irrégularité dans le temps de la concentration des sédiments et la relation non linéaire existant entre cette concentration et le débit liquide peuvent constituer une cause

d'erreurs graves à l'occasion de l'intégration dans le temps des charges solides.

Le programme de mesures a été conçu de façon à réduire au minimum les erreurs dues aux deux premières causes grâce à une bonne organisation de l'échantillonnage, sur la base de l'expérience acquise pendant le projet pilote. On pourrait éviter la troisième cause d'erreur en ayant le moins possible recours à l'interpolation et à l'extrapolation après avoir obtenu un nombre suffisant d'échantillons représentatifs à l'aide de dispositifs automatiques. On peut éviter la quatrième source d'erreurs en adoptant le plus petit intervalle possible d'intégration dans le temps, par exemple 5 minutes pour les petits bassins intermittents.

Il ne faut néanmoins pas oublier qu'il n'existe aucune série de données exempte d'erreurs ou de lacunes, ni aucune méthode parfaite d'interpolation-extrapolation.

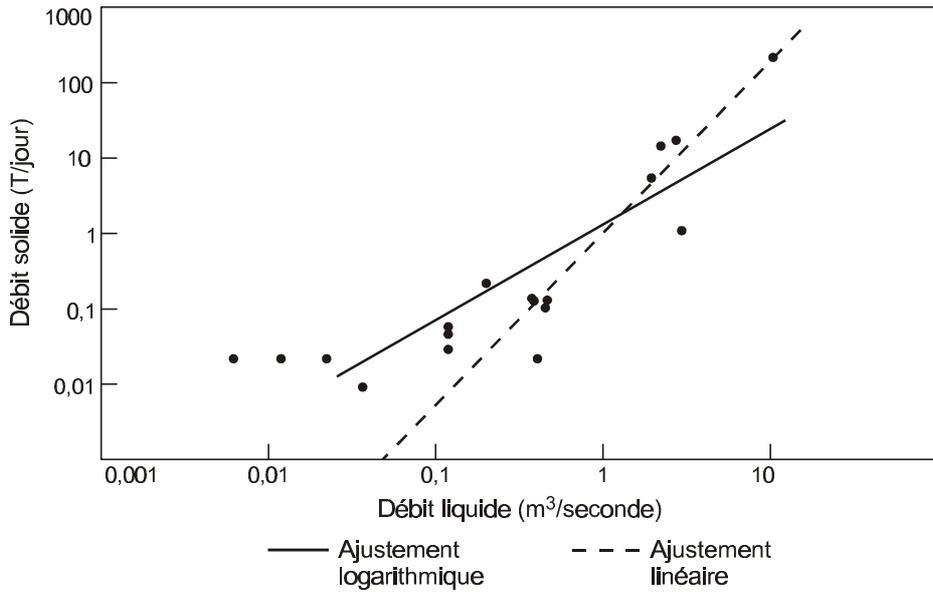
### 4.2.2 Interpolation et extrapolation

Il est très difficile d'établir des règles faciles à appliquer en ce qui concerne l'interpolation et l'extrapolation des données car le programme a pour objectif non pas d'obtenir des données "officielles" faisant autorité mais de fournir des instruments fiables pour analyser les stratégies de conservation des terres et des eaux.

Le projet pilote a fourni un exemple frappant de difficultés de ce genre à l'occasion des travaux de l'équipe turque (PAP/CAR-PNUE, 1997). Il est en effet apparu que les informations tirées d'échantillons peuvent aboutir au calcul de taux de transport de sédiments très différents selon la méthode d'interpolation et d'extrapolation qui est appliquée.

On trouvera à la figure II-10 ci-après, sous forme de graphique à double échelle logarithmique, les débits solides instantanés mesurés sur le terrain à la station de Çenger pendant le projet pilote ainsi que l'équation débit solide-débit liquide obtenue habituellement par régression linéaire log-log et une autre droite de régression obtenue sur la base de la minimisation des résidus des valeurs réelles au lieu des valeurs logarithmiques. Il est évident que la première droite de régression aboutit à une adéquation bien meilleure que la seconde dans ce graphique.

Les deux droites de régression sont établies en minimisant les résidus des logarithmes et les résidus des valeurs réelles de débits.

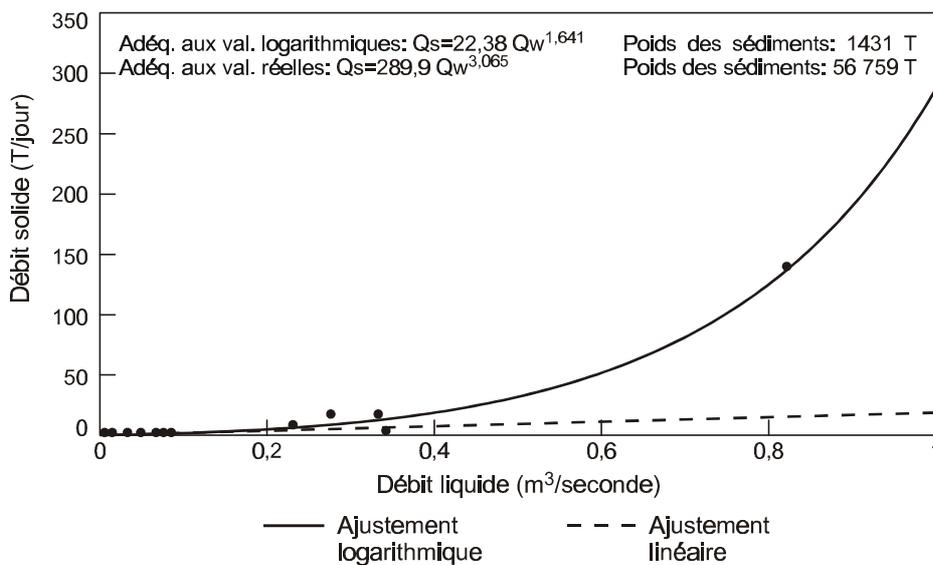


**Figure II-10: Relation débit solide-débit liquide instantanés obtenus par échantillonnage à la station de Çenger (Turquie)**  
 Source des données: Dogan et Sevinç, 1995

En revanche, les mêmes données et régressions sont présentées à la figure II-11 sous forme de graphique à échelle linéaire; il apparaît que si l'adéquation linéaire habituelle est appliquée, on peut laisser échapper les informations fournies par la valeur la plus élevée de transport de sédiments qui est observée.

Les données et la régression sont les mêmes que dans la figure précédente mais elles sont

présentées sous forme de graphique à double échelle linéaire. La régression linéaire aboutit à une très forte sous-estimation des événements importants qui jouent le rôle principal dans le transport de sédiments. Il faut noter que le poids de sédiments transportés estimé sur la base de la régression logarithmique est approximativement 40 fois plus élevé que l'estimation fondée sur la régression linéaire à partir de la même série de données.



**Figure II-11: Relation linéaire débit solide-débit liquide instantanés obtenus par échantillonnage à l'échelle linéaire à la station de Çenger (Turquie)**

Dans ce cas, on obtient, en utilisant les mêmes données de terrain et la même méthode de calcul, mais en appliquant des techniques différentes d'ajustement des courbes, **1.431** et **56.759** tonnes de sédiments pour 1995, soit une différence de 1 à 40. On voit aussi qu'il n'est guère utile d'employer un grand nombre de chiffres significatifs dans les résultats car on donne ainsi une fausse impression de précision.

Il convient de souligner que, si la régression logarithmique est appliquée à un sous-échantillon comprenant les dix points pour lesquels le débit liquide est supérieur à 0,05 m<sup>3</sup>/seconde, la régression obtenue se présente comme  $Q_s = 236,7 Q_w^{3,074}$ , et le volume solide ainsi obtenu pour l'année s'établit à 46.776 tonnes, valeur comparable à l'estimation obtenue au moyen de l'équation appliquée aux valeurs réelles. Cette troisième méthode présente malheureusement un certain degré de subjectivité mais elle peut permettre d'éviter des erreurs importantes.

*Il est donc recommandé* d'appliquer une technique d'ajustement des courbes qui minimise la somme des résidus des valeurs réelles (non logarithmiques). Si cela n'est pas possible, il est nécessaire de vérifier l'ajustement de la courbe sur un graphique linéaire et de choisir des séries de sous-échantillons (chaque

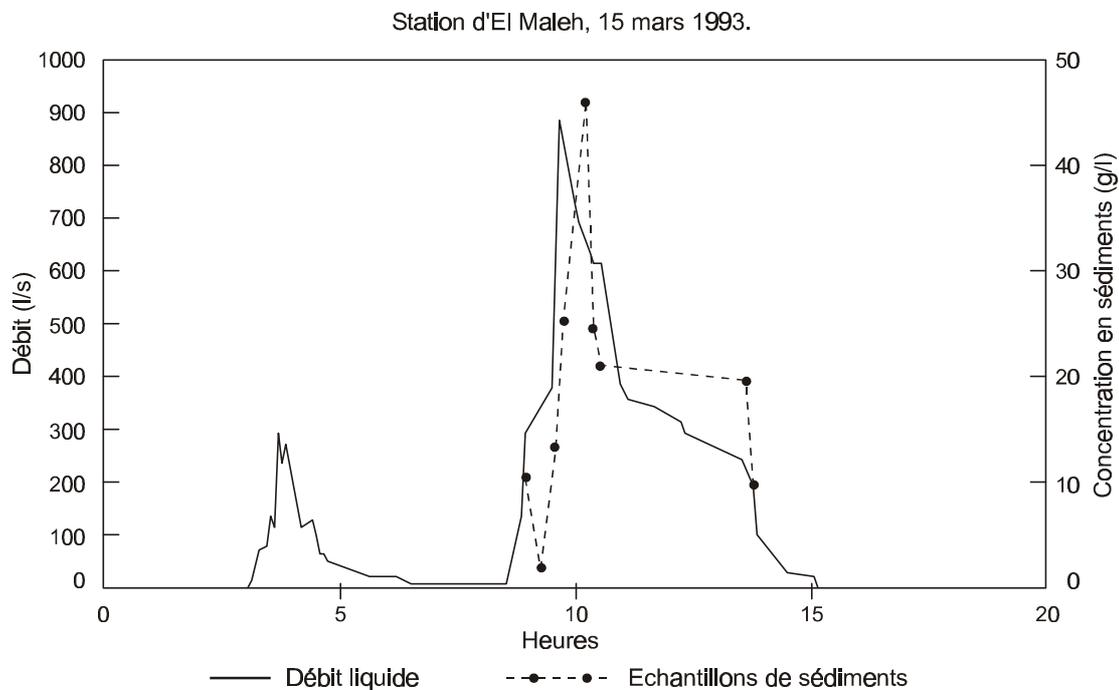
échantillon étant maintenant représenté par  $n$  observations,  $n$  correspondant à la valeur de transport de sédiments) afin d'assurer un bon ajustement par rapport aux données réelles.

#### 4.2.3 Analyse des événements et intégration temporelle

Les petites dimensions des bassins versants ainsi que le caractère intermittent des cours d'eau rendent nécessaire l'analyse détaillée des événements. L'équipe de Tunisie a exécuté d'excellentes analyses de ce genre au cours du projet pilote (Boughrara, 1994) ainsi qu'il apparaît à la figure II-12 ci-après.

Ce graphique suscite une première observation qui concerne le chapitre précédent: il est très important de procéder à des échantillonnages fréquents pendant un événement de ce genre; le prélèvement d'un échantillon par jour ne présenterait guère d'utilité.

Les événements de ce genre doivent être analysés de façon détaillée afin d'obtenir les informations appropriées non seulement sur les taux d'érosion et de transport des sédiments mais aussi sur les processus en cours dans le bassin.



**Figure II-12: Hydrogramme et concentrations de sédiments obtenus à la station d'El Maleh (Tunisie) pendant l'événement du 15 mars 1993.**

Il convient de noter la forte variation du débit et des concentrations de solides pendant cet événement de courte durée. (Source: PAP/CAR-PNUE, 1997)

*Analyse qualitative:* Il apparaît à la figure II-12 que l'écoulement d'eau précède quelque peu la concentration concomitante en sédiments. Dans le cas d'un petit bassin, ce décalage fait penser que les sédiments proviennent principalement des pentes de collines et que la crue montante n'a pas un effet de "bulldozer" dans le lit du cours d'eau. On peut aussi penser que les principales sources de sédiments se trouvent dans le cours supérieur. Enfin, la concentration élevée de sédiments qui persiste pendant la décrue semble indiquer que l'érosion est limitée par l'énergie des précipitations et de l'écoulement superficiel: les sédiments disponibles ne sont pas épuisés. Il semble exister des sédiments très fins qui n'ont pas besoin d'un courant très rapide pour rester en suspension.

*Evaluation quantitative:* Grâce aux excellents prélèvements d'échantillons opérés pendant cet événement, le recours à l'interpolation et à l'extrapolation ne peut provoquer que des erreurs légères. Cependant, la forte variation dans le temps du volume de sédiments transportés peut causer des erreurs significatives liées à l'intégration dans le temps du débit solide.

Les hydrologues ont souvent recours à l'accumulation des flux journaliers pour évaluer les ressources en eau. Néanmoins, lorsque le débit liquide et les concentrations de sédiments accusent de fortes variations journalières, il faut intégrer les débits solides pour des intervalles aussi brefs que possible avant de procéder à l'accumulation journalière; sans cette opération, ce procédé peut causer des erreurs très importantes. Dans l'exemple étudié ici, l'intégration "simple" des débits journaliers avant le calcul du débit solide constituerait la principale source d'erreurs, ainsi qu'il ressort du tableau II-1.

Il apparaît dans ce tableau que l'application de méthodes différentes d'intégration temporelle, sans modification de la procédure d'interpolation ni des données, aboutit au calcul d'un volume de sédiments de 350 ou 0,120 tonnes, soit un rapport d'environ 1 à 3.000. Cette différence tient au fait que la relation entre le volume de sédiments transportés et le débit liquide décrit une courbe et que la moyenne des valeurs Y est différente de la valeur Y qui correspond à la moyenne des valeurs X.

#### 4.2.4 Recommandations de caractère général

Les procédures de manipulation et de présentation des données dans le cadre d'un projet doivent comporter:

	Adéquation valeurs réelles		Adéquation logarithmes	
	intervalle 5 min.	flux journalier	intervalle 5 min.	flux journalier
tous échantill.	174 T	73,6 T	132 T	32,6 T
série d'échantill. A	337 T	0,179 T	350 T	0,12 T
série d'échantill. B	183 T	131 T	192 T	152 T

**Tableau II-1: Estimations du volume de sédiments pendant l'événement du 15 mars 1993 à la station d'El Maleh**

calculées après douze opérations différentes concernant l'échantillonnage (tous les échantillons ou deux séries de sous-échantillons), la technique d'adéquation de la courbe (valeurs réelles ou valeurs logarithmiques) et l'intégration dans le temps d'une formule de calcul de la relation sédiments-débit liquide (intervalle de 5 minutes ou journée). L'intégration dans le temps peut provoquer des erreurs bien plus grandes que l'interpolation ou l'organisation de l'échantillonnage.

- Une description des données originales obtenues grâce au programme d'échantillonnage avec indication du lieu, de la date et de l'heure, de la méthode d'échantillonnage, du niveau de l'eau et du débit liquide au moment du prélèvement. Toutes ces informations sont nécessaires pour **contrôler les erreurs éventuellement commises** au cours de l'échantillonnage ou des mesures.
- Une analyse détaillée de certains événements particulièrement représentatifs, notamment pour présenter les hydrogrammes détaillés ainsi que les relations entre la concentration de sédiments en suspension et le débit liquide. Cette analyse est nécessaire pour étudier les principaux aspects des processus d'érosion et de transport de sédiments intervenant dans le bassin, en d'autres termes pour **analyser les aspects qualitatifs des phénomènes d'érosion et de transport**.
- Une description détaillée des modalités suivies pour l'interpolation et l'extrapolation des mesures instantanées de sédiments ainsi que de la procédure suivie pour l'intégration dans le temps des débits liquides et solides. Chaque fois que possible, plusieurs procédures possibles doivent être mises à l'essai et présentées afin de connaître la marge d'erreur que présentent les estimations ainsi obtenues.

- d) Une description des débits liquides et solides qui comporte une évaluation des erreurs probables et permet l'analyse des variations temporelles ou saisonnières.
- e) Une récapitulation des informations et des conclusions susceptibles d'être utilisées ultérieurement par les chercheurs, les ingénieurs et les responsables politiques. Il s'agirait des statistiques obtenues (débits liquides, débits solides avec appréciation des erreurs, concentrations caractéristiques de sédiments dans les cours d'eau) ainsi que d'un bref exposé des objectifs atteints et des problèmes rencontrés pendant l'exécution du programme (nombre d'échantillons, temps total de mesure du débit, principaux problèmes posés par les instruments, orientations permettant d'améliorer la méthode).

### 4.3 Traitement et enregistrement des données

#### 4.3.1 Catégories de données à traiter

Le programme de mesures offre diverses sources d'informations:

- mesures continues des précipitations, du niveau de l'eau et l'horaire des échantillonneurs automatiques, en provenance des enregistreurs de données. Ces informations sont généralement fournies sous forme de fichiers informatisés à intervalle de 5 minutes ou à intervalle variable, qui permettent un traitement complètement informatisé, solution bien préférable à l'établissement de graphiques à la main.
- mesures instantanées du débit liquide au moulinet ou suivant des méthodes chimiques effectuées par un opérateur. Ces données sont identifiées par la date et l'heure ainsi que par le niveau de l'eau.
- concentrations de sédiments instantanées pendant la montée de l'hydrogramme obtenues grâce à l'analyse d'échantillons prélevés par les échantillonneurs multiples. Ces données sont identifiées par la hauteur de l'eau correspondante pendant la montée de l'hydrogramme.
- concentrations de sédiments instantanées pendant les crues obtenues grâce à l'analyse des échantillons fournis par un échantillonneur automatique programmable ou prélevés à la main par un opérateur. Ces données sont identifiées par la date et l'heure qui sont

notées par l'enregistreur automatique ou l'opérateur.

#### 4.3.2 Etapes dans le traitement des données

Le traitement des données porte sur deux sortes d'informations: les *données réelles* provenant des quatre sources énumérées au paragraphe précédent et les *données dérivées* provenant de calculs effectués au moyen d'une relation hauteur-débit ou d'une relation débit liquide-débit solide. Les données réelles d'origine doivent être conservées avec soin pour éviter les pertes ou les dégradations et les données dérivées doivent être considérées comme susceptibles d'être améliorées si des relations plus satisfaisantes sont établies pendant l'exécution du programme.

Le traitement des données comporte les étapes suivantes:

- a) **Etablissement de relations "hauteur-débit" ou courbe de tarage pour les stations de jaugeage.** Il est recommandé dans le chapitre précédent que ces relations soient fournies par le concepteur de l'ouvrage de contrôle du débit, s'il existe un tel ouvrage artificiel, ou par les autorités responsables des eaux si des stations de mesure du débit ont déjà été installées. Si ces recommandations ne peuvent être appliquées et que de nouvelles stations de contrôle non dotées de courbe de tarage sont mises en place, la meilleure solution consiste à adopter une formule usuelle (écoulement critique, Manning-Strickler ...) avec des paramètres provisoires, et à améliorer les paramètres pendant l'exécution du programme en effectuant des mesures sur une gamme de débits aussi large que possible au moyen d'un moulinet. Néanmoins, les rapports niveau-débit ne constituent généralement pas la principale source d'erreurs dans l'estimation du volume de sédiments.
- b) **Etablissement de fichiers chronologiques contenant les données brutes fournies par les enregistreurs et des données dérivées calculées au moyen de courbes de tarage.** Il est recommandé d'utiliser à cette fin un tableur comme EXCEL ou LOTUS 1-2-3. Les fichiers doivent être créés peu après la récupération des données de façon à repérer tout mauvais fonctionnement des instruments, mais les premiers fichiers peuvent ensuite être mis à jour ou améliorés en cas de besoin grâce à l'application de relations débit liquide-débit solide obtenues ultérieurement pendant l'exécution du programme. L'intégration dans le temps des débits solides

et liquides doit être effectuée sur les mêmes tableurs et avec les mêmes intervalles de temps utilisés par les enregistreurs de données.

- c) **Etablissement de relations débit solide-débit liquide.** Il est tout d'abord nécessaire de déterminer la concentration de sédiments des échantillons et d'indiquer la date, l'heure, le niveau et le débit liquide correspondant à chaque concentration. L'analyse de la relation débit solide-débit liquide, qui peut être effectuée sur un tableur, est capitale pour bien comprendre les processus d'érosion et de transport et pour établir une bonne méthode de calcul des taux de sédiments qui permet d'évaluer le volume de sédiments avec exactitude. Il faut éviter d'utiliser dans le cadre du programme, une formule unique de taux de sédiments pour toutes les valeurs de débit liquide obtenues à une station, car les erreurs peuvent être très importantes. La meilleure solution consisterait à appliquer deux courbes de tarage des sédiments différentes pour la montée et la descente des eaux de chaque événement significatif en utilisant les données relatives aux sédiments collectés à l'occasion d'un même événement hydrologique. On pourrait aussi, plus simplement, utiliser des formules adaptées à différentes saisons et tronçons d'hydrogrammes.
- d) **Etablissement de graphiques temporels des précipitations, du débit liquide, du débit solide en suspension et dissous pour toute la période de mesures, ainsi que de graphiques plus détaillés pour les principaux événements.** Préparation de tableaux donnant les valeurs intégrées dans le temps des précipitations, du débit, du volume des sédiments en suspension et dissous pour les principaux événements, la période de mesures totale et les moyennes annuelles pour l'ensemble de la superficie étudiée.

#### 4.3.3 Tableurs pour données

Deux sortes de données peuvent être traitées à l'aide de tableurs: les **données d'échantillonnage** tirées de prélèvements manuels ou automatiques et les **données chronologiques** notées par les enregistreurs.

**Donnée d'échantillonnage:** La figure II-13 ci-après offre un exemple de la procédure recommandée pour traiter les données d'échantillonnage sur tableur informatisé. Ce tableur peut également être utilisé pour analyser et établir les relations niveau-débit, conductivité

électrique – concentrations de sédiments dissous et débit liquide-débit solide.

Néanmoins, les tableurs habituels ne sont pas programmés pour une large gamme de techniques d'ajustement de courbes et la méthode habituelle consiste à ajuster une fonction potentielle par une régression linéaire des valeurs logarithmiques. Dans ces conditions, la meilleure solution consiste à exécuter les opérations suivantes, *pour chaque événement*, si possible:

- a) Inscrire dans deux colonnes les logarithmes des débits liquides et des débits solides (multiplication des débits liquides par taux de concentration en solides de échantillon) correspondant à tous les échantillons disponibles.
- b) Construire les courbes en XY pour les débits solides et liquides réels ainsi que pour les valeurs logarithmiques, suivant l'ordre chronologique des prélèvements. Etudier les boucles d'hystérésis et la signification relative de chaque échantillon dans le volume total transporté (valeurs réelles). Si les phénomènes d'hystérésis sont significatifs, procéder à l'opération suivante pour chaque section différente de l'hydrogramme (habituellement montée et descente).
- c) Calculer les régressions linéaires pour les valeurs réelles et les valeurs logarithmiques, inscrire dans trois nouvelles colonnes les valeurs prévues à partir des deux régressions et des antilogarithmes des valeurs prévues par la régression logarithmique; les présenter sur les courbes respectives.
- d) Calculer et cumuler les différences entre les débits solides mesurés et prévus au moyen des antilogarithmes de la régression log-log. Si la différence est considérée comme trop élevée, sélectionner un nombre plus petit d'échantillons (il y a généralement trop d'échantillons disponibles pour les débits très faibles) et répéter l'opération c).
- e) Sélectionner la série des régressions les plus appropriées pour prévoir les débits solides; la solution la plus compliquée consiste à établir une équation différente pour chaque tronçon de l'hydrogramme de chaque événement et la plus simple à utiliser une régression simple pour toutes les données d'observation. Présenter sous forme de tableau les différences observées suivant les diverses méthodes (voir tableau II-1).

Origine>	Opérateur	Enregistreur de données à horloge	Enregistreur de données à horloge	Enregistreur de données à horloge	Jaugé	Laboratoire	Laboratoire	Laboratoire	Calcul	Calcul	Calcul	Calcul
Description>	Numéro de l'échantillon	Date	Heure	Niveau	Débit	Concentration solide en suspension	Conductivité électrique	Concentration en solides dissous	Débit	Concentration en solides dissous	Débit solides en suspension	Débit solides dissous
Symbole>				H	Qm	Cs	Ec	Cdm	Q	Cd	Qs	Qd
Unité>		dd-mm-gg	ss:mm	m	m3/s	kg/m3	mS	kg/m3	m3/s	kg/m3	kg/s	kg/s
	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Figure II-13: Exemple de tableur pour données d'échantillonnage**

Les échantillons doivent être présentés par ordre chronologique afin de permettre d'étudier l'hystérésis probable. Une colonne supplémentaire peut être prévue pour noter des observations.

Les fichiers de **données chronologiques** ne peuvent pas être facilement traités sur un tableur si l'ensemble des données du mois est enregistré à intervalles de 5 minutes (avec emploi d'un enregistreur de données à intervalle constant). Il y a deux moyens de résoudre ce problème, on peut soit supprimer les rangées de valeurs répétées de niveau de l'eau sans nouvelles données de précipitations ou d'échantillonnage, soit adopter des périodes de 15 jours, avec intervalle de 5 minutes. L'intégration dans le temps des débits liquides et solides doit être présentée dans le même tableau en multipliant les débits instantanés par l'intervalle de temps séparant les lectures (rangées).

On trouvera à la figure II-14 ci-après un exemple de tableur pouvant être utilisé pour les données chronologiques. On peut établir des colonnes d'écoulement de sédiments et de transport pour les diverses équations de tarage des sédiments. On peut ajouter une ligne en bas de la page pour inscrire les volumes cumulatifs totaux d'eau et de sédiments.

#### 4.3.4 Présentation des rapports d'activité

Les rapports d'activité doivent être conformes aux recommandations formulées à la rubrique 4.2.4 du présent chapitre. Les principales conditions à remplir sont les suivantes:

#### Texte:

La partie narrative principale du rapport doit résumer les principaux aspects des travaux exécutés dans le cadre du programme de mesures, notamment:

- Dates de mise en place des instruments et périodes d'enregistrement des données dans les diverses stations. Lacunes d'enregistrement constatées.
- Récapitulation des échantillons prélevés ainsi que mesures des débits exécutées par l'opérateur, le cas échéant.
- Description des principaux événements survenus et des débits liquides et solides observés et mesurés. Autres estimations du volume de sédiments transportés ou évaluation des erreurs, si possible. Evaluation de la représentativité des données obtenues sur une longue période, en fonction de la récurrence ou de la fréquence probable des événements enregistrés.
- Utilité des résultats obtenus pour connaître du point de vue qualitatif et quantitatif les processus d'érosion et de transport de sédiments.

Origine>	Enregistreur de données à horloge	Enregistreur de données à horloge	Enregistreur de données à horloge	Calcul	Enregistreur de niveau	Pluviomètre enregistreur	Calcul	Calcul	Calcul	Calcul	Calcul	Calcul
Description>	Date	Heures	Minutes	Intervalle temporel des rangées	Niveau de l'eau	Précipitations	Débit calculé	Débit solides en suspension calculé	Débit solides dissous calculé	Ruissellement calculé	Volume sédiments en suspension transportés calculé	Volume sédiments dissous transportés calculés
Symbole>				dt	H	P	Q	Qs	Qd	R	Ts	Td
Unité>	d	h	min	s	m	mm	m3/s	kg/s	kg/s	m3	T (tm)	T (tm)
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Figure II-14: Exemple de tableur pour la présentation des données provenant d'enregistreur de données chronologique**

Une colonne supplémentaire peut être prévue pour noter les observations.

e) Suggestions visant à améliorer le programme de mesures.

f) Résumé à usage pratique (voir Conclusions).

#### Graphiques:

- Hyétogrammes, hydrogrammes et sédigrammes des événements mesurés les plus intéressants, avec comparaisons entre stations ou saisons.
- Relations entre les débits solides et les débits liquides mesurés qui ont été appliquées pour élaborer les courbes de tarage des sédiments.

#### Tableaux:

- Tableaux de l'écoulement et du volume de sédiments transportés totaux par jour, avec totaux mensuels (ces tableaux servent à présenter les informations mais les calculs doivent être faits sur les tableurs à intervalles de 5 minutes).
- Récapitulation des principaux résultats obtenus aux stations, par événement, par année et pour toute la période étudiée, en ce qui concerne: précipitations, ruissellement, coefficient de ruissellement, transport de sédiments en suspension, transport de sédiments dissous, taux d'érosion moyen et taux d'altération chimique moyen pour l'ensemble du bassin versant.

#### A joindre:

Disquette contenant les fichiers de tableurs utilisés pour la période couverte.

### **4.4 Interprétation et présentation des résultats**

Après la collecte et le traitement des données, il est nécessaire de les interpréter afin d'obtenir des informations plus accessibles et de mettre en lumière les aspects qui doivent retenir particulièrement l'attention mais pourraient échapper aux lecteurs dans des rapports plus longs.

#### 4.4.1 Présentation des résultats à des fins techniques

Il est difficile de donner des directives pour préparer l'interprétation technique des résultats car elles dépendent des informations obtenues, des caractéristiques de la zone étudiée et aussi de l'expérience de l'équipe chargée des mesures. Le rapport devrait néanmoins comporter les éléments suivants:

- Un bref exposé des connaissances disponibles sur les problèmes d'érosion dans la zone avant la mise en oeuvre du programme de

mesures, problèmes qui ont justifié la sélection de cette zone.

- Evaluation des nouveaux aspects qualitatifs et quantitatifs des processus d'érosion connus grâce au programme. Les taux d'érosion et de production de sédiments pendant les divers événements ou pendant une année (moyenne) doivent être récapitulés et complétés par des informations sur les coefficients d'écoulement et les concentrations en solides dissous.
- Estimation de la fiabilité des données obtenues avec examen de l'évolution des concentrations de sédiments pendant les événements, des ressemblances ou des différences entre les événements, des tendances saisonnières des processus d'érosion et de transports de sédiments et du caractère représentatif des événements survenus pendant la période de mesure par rapport aux taux à long terme. Les avantages et les limitations du programme de mesures devront être discutés dans cette section.
- Enfin, évaluation de l'intérêt que présentent les taux d'érosion et de production de sédiments mesurés en ce qui concerne les problèmes de dégradation des terres, de dégradation de la qualité de l'eau et de dégâts aux ouvrages hydrauliques.

La mise en oeuvre d'un programme de mesure de l'érosion dans une zone expérimentale nécessite l'intervention d'une équipe de spécialistes. Quelques indications concernant la composition et les tâches d'une telle équipe sont données ci-après sur la base de l'expérience acquise pendant l'exécution du projet pilote sur les trois sites de terrain.

L'équipement nécessaire sera aussi présenté brièvement, avec indication des prix.

Les estimations relatives au personnel, au temps et à l'équipement nécessaires qui figurent ci-après sont fondées sur le site expérimental type décrit au chapitre 3 et couvrent une période de trois ans, qui est considérée comme appropriée pour la sélection et l'installation de la zone d'expérimentation avec une première année de fonctionnement complet et d'acquisition, de traitement et d'exploitation des données.

Pour plus de commodité, les instruments et autres matériels nécessaires sont présentés en premier lieu; l'estimation des besoins de personnel ainsi que quelques indications sur le programme de visites sur le terrain viennent ensuite.

L'équipement nécessaire est le suivant:

- les instruments installés sur le terrain;
- l'équipement auxiliaire; et
- le laboratoire pour l'analyse des échantillons.

Les recommandations relatives au choix de la zone d'expérimentation peuvent être résumées comme suit: superficie de 20 km<sup>2</sup> au maximum, trois bassins ou plus équipés dans la même zone d'expérimentation; garantie de l'utilisation des terres à moyen-long terme; accès le plus facile possible compte tenu des objectifs; protection contre les risques naturels et le vandalisme; stabilité des lits des cours d'eau où les mesures sont effectuées.

Le matériel de terrain, qui est présenté en détail au chapitre 3, comprend les éléments suivants:

- **Ouvrage de contrôle de l'écoulement.** Canal de jaugeage ou déversoir suivant les conditions de transport de la charge de fond.
- **Enregistreur de données.** Deux pistes d'enregistrement. Autonomie minimum d'un mois avec intervalle d'enregistrement de 5 minutes. Piles alcalines d'une durée supérieure à 12 mois.
- **Limnimètre.** Dispositif électronique convertissant le niveau de l'eau en impulsions électroniques. Lisible directement par l'enregistreur. Un capteur capacitif est recommandé pour les climats semi-arides.
- **Echantillonneur de sédiments en suspension.** Il est recommandé d'utiliser simultanément deux systèmes:
  - a) un instrument à aspiration programmable déclenché par l'enregistreur de données ou un autre mécanisme lié au niveau de l'eau et capable d'envoyer des signaux à l'enregistreur pour que celui-ci note l'heure exacte de prélèvement d'échantillon; et
  - b) un échantillonneur à siphons comprenant une batterie de bouteilles disposées à des hauteurs différentes qui prélèvent des échantillons à divers niveaux à mesure que l'hydrogramme monte de façon à ne pas manquer la partie supérieure de l'hydrogramme. Les bouteilles sont placées verticalement en batterie dans le courant.
- **Stations d'enregistrement de la pluviométrie.** Au minimum, un pluviomètre par station hydrométrique. Il est recommandé d'utiliser des pluviomètres à augets basculants reliés à l'enregistreur de données avec une résolution de 0,2 mm.

L'équipement auxiliaire est indiqué au chapitre 3. L'ordinateur portable représente la majeure partie du coût total. Il doit absolument être sûr, robuste, autonome et pas trop lourd. Il est indispensable de disposer d'une housse imperméable ainsi que de câbles, de prises ou d'interfaces spécifiques pour le relier à l'enregistreur de données, et d'un logiciel pour transmettre les données à l'ordinateur.

L'équipement de laboratoire est également indiqué au chapitre 3. Au coût de cet équipement il faut ajouter les coûts de gestion des locaux et des installations et services habituels (eau, électricité, entretien) qui est normalement couvert par les frais généraux de l'organisme d'exécution.

Le personnel nécessaire pour les trois années de mise en oeuvre, dont une année de fonctionnement complet, est composé comme suit:

- **Directeur de recherche** responsable du projet. Chercheur expérimenté spécialiste des sols et de l'hydrologie de surface, chargé d'assurer la conception, la direction et l'encadrement du projet. Il/elle doit travailler à temps partiel au projet pour l'équivalent de 12 hommes/mois.
- **Assistant du directeur de recherche.** Chercheur expérimenté spécialiste des sols et/ou de l'hydrologie de surface. Il/elle assure à plein temps la partie recherche du projet et peut prendre la direction en cas de besoin. 36 hommes/mois de travail.
- **Deux chercheurs adjoints.** Chercheurs titulaires d'un doctorat ou d'un autre titre universitaire, spécialistes des sols ou de l'hydrologie. Chargés de la mise en oeuvre du projet sous l'autorité directe de l'assistant de recherche. Installation de l'équipement et des services, collecte, traitement et interprétation des données. Exploitation et entretien des installations. Analyses de laboratoire. 36 hommes/mois de travail x 2.
- **Personnel auxiliaire** (non technique). Un assistant de terrain, principalement pour l'entretien et la garde des installations, résidant de préférence dans le voisinage de la zone d'expérimentation. 12 hommes/mois de travail. Personnel de secrétariat, principalement pour la préparation des documents et l'assistance administrative. 12 hommes/mois de travail.

Le programme de visites est étroitement lié aux conditions météorologiques:

- une ou deux visites par semaine par temps pluvieux pour l'entretien des échantillonneurs;
- une visite par mois pour récupérer des données; et
- le cas échéant, visites pendant les événements hydrologiques, en particulier pour prélèvement direct d'échantillons, entretien et surveillance générale.

Les recherches sur la mesure de l'érosion peuvent être financées par diverses sources suivant le contexte du projet en cause. La première source doit naturellement être le budget de recherche au niveau national. Si un programme national de lutte contre l'érosion est mis en place conformément aux recommandations, il devrait offrir les mécanismes voulus pour fournir les fonds requis.

Les organisations internationales ou supra-nationales peuvent jouer un rôle important dans certains cas. Le programme de recherche de l'Union européenne offre des fonds importants pour les projets de recherche sur l'environnement, dont les projets de mesure de l'érosion. Ce financement est limité aux Etats membres mais l'Union a aussi établi d'autres programmes destinés aux Etats non membres. Dans ce contexte, et notamment en vue de la coopération avec les Etats méditerranéens non membres de l'Union, le Programme MEDA constitue une source potentielle importante de moyens financiers pour les projets dans divers domaines et notamment la coopération pour la protection de l'environnement (UE, 1996).

Le système des Nations Unies fournit depuis longtemps des moyens financiers aux projets de recherche appliquée dans les domaines des sciences de la terre, de l'agriculture, des ressources hydriques, de la protection de l'environnement, etc. Plusieurs institutions des Nations Unies, dont la FAO, l'UNESCO, le PNUD et le PNUE, s'intéressent à ce type de projets.

## CONCLUSIONS

---

### 1. LE PRODUIT FINAL: UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION

Le produit final du processus de cartographie et de mesure de l'érosion présenté dans ces Directives comporte:

- a) les cartes présentant les états érosifs et les processus d'érosion;
- b) les résultats de mesure;
- c) l'interprétation de ces cartes et résultats; et
- d) les propositions de gestion à l'intention des professionnels et des décideurs concernés.

Par ailleurs, des rapports concernant la phase de cartographie, la phase de mesure, l'interprétation des résultats et les propositions et recommandations seront présentés soit séparément soit comme partie intégrante du rapport final comprenant également un résumé à l'intention des décideurs.

Les paragraphes qui suivent illustrent l'approche à la présentation des documents finaux.

#### 1.1 Présentation des résultats à des fins pratiques

Le rapport doit comporter un résumé rédigé de façon compréhensible et utile pour les décideurs.

- a) Les avantages tirés du programme de cartographie et de mesure doivent être exposés. Il faut indiquer les nouvelles informations ainsi obtenues (interprétation de base des résultats de la cartographie, précipitations, ruissellement, coefficient de ruissellement, débit maximum, charges dissoutes, charges en suspension, taux d'érosion). Il faut aussi présenter une comparaison avec la précision dans l'espace et dans le temps des données obtenues dans le cadre de programmes ordinaires par les autorités responsables des terres ou des eaux.
- b) On doit étudier la signification pour l'environnement des informations obtenues en regroupant les informations disponibles avant le programme et les informations chiffrées obtenues grâce à celui-ci. Il est hautement souhaitable d'intégrer ces

informations avec celles qui ont été obtenues pendant le programme de cartographie. Il convient de souligner que ces informations sont aussi réalistes que possible, sans être catastrophiques ni trop optimistes. Bien que le projet ne vise pas à concevoir des ouvrages de lutte contre l'érosion ni des stratégies d'aménagement des terres, il faut indiquer les politiques nécessaires et formuler des recommandations générales de mise en oeuvre.

- c) L'intérêt général des informations fournies doit être dégagé. A cette fin, il faut notamment évaluer l'importance écologique des zones présentant des problèmes similaires dans d'autres régions du pays et les comparer avec d'autres zones dont les taux d'érosion sont connus. Il est également souhaitable de comparer la qualité des données fournies par le programme avec celle d'autres données. Les informations concernant les taux et les processus de transport de sédiments doivent être utilisées en même temps que les informations cartographiques pour identifier et évaluer les sources de sédiments à l'intérieur des bassins. Les stratégies d'aménagement des terres en vue de la lutte contre l'érosion doivent être orientées vers les sources et les voies de transport de sédiments pour améliorer le rapport coût/efficacité.
- d) Enfin, il faudrait formuler des recommandations sur l'utilisation à venir des résultats du programme de mesures. On pourrait, par exemple, proposer de changer l'échelle de l'étude en la réduisant (parcelles) ou en l'élargissant (bassins plus grands), de vérifier la qualité d'autres données sur les taux d'érosion, d'entreprendre des programmes analogues dans d'autres zones présentant des problèmes d'érosion ou d'utiliser les bassins déjà équipés d'instruments pour contrôler l'efficacité des ouvrages de lutte contre l'érosion ou des stratégies d'aménagement des terres.

Du point de vue pratique, la mise en oeuvre du programme de cartographie et de mesure de l'érosion décrit plus haut sous-entend que plusieurs conditions sont remplies:

- Une **action administrative coordonnée** et intégrée à divers niveaux: ministères nationaux et autorités de niveau moins élevé et local responsables et intéressés. Les décisions sectorielles doivent être préparées, discutées et approuvées de façon à assurer l'harmonisation avec les autres activités sectorielles; une information appropriée doit être fournie en temps voulu; les éléments financiers et la logistique doivent être définis et l'organisme/institution d'exécution désigné.
- L'**organisme d'exécution** doit avoir le niveau professionnel et administratif nécessaire, disposer d'équipement et la formation doit être assurée (si nécessaire).
- Le **programme de lutte contre l'érosion dans la zone** doit être formulé et approuvé, de préférence dans le cadre du programme national de lutte contre l'érosion, et s'harmoniser avec les priorités fixées au niveau national.
- Les **problèmes** éventuels d'ordre institutionnel, logistique, administratif, juridique ou autre doivent être identifiés et résolus en ce qui concerne l'aire de mesures, les visites de terrain et l'équipement à installer ou entretenir.
- La **formation du personnel** doit être organisée en temps voulu au niveau des organismes d'exécution; l'**information** et la **formation générales** doivent être organisées à d'autres niveaux en cas de besoin.
- **Éléments pratiques à inscrire au programme:** harmonisation et corrélation des mesures de terrain avec les travaux de cartographie; interprétation des résultats obtenus; formulation de propositions de mesures d'atténuation, de lutte ou de prévention à mettre en oeuvre dans le cadre du programme de lutte contre l'érosion; interprétation des résultats et mesures proposées au niveau de la gestion intégrée des zones côtières afin d'assurer l'intégration à l'intérieur du secteur puis l'intégration multisectorielle.
- **Equipe d'exécution:** la composition, l'organisation du travail et les tâches de l'équipe d'exécution sont exposées dans les chapitres y relatifs des Parties I et II.

## 2. RECOMMANDATIONS ET ACTIONS PROPOSEES AUX RESPONSABLES

L'érosion découle essentiellement de la mauvaise utilisation des terres, de la surexploitation des ressources naturelles, de l'intensification de l'agriculture, du développement anarchique du tourisme, des communications, de l'urbanisation, etc. Les zones côtières de la Méditerranée ont connu un énorme développement au cours des dernières décennies au détriment des régions intérieures où la population et les activités humaines ont au contraire diminué. Les plans-cadres de développement intégré sont souvent inexistant, incomplets ou périmés parce qu'ils sont dépassés par l'évolution réelle de la région. Les responsables n'ont pas eu la volonté politique d'interrompre ou au moins de freiner ce développement créateur de richesses.

Afin de prévenir la dégradation à venir due à l'érosion incontrôlée et d'atténuer les problèmes d'érosion existants déjà, chaque gouvernement devrait, pour commencer:

- établir un inventaire des ressources des terres (climat, sol, eau, biotes), en rassemblant les données fragmentaires disponibles et en comblant les lacunes au moyen de relevés et de télédétection associés aux systèmes d'information géographique;
- évaluer le potentiel et les difficultés des projets de développement locaux couvrant tous les sous-secteurs que les zones côtières de la Méditerranée offrent généralement: agriculture, industrie, communications, urbanisation, tourisme (terrains de sport, hôtels, campings, sports aquatiques, etc.) et les pratiques de conservation, et identifier les options propres à accroître la productivité des terres et à réduire les risques tout en diminuant la dégradation;
- étudier les raisons profondes qui expliquent la mauvaise utilisation des terres, notamment les problèmes de régime foncier, les prix des produits et des intrants agricoles, les subventions, les impôts, les lois et les coutumes sociales; et
- préparer des innovations progressives pour mettre en place une bonne gestion des terres et encourager les agents et agriculteurs à adopter au niveau individuel des formes durables d'utilisation et de mise en valeur des terres.

Ces premières études contribueront à identifier des stratégies en vue d'un programme de lutte contre l'érosion et de conservation des terres;

elles aideront aussi les autorités nationales et locales à éviter les mesures qui traitent les symptômes plutôt que les causes et à encourager la prise de conscience et la participation de tous les utilisateurs des terres. Dans le passé, les projets de conservation et de remise en état des terres ont souvent reposé largement sur la construction d'ouvrages matériels. Or, ces stratégies ont un coût élevé par unité de superficie conservée ou restaurée et l'entretien pose souvent des problèmes après le retrait du personnel et de l'équipement de soutien. En outre, il est difficile d'appliquer ces stratégies assez largement ou assez rapidement pour résoudre des problèmes d'érosion de grande ampleur. En conséquence, le programme idéal de lutte contre l'érosion est celui qui permet aux utilisateurs des terres d'élaborer et de mettre en oeuvre eux-mêmes des solutions. A cette fin, les pouvoirs publics devraient faire mieux prendre conscience aux utilisateurs des terres des possibilités de lutte contre l'érosion et d'amélioration des terres lorsqu'ils s'occupent des problèmes de dégradation. Pour ce faire, ils devraient avoir recours aux médias et former le personnel technique pour qu'il aide les utilisateurs à adopter cette nouvelle démarche.

### 2.1 Mise au point de stratégies

Chaque pays doit mettre au point des politiques et des stratégies adaptées aux conditions locales. Sous la direction d'une commission consultative de haut niveau comprenant des spécialistes de l'érosion, des planificateurs de l'utilisation des terres et des représentants des pouvoirs politiques, un service ministériel bien défini doit avoir la responsabilité et le pouvoir général de:

- renforcer les services destinés aux utilisateurs des terres en rationalisant et renforçant les institutions et en assurant une formation, des recherches et une législation appropriées à l'appui de la conservation;
- évaluer les composantes de conservation des programmes de développement régional, les informations politiques, sociales et économiques étant utilisées pour formuler une politique et des stratégies de lutte contre l'érosion et de conservation à long terme;
- établir des programmes détaillés, des plans cheniilles de 3 à 5 ans environ qui doivent être réexaminés et mis à jour une fois par an;
- promouvoir des programmes locaux répondant aux besoins présents.

### 2.2 Rôle de catalyseur des programmes régionaux

Les programmes régionaux donnent à chaque pays la possibilité de tirer profit des succès obtenus par d'autres en matière de lutte contre l'érosion et de conservation des terres:

- les besoins globaux de formation doivent être évalués de façon à ce que des cours multidisciplinaires appropriés soient organisés dans les universités et instituts spécialisés régionaux les plus importants;
- les recherches étant coûteuses, il est souvent souhaitable de regrouper les activités lorsque les conditions sont analogues et les priorités bien identifiées;
- les résultats de recherche peuvent être diffusés au moyen de réseaux et de bulletins d'information simples.

### 2.3 Coordination des actions internationales

Afin de lutter contre l'érosion ou de la prévenir avant qu'elle ne devienne chronique, de nombreux pays ont besoin du concours d'organismes techniques.

- Les gouvernements devraient s'engager à entreprendre les politiques et programmes à long terme et à fournir les moyens financiers propres à favoriser des formes durables d'utilisation des terres.
- Les organisations techniques devraient aider à formuler des programmes d'ensemble. Elles pourraient ainsi déterminer où et comment leurs contributions peuvent être utilisées au mieux et articuler ces contributions dans un plan d'action national global.



## ANNEXE I:

# ROLE DES PROGRAMMES D'EVALUATION DE L'EROSION DANS LE CADRE DE LA GESTION INTEGREE DES ZONES COTIERES

---

### 1.1 Gestion intégrée des zones côtières – outil principal de développement durable et de protection de l'environnement dans les zones côtières

La zone côtière peut être définie comme un ensemble naturel consistant en terres côtières, frange littorale, ligne de rivage et espace marin correspondant. Ces zones sont généralement caractérisées par des processus physiques, biologiques, sociaux, culturels et économiques plus intensifs, et par leurs interactions. Les changements d'un élément quelconque d'un système produisent très souvent des impacts dans d'autres éléments, parfois très éloignés.

Du fait de leur caractère spécifique et de leurs ressources riches et diversifiées, les zones côtières offrent toutes les garanties et conditions requises à la croissance économique et au développement socioculturel, ce qui a attiré les populations tout au long de l'histoire. Dans un passé récent, cela a engendré un développement rapide, très souvent incontrôlé, une forte croissance des populations côtières, et l'exploitation non durable et la dégradation de nombreuses ressources vitales. La conséquence en a été une détérioration dramatique de l'environnement et de la qualité de vie. Dans de nombreuses zones côtières, les pressions croissantes sur les écosystèmes, associées à une forte pollution, ont provoqué une rupture d'équilibre irréversible des écosystèmes les plus fragiles.

Le souci grandissant au sujet des conséquences ultimes de telles tendances a abouti à la formulation, dès les années 80, du concept de développement durable, et plus récemment, à l'adoption des documents de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED), tenue à Rio, en 1992. Un de ces documents, l'"Agenda 21", définit les principes, les objectifs et les activités à mettre en oeuvre par les différents pays dans le but d'assurer un développement durable. Son chapitre 17 traite des zones côtières et, pour le moment, constitue le plus important document international relatif à la gestion intégrée de ces zones.

Il existe plusieurs définitions du développement durable. Nous citerons ici la définition originale de Brundtland telle qu'elle a récemment été amendée par le PAM-Plan Bleu (UNEP/MAP-Blue Plan, 1995):

*"Le développement durable est un développement respectueux de l'environnement, techniquement approprié, économiquement viable et socialement acceptable, visant à répondre aux besoins du présent sans pourtant compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs."*

Pour ce qui est des zones côtières, le même souci se reflète dès le début des années 70 dans le développement du concept et des premiers instruments de gestion intégrée. Lancée aux Etats-Unis, la gestion intégrée des zones côtières s'est graduellement développée et a trouvé une application dans de nombreuses zones et états côtiers à travers le monde. Dans le cadre du PAM, ce sont le PAP et le Plan Bleu qui réalisent les activités relevant de ce domaine depuis le début des années 80. La FAO est également impliquée dans de nombreux projets et activités dans ce domaine.

Le gestion intégrée des zones côtières est un processus continu, proactif et flexible de gestion des ressources, visant à assurer un développement durable. Elle est centrée sur:

- le renforcement de la gestion sectorielle et de l'intégration;
- la préservation et la protection de la productivité et de la biodiversité des écosystèmes côtiers; et
- la promotion d'un développement durable et d'une utilisation rationnelle des ressources côtières.

Fondée sur l'intégration d'activités et de décisions plurisectorielles et à différentes échelles, la gestion intégrée des zones côtières ne prétend pas se substituer à la planification sectorielle, mais elle intègre les plans sectoriels pour atteindre des objectifs plus globaux, tels que:

Contributions sectorielles	Etapes	Phases	Activités	Résultats	Décisions politiques
Facteurs déclenchants: décisions prises dans le passé, décisions récentes, influences de l'extérieur	<b>DEMARRAGE</b>	DEMARRAGE DE LA GESTION INTEGREE	Analyse des conditions préalables à la gestion intégrée. Limites provisoires de la région. Elaboration d'une proposition concernant le démarrage de la gestion intégrée.	Proposition concernant la phase préparatoire de la gestion intégrée	Démarrer le processus
Identification des problèmes sectoriels	<b>PLANIFICATION</b>	ACTIONS PREPARATOIRES	Définition de la région littorale. Identification des problèmes sectoriels et transsectoriels. Proposition d'objectifs généraux. Elaboration des scénarios environnement-développement et stratégie provisoire. Identification des lacunes en matière d'informations. Définition des exigences réglementaires, financières et institutionnelles pour la gestion intégrée. Proposition concernant la procédure d'élaboration du Plan directeur intégré du littoral.	Diagnostic du littoral. Programme de gestion intégrée de la région littorale	Etablir la gestion intégrée en tant que processus continu et à long terme
Analyses sectorielles et prévisions		ANALYSES ET PREVISIONS	Nouvelles enquêtes centrées sur des questions particulières (génération de données manquantes). Analyse des systèmes naturels et socio-économiques. Prévision de la demande future. Elaboration de scénarios transsectoriels et choix du scénario à retenir.	Scénarios alternatifs	
Définition des objectifs sectoriels		DEFINITION DES BUTS ET DES STRATEGIES	Proposition concernant les objectifs sectoriels et transsectoriels. Elaboration de stratégies alternatives, comprenant les incidences réglementaires, financières et institutionnelles. Evaluation et choix de la stratégie à retenir.	Stratégie de gestion	Approuver les objectifs et les stratégies
Plans sectoriels		INTEGRATION DES PLANS DE DETAIL	Allocation des usages de la terre et de la mer. Proposition concernant les procédures de mise en oeuvre (réglementaires, institutionnelles, financières) et les instruments réglementaires d'évaluation et d'analyse. Définition des étapes de mise en oeuvre. Projet de Plan directeur intégré du littoral soumis aux autorités concernés pour approbation.	Plan directeur intégré du littoral	Adoption du Plan directeur littoral et des politiques associées
Plans et politiques sectoriels	<b>EXECUTION</b>	MISE EN OEUVRE DES PLANS	Phasage des propositions et politiques. Application d'instruments économiques, réglementaires et d'évaluation de l'environnement pour le suivi du développement. Adaptation des institutions à la gestion intégrée.	Etude d'impact sur l'environnement. Analyse coûts-bénéfices	Approbation des instruments de mise en oeuvre utilisés pour suivre le développement
Suivi sectoriel		SUIVI ET EVALUATION	Réarticulation des problèmes transsectoriels. Identification des instruments inadéquats.	Etude d'évaluation	Réactivation de la gestion intégrée

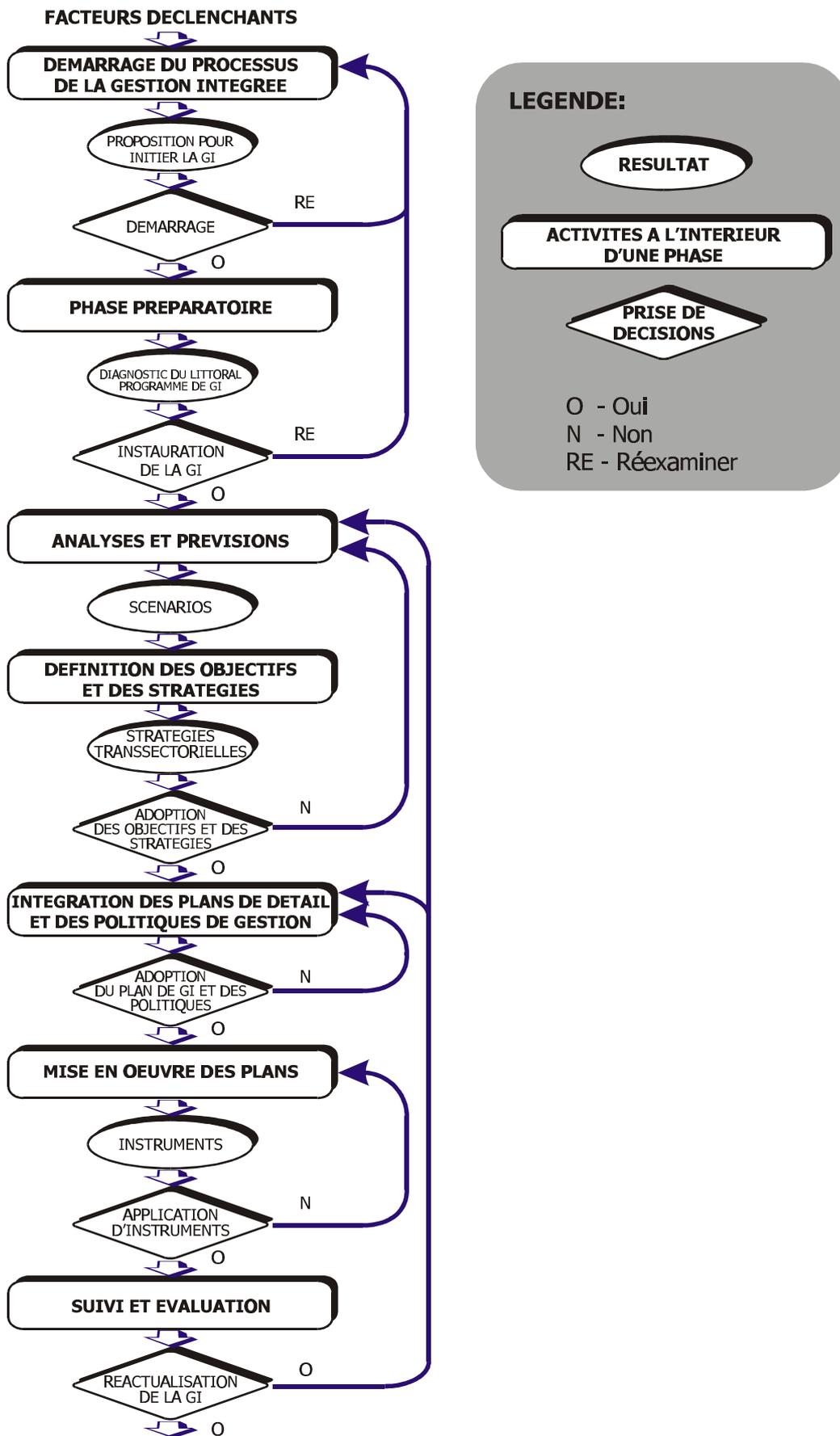


Figure A-1: Organigramme concernant la gestion intégrée des zones côtières (source: PNUE, 1995)

- la définition des modalités et du niveau d'utilisation durable des ressources;
- le renouvellement ou la réhabilitation des ressources dégradées;
- la sécurité que la consommation des ressources n'altère pas le potentiel de renouvellement;
- la réduction des risques auxquels sont exposées les ressources vulnérables;
- le respect des processus naturels dynamiques, en prévenant les interférences négatives; et
- la protection de l'exploitation traditionnelle des ressources.

La gestion intégrée des zones côtières est un processus à long terme et récurrent, se déroulant en trois phases principales:

- démarrage;
- planification; et
- exécution.

La **phase de planification** englobe les étapes suivantes:

- actions préparatoires;
- analyses et prévisions;
- définition des objectifs et des stratégies, et intégration des plans de détail.

La **phase d'exécution** englobe:

- la mise en oeuvre des plans;
- le suivi; et
- l'évaluation.

Chaque phase/étape de la gestion intégrée des zones côtières est définie par une séquence d'activités, résultats, décisions et feed-backs. Les étapes et les phases de la gestion intégrée des zones côtières selon le PNUE/PAP sont présentées dans le tableau A-1 et la figure A-1.

## 1.2 Cartographie et mesure des processus d'érosion – leur rôle dans la gestion intégrée

La cartographie et la mesure des phénomènes d'érosion fournissent les bases de l'évaluation des causes, de l'état actuel, de l'intensité et des tendances de l'érosion. Les impacts de l'érosion sur les ressources côtières, les activités économiques (particulièrement l'agriculture), l'environnement et la pollution, ainsi que leurs conséquences sociales, revêtent une importance primordiale dans de nombreuses zones côtières méditerranéennes. En conséquence, l'évaluation de l'érosion fait partie intégrante de l'exercice

diagnostic de base dans le processus de gestion intégrée des zones côtières. Les cartes des zones affectées par l'érosion, établies sur la base de la méthodologie commune consolidée, représentent dans de nombreux cas un intrant indispensable à la phase cartographique de la gestion intégrée des zones côtières, particulièrement au SIG, lorsqu'il est appliqué. Par ailleurs, les programmes de gestion intégrée des zones côtières concernent le plus souvent de larges espaces côtiers et sont, dans bon nombre de cas, fondés sur la coopération régionale ou multinationale. Il en ressort que l'application de la méthodologie commune consolidée doit être considérée non seulement comme un avantage, mais comme une obligation. Même dans les cas où l'analyse des informations disponibles effectuée dans la phase initiale de la gestion intégrée d'une zone côtière indique l'absence d'impacts significatifs causés par l'érosion, l'identification et la cartographie des sites d'érosion potentielle est indispensable. Lorsqu'il s'agit de processus d'érosion sévère, l'application de la méthodologie commune consolidée est nécessaire pour les mêmes raisons (coopération, évaluation comparative, utilisation du SIG ou d'autres techniques de superposition cartographique). La démarche cartographique peut être menée à terme dans un temps raisonnable, de sorte qu'elle n'affecte pas l'échéancier général d'un programme ou d'un projet de gestion intégrée des zones côtières.

Aussi bien la cartographie que la mesure nécessitent une interprétation adéquate pour les besoins de la gestion intégrée des zones côtières, englobant des recommandations relatives aux mesures de contrôle de l'érosion, qui constituent un apport valable à la phase de planification du processus de gestion intégrée. S'agissant de cette dernière, les éléments les plus importants à interpréter concernent le plus souvent les impacts suivants:

- les **impacts primaires**: dégradation des terres, perte en sols productifs, transport de sédiments, dégradation du paysage;
- les **impacts secondaires**: perte de productivité, déclin des activités connexes (cultures méditerranéennes, élevage du bétail), dépôts de matériel érodé (cours d'eau, barrages), changements dans la charge solide du cours d'eau et l'équilibre naturel le long du littoral, pollution de l'eau douce et des eaux côtières;
- les **impacts tertiaires**: changements du régime des précipitations, biodiversité menacée, impacts sociaux (pauvreté, migrations), impacts économiques (durée de vie et valeur écono-

mique des barrages, impacts sur le tourisme par les plages érodées ou polluées).

Les impacts précités (existants ou potentiels) sur l'utilisation rationnelle des ressources et le schéma de gestion côtière doivent être examinés avec soin et interprétés au cours de l'analyse des

résultats des activités de cartographie et de mesure de l'érosion.

Le tableau A-2 montre le rôle et la place des activités de lutte anti-érosive dans le cadre des différentes phases et étapes de la gestion intégrée des zones côtières, expliquées dans le chapitre 1.1 de cet Annexe.

GESTION INTEGREE DES ZONES COTIERES		ACTIVITES DE LUTTE ANTI-EROSIVE
Etape	Phase	
Démarrage	-	Analyse des conditions préalables et des exigences relatives aux activités de lutte anti-érosive.
Planification	Préparatoire	Identification des problèmes, évaluation des données et renseignements, et des capacités humaines et institutionnelles. Evaluation rapide des zones affectées ou qui risquent d'être affectées. Formation à la cartographie, fondée sur la méthodologie commune. Cartographie. Démarrage des travaux de mesure, le cas échéant.
	Analyses et prévisions	Conclusion de la cartographie. Analyse des informations recueillies, y compris les cartes. Prévision des conséquences de l'érosion. Développement d'alternatives de scénarios de lutte anti-érosive. Sélection du scénario approprié. Etude d'éventuelles restructurations légales et/ou institutionnelles.
	Objectifs et stratégies	Définition des objectifs de la lutte anti-érosive, et développement de la stratégie la plus appropriée. Développement des structures de gestion. Clôture des travaux de mesure, mise à jour de la stratégie retenue, le cas échéant. Développement d'un programme de lutte anti-érosive.
	Intégration des plans de détail	Intégration des programme de lutte anti-érosive dans le plan de gestion intégrée des zones côtières. Mesures pour une mise en oeuvre harmonisée, intégrée.
Exécution	Mise en oeuvre	Mise en oeuvre des plans de lutte anti-érosive dans le cadre du plan de gestion intégrée des zones côtières.
	Suivi	Suivi et mesure sur le terrain, selon les besoins. Redéfinition éventuelle du plan de lutte anti-érosive. Feed-back et mise à jour des activités de lutte anti-érosive.

**Tableau A-2: Rôle des activités de lutte anti-érosive dans le cadre de la gestion intégrée des zones côtières**

## ANNEXE II: GLOSSAIRE DE TERMES TECHNIQUES

---

**Bassin de décantation (ou de tranquillisation)** (A.: *Stilling pond*; E.: *Tanque de decantación*): Bassin relié à un cours d'eau de manière à permettre de mesurer la sédimentation dans une eau relativement calme.

**Bassin versant** (A.: *Catchment or watershed*; E.: *Cuenca*): Aire déterminée par la topographie à l'intérieur de laquelle les précipitations contribuent à l'écoulement à un point particulier qui est à l'étude.

**Canal d'essai** (A.: *Flume*; E.: *Canaleta*): Canal artificiel ayant une forme et des dimensions bien spécifiées qui peut servir à mesurer l'écoulement.

**Charriage de fond** (A.: *Bed load*; E.: *Carga de fondo*): Sédiments grossiers transportés sur le lit d'un cours d'eau.

**Charge solide** (A.: *Load*; E.: *Carga sólida*): Poids de solides secs transportés par un moyen quelconque sous l'effet de la gravité, de l'eau ou du vent.

**Charge soluble** (A.: *Dissolved load*; E.: *Carga soluble*): Sédiments transportés en dissolution.

**Concentration en sédiments** (A.: *Sediment concentration*; E.: *Concentración de sedimentos*): Quantité de sédiments présents dans une unité de volume d'eau. Le symbole le plus utilisé est Cs. La concentration est généralement exprimée en kg/m<sup>3</sup>.

**Cours d'eau intermittent** (A.: *Ephemeral stream*; E.: *Curso de aqua intermitente*): Cours d'eau asséché pendant la saison sèche ou les années particulièrement sèches.

**Cours d'eau pérenne** (A.: *Perennial stream*; E.: *Curso de aqua permanente*): Cours d'eau coulant pendant toute l'année.

**Couvert végétal** (A.: *Vegetation cover*; E.: *Cobertura vegetal*): Ensemble des espèces végétales couvrant le sol.

**Débit solide** (A.: *Sediment or solid discharge*; E.: *Acarreo sólido*): Quantité de sédiments mesurée en poids de matière sèche par unité de temps transportée dans une section d'un cours d'eau. On obtient cette quantité en multipliant le taux de concentration de sédiments par le débit (liquide) du cours d'eau.

**Encroûtement** (A.: *Soil crusting*; E.: *Sellado del suelo*): Processus de compactation et de cimentation des particules fines de la couche superficielle d'un sol, enlevées et accumulées par l'érosion pluviale et laminaire et pouvant aboutir à l'obstruction totale des pores du sol.

**Engorgement** (A.: *Waterlogging*; E.: *Anegamiento*): Etat d'une terre où la nappe phréatique se trouve à la surface du sol ou près de cette surface et peut gêner la croissance des végétaux.

**Enregistreur électronique de données** (A.: *Data logger*; E.: *Registrador electrónico*): Instrument électronique conçu pour lire et emmagasiner des informations comme les précipitations et le niveau de l'eau. Sa mémoire assure un mois d'autonomie avec enregistrement à intervalles de 5 minutes. L'instrument peut être directement interrogé par un ordinateur portable.

**Erodibilité** (A.: *Erodibility*; E.: *Erodibilidad*): Susceptibilité à l'érosion, prédisposition à l'érosion. Le sable est en général plus érodible que le limon, et le limon plus que l'argile; aucune méthode d'évaluation de l'érodibilité des sols totalement satisfaisante n'a encore été mise au point. L'érodibilité d'un sol peut changer en fonction de ses conditions physiques (humidité, gel, labour ou tassement récents). Les particules angulaires du sol s'imbriquent mieux que les particules arrondies; les colloïdes des sols cimentent les particules; la compactation augmente la surface de contact totale entre les particules. (Hewlett, 1982).

La **carte d'érodibilité** tirée de la méthodologie commune de cartographie élaborée pour la Méditerranée, exprime le même concept pratique en combinant l'érodibilité qualitative d'un sol avec le facteur de pente pour évaluer la susceptibilité totale d'une terre à l'érosion.

**Erosion** (A.: *Erosion*; E.: *Erosión*): La dégradation de la terre par l'eau qui s'écoule, la pluie, le vent, la glace ou autres agents externes, y compris les processus tels que l'ablation, le transport en suspension, le charriage ou les mouvements de masse. (SCS-New South Wales, 1986).

**Erosion concentrée (ravinement)** (A.: *Gully erosion*; E.: *Erosión en cárcavas*): Ablation du sol

due à la formation de chenaux ou ravins relativement larges, profondément entaillés par le ruissellement de surface linéaire concentré. A la différence des rigoles, les ravins sont trop profonds pour être colmatés par des pratiques culturales ordinaires. (U.S. Soil Conservation Service, 1951).

**Erosion en nappe/laminaire** (A.: *Sheet erosion*; S.: *Erosión laminar*): Décapage uniforme de la couche superficielle du sol par le ruissellement laminaire ou le vent. (Soil Conservation Society of America, 1970).

**Erosion en rigoles** (A.: *Rill erosion*; E.: *Erosión en regueros*): Erosion du sol due à l'entaille de nombreux ruisselets et petits chenaux, causée par le ruissellement concentré de surface. Les traces de l'érosion en rigoles peuvent être effacées par les pratiques culturales ordinaires. (U.S. Soil Conservation Service, 1951).

**Erosion pluviale/aréolaire** (A.: *Splash/raindrop erosion*; E.: *Erosión pluvial*): Eclaboussement et dispersion des particules du sol causé par l'impact des gouttes de pluie sur le sol. Les particules redéposées peuvent ou non être ensuite évacuées par le ruissellement; l'érosion pluviale est une composante importante de l'érosion laminaire.

**Erosion potentielle** (A.: *Erosion risk*; E.: *Riesgo de erosión*): Degré de probabilité du déclenchement d'un processus d'érosion et de son développement comme résultat des changements d'un seul ou de plusieurs facteurs conditionnant l'érosion. Alors que le climat, les sols et la topographie sont assez stables, le couvert végétal, l'occupation du sol et la gestion sont plus dynamiques. Le concept d'érosion potentielle est équivalent à celui de RISQUE d'érosion. (Giordano, 1991).

**Erosivité** (A.: *Erosivity*; E.: *Erosividad*): Capacité potentielle des agents physiques dynamiques, tels que l'eau, le vent ou la glace, de déclencher l'érosion. La pluie est plus érosive que le ruissellement de surface. La taille des gouttes, la vitesse et l'intensité de la pluie sont des caractéristiques étroitement liées qui déterminent l'érosivité de la pluie. (Hewlett, 1982).

**Etalonnage** (A.: *Calibration syn rating*; E.: *Calibración*): Détermination expérimentale du rapport existant entre la quantité à mesurer et l'indication de l'instrument, du dispositif ou du processus qui la mesure.

**Etat érosif** (A.: *Erosion status*; E.: *Estado erosivo*): Evaluation de l'érosion actuelle et/ou potentielle mise en rapport avec les caractéristiques environnementales locales, telles la topographie, la géologie et les sols, le couvert végétal et l'utilisation actuelle des terres. Les précipitations

et les autres caractéristiques climatiques ne sont pas prises en compte.

**Glissement de terrain** (A.: *Landslide*; E.: *Deslizamiento de terreno*): Mouvement d'une masse de terre le long d'une pente, où une masse de sol ou de substrat glisse le long d'un plan de contact appelé surface de glissement.

**Lave torrentielle** (A.: *Mudflow*; E.: *Lava torrencial*): Fluide boueux, composé d'eau et d'une concentration très élevée de sédiments et de matériel détritique, le plus souvent déclenché par des mouvements de masse tels les glissements de terrain dans les sections en amont du bassin versant.

**Ligne de partage des eaux** (A.: *Water divide line*; E.: *Divisoria de aguas*): Ligne constituée des points les plus élevés d'un relief et à partir de laquelle les eaux de surface s'écoulent en sens opposé.

**Lithofaciès** (A.: *Lithofacies*; E.: *Litofacies*): Terme utilisé pour décrire les caractéristiques physiques, mécaniques et organiques des conditions locales d'un sol ou d'un sous-sol.

**Milieux exploités** (A.: *Managed area*; E.: *Medios intervenidos*): Espaces de terre faisant l'objet d'une ou plusieurs interventions humaines liées à l'utilisation de la terre et de ses ressources, ou ayant des impacts sur elles.

**Milieux instables** (A.: *Unstable area*; E.: *Medios inestables*): Espaces de terre affectés par un ou plusieurs processus d'érosion active.

**Milieux stables** (A.: *Stable area*; E.: *Medios estables*): Espaces de terre libres de tout indice ou évidence de processus d'érosion active du fait de l'effet stabilisateur d'un ou plusieurs paramètres physiques du paysage assurant ainsi un équilibre morphodynamique plus au moins permanent.

**Morphologie** (A.: *Morphology*; E.: *Morfología*): Caractéristiques d'un bassin de drainage, à savoir superficie, profil longitudinal des cours d'eau, topographie, etc.

**Mouvements de masse** (A.: *Mass earth movements*; E.: *Movimientos en masa*): Type d'érosion dont les principaux facteurs causaux sont la saturation en eau et la gravité. Les pluies fortes et/ou prolongées sont habituellement des facteurs déclenchants. Les glissements de terrain, les laves torrentielles, les chutes de pierres, la reptation et la solifluction sont des mouvements de masse.

**"Pieds-de-vaches"** (A.: *Terracetting*; E.: *Pisoteo*): Entrelacs caractéristiques formés de nombreuses banquettes légèrement inclinées ou de replats traversant une pente. Ils sont apparemment

causés par l'action combinée du glissement du sol et du piétinement.

**Pourcentage de sédiments capturés** (A.: *Trap efficiency*; E.: *Porcentaje de sedimentos retenidos*): Aptitude d'un réservoir à piéger et retenir les sédiments, exprimée en pourcentage du volume de sédiments qui est effectivement retenu dans le réservoir.

**Pourcentage de sédiments transportés** (A.: *Sediment delivery ratio*; E.: *Porcentaje de acarreo*): Volume de sédiments transportés par un cours d'eau dans une section particulière, exprimé en pourcentage du volume total de matériaux d'érosion en mouvement à l'intérieur d'un bassin versant.

**Récurrence, intervalle de ~** (A.: *Recurrence, ~ interval*; E.: *Recurrencia, intervalo de ~*): Intervalle de temps moyen séparant les apparitions effectives d'un événement hydrologique d'une ampleur égale ou supérieure à une ampleur déterminée.

**Réseau de drainage** (A.: *Drainage network*; E.: *Red de drenaje*): Ensemble de cours d'eau ou de canaux naturels ou artificiels à l'intérieur du bassin.

**Sédimentation** (A.: *Sediment siltation*; E.: *Sedimentación*): Dépôt de sédiments par l'eau. Ce terme concerne techniquement le dépôt de particules de limon mais il est habituellement appliqué aux dépôts de sédiments en général.

**Sédiments en suspension** (A.: *Suspended load*; E.: *Sedimentos en suspensión*): Volume total de sédiments se déplaçant dans l'eau comprenant les sédiments en suspension et la charge de fond.

**Seuil** (A.: *Weir*; E.: *Vertedero*): Ouvrage de trop-plein qui peut servir à réguler le niveau de l'eau en amont et/ou à mesurer le débit.

**Simulateur de pluie** (A.: *Rainfall simulator*; E.: *Simulador de lluvia*): Dispositif conçu pour appliquer l'eau sous une forme et avec un débit comparables aux précipitations.

**Téléphérique** (A.: *Cableway*; E.: *Teleférico de aforro*): Câble tendu au-dessus d'un cours d'eau de façon à le traverser auquel est suspendu un débitomètre ou un autre dispositif de mesure ou d'échantillonnage qui est déplacé d'une berge à l'autre à des profondeurs déterminées au-dessous du niveau de l'eau. Le dispositif peut être manipulé de la berge ou par des opérateurs portant le câble.

**Tendance évolutive de l'érosion** (A.: *Erosion trend*; E.: *Tendencia de erosión*): Tendance prévisible du développement ou de la stabilisation d'un processus d'érosion dans sa nature, son intensité et/ou son expansion spatiale.

**Thalweg** (A.: *Thalweg*; E.: *Talweg/Vahuada*): Terme fréquemment utilisé pour désigner le profil longitudinal d'un fleuve, notamment de la source à l'embouchure suivant la ligne des points les plus bas d'une vallée.

**Torrentiel** (A.: *Torrential*; E.: *Torrencial*): Ecoulement d'un cours d'eau à forte pente présentant une grande vitesse et une forte turbulence.

**Transport en suspension** (A.: *Wash load*; E.: *Transporte en suspensión*): Sédiments à grains fins transportés par l'eau entièrement en suspension.

**Transport solide par saltation** (A.: *Saltation load*; E.: *Transporte por saltación*): Sédiments transportés tantôt en suspension, tantôt au fond.

**Tronçon** (A.: *Reach*; E.: *Tramo*): Section longue et rectiligne d'un cours d'eau dans laquelle les éléments hydrauliques restent assez uniformes.

**Turbidité** (A.: *Turbidity*; E.: *Turbidez*): Présence d'un matériau visible fin en suspension dans un liquide qui n'est pas d'une taille suffisante pour apparaître sous forme de particules individuelles visibles mais fait obstacle au passage de la lumière dans le liquide.

## Bibliographie

Soil Conservation Service, New South Wales, 1986: *Glossary of terms used in Soil Conservation*

*Chambers Science and Technology Dictionary*, Editor T.C. Collocott, MA, 1984.

Soil Conservation Society of America, 1970: *Resource Conservation Glossary*. Journal of Soil and Water Conservation No. 25 (supplement).

U.S. Soil Conservation Service 1951: *Soil Survey Manual*. USDA Washington D.C.

Hewlett, J.D., 1982: *Principles of Forest Hydrology*. University of Georgia Press. Athens, Georgia.

Giordano, A. and Marchisio C., 1991: *Analysis and Correlation of the existing Soil Erosion Maps in the Mediterranean Basin*. Quaderni di Scienza del Suolo, Vol III, Firenze.

Griesbach, J.C., 1980: *Vocabulario Básico de las Ciencias de la Tierra*, TRANARG, CA, Caracas, Venezuela.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Arnouldous, H.M.J.: *Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco*. FAO Soils Bulletin no. 34. FAO, Rome, 1977.
- Bos, M.G. (Ed.): *Discharge measurement structures*. Int. Inst. for Land Reclamation and Improvement. P.O. Box 45, 6700AA Wageningen, Netherlands pub. no 20, 1976. 464 p.
- Boughrara, A.: *Mesure de l'érosion dans le bassin versant de l'oued El Khairat et ses deux sous-bassins: oued El Maleh et oued Eddhieb*. Rapport final. Agence Nationale de Protection de l'Environnement, Direction des sols, PNUE, PAM PAP. Tunis, 1994. 65pp + annexes.
- Brakensiek, D.L., Osborn, H.B. & Rawls, W.J. (Coord.): *Field manual for research in agricultural hydrology*. Agriculture Handbook n° 224, U.S.D.A., 1979. 550 pp.
- CEMAGREF: *Les bassins versants expérimentaux de Draix*. Grenoble, 1988.
- Clark, J.: *Integrated Management of Coastal Zones*. FAO Technical Fisheries Paper 327. FAO, Rome, Italy, 1992.
- Crickmore, M.J., Tazioli, G.S., Appleby, P.G., Oldfield, F.: *The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems*. Technical Documents in Hydrology. Unesco, Paris, 1990.
- Dogan O., Sevinç, N.: *Measurement of rainfall-induced erosion processes in Mediterranean coastal areas: The Turkish Case Study*. General Directorate of Rural Services, UNEP MAP PAP. Ankara, 1995. 73 pp.
- EC: *Soil erosion risk and important land resources in the southern EC countries*. DG XI, EC 1989 CORINE Programme.
- European Commission: *Desertification in a European context: Physical and socio-economic aspects*. Proceedings of the European School of Climatology and Natural Hazards, Final report, EUR 15415EN, 1995.
- FAO-UNEP-UNESCO: *A provisional methodology for soil degradation assessment*. FAO, Rome, 1980.
- FAO: *Arid zone hydrology for agricultural development*. FAO Irrigation & Drainage Paper No. 37. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1981.
- Gavrilovi, S.: *Prora un srednje godišnje koli ine nanosa prema potencijalu erozije*. Glasnik Šumarskog fakulteta br. 26. Beograd, 1962.
- Gazzolo, T., Bassi, G.: *Carta delle isolinee di ugual erosione in Italia*. In: Contributo allo studio del grado di erodibilità dei terreni costituenti i bacini montani dei corsi d'acqua italiani. Memorie e studi idrografici – Ministero di LL.PP. Servizio idrografico – Publ. no. 2 – vol IV. 1966.
- Giordano, A., Marchisio, C.: *Analyse et corrélation des cartes existantes d'érosion du sol dans les zones côtières méditerranéennes*. PAP, Malaga, Espagne. 1989.
- Giordano, A., Marchisio, C.: *Analysis and Correlation of Soil Erosion Maps in the Mediterranean Basin*. Quaderni di Scienza del Suolo No. 4 CNR. Firenze, 1992.
- Gregory, K.H. & Walling, D.E.: *Drainage basin form and processes*. Edward Arnold, London, 1973. 458 pp.
- Grenon, M., Batisse, M. (eds): *The Blue Plan. Futures for the Mediterranean Basin*. Oxford University Press. Oxford, UK, 1989.
- Hadley, R.F. & Walling, D.E. (Edrs.): *Erosion and sediment yield: some methods of measurement and modelling*. Geobooks, Norwich, 1984. 218 pp.
- Hewlett, J.D.: *Principles of forest hydrology*. University of Georgia Press. Athens, Georgia, 1982. 178p.
- Hudson, N.W.: *Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface*. Bulletin pédologique de la FAO n°67, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, 1991.
- ICONA: *Paisajes erosivos en el Sureste Espanol*. Projecto Lucdeme. Monografias 26. Instituto Nacional para la Conservacion de la Naturaleza. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion. Madrid, 1982.

- Lahlou, A.: *The silting-up of Moroccan dams*. 1<sup>st</sup> International Congress of Geohydrology "Antropization and degradation of the physical environment". Florence, Italy, 2-6 December 1987. CNR Gruppo Naz. per la Difesa delle Catastrofi Idrogeologiche. Pubbl. Nx129. Florence, 1987.
- Lal, R.: *Preface*. in: R. Lal (Ed.), *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa: xi-xiii. 1988.
- Lazarevi, R.: *Novi postupak za odredivanje koeficijenta erozije (z)*. Erozijski br. 13. Beograd, 1985.
- Lean, G.: *Down to earth. A simplified guide to the Convention to combat desertification*. The Centre for our common future, Geneva, 1995. 32pp.
- Michaelides, P.: *Rainfall induced soil erosion in Cyprus*. Ministry of Agriculture and Natural Resources, Dept. of Agriculture, Republic of Cyprus. Cyprus, 1989.
- OECD: *Coastal Zone Management: Integrated Policies*. Organization for Economic Cooperation and Development. Paris, France, 1993.
- OECD: *Coastal Zone Management: Selected Case Studies*. Organization for Economic Cooperation and Development. Paris, France, 1993.
- PAP/RAC-UNEP: *National Reports on Pilot Mapping and Measurement of Rainfall-Induced Erosion Processes in the Mediterranean Coastal Areas*. PAP-8/PP/NR.1. PAP/RAC – MAP/UNEP, Split, Croatia, 1997.
- PNUE: *Directives concernant la gestion intégrée des régions littorales, avec une référence particulière au bassin méditerranéen*. PNUE Rapports et études des Mers régionales No. 161. PAP/CAR (PAM-PNUE). Split, Croatie, 1995.
- Puigdefábregas, J.: *Desertificación: una perspectiva sobre la cuenca mediterránea*. Fronteras de la Ciencia y la Tecnología, 3: 15-19. 1995.
- Roche, M.: *Hydrologie de surface*. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer. ORSTOM. Gauthier-Villars Editeurs, Paris, 1963.
- Rojo Serrano, L.: *Synthesis of the National Reports on the State of the Art of Erosion in the Mediterranean countries*. UNEP/ICONA, Madrid. Spain, 1988.
- Rojo Serrano, L.: *Programmes of national agencies for mitigation of desertification in Spain*. European Union Concerted Action on Mediterranean Desertification. King's College, London, 1996. 31 pp.
- Romero-Diaz, M.A., Cabezas, F., Lopez Bermudes, F.: *Erosion and fluvial sedimentation in the River Segura Basin*. Catena vol. 19. Cremlingen, 1992.
- Rouse, H.: *Engineering Hydraulics*. John Wiley & Sons, Inc., 1949.
- The World Bank: *The Noordwijk Guidelines for Integrated Coastal Zone Management*. The World Bank, Environment Department, Land, Water and Natural Habitats Division – distributed at the World Coast Conference, Noordwijk. The Netherlands, 1993.
- Thomas, W.A.: *Sediment Transport. Hydrologic Engineering Methods for Water Resources Development*. The Hydrologic Engineering Center Corps of Engineers, U.S. Army. Davis, California, 1977.
- Toebe, C. & Ouryvaev, V. (Eds): *Les bassins représentatifs et expérimentaux*. Unesco-I.A.H.S., Paris, 380 pp. 1970.
- Toprak Koyisleri ve Kooperatifler Bakanligi: *Erosion map of Turkey*. Harita Mdrlgnde Hazinranmis ve Basilmistir. 1981.
- UNCED (United Nations Conference on Environment and Development): *Rio Declaration on Environment and Development*. UNCED, Rio de Janeiro, Brazil, 1992.
- UNEP/MAP-Blue Plan: *Systemic and Prospective Analysis for Mediterranean Sustainable Development: Activities and Outputs*. UNEP(OCA)/MED IG.5/Inf.5. Athens, 1995.
- USDA: *Field Manual for Research in Agricultural Hydrology*. Agriculture Handbook No. 224. United States Department of Agriculture, 1979.
- Walling, D.E. & Webb, B.W.: *The reliability of suspended sediment load data* in: Erosion and sediment transport measurements, IAHS Pub. no 133: 177-194. 1981.
- Walling, D.E.: *The sediment delivery problem*. J. Hydrol. 65: 209-237. 1983.
- Walling, D.E.: *Measuring sediment yield from river basins* in: Soil Erosion Research Methods, R. Lal (Ed.), Soil and Water Conservation Society, Ankeny, 39-73. 1988.
- WMO: *Guide to Hydrological Practices, Volume I: Data Acquisition and Processing*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1981.
- World Meteorological Organization: *Measurement of river sediments*. Operational Hydraulics Report N° 16. Geneva, Switzerland. 1981.

Le Programme d'actions prioritaires (PAP), réalisé par le Centre d'activités régionales (CAR), à Split, Croatie, fait partie du Plan d'action pour la Méditerranée (PAM) du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Bien que le PAP agisse comme un des centres du PAM depuis 1978, il est une institution nationale disposant du budget et du mandat d'effectuer un certain nombre d'activités du PAM dans les zones côtières du bassin méditerranéen.

Le PAP est une organisation centrée sur l'action, dont l'objectif principal est la mise en oeuvre d'activités pratiques, susceptibles de donner des résultats immédiats et de contribuer à la protection et l'amélioration de l'environnement méditerranéen, et au renforcement des capacités nationales et locales de gestion intégrée des zones côtières. Le PAP collabore avec un grand nombre d'organismes de l'ONU (PNUE, FAO, OMI, UNESCO, COI, OMS, AIEA, OMT, PNUD), d'institutions financières (Banque Mondiale, Banque Européenne d'Investissement), d'autres organisations internationales (Union européenne, Conseil de l'Europe, UICN, etc.), d'institutions internationales et de compagnies-conseils.

Pour plus d'informations sur le PAP, veuillez vous adresser au:

**Centre d'activités régionales du  
Programme d'actions prioritaires (PAP/CAR)**  
**Kraj sv. Ivana 11, HR-21000 Split, Croatie**  
**Tél: +385 21 343499/591171**  
**Fax: +385 21 361677**  
**E-mail: [pap@gradst.hr](mailto:pap@gradst.hr)**

PROGRAMME  
D' ACTIONS  
PRIORITAIRES



PLAN D' ACTION POUR  
LA MEDITERRANEE



PNUE

En coopération avec



PAP-8/PP/GL.1

PROGRAMME D' ACTIONS PRIORITAIRES  
CENTRE D' ACTIVITES REGIONALES  
SPLIT, 1998