

Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux

**Les protections végétales et structurelles
des surfaces et des pentes**

Pierre HENENSAL

études et recherches
des laboratoires des ponts et chaussées

lpc

série géotechnique GT54



Ministère de l'Équipement,
des Transports et du Tourisme

Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées



Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



(CC BY-NC-ND 4.0)



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

www.ifsttar.fr



Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux

**Les protections végétales et structurelles
des surfaces et des pentes**

Pierre HENENSAL

3^e trimestre 1993



**Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15**

**Collection « Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées »,
série Géotechnique, ISSN 1157 - 3910.
Fait suite à la collection « Rapports des laboratoires »,
série Géotechnique - Mécanique des sols - Sciences de la terre, ISSN 0761 - 2389.**

Pierre HENENSAL

Ingénieur

Section Géologie et risques naturels

Division Géologie de l'aménagement

et de l'environnement

LCPC

Fiche d'action élémentaire de recherche 222 041

Fiche d'action élémentaire de recherche 222 042

Diffusion :

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Section Publications

58, boulevard Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15

Tél. 33 (1) 40 43 52 26 – Télécopie 33 (1) 40 43 54 95

Prix : 140 FF

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit, même partiellement,
sans l'autorisation du Directeur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
(ou de ses représentants autorisés).

© 1993 – LCPC

SOMMAIRE

RÉSUMÉS	5
INTRODUCTION	9
I - IMPORTANCE DE L'ÉROSION SELON LES TRAVAUX ET LES CONDITIONS LOCALES.....	11
I - 1 • Caractéristiques générales des travaux et de l'environnement	11
I - 2 • Les paramètres semi-quantitatifs de l'Équation Universelle.....	12
I - 3 • Observations sur l'utilisation de l'Équation Universelle.....	18
II - PRISE EN COMPTE DE LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION AU STADE DU PROJET	21
II - 1 • Les aléas climatiques et géotechniques et la lutte contre l'érosion	21
II - 2 • La prise en compte des contraintes esthétiques et d'environnement.	22
II - 3 • Mesures antiérosives prises ou prévues au stade du projet.....	22
III - PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION	25
III - 1 • Principes de la lutte contre le déclenchement de l'érosion	25
III - 2 • Principes de la maîtrise de la sédimentation	28
IV - LA VÉGÉTATION DANS LA LUTTE ANTIÉROSIVE ET LA STABILITÉ DES TALUS. LIMITATIONS.....	33
IV - 1 • Prévention contre l'érosion superficielle des sols	33
IV - 2 • Prévention contre les mouvements de masse peu profonds.....	34
IV - 3 • Rôles particuliers de la végétation dans les ouvrages confortatifs.....	38
IV - 4 • Limitations, insuffisances ou inconvénients des protections végétales	40
IV - 5 • Conclusion partielle sur l'utilisation des végétaux	48
V - PANORAMA DES TECHNIQUES DE LUTTE.....	51
V - 1 • Diversité et évolution des mesures antiérosives	51
V - 2 • Taxonomie des techniques.....	52
VI - LE CHOIX DES TECHNIQUES	83
VI - 1 • Remarques préalables sur les techniques	83
VI - 2 • Niveau de service et schéma de prise de décision	86
VI - 3 • Les rapports efficacité / coûts.	88
CONCLUSION	89
ANNEXE	93
BIBLIOGRAPHIE	97

Résumé

La lutte contre l'érosion sur l'emprise des ouvrages de génie civil ou les zones d'aménagement concourt à la bonne marche des travaux, protège l'environnement et préserve à long terme les ouvrages construits. Ce rapport essaye de rassembler des principes ou des éléments qui permettront de conduire cette lutte avec davantage d'efficacité.

La lutte contre l'érosion nécessite une bonne connaissance des relations existant entre l'érosion et ses nombreux paramètres tels que le régime des pluies, l'érodabilité des sols, les conditions topographiques, la nature des travaux et celle des protections envisagées. Ce rapport donne dans le premier chapitre quelques indications à ce sujet.

Cette approche de l'érosion potentielle permet à l'ingénieur projeteur de prendre en compte les différents paramètres dès le stade du projet de façon à se protéger de l'érosion le mieux possible pendant les travaux et la vie de l'ouvrage (chapitre II).

L'ingénieur de travaux sera guidé dans cette tâche par les principes généraux de la lutte contre l'érosion (chapitre III).

Il utilisera les moyens mis à sa disposition pour mettre en place, cas par cas, les protections nécessaires. Parmi celles-ci, les protections végétales jouent un rôle de premier plan. Elles restent les plus sûres à moyen et long terme et le chapitre IV passe en revue leurs avantages contre l'érosion et les mouvements de masse peu profonds, mais aussi leurs défauts et insuffisances.

En fait la panoplie des techniques antiérosives est vaste et le chapitre V montre comment on peut les regrouper en cinq tableaux taxonomiques : action sur la physique du sol — protection des surfaces — modulation de l'inclinaison des talus — maîtrise des eaux superficielles — protections spéciales pour zones très attaquées ou sensibles.

Après avoir montré l'ambivalence et la polyvalence de certaines techniques et leur caractère temporaire ou permanent le dernier chapitre enfin essaye d'appréhender les considérations pratiques et économiques (niveau de service des ouvrages, rapports efficacité/coûts) qui président au choix des techniques et aux prises de décision.

Abstract

Combating erosion on the areas covered by civil engineering structures or development areas helps to facilitate the proper execution of the work, protects the environment, and in the long term preserves the structures built. This report attempts to enumerate some principles and factors leading to more effective anti-erosion measures.

Combating erosion calls for a proper knowledge of the relationships between erosion and its numerous parameters, such as rainfall, soil erodability, topography, the nature of the work, and the nature of the protective measures envisaged. The first chapter of the report gives some indications on this subject.

This approach to potential erosion enables the project engineer to take the different parameters into account at the planning stage, so as to ensure the best possible protection against erosion during the work and throughout the life of the structure (chapter II).

The engineer in charge of the work is guided in this task by the general principles of erosion prevention (chapter III).

He must use the resources at his disposal to implement the necessary protective measures in each case. Among these available resources, the use of plantation is of particular interest. This method constitutes the most reliable type of protection in the medium and long term, and chapter IV reviews its advantages in preventing erosion as well as shallow movements of soil masses. It also reviews the defects and inadequacies of the method.

The range of anti-erosion techniques is extensive, and chapter V shows how they can be grouped in five taxonomic tables : action on the physical properties of the soil — the protection of surfaces — modulation and gradient of slopes — control of surface water — and special protections for highly vulnerable or sensitive areas.

After showing the ambivalence and polyvalence of certain techniques and their temporary or permanent nature, the final chapter tackles practical and economic considerations (service conditions of the structures concerned, cost-effectiveness) determining the choice of techniques and related decision-making.

Zusammenfassung

Die Erosionsbekämpfung an den Standorten von Kunstbauten oder bebauten Zonen trägt zum einwandfreien Ablauf der Arbeiten bei, schützt die Umwelt und erhält die errichteten Bauwerke über einen langen Zeitraum. In diesem Bericht soll versucht werden, die Grundsätze oder Elemente zusammenzustellen, die es ermöglichen, diesen Kampf effizienter zu führen.

Die Erosionsbekämpfung erfordert eine gute Kenntnis der Beziehungen zwischen der Erosion und ihren zahlreichen Parametern wie Niederschlagsverhältnissen, Erodierbarkeit der Böden, topographische Verhältnisse, Art der Arbeiten und beabsichtigtem Schutz. Dieser Bericht enthält im ersten Kapitel einige Angaben dazu.

Diese Betrachtungsweise der potentiellen Erosion gestattet es dem planenden Ingenieur, die verschiedenen Parameter bereits zu Beginn der Projekterstellung zu berücksichtigen, um noch während der Arbeiten und während der Nutzungszeit des Bauwerks bessere Vorkehrungen gegen die Erosion zu treffen (Kapitel II).

Der ausführende Ingenieur wird in dieser Aufgabe durch die allgemeinen Grundsätze der Erosionsbekämpfung geleitet (Kapitel III).

Er wird die Mittel nutzen, die ihm zur Verfügung gestellt werden, um in jedem Einzelfall die erforderlichen Schutzmaßnahmen zu verwirklichen. Darunter spielen Bepflanzungen eine Rolle erster Ordnung. Sie sind auf mittlere und lange Sicht immer noch die sichersten Maßnahmen; im Kapitel IV werden ihre Vorteile im Kampf gegen die Erosion und gegen wenig tiefe Massebewegungen erläutert, aber auch ihre Mängel und Schattenseiten.

In der Tat stehen eine Vielzahl von Techniken der Erosionsbekämpfung zur Verfügung. In Kapitel V werden sie in fünf Tabellen geordnet: Maßnahmen zur Bodenphysik — Schutz der Oberflächen — Modulation der Neigung der Hänge — Kontrolle der Wasserbewegungen an der Oberfläche — besonderer Schutz für stark ausgesetzte oder empfindliche Zonen.

Nachdem die Doppel- und Mehrfachwirkung gewisser Techniken und ihr vorübergehender oder bleibender Charakter behandelt wurden, versucht das letzte Kapitel schließlich auf praktische und wirtschaftliche Aspekte einzugehen (Leistungsstand der Bauten, Wirksamkeits-/Kostenverhältnis), die für die Wahl der Techniken und die Entscheidungsfindung ausschlaggebend sind.

Resumen

La lucha contra la erosión sobre el impacto de las obras civiles o las zonas de planificación concurre al buen funcionamiento de las obras, protege el medio ambiente y preserva a largo plazo las estructuras construidas. Se intenta en este informe reunir o elementos que permitan llevar a cabo esta lucha con mayor eficacia.

La lucha contra la erosión requiere el correcto conocimiento de las relaciones que existen entre la erosión y sus cuantiosos parámetros, tales como régimen de lluvias, erosionabilidad de los suelos, condiciones topográficas, índole de los trabajos y de las protecciones contempladas. En el primer capítulo del informe constan algunas indicaciones al respecto.

Este planteamiento de la erosión potencial permite que el ingeniero proyectista tome en cuenta los distintos parámetros desde la fase del proyecto con objeto de protegerse de la erosión lo mejor que se puede durante las obras y la duración de vida de la estructura (capítulo II).

El ingeniero de obras quedará guiado en esta tarea por los principios generales de la lucha contra la erosión (capítulo III).

Utilizará los medios puestos a su disposición para organizar, caso por caso, las correspondientes protecciones. Entre las mismas, las protecciones vegetales desempeñan un papel de primer orden. Son más seguras a mediano y largo plazo y en el capítulo IV se revisan sus ventajas contra la erosión y los movimientos de masa poco profundos, pero también sus defectos e insuficiencias.

En realidad, es amplia la panoplia de técnicas antierosivas y en el capítulo V se demuestra cómo se puede reagruparlas en cinco cuadros taxonómicos: acción en la física del suelo — protección de superficies — modulación de la inclinación de los taludes — dominio de las aguas superficiales — protecciones especiales para zonas muy atacadas o sensibles.

Tras demostrar la ambivalencia y polivalencia de algunas técnicas y su carácter temporal o permanente, en el último capítulo se intenta finalmente captar las consideraciones prácticas y económicas (nivel de servicio de las estructuras, relaciones eficacia/costos) que presiden las opciones de las técnicas y las tomas de decisión.

Аннотация

Борьба с действием эрозии на инженерные сооружения и зоны обустройства способствует успешному проведению работ и увеличению срока службы стройобъектов. В данном отчете сделана попытка обобщения принципов и данных, позволяющих вести эту борьбу более эффективно.

Борьба с эрозией требует предварительного знания взаимосвязей между эрозией и многочисленными ее параметрами, а в частности — режимом дождей, эродируемостью грунтов, топографическими условиями, характером проводимых строительных работ и намеченных защитных мероприятий. Некоторые указания об этом даны в первом разделе отчета.

Такой подход к потенциальной эрозии позволяет инженеру-проектанту принимать в расчет все необходимые параметры еще при проектировании объекта с тем, чтобы обеспечить максимальную защиту от эрозии в период строительства и эксплуатации объекта (раздел 2).

А инженер-строитель будет руководствоваться общими принципами борьбы с эрозией (раздел 3).

Он будет использовать имеющиеся в его распоряжении средства, обеспечивающие в каждом конкретном случае необходимую защиту. Первостепенное место среди них занимают растительные средства защиты, обладающие наибольшей среднесрочной эффективностью. В разделе 4 указаны их преимущества в борьбе с эрозией и массовыми движениями малой глубины, а также их недостатки и минусы.

На самом деле имеется широкий набор противозрозийных средств. В разделе 5 показано, как можно их свести в пять таксономических таблиц в зависимости от действия на физику грунта, от защиты поверхностей, от регулирования наклона откосов, от упорядочения поверхностных вод, от специальной защиты наиболее подверженных или чувствительных к действию эрозии зон.

После определения того, те или иные методы имеют двойное или универсальное применение, временный или постоянный характер, в последнем разделе сделана попытка рассмотреть практические и экономические соображения (уровень обслуживания сооружений, отношение «затраты-эффективность»), диктующие выбор технологий и принятие решений.

INTRODUCTION

On estime que plus de 25 millions d'hectares de terre agricoles, soit la moitié de la France, sont touchés et menacés par l'érosion [42]. Mais l'érosion est un phénomène général qui ne touche pas seulement les terres agricoles. Sur l'emprise des chantiers de génie civil, les constructions d'ouvrages d'art ou d'ensembles urbains immobiliers, certains aménagements publics paysagers ou de loisirs, on rencontre des phénomènes d'érosion encore plus impressionnants que sur les terrains agricoles. Pendant la phase des travaux, cela s'explique par l'enlèvement de la végétation, le fréquent décapage de la terre végétale, son remplacement en surface par des sols souvent bien plus érodables, (sables et limons peu cohérents), l'utilisation de machines puissantes qui modifient les caractéristiques habituelles des sols, enfin la géométrie imposée des ouvrages conduisant à des pentes de talus beaucoup plus importantes que sur les terres agricoles.

Après la phase des travaux, pendant la vie de la route, l'intensité des phénomènes est plus faible, mais si la protection anti-érosive est insuffisante, les effets sont souvent cumulatifs. L'érosion chronique s'installe alors et oblige à des entretiens ou à des réparations toujours plus onéreuses.

Rappelons que les deux dangers principaux de l'érosion sont le ravinement et la sédimentation. Le ravinement peut entraîner des affouillements et mettre en cause la stabilité des ouvrages. Par ailleurs les talus de déblais et de remblais ravinés nuisent à l'intégration paysagère et à l'esthétique générale des ouvrages.

La sédimentation est la conséquence directe de la mise en suspension préalable des particules pendant le phénomène de l'érosion proprement dite. A la faveur d'un ralentissement des eaux, les particules, en se déposant, peuvent ensevelir les semis, colmater les dispositifs de drainage et de collecte des eaux pluviales, bouleverser l'écologie naturelle des rivières, détruire les frayères des poissons, amoindrir la capacité des lacs et des réservoirs. En outre certains dépôts sont particulièrement inesthétiques et nuisent, comme les ravines, à l'intégration paysagère des ouvrages.

Les plus fines particules, quant à elles, restent en suspension et augmentent la turbidité et la pollution chimique des cours d'eau ou des réservoirs d'eau potable. La turbidité, en outre, nuit gravement à la qualité récréationnelle et esthétique des cours d'eau.

Les ingénieurs responsables des projets et de la construction n'apprécient pas toujours comme il faudrait la menace qui pèse sur leur ouvrage et leur environnement. Certes la "bonne pratique du chantier" fait que les responsables appliquent dans l'ensemble assez bien les règles qui permettent d'amoindrir beaucoup les risques : mais il s'agit de risques moyens, non spécifiques de l'endroit. L'un des buts de cette étude sera donc d'encourager les ingénieurs à moduler et adapter les actions suivant les risques qui sont vraiment encourus, c'est à dire suivant les caractéristiques du climat des sols, de la topographie et des travaux sur le chantier. Si on appréhende, au moins grossièrement, ces paramètres au stade du projet ou de l'avant-projet, on pourra les utiliser pour prévoir les actions antiéro-

sives sur le chantier, de façon à ce que les moyens ne viennent pas à manquer lorsque ceux-ci deviendront nécessaires.

Pendant les travaux proprement dits, l'action antiérosive doit s'adapter aux conditions changeantes, au jour le jour, en s'inspirant des principes de la lutte antiérosive et du contrôle de la sédimentation. Pour cela les responsables sur le chantier devront bien connaître le domaine d'utilisation des différentes techniques et notamment des plus importantes d'entre elles : les techniques végétales.

Nous insisterons, dans ce document, plus spécialement sur ces techniques végétales, car la végétation, bien qu'omniprésente, a des qualités, des avantages et même parfois certains défauts généralement méconnus ou mal compris par les ingénieurs en génie civil.

Nous replacerons également les techniques végétales dans une classification beaucoup plus vaste regroupant toutes les techniques antiérosives ou celles améliorant la stabilité des talus. Ce regroupement devrait faciliter le choix des ingénieurs, compte tenu évidemment des nombreuses contraintes auxquelles ils sont assujettis : niveau de service, esthétique, coût et efficacité des techniques.

Mais avant d'en arriver là il nous paraît nécessaire d'étudier la justification technique initiale des mesures prises, c'est-à-dire les paramètres dont nous avons déjà parlé et qui pourraient conduire, au moins si rien n'était fait pour la contrecarrer, à une érosion très dangereuse.

I. IMPORTANCE DE L'ÉROSION SELON LES TRAVAUX ET LES CONDITIONS LOCALES

Sur les chantiers de travaux publics, le danger potentiel de l'érosion sur l'emprise même des travaux et ses conséquences pour l'environnement doivent être appréciés avant le commencement des travaux. Pour cela on doit prendre en considération un certain nombre d'indications parmi lesquelles on distinguera, d'une part des caractéristiques générales des travaux et de leur environnement naturel et d'autre part l'étude semi-quantitative des paramètres de l'érosion telle qu'elle a été proposée notamment par WISHMEIER [160].

I. 1. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES TRAVAUX ET DE L'ENVIRONNEMENT

I. 1. 1. Caractéristiques générales des travaux

Certains travaux sont plus susceptibles que d'autres d'entraîner de fortes érosions [71] [130]. On peut citer par exemple :

- les travaux de dessouchage et de nettoyage de l'emprise,
- les opérations de décapage et le mouvement général des terres et des sols,
- les constructions des fossés, ponceaux, aqueducs et buses,
- les constructions des pistes d'accès et les reprofilages et nivelages avant la construction des chaussées,
- les travaux d'emprunt en carrières ou les travaux de stockage des matériaux.

Mais les travaux les plus dangereux sont ceux qui changent les caractéristiques hydrauliques des cours d'eau en créant des affouillements ou des dépôts intempestifs. Citons par exemple :

- les empiétements des travaux de construction d'ouvrages d'art et surtout des piles ou des culées dans les cours d'eau avec les excavations et les remblayages correspondants,
- les franchissements temporaires des cours d'eau,
- les dragages hydrauliques ou mécaniques,
- les déviations, élargissements, approfondissements et réalignements des cours d'eau.

Il est difficile de donner un classement objectif sur le caractère dangereux, vis-à-vis de

l'érosion, présenté par ces activités. Il ne fait pas de doute, cependant, que toutes les opérations à proximité immédiate des cours d'eau sont parmi les plus dangereuses. Bien heureusement ces opérations sont relativement exceptionnelles. En dehors de ces zones très sensibles, on notera l'importance du maniement de grandes quantités de matériaux foisonnés. Ainsi REED [130] a pu observer des surcroûts de turbidité dans les ruisseaux drainant une zone en terrassement, par rapport à la normale avant travaux, de 200 % au moment du dessouchage et du nettoyage de l'emprise, de 50 % pour les aqueducs et ponceaux, de 1100 % pour les ponts, de 600 % pour les premiers terrassements, de 200 % pour la première saison hivernale après le début des travaux, de 800 % pour les derniers terrassements au printemps et enfin de 4 000 % pour les reprofilages et nivelages automatiques avant la construction des chaussées. Bien entendu, il ne s'agit là que d'un exemple, les chiffres pourraient être nettement différents en d'autres circonstances.

I. 1. 2. Caractéristiques générales de l'environnement

Avant le début des travaux les projeteurs et ingénieurs peuvent se faire déjà une idée du danger d'érosion qui menace les futurs ouvrages, en observant les marques d'érosion sur les terres agricoles environnantes ou sur les chantiers de travaux publics en cours. Mais les marques d'érosion peuvent être absentes et le danger cependant très présent. Psychologiquement, on peut même dire que le fait que les eaux des ruisseaux et cours d'eau soient très claires est plutôt, pour l'ingénieur, un souci supplémentaire qu'une caractéristique rassurante, car la moindre pollution pendant les travaux se remarquera aussitôt.

Il est bien évident, par ailleurs, que deux critères d'environnement, forcément aggravant vis-à-vis de l'érosion, peuvent être connus facilement. Le premier c'est le caractère pluvieux et surtout orageux de la région traversée. Le deuxième c'est son caractère escarpé ou montagneux impliquant des pentes et des talus à terrasser très importants et donc de fortes érosions.

I. 2. LES PARAMÈTRES SEMI-QUANTITATIFS DE L'ÉQUATION UNIVERSELLE DE PERTE DE SOL (EUPS)

Une appréciation purement qualitative peut paraître insuffisante pour étayer les décisions des projeteurs et ingénieurs dans le domaine de la lutte contre l'érosion et le contrôle de la sédimentation. La difficulté est cependant de passer de l'appréciation qualitative d'une variable à son appréciation quantitative dans le processus de l'érosion.

En fait, les processus physiques et biologiques qui gouvernent l'érosion interagissent ensemble de façon compliquée et changeante. Les forces qui agissent pour causer l'érosion et la réponse du sol à ces forces dépendent de nombreux facteurs qui ne sont homogènes ni dans le temps ni dans l'espace et cette hétérogénéité est encore bien plus évidente dans le cas des terrassements en génie civil.

Ces interdépendances complexes ont conduit les chercheurs en génie civil à faire certaines hypothèses simplificatrices de façon à réduire la prévision de l'érosion à des proportions relativement manipulables. Une de ces simplifications a été de dire par exemple après WISHMEIER et SMITH [160], ISRAELSEN et AL [76] et GRAY et LEISER [56] qu'il était possible

d'assimiler la prévision de l'érosion dans les terrassements et les emprises des ouvrages de génie civil (pentes souvent très supérieures à 20 %) à la prévision de l'érosion sur les terres agricoles (Pentes très inférieures à 20 %).

C'est à WISHMEIER que l'on doit l'analyse des facteurs de l'érosion hydraulique sur les terres agricoles. Ces facteurs sont au nombre de six.

Il y a d'abord un facteur complètement indépendant de l'action de l'homme, le facteur causal de l'érosion ou érosivité R qui traduit la force de l'action de la pluie ou des ruissellements ou des courants ou du vent.

Il y a ensuite cinq facteurs que l'on peut regrouper, suivant HUDSON [74], sous le générique "d'érodabilité au sens large". Ces facteurs sont les suivants :

- la résistance intrinsèque du sol ou érodabilité K ,
- la longueur de la pente L ,
- la déclivité de la pente S ,
- l'état de surface du sol C ,
- l'aménagement antiérosif du terrain P .

Le principe du travail de WISHMEIER a été de comparer l'érosion sur un site quelconque à celle d'un grand nombre de parcelles témoins en jachère ayant une longueur de 22 m et une pente de 9 % et labourées fréquemment dans le sens de la pente. Conventionnellement les facteurs L , S , P , et C , de ces parcelles sont alors tous égaux à 1. Pour une parcelle homogène quelconque, ces facteurs sont différents de 1 et les nombres trouvés sont tels que les six nombres correspondant aux six facteurs, une fois multipliés entre eux, donnent un chiffre E qui soit la perte du sol par unité de surface.

On aboutit donc à une équation de caractère empirique : l'Équation Universelle de Pertes de Sol (EUPS), qui s'écrit :

$$E = R.K.L.S.C.P.$$

On trouvera ci-dessous quelques indications générales sur les facteurs de cette équation.

I. 2. 1. L'érosivité R

Pour une pluie, elle dépend, selon WISHMEIER, du produit WI 30 de l'énergie W de la pluie par l'intensité I des 30 minutes les plus intenses de cette pluie. L'énergie w d'une séquence d'une pluie homogène d'intensité I et de hauteur h s'obtient en J/m^2 à partir de l'équation

$$w = (13,3 + 9,8 \lg I) h$$

L'énergie W d'une pluie sera la somme des énergies partielles w ainsi obtenues pour les différentes séquences de la pluie. On fait de même pour toutes les pluies d'une période plus ou moins longue (le mois, l'année, etc.) en convenant d'éliminer les trop faibles pluies (hauteur de pluie inférieure à 12,7 mm).

L'érosivité du climat local et sa variation annuelle peuvent être obtenues dans certaines régions par lecture de carte d'isoérosivité [76] [118] [132]. Par exemple, en France métropolitaine (voir figure 1) l'érosivité varie suivant les régions entre 30 et 300, aux USA entre 75 et 600 soit dans les deux pays un rapport à peu près de 1 à 10.

Il est particulièrement intéressant de remarquer que l'érosivité varie en cours d'année de façon généralement importante. Ainsi par exemple, dans le midi méditerranéen, les mois de septembre, octobre et novembre sont particulièrement dangereux. Il est évidemment recommandé d'en tenir compte, si possible, dans le planning des travaux.

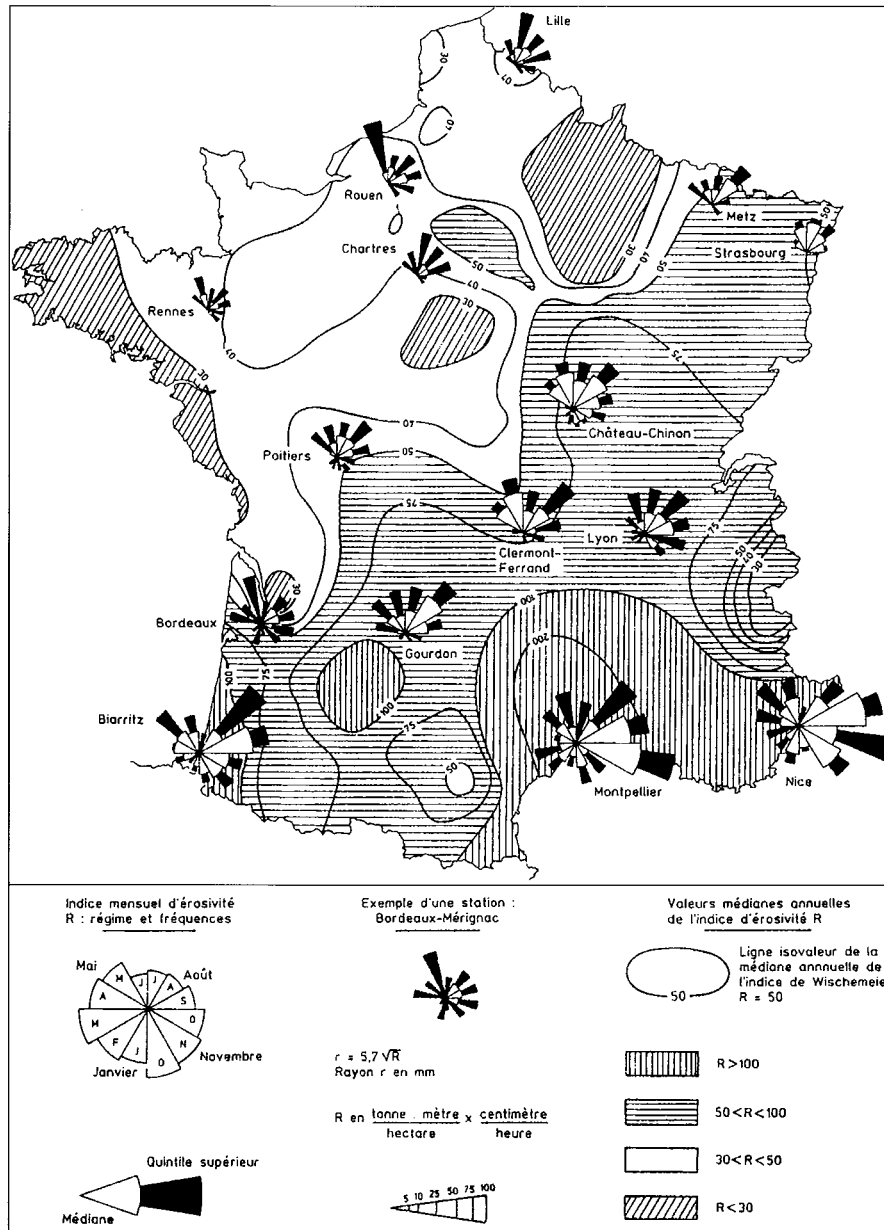


Figure 1 – Erosivité des pluies en France.
Répartition de l'indice R de Wischmeier
D'après Pihan [118]

I. 2. L'érodabilité K

Celle-ci est très forte pour les sables fins et les limons peu plastiques (sols A1, B1, B2 et D1 de la classification N.F. P 11300 décrite dans [103]). Elle décroît quand la proportion d'argile et/ou de matière organique s'accroît. Elle décroît quand l'indice des vides du sol ou le rapport du sodium adsorbé dans le sol décroissent ou que la force ionique de l'eau érosive s'accroît [43] [144].

WISHMEIER [160] a proposé un abaque (fig. 2) permettant l'obtention rapide de K en fonction de caractéristiques granulométriques, de la teneur en matières organiques et de considérations sur la structure et la perméabilité du sol. Dans cet abaque K varie entre 0,05 et 0,7.

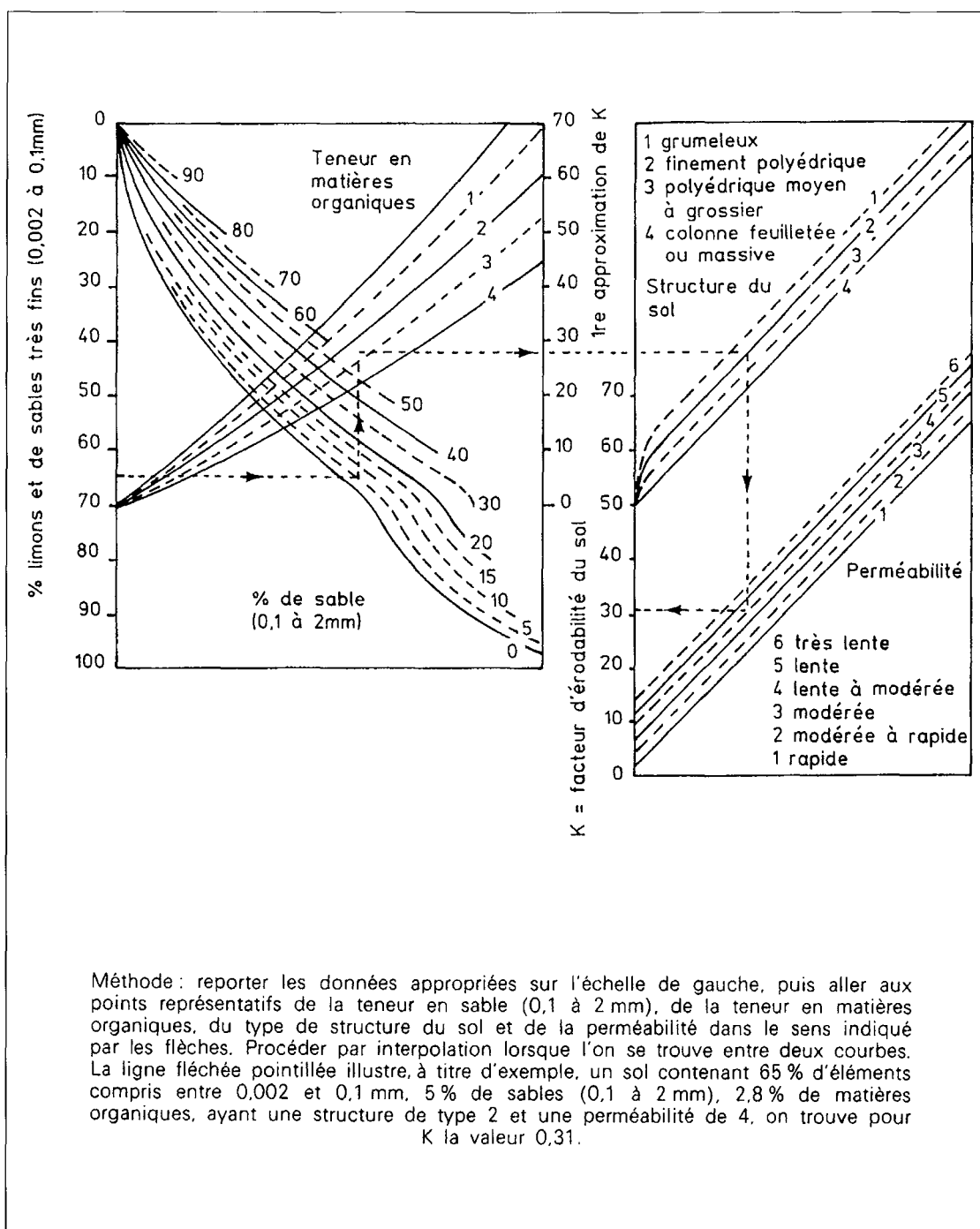


Figure 2 – Abaque permettant d'obtenir l'érodabilité K de Wishmeier

II. 2. 3. La longueur L et la pente S des surfaces de talus

L'influence de la longueur augmente quand la pente des talus s'accroît. C'est une des raisons (parmi d'autres) pour lesquelles on tend à diviser les talus longs et pentus en les coupant par exemple de fascines, de risbermes, de drains subhorizontaux, etc.

WISHMEIER [160] puis ISRAELSEN [76] ont proposé des abaques ou des tableaux de chiffres pour l'obtention du produit LS. Suivant la pente et la longueur du talus, LS peut varier ainsi entre 0,06 et 134 (voir le tableau de la fig. 3).

Figure 3 – Tableau donnant la valeur de LS calculé par Israelsen

Table		LS values. *																						
Slope Ratio	Slope Gradient "s" (%)	Slope Length "l" (ft.) (λ = summation of "l" segments)																						
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000
100:1	0.5	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15
	1	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20
	2	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.19	0.20	0.23	0.25	0.26	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37	0.39	0.40
	3	0.14	0.18	0.20	0.22	0.23	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.32	0.35	0.38	0.40	0.42	0.43	0.45	0.46	0.49	0.51	0.54	0.55	0.57
20:1	4	0.16	0.21	0.25	0.28	0.30	0.33	0.35	0.37	0.38	0.40	0.47	0.53	0.58	0.62	0.66	0.70	0.73	0.76	0.82	0.87	0.92	0.96	1.00
	5	0.17	0.24	0.29	0.34	0.38	0.41	0.45	0.48	0.51	0.53	0.66	0.76	0.85	0.93	1.00	1.07	1.13	1.20	1.31	1.42	1.51	1.60	1.69
	6	0.21	0.30	0.37	0.43	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.67	0.82	0.95	1.06	1.16	1.26	1.34	1.43	1.50	1.65	1.78	1.90	2.02	2.13
	7	0.26	0.37	0.45	0.52	0.58	0.64	0.69	0.74	0.78	0.82	1.01	1.17	1.30	1.43	1.54	1.65	1.75	1.84	2.02	2.18	2.33	2.47	2.61
12½:1	8	0.31	0.44	0.54	0.63	0.70	0.77	0.83	0.89	0.94	0.99	1.21	1.40	1.57	1.72	1.85	1.98	2.10	2.22	2.43	2.62	2.80	2.97	3.13
	9	0.37	0.52	0.64	0.74	0.83	0.91	0.98	1.05	1.11	1.17	1.44	1.66	1.85	2.03	2.19	2.35	2.49	2.62	2.87	3.10	3.32	3.52	3.71
10:1	10	0.43	0.61	0.75	0.87	0.97	1.06	1.15	1.22	1.30	1.37	1.68	1.94	2.16	2.37	2.56	2.74	2.90	3.06	3.35	3.62	3.87	4.11	4.33
	11	0.50	0.71	0.86	1.00	1.12	1.22	1.32	1.41	1.50	1.58	1.93	2.23	2.50	2.74	2.95	3.16	3.35	3.53	3.87	4.18	4.47	4.74	4.99
	12.5	0.61	0.86	1.05	1.22	1.36	1.49	1.61	1.72	1.82	1.92	2.35	2.72	3.04	3.33	3.59	3.84	4.08	4.30	4.71	5.08	5.43	5.76	6.08
	15	0.81	1.14	1.40	1.62	1.81	1.98	2.14	2.29	2.43	2.56	3.13	3.62	4.05	4.43	4.79	5.12	5.43	5.72	6.27	6.77	7.24	7.68	8.09
8:1	16.7	0.96	1.36	1.67	1.92	2.15	2.36	2.54	2.72	2.88	3.04	3.72	4.30	4.81	5.27	5.69	6.08	6.45	6.80	7.45	8.04	8.60	9.12	9.62
5:1	20	1.29	1.82	2.23	2.58	2.88	3.16	3.41	3.65	3.87	4.08	5.00	5.77	6.45	7.06	7.63	8.16	8.65	9.12	9.99	10.79	11.54	12.24	12.90
	22	1.51	2.13	2.61	3.02	3.37	3.69	3.99	4.27	4.53	4.77	5.84	6.75	7.54	8.26	8.92	9.54	10.12	10.67	11.68	12.62	13.49	14.31	15.08
	25	1.86	2.63	3.23	3.73	4.16	4.56	4.93	5.27	5.59	5.89	7.21	8.33	9.31	10.20	11.02	11.78	12.49	13.17	14.43	15.58	16.66	17.67	18.63
	30	2.51	3.56	4.36	5.03	5.62	6.16	6.65	7.11	7.54	7.95	9.74	11.25	12.57	13.77	14.88	15.91	16.87	17.78	19.48	21.04	22.49	23.86	25.15
4½:1	33.3	2.98	4.22	5.17	5.96	6.67	7.30	7.89	8.43	8.95	9.43	11.55	13.34	14.91	16.33	17.64	18.86	20.00	21.09	23.10	24.95	26.67	28.29	29.82
2½:1	35	3.23	4.57	5.60	6.46	7.23	7.92	8.55	9.14	9.70	10.22	12.52	14.46	16.16	17.70	19.12	20.44	21.68	22.86	25.04	27.04	28.91	30.67	32.32
	40	4.00	5.66	6.93	8.00	8.95	9.80	10.59	11.32	12.00	12.65	15.50	17.89	20.01	21.91	23.67	25.30	26.84	28.29	30.99	33.48	35.79	37.96	40.01
	45	4.81	6.80	8.33	9.61	10.75	11.77	12.72	13.60	14.42	15.20	18.62	21.50	24.03	26.33	28.44	30.40	32.24	33.99	37.23	40.22	42.99	45.60	48.07
	50	5.64	7.97	9.76	11.27	12.60	13.81	14.91	15.94	16.91	17.82	21.83	25.21	28.18	30.87	33.34	35.65	37.81	39.85	43.66	47.16	50.41	53.47	56.36
2:1	55	6.48	9.16	11.22	12.96	14.48	15.87	17.14	18.32	19.43	20.48	25.09	28.97	32.39	35.48	38.32	40.97	43.45	45.80	50.18	54.20	57.94	61.45	64.78
1¾:1	57	6.82	9.64	11.80	13.63	15.24	16.69	18.03	19.28	20.45	21.55	26.40	30.48	34.08	37.33	40.32	43.10	45.72	48.19	52.79	57.02	60.96	64.66	68.15
	60	7.32	10.35	12.68	14.64	16.37	17.93	19.37	20.71	21.96	23.15	28.35	32.74	36.60	40.10	43.31	46.30	49.11	51.77	56.71	61.25	65.48	69.45	73.21
	66.7	8.44	11.93	14.61	16.88	18.87	20.67	22.32	23.87	25.31	26.68	32.68	37.74	42.19	46.22	49.92	53.37	56.60	59.66	65.36	70.60	75.47	80.05	84.38
	70	8.98	12.70	15.55	17.96	20.08	21.99	23.75	25.39	26.93	28.39	34.77	40.15	44.89	49.17	53.11	56.78	60.23	63.48	69.54	75.12	80.30	85.17	89.78
1½:1	75	9.78	13.83	16.94	19.56	21.87	23.95	25.87	27.66	29.34	30.92	37.87	43.73	48.89	53.56	57.85	61.85	65.60	69.15	75.75	81.82	87.46	92.77	97.79
	80	10.55	14.93	18.28	21.11	23.60	25.85	27.93	29.85	31.66	33.38	40.88	47.20	52.77	57.81	62.44	66.75	70.80	74.63	81.76	88.31	94.41	100.13	105.55
	85	11.30	15.98	19.58	22.61	25.27	27.69	29.90	31.97	33.91	35.74	43.78	50.55	56.51	61.91	66.87	71.48	75.82	79.92	87.55	94.57	101.09	107.23	113.03
	90	12.02	17.00	20.82	24.04	26.88	29.44	31.80	34.00	36.06	38.01	46.55	53.76	60.10	65.84	71.11	76.02	80.63	84.99	93.11	100.57	107.51	114.03	120.20
1:1	95	12.71	17.97	22.01	25.41	28.41	31.12	33.62	35.94	38.12	40.18	49.21	56.82	63.53	69.59	75.17	80.36	85.23	89.84	98.42	106.30	113.64	120.54	127.06
	100	13.36	18.89	23.14	26.72	29.87	32.72	35.34	37.78	40.08	42.24	51.74	59.74	66.79	73.17	79.03	84.49	89.61	94.46	103.48	111.77	119.48	126.73	133.59

* Calculated from Equation 2-3

$$LS = \left(\frac{65.41 s^2}{s^2 + 10,000} + \frac{4.56 s}{\sqrt{s^2 + 10,000}} + 0.065 \right) \left(\frac{l}{72.5} \right)^m$$

ISRAELSEN [76] donne deux exemples pour montrer comment les valeurs de LS varient (et donc l'érosion) quand on modifie soit la pente (fig. 4) soit la longueur (fig. 5)

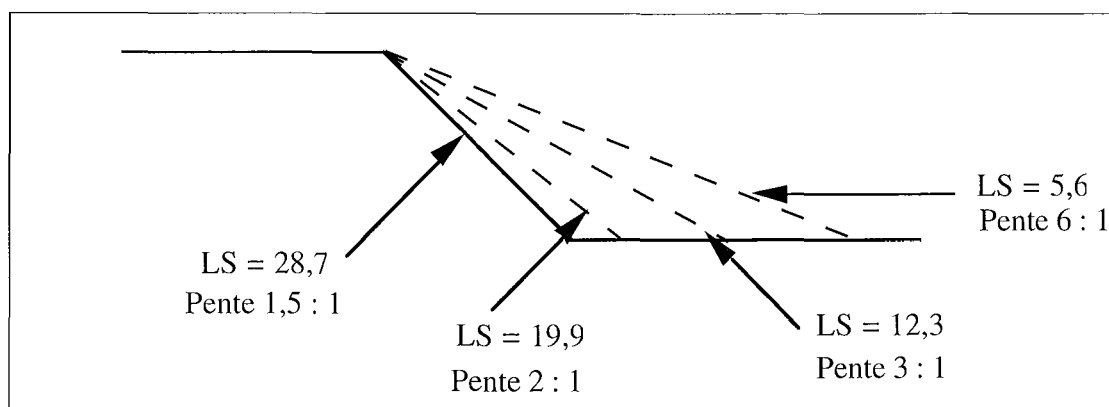


Figure 4 – Relation entre la pente d'un talus et l'érosion.

Les longueurs croissantes de talus sont 30, 38, 54 et 103 mètres. Les érosions totales correspondantes seront proportionnelles aux produits $30 \times 28,7 - 38 \times 19,9 - 54 \times 12,3$ et $103 \times 5,6$

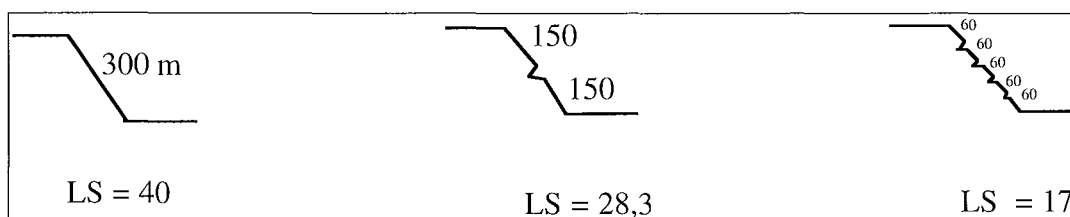


Figure 5 – Relation entre la longueur d'un talus ayant une pente de 40 % et l'érosion.

L'érosion totale de l'ensemble des planches parallèles formant le talus varie comme les valeurs LS indiquées.

I. 2. 4. L'état de surface du sol C

Le facteur état de surface C présente deux aspects distincts suivant que le sol est revêtu ou non. L'un Cc est celui de la couverture du sol, qu'elle soit végétale ou inerte (la couverture inerte protectrice est appelée paillis), en contact direct ou non avec le sol. L'autre Ct est celui du traitement mécanique de surface subi par le sol nu. Le paramètre Cc traduit en quelque sorte le pourcentage d'effet protecteur attribué soit à la végétation soit au paillis. Il est égal au rapport de la perte de sol observé sur le terrain avec celle qui aurait lieu si le sol était nu et maintenu en jachère labourée.

Pour différentes végétations et différents paillis des valeurs pour Cc sont proposées dans la littérature [56] [76] [160]. Nous en donnons ci-après quelques exemples.

Couverture temporaire de ray-grass		C = 0,05
Couverture permanente		C = 0,01
Gazon en plaque		C = 0,01
Paillis de foin	112 g/m ²	C = 0,25
	450 g/m ²	C = 0,02
Cellulose tirée du bois	390 g/m ²	C = 0,02
Emulsion d'asphalte	1,17 l/m ²	C = 0,02
Cailloux concassés (1 à 4 cm de Δ)	34 kg/m ²	C = 0,05
	60 kg/m ²	C = 0,02

En ce qui concerne le facteur C_t , lorsque le sol est nu, on trouve aussi quelques exemples dans la littérature. Ainsi pour GRAY [56] :

Talus compacté et lissé par la lame d'un buteur du haut en bas d'un talus	$C = 1,3$
--	-----------

Talus parcouru perpendiculairement à la pente par un buteur travaillant en râteau (lame avec dents)	$C = 0,9$
--	-----------

I. 2. 5. Le facteur aménagement du terrain P

Selon WISHMEIER et SMITH [160] le facteur P correspond à l'établissement des terrasses, aux cultures en bandes de végétation parallèles aux courbes de niveau etc.

En génie civil selon GRAY et LEISER [56] P représentera l'efficacité des mesures pour contrôler et filtrer le ruissellement ou atténuer l'énergie potentielle des eaux concentrées. Ces mesures inclueront par exemple les banquettes de diversion, le réseau des fossés de drainage, les descentes d'eau, les étaleurs d'eau, les banquettes de diversion, les clayonnages, les murets, les bassins de sédimentations etc.

L'efficacité antiérosive ou antipollution de ces structures peut conduire normalement selon GRAY à $P = 0,5$

On notera ici cependant, que pour certains auteurs [76] [148], l'effet des mesures précédentes doit être inclus dans le paramètre LS, si bien que ces auteurs au lieu de parler d'un facteur C et d'un facteur P parlent d'un seul facteur appelé VM. Nous préférons quant à nous, comme GRAY, conserver ce paramètre P car il permet de reconnaître l'importance, pour la maîtrise de l'érosion, d'un bon aménagement du terrain pendant et après les travaux.

C'est, évidemment, surtout pendant les travaux de terrassement que le facteur P doit être pris en considération. Les produits d'érosion atteignant les cours d'eau peuvent varier, en effet, de façon considérable, suivant les précautions et les aménagements du terrain mis en œuvre sur les chantiers.

I. 3. OBSERVATIONS SUR L'UTILISATION DE L'ÉQUATION UNIVERSELLE E.U.P.S.

L'équation E.U.P.S. est semi-empirique car elle utilise des coefficients empiriques qui ont été établis non pas à partir de lois physiques s'exprimant par des relations mathématiques précises, mais à partir d'un certain nombre d'observations obtenues sur des terres agricoles dont la pente est inférieure à 20 %. L'extension des coefficients Wishmeier à des talus autoroutiers de pente très supérieure à 20 % (fig. 3) est donc assez spéculative. Les chiffres indiqués sont d'ailleurs relatifs au territoire des U.S.A. et peuvent donc ne pas convenir pour d'autres pays du globe.

La carte de répartition de l'érosivité R en France (fig. 1) a été obtenue par PIHAN à partir des données de 81 stations météorologiques. La carte est donc imprécise quand on se trouve

dans une région où les considérations de relief ou de proximité de la mer viennent bouleverser les caractéristiques régionales. Il nous semble donc justifié de moduler les indications de cette carte en fonction des hauteurs de pluie journalières décennales que l'on pourra trouver par exemple dans la Recommandation pour l'Assainissement Routier du L.C.P.C.- SETRA [85].

L'abaque de la figure 2 utilisé pour obtenir l'érodabilité K laisse de côté des caractéristiques importantes comme la présence des cailloux ou des facteurs physico-chimiques comme la plasticité, l'argilosité, la richesse en sodium... Une approche plus expérimentale, grâce à un érodimètre de terrain [69], pourrait être une méthode complémentaire intéressante dans certains cas.

L'érosivité R et l'érodabilité K sont des données naturelles sur lesquelles l'homme en principe ne peut pas jouer. Par contre, les autres facteurs, à savoir :

- le facteur topographique LS,
- l'état de surface du sol C,
- l'aménagement du terrain P,

sont des facteurs anthropiques sur lesquels les concepteurs et entrepreneurs peuvent jouer. Bien que les données sur LS soient assez spéculatives et que les données sur C et P soient rares ou imprécises il semble que l'utilisation de ces coefficients, quand elle est possible, permette une approche rudimentaire de l'érosion dans différents cas de figure. Leur connaissance permet en tous les cas de réduire la somme de recherches nécessaires pour obtenir des valeurs adaptées aux conditions locales.

Au total, l'équation universelle E.U.P.S. nous paraît être, malgré ses imperfections et ses nombreuses imprécisions, une base intéressante, au moins dans certains cas, pour progresser dans le domaine difficile de la comparaison des méthodes de protection sur les chantiers de génie civil.

II. PRISE EN COMPTE DE LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION AU STADE DU PROJET

II. 1. LES ALÉAS CLIMATIQUES ET GÉOTECHNIQUES ET LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION

Nous venons de voir qu'il est possible de prévoir au moins grossièrement les risques moyens d'érosion susceptibles d'être rencontrés sur l'emprise d'un futur ouvrage pendant et après sa construction.

On peut cependant se trouver pendant les travaux de terrassement en présence de sols beaucoup plus érodables ou instables que prévus ; en outre, la période des travaux, même choisie à bon escient, peut présenter des épisodes pluvieux très exceptionnels.

Si les aléas climatiques sont par nature difficilement prévisibles, au moins en climat tempéré, on peut se faire une idée de la fréquence de leur apparition et intégrer ces données dans la conduite des chantiers [56] [76]. Par ailleurs, dans le domaine géotechnique, il est possible, selon PUECH [121], de limiter l'improvisation grâce aux progrès techniques d'investigation et de simulation.

Il semble donc que l'on puisse compter sur une fourchette raisonnable de conditions géotechniques et climatiques permettant en situation haute, moyenne ou basse, la prévision et la préparation de différentes parades contre l'érosion.

Par contre les pluies catastrophiques (par exemple une pluie cinquantenaire ou centennale) ne semblent pas pouvoir faire l'objet de parades spécifiques.

II. 2. LA PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES ESTHÉTIQUES ET D'ENVIRONNEMENT ET LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION

La protection de l'environnement sur les chantiers autoroutiers ou de TGV pendant et après la construction est en fait de plus en plus conçue dès l'origine du projet. Elle devient partie intégrante et structurelle du projet général. Ainsi l'autoroute n'est plus le "sillon destructeur" [107] que certains décrivaient autrefois. L'ambition légitime des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre est de faire une œuvre pleinement fonctionnelle s'intégrant parfaitement dans le paysage. Cette ambition est d'ailleurs de plus en plus affirmée et encouragée par les responsables administratifs ou politiques [107]. Or, adoucir ici une pente de talus, végétaliser ou aplanir plus loin des excédents de matériaux, c'est bien sûr œuvrer pour le paysage, mais c'est aussi, en quelque sorte, faciliter la lutte contre l'érosion.

Le souci du paysage ne suffit cependant pas en matière d'érosion. Il y a des pollutions qui sont peu visibles, vues de loin, mais qui portent tout autant atteinte à l'environnement en polluant par exemple les ruisseaux et les cours d'eau. Il faut donc aussi travailler de façon à n'entraîner que le minimum de pollution hydraulique. Pour cela, le mieux est encore ici de prévoir, en amont, les meilleures dispositions et les meilleures parades pour limiter l'érosion au minimum pendant les travaux.

II. 3. MESURES ANTIÉROSIVES PRISES OU PRÉVUES AU STADE DU PROJET

II. 3. 1. Choisir pour le tracé les zones et les sols les moins érodables

Dans le choix d'un tracé autoroutier, par exemple, dès le stade de l'avant-projet et toutes choses égales par ailleurs, on tiendra compte à la fois des contraintes locales et de la protection des sols, c'est-à-dire que l'on s'efforcera d'éviter, dans la mesure du possible, les zones ou les sols très érodables.

Notons qu'il est souvent possible d'estimer grossièrement, par le biais de l'équation universelle de perte de sol, comme l'a fait SORIAL [148], la quantité de sédiments susceptible d'être érodée pour différents tracés à l'étude, dans un certain secteur du projet.

2. Etudier le problème des franchissements de cours d'eau pour éliminer les risques d'érosion hydraulique.

Comme le souligne la Recommandation pour l'Assainissement Routier [85], le rétablissement des écoulements naturels constitue une contrainte très importante. Il importe donc de s'en préoccuper au stade du projet par des études hydrologiques et hydrauliques de manière à ce que les ouvrages de franchissement soient correctement placés et dimensionnés en fonction des caractéristiques de pluie et de débit des bassins versants en amont des ouvrages. Si on ne le faisait pas, les risques d'érosion seraient très importants et pourraient être très graves.

Des franchissements provisoires sommaires supportant une piste (photo n° 1) pour les besoins immédiats du chantier peuvent être installés pour que les engins ne passent pas à gué le ruisseau (ce qui occasionnerait beaucoup de pollution). Ces franchissements doivent être remplacés rapidement par une installation définitive



Photo n° 1 : Franchissement provisoire d'un ruisseau par une piste de chantier.

On peut être amené par ailleurs à prévoir la déviation provisoire ou définitive de certains petits ruisseaux ou petits cours d'eau. Des affouillements dangereux peuvent se produire si ces déviations se déversent dans le lit d'un cours d'eau incapable de recevoir un débit plus important.

Des affouillements peuvent également se produire si la pente des ouvrages de franchissement des remblais est trop forte.

II. 3. 3. Diminuer la longueur et la pente des talus par des dispositifs respectant la structure des couches géologiques.

Une fois l'implantation géographique décidée, la longueur et l'inclinaison des pentes de talus seront réduites pour diminuer l'érosion. Pour arriver à cette fin, des dispositions structurelles seront éventuellement aménagées (risbermes, murs, réseaux de drainage). Toutefois, la morphologie générale des talus et l'implantation des dispositifs devront tenir compte soigneusement de la géologie structurelle des terrains, de leur perméabilité et éventuellement du sens et de l'importance de la pente des différentes couches sédimentaires [54] [91] [121] [129].

Outre les considérations esthétiques rappelées en II. 2., la topographie générale des talus devra tenir compte aussi, évidemment, des points bas des talwegs et des points obligés de franchissement des remblais par les ouvrages de drainage ou les cours d'eau naturels.

II. 3. 4. Choisir la saison la plus favorable pour les travaux.

En ce qui concerne le choix de l'époque des travaux, l'examen des conditions climatiques et

éventuellement des cartes d'érosivité, indiquera au maître d'oeuvre quelles sont les périodes les plus favorables en ce qui concerne la lutte contre l'érosion [84] [86]. Pour les travaux dans les cours d'eau, par exemple, on peut être conduit à n'effectuer le travail que pendant la période des basses eaux.

II. 3. 5. Programmer les actions préventives. Approvisionner à l'avance les matériaux nécessaires. Prévoir des actions correctrices.

Les mesures préventives dans le domaine de l'érosion étant habituellement beaucoup plus efficaces et économiques que des mesures correctrices, la lutte contre l'érosion pendant les terrassements devra être prévue et préparée bien avant le commencement des travaux, de manière à ce que les actions et les matériaux nécessaires ne fassent pas défaut au moment voulu.

Notamment, la nature et l'implantation des protections biotechniques contre l'érosion devront être définies et précisées avant le commencement des travaux et leur exécution programmée au plus près du dégagement des surfaces définitives de talus [32].

II. 3. 6. Suivre les indications données par le maître d'oeuvre.

Le C.C.T.G. Terrassements Généraux [102] indique que, jusqu'à réception des travaux par le maître d'oeuvre, l'entrepreneur est tenu de conduire le chantier, "de mettre en oeuvre et d'entretenir les moyens provisoires ou définitifs qui s'imposent", pour éviter que les eaux de ruissellement et les eaux superficielles n'endommagent les profils ou l'état de la plateforme ainsi que ceux des talus de déblai et de remblai.

Il reviendra donc au C.C.T.P. (Clauses particulières) de mettre l'accent sur tel ou tel aspect particulier de la lutte contre l'érosion.

Quand l'écoulement gravitaire des eaux est possible, le C.C.T.P. pourra par exemple prescrire à l'entrepreneur de maintenir une pente suffisante à la surface des parties excavées et réaliser en temps utile différents dispositifs de collecte et d'évacuations des eaux (banquettes, bourrelets, saignées, descentes d'eau ...)

De façon générale les prescriptions et recommandations du C.C.T.P. devront être basées sur un certain nombre de principes assurant une bonne gestion de la lutte anti-érosive. Voyons à présent quels sont ces principes.

III. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION

La lutte contre l'érosion comporte deux volets. Le premier volet c'est la lutte contre l'érosion proprement dite, c'est-à-dire empêcher celle-ci de se produire. Le deuxième volet c'est la maîtrise de la sédimentation, c'est-à-dire agir de manière à ce que la sédimentation ne nuise que relativement peu aux travaux et à l'environnement. Voyons tout d'abord le premier volet.

III. 1. PRINCIPES DE LA LUTTE CONTRE LE DÉCLENCHEMENT DE L'ÉROSION

Quand on construit une route, la quasi-totalité des surfaces de l'emprise est complètement bouleversée. L'action des forces érosives est très importante sur ces surfaces car la résistance des sols nus et perturbés est infiniment plus faible que celle des sols végétalisés. Par ailleurs le risque de concentration sauvage des eaux y est fortement accru, ce qui augmente beaucoup les risques de ravinement, tout au moins si la vitesse de l'eau dépasse une certaine valeur.

Les principes d'action antiérosive sur les chantiers seront finalement les suivants :

III. 1. 1. Veiller à l'adéquation en temps et en lieu des mesures antiérosives

C'est le principe de base fondamental en matière de lutte antiérosive. En effet, pendant les travaux de terrassement, la nature des surfaces et leur érodabilité changent très vite et il en est de même par ailleurs des conditions météorologiques.

L'ingénieur responsable doit être prêt à mettre en œuvre, au moment opportun, les mesures temporaires ou permanentes envisagées ou prévues à l'avance, quand les travaux approchent telle phase délicate ou telle zone sensible ou qu'une période météorologique humide est attendue.

Une programmation correcte des mesures antiérosives, leur utilisation, leur localisation sur le projet, la chronologie de leur installation et leur entretien correct sont tous des points critiques d'un contrôle réussi de l'érosion et de la sédimentation.

Pour ISRAELSEN [75] de nombreuses petites mesures de contrôle de l'érosion, mise en place au bon moment, sont plus efficaces et moins coûteuses qu'un petit nombre de mesures importantes appliquées à contre-temps. De toutes façons une excellente mesure de contrôle de l'érosion est sans valeur tant qu'elle n'est pas mise en oeuvre.

En situation exceptionnelle, par exemple si un orage violent est annoncé, l'ingénieur responsable sur le chantier devra avoir les pleins pouvoirs pour renforcer effectivement et rapidement les précautions habituelles ; après l'orage, il devra réparer immédiatement les dégâts subis par les protections et les structures antiérosives ainsi que les affouillements, renards et débuts de ravinement. S'il ne le fait pas les prochains orages pourraient être désastreux.

III. 1. 2. Maintenir la plus faible possible à un instant donné la superficie des zones perturbées ou dénudées.

La bonne marche du chantier impose évidemment la dénudation ou la perturbation des surfaces en travaux. Cependant, parce qu'il est difficile d'égaliser la résistance à l'érosion d'une terre naturellement végétalisée, on s'efforcera toujours de minimiser les travaux préparatoires de débroussaillage, dessouchage et nivellement des terres. On ne dénudera donc que les surfaces sur lesquelles on est assuré d'une progression normale et continue des travaux.

On notera ici que certaines spécifications américaines recommandent de ne pas découvrir plus de 7 ha de terrains érodables pendant les opérations de dessouchage et de nettoyage (sauf avis notifié de l'ingénieur responsable).

III. 1. 3. Stabiliser et protéger les zones perturbées le plus vite possible et d'autant mieux que le travail est interrompu pour longtemps.

Les travaux étant multiples sur une même surface, on devra s'arranger pour qu'il y ait le minimum de temps mort, sans protection de surface, entre chacun des travaux à engager.

Si, pour une raison ou une autre, on apprend que les temps morts doivent se prolonger anormalement, il y aura évidemment lieu de stabiliser et protéger les surfaces qui viennent d'être travaillées à l'aide de traitements mécaniques ou chimiques ou d'un recouvrement par un paillis quelconque ou d'une combinaison de ces méthodes. Si l'orage menace on le fera même pour de très courtes périodes, avant les week-ends ou la veille pour le lendemain, par exemple en compactant et réglant la surface des plates-formes pour éviter une trop forte érosion.

Plus la période d'arrêt des travaux est longue, plus le travail de protection devra être soigné, ainsi, par exemple, avant la saison hivernale qui interrompt généralement les travaux pendant plusieurs mois.

Enfin, toutes les surfaces ayant atteint leur profil définitif devront être stabilisées rapidement ou recouvertes le plus vite possible d'une végétation adaptée et permanente de façon à ce qu'elles puissent toutes résister au choc érosif des gouttes de pluie et au ruissellement en nappe non concentré (et ne pas subir trop de dommage si par malheur elles subissent momentanément des écoulements concentrés).

III. 1. 4. Dévier les eaux de ruissellement pour les empêcher de pénétrer sur le chantier.

Cette déviation est nécessaire si les terrains situés en amont des lignes de plus grande pente traversant le chantier, ont une surface ou un impluvium important et sont à même de déverser un fort ruissellement ou même des eaux concentrées sur l'emprise du chantier. La déviation peut s'effectuer par exemple à l'aide d'une banquette de bordure ou d'un fossé (par exemple fossé de crête au haut de certains talus de déblais sur autoroutes.).

III. 1. 5. Étaler les nappes en ruissellement sur le chantier pour retarder leur concentration.

Les travaux de construction bouleversent complètement les surfaces de ruissellement naturel en créant des ornières et des obstacles qui peuvent concentrer les eaux de ruissellement. Si on laisse faire, les eaux se concentrent sur des sols non préparés spécialement pour cela, ce qui entraîne un fort danger d'érosion.

Il faut donc améliorer la planéité des surfaces de ruissellement pour étaler les eaux en mouvement. On le fera si possible en augmentant en même temps la résistance du sol à l'érosion, par exemple en le compactant.

III. 1. 6. Organiser la concentration des eaux sur le chantier quand celle-ci devient inévitable.

Pour des raisons diverses la concentration des eaux est généralement inévitable au cours des pluies sur l'emprise d'un chantier. Cette concentration peut s'effectuer par exemple à la rupture de pente entre la partie déjà terrassée d'un déblai et la zone en cours de terrassement ou bien encore au point le plus bas de la surface terrassée (talweg provisoire). De toute façon, si les sols sont relativement imperméables, l'épaisseur des nappes en ruissellement augmente sans cesse vers l'aval et, si la pluie est importante, le ruissellement finit par se concentrer malgré les précautions prises au chapitre 5 précédent. En dehors de toutes pluies on peut aussi avoir des venues d'eau sur des déblais en cours de terrassement (sources ponctuelles).

Les terrassements seront donc conduits de manière à ce que les eaux concentrées trouvent un exutoire en dehors de l'emprise du chantier et ne s'accumulent pas sur les zones de travail (à moins de prévoir dans certains cas une évacuation par pompage).

On empêchera la divagation des eaux concentrées sur des sols érodables grâce à un réseau de drainage provisoire. Ces chemins d'eau appropriés devront pouvoir résister à un écoulement concentré érosif ayant une vitesse et un débit donné et d'autant mieux, pour certaines parties, qu'on songe à les inclure dans un réseau de drainage permanent (photo n° 2).



*Photo n° 2 : Atelier de terrassement assaini par un large fossé drainant
(Une trappe de sédimentation serait utile avant le rejet des eaux dans la rivière)*

III. 1. 7. Briser l'énergie des eaux concentrées

Dans certains ouvrages de drainage en forte pente, l'énergie des eaux concentrées pendant les orages peut devenir dangereuse pour la conservation même des ouvrages. L'énergie peut être diminuée grâce à des dissipateurs d'énergie [85] installés sur les radiers de place en place (escaliers, plots, chicanes diverses). Ces dissipateurs, en augmentant la turbulence de l'eau, en diminuent la vitesse et l'énergie.

III. 2. PRINCIPES DE LA MAÎTRISE DE LA SÉDIMENTATION

Les dangers relatifs à la turbidité des eaux et à la sédimentation anarchique peuvent être notablement amoindris si l'on facilite le dépôt des sédiments au plus près de leur source, c'est-à-dire sur les surfaces en cours d'érosion et sur le lieu même des travaux. Les principes d'action pour la maîtrise de la sédimentation sont donc relativement simples :

- freiner et filtrer le ruissellement diffus,
- diminuer la charge solide des eaux quittant le chantier,
- entretenir tous les ouvrages de protection,
- limiter l'extension de la turbidité autour des travaux en rivière.

III. 2. 1. Freiner et filtrer le ruissellement diffus

Les meilleurs agents pour cela sont évidemment les entrelacements et enchevêtrements des racines, tiges et feuilles des graminées ou des autres plantes herbacées dans les engazonnements.

L'efficacité d'un gazon dépendra, en premier lieu, de son pourcentage de couverture sur une surface donnée. Une couverture totale de 100 % (définie comme une couverture à travers laquelle on ne voit pas le sol) arrête complètement l'érosion due à la battance des gouttes de pluie. Elle freine et filtre en partie le ruissellement chargé provenant de l'amont, au moins si la hauteur du ruissellement n'est pas trop forte (ruissellement diffus). Par contre, si la hauteur de l'écoulement apparente ce dernier à un écoulement concentré, le freinage de l'eau en mouvement par la végétation peut être fortement réduit et l'énergie de l'eau, dans certains cas, peut être suffisante pour détruire le gazon et entraîner des ravinements.

Dans le cas où la végétation n'existe pas ou est insuffisante, les fonctions de freinage et de filtrage peuvent être assurées artificiellement par des paillis ou encore par des obstacles divers.

III. 2. 2. Diminuer la charge solide des eaux quittant le chantier.

Les eaux concentrées dans les réseaux de drainage superficiel, sur le chantier ou sa périphérie, peuvent être encore fortement chargées et rester turbides, même si elles ont été filtrées sur le terrain par des moyens végétatifs ou structurels. Il est donc souvent nécessaire de diminuer encore fortement cette turbidité si l'on désire protéger au maximum de la pollution le récepteur le plus sensible à l'aval du chantier. Les méthodes employées consistent, généralement, à créer des bassins de sédimentation dans lesquels la vitesse de l'eau est fortement diminuée, ce qui permet le dépôt de la plus grande partie des matériaux en suspension à l'entrée.

Suivant leur importance et leur durée de vie, il est possible de distinguer différents types de bassins de sédimentation [148] : les bassins d'urgence (mis en place pour une très courte période de temps, une nuit par exemple), les bassins temporaires (opérationnels pendant la période de construction), les bassins permanents.

Les bassins permanents, surtout au voisinage des agglomérations, en milieu urbain et suburbain, sont conçus, le plus souvent, non seulement pour lutter contre la charge solide et la turbidité des eaux, mais aussi pour lutter contre des pollutions chimiques et organiques d'origines diverses. Des conceptions spécifiques, décrites par RANCHET et RUPERD [127], répondent à ces besoins (photo n° 3).

En ce qui concerne les bassins d'urgence et les bassins temporaires dont nous parlons essentiellement ici, on peut dire évidemment que plus la dimension des bassins est importante plus ils peuvent retenir des pluies de longue durée et de forte intensité. Une première limitation dans l'agrandissement vient de l'espace disponible : les bassins ne doivent pas gêner la circulation des engins ni la vie même de l'ouvrage principal. La deuxième limitation est évidemment le coût de réalisation des bassins.

L'efficacité d'un bassin, c'est-à-dire le rapport, en pour cent, des particules retenues par le bassin à la charge solide totale, à l'entrée du bassin, dépend de la courbe granulométrique de cette charge et des conditions hydrauliques du bassin, et notamment du temps de rétention, c'est-à-dire du temps de vidange du bassin par l'évacuateur principal.

Selon les auteurs et la finalité des ouvrages, la conception et le nombre des bassins jugés nécessaires peuvent être assez différents. Pour ISRAELSEN [76], par exemple, il est plus économique de créer de nombreuses petites trappes à sédiment très près de la source de ces sédiments (100 mètres) que de créer de grands bassins de sédimentation à l'aval du chantier. Si l'eau quittant les différents dispositifs est encore trop trouble pour le niveau de pollution requis, l'ingénieur devra se résoudre à agrandir ou modifier ses bassins (photo n° 4) ou à procéder à un traitement chimique à l'aide de flocculants ou de coagulants.

III. 2. 3. Entretenir tous les ouvrages de protection

Qu'il s'agisse des réseaux de drainage superficiel, des barrages filtrants ou des bassins de sédimentation, tous les ouvrages de protection sont susceptibles de destruction ou d'un arrêt de fonctionnement par remplissage avec des sédiments. Il faut donc assurer leur nettoyage périodique ainsi qu'une visite d'entretien après chaque orage de forte intensité [148] pour réparer au plus vite les dégâts éventuels dus à l'érosion. On veillera notamment à éviter toute obstruction des drains superficiels à l'entrée des avaloirs ou des descentes d'eau. Les débordements sur des terrains non préparés à l'avance pourraient, en effet, être catastrophiques pour la tenue des ouvrages.

La périodicité de nettoyage des bassins dépendra évidemment de la dimension respective du bassin versant et du bassin de sédimentation ainsi que du régime des pluies.

III. 2. 4. Limiter l'extension de la turbidité autour des travaux en rivière

Cette limitation est possible dans certains cas si l'on est en mesure d'utiliser des barrières à limon flottantes en géotextiles. On n'effectuera si possible les travaux qu'en période de basses eaux.



Photo n° 3 : Bassin permanent de déshuilage le long d'une autoroute, dans une zone où il faut absolument protéger la nappe phréatique



Photo n° 4 : Large bassin provisoire de sédimentation à l'aval d'un chantier de terrassement. Il empêche une trop grande pollution des eaux courantes du voisinage.

IV. LA VÉGÉTATION DANS LA LUTTE ANTIÉROSIVE ET LA STABILITÉ DES TALUS. LIMITATIONS

La présence de la végétation sur l'emprise des ouvrages de génie-civil se justifie pour de nombreuses raisons, rappelées par différents auteurs [3] [32] [63]. Citons, par exemple, le rôle essentiel joué par la végétation dans les domaines suivants :

- esthétique et intégration des ouvrages dans le paysage rural, semi-urbain et urbain,
- action anti-éblouissante,
- guidage optique des automobilistes,
- protection contre le vent,
- protection contre les congères.

Mais c'est évidemment pour son action contre l'érosion et pour la stabilisation des talus que la végétation est le plus systématiquement utilisée. Nous allons donc étudier les rôles de la végétation pour prévenir d'abord l'érosion superficielle des sols, ensuite les mouvements de masse peu profonds. Puis nous rappellerons les rôles particuliers de la végétation dans les ouvrages confortatifs. Enfin nous mettrons le lecteur en garde contre certaines limitations d'emploi qui font que la végétation n'est pas, dans tous les cas, la panacée idéale.

IV. 1. PRÉVENTION CONTRE L'ÉROSION SUPERFICIELLE DES SOLS

L'effet protecteur de la végétation vis-à-vis de l'érosion joue de façon distincte au niveau des trois strates suivantes :

- d'abord la strate aérienne vivante d'interception à une certaine distance du sol (plusieurs mètres pour les arbres),
- ensuite la strate aérienne de faible épaisseur en contact direct avec le sol,
- enfin la strate constituée par la couche superficielle du sol contenant un mélange de particules minérales, de racines vivantes et de différents débris végétaux en décomposition plus ou moins avancée.

L'action antiérosive est donc jouée différemment par la végétation basse herbacée (graminées et autres plantes non ligneuses), la végétation buissonnante et la végétation des

arbustes et des arbres. Les différences jouent essentiellement sur la part du sol qui reste nue et exposée à l'action directe de la pluie et du ruissellement. Suivant la strate de végétation envisagée, la répartition relative des effets antiérosifs peut également être différente.

Rappelons que ces effets sont les suivants :

1. Interception des gouttes de pluie et absorption de l'énergie de la pluie. Disparition de l'effet de battance, c'est-à-dire du choc destructeur et explosif des gouttes de pluie sur le sol.
2. Infiltration accrue des eaux de pluie par amélioration de la porosité et de la perméabilité du sol. Cela entraîne une diminution du ruissellement.
3. Retenue du sol. Le système racinaire relie, enserre et retient les particules du sol.
4. Ralentissement de la vitesse du ruissellement. Les tiges et les différents résidus végétaux en surface augmentent la rugosité de surface.
5. Filtration du ruissellement. Le chevelu végétal entraîne le dépôt des particules les plus grossières transportées par le ruissellement et cela plus près de leur source.
6. Evapotranspiration. Cette fonction vitale de la végétation entraîne un abaissement de l'humidité du sol qui peut-être sensible dans le volume de sol exploré par les racines. Cet abaissement entraîne une infiltration accrue des eaux de ruissellement et donc moins d'érosion.

A titre d'illustration, on trouvera rassemblées dans la figure 6 certaines des fonctions précédentes.

IV. 2. PRÉVENTION CONTRE LES MOUVEMENTS DE MASSE PEU PROFONDS

La végétation, principalement ligneuse, peut affecter l'équilibre des forces et la stabilité dans un talus de différentes façons :

IV. 2. 1. Diminution de la teneur en eau entraînant une augmentation de la résistance au cisaillement du sol

L'évapotranspiration des végétaux entraîne une diminution des teneurs en eau des sols dans toute la couche de sol explorée par les racines. La diminution, par rapport aux teneurs en eau du début du printemps, est particulièrement nette au début de l'automne. L'amplitude des variations décroît avec la profondeur et avec la distance au pied du végétal et dépend évidemment de l'espèce considérée et de l'âge du végétal.

Certains arbres peuvent affecter l'humidité du sol dans un cercle de rayon supérieur à environ 1,5 fois leur hauteur. La profondeur d'action dépend beaucoup de la morphologie d'ensemble du système racinaire et notamment de la présence ou non d'une racine pivotante centrale à côté d'un système racinaire latéral. Ce dernier est généralement fortement

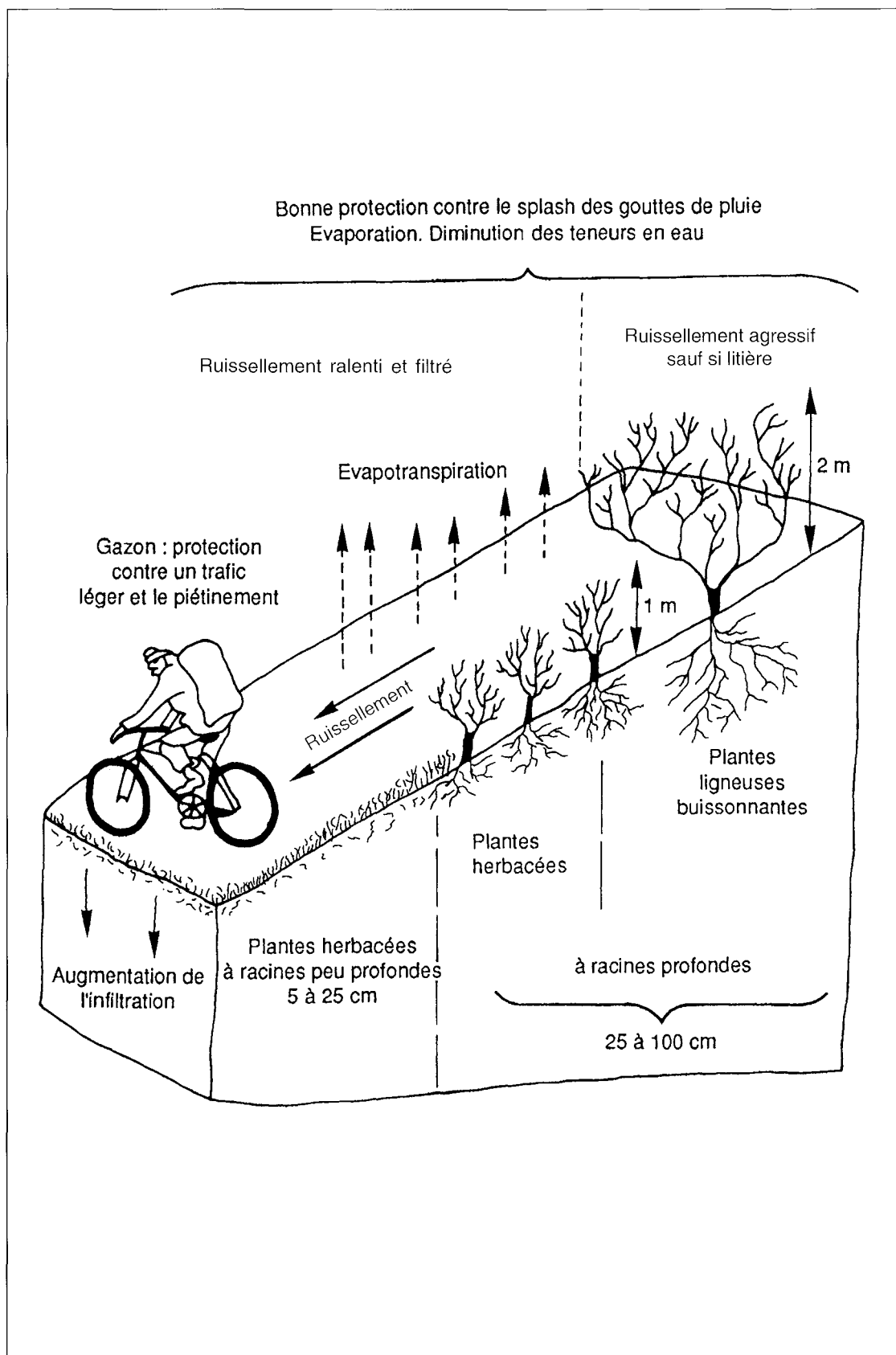


Figure 6 – Illustration d'une partie des rôles antiérosifs joués par la végétation herbacée et buissonnante.

prépondérant (par exemple 85 % des racines totales dans le mètre supérieur pour un pin à l'âge adulte) et peut même exister seul. On a cependant pu observer des racines verticales jusqu'à une profondeur de 5,5 m. [56].

Pour certaines espèces très avides d'eau comme les peupliers, la diminution des teneurs en eau peut-être encore notée à 3 m de profondeur, comme le montre la figure 7.

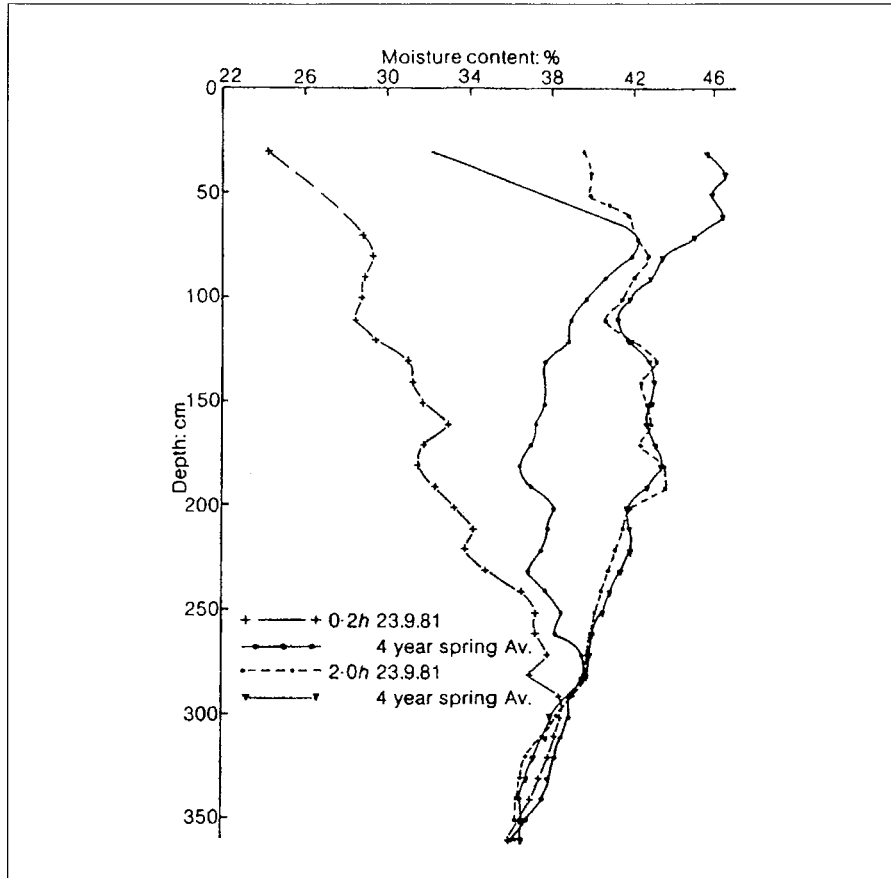


Figure 7 – En automne et au printemps, en Angleterre. Profils des w , sur argile à blocs, à des distances de 0,2 h et 2 h du tronc d'un peuplier de hauteur h [15].

En ce qui concerne les espèces herbacées, si les graminées à gazon fin, comme les fétuques rouges ou ovines, n'assèchent fortement le sol que dans les 20 cm supérieurs du sol, certaines légumineuses (luzerne) et d'autres plantes herbacées peuvent avoir un développement racinaire profond (parfois plusieurs mètres pour la luzerne).

Au total, grâce à la végétation, les périodes pendant lesquelles il existe de fortes teneurs en eau dans le sol et qui sont génératrices de glissements de terrain ou de solifluxion sont moins nombreuses et réduites en longueur. Les phénomènes de glissement sont donc aussi moins nombreux et moins importants.

IV. 2. 2. Renforcement du sol par les racines

Les racines renforcent mécaniquement le sol en transférant les contraintes de cisaillement dans le sol sur la résistance à la traction des racines. L'enchevêtrement des racines latérales lie le sol en une masse monolithique. Celle-ci est ancrée dans le sol sous-jacent et est

empêchée de glisser par le pivot central ou quelques racines verticales à une certaine distance de l'axe de la plante.

Selon WALDRON [156] l'accroissement de la résistance au cisaillement dû à la pénétration des racines dans le sol est une fonction, d'une part, de la résistance à la traction moyenne des racines et, d'autre part, du pourcentage de la surface occupée par les racines dans une section parallèle au plan de cisaillement.

A titre d'exemple, la résistance à la traction d'une racine de pin varie entre 20 et 50 MPa.

IV. 2. 3. Soutènement et effet de voûte

Le soutènement est l'action par laquelle le tronc d'un arbre bien implanté empêche une couche de sol qui se trouve immédiatement en amont de lui de glisser plus bas.

L'effet de voûte se produit lorsqu'une masse de sol superficielle en déséquilibre est retenue par une série de troncs d'arbres suffisamment rapprochés pour que la masse de sol ne puisse pas fluer entre les troncs.

IV. 2. 4. Rôle antichute de pierres ou antiavalanche

Ce rôle est joué de façon active par les arbres et arbustes. Ceux-ci empêchent dans une certaine mesure le déclenchement des chutes de pierres ou des avalanches et la formation des congères sur les chaussées et accotements.

La végétation ligneuse peut aussi freiner ou dévier certaines chutes de pierres ou avalanches.

IV. 2. 5. Surcharge

Le poids de la végétation ligneuse sur une pente exerce à la fois une contrainte déstabilisante dirigée vers le bas de la pente et une composante perpendiculaire au talus qui tend au contraire à augmenter la résistance au glissement. Au total, selon GRAY [56], la surcharge n'augmente que rarement l'instabilité des pentes et peut au contraire le plus souvent jouer un rôle favorable.

IV. 2. 6. Effet de coin

C'est la tendance des racines à pénétrer les fissures et par là à causer des instabilités locales par effet de coin ou de levier. Ces phénomènes, selon GRAY, sont rares et peu importants.

IV. 2. 7. Prise au vent

Les vents forts soufflant vers le bas du talus exercent sur les arbres des moments de renversement. Des arbres brisés ou abattus (chablis) apparaissent ainsi dans certaines forêts, mais ce phénomène ne concernerait essentiellement que les arbres âgés ou malades.

Finalement, les quatre premiers effets (diminution de la teneur en eau, renforcement du sol, soutènement, rôle antichute) augmentent la stabilité des pentes. Le cinquième effet (surcharge) est relativement indifférent. Les deux derniers (effet de coin et prise au vent)

peuvent affecter de façon défavorable la stabilité en masse des sols superficiels. Pris dans son ensemble, cependant, sauf exception, l'action de la végétation sur la stabilité des pentes est finalement très nettement positive. On en a d'ailleurs une démonstration, à contrario, dans le fait qu'une coupe à blanc des arbres sur les pentes peut entraîner une reprise d'anciens glissements.

A titre d'exemple, sur la figure 8, on a schématisé l'implantation d'un arbre de 15 m de haut sur une pente 1 pour 2. On retrouve sur ce schéma quelques-unes des caractéristiques qui peuvent jouer sur la stabilité du terrain.

IV. 3. RÔLES PARTICULIERS DE LA VÉGÉTATION DANS LES OUVRAGES CONFORTATIFS (BIOSTRUCTURES)

La stabilisation de nombreux talus ou de berges de rivières serait impossible si les ingénieurs se contentaient seulement d'un engazonnement superficiel des surfaces. Il leur faut parfois empierrer ou bétonner, souvent à grands frais, pour résister aux glissements, ravinements et affouillements. Dès qu'ils le peuvent, cependant, ils incorporent aux structures inertes des éléments végétaux généralement ligneux. Ils ne le font d'ailleurs pas seulement pour des raisons économiques ou esthétiques, bien compréhensibles, mais aussi parce que le matériel végétal vivant est capable de se régénérer naturellement, contrairement aux structures inertes.

Les dispositifs biostructuraux permettent, dès les premières années, une stabilisation semi-profonde (entre 0,3 et 1 m) ou profonde (> à 1 m) du terrain. Dans le cas le plus simple, le dispositif peut être constitué de piquets en bois. Ces piquets peuvent être constitués soit de bois mort (par exemple, piquets de construction), soit de branches vivantes élaguées et pouvant prendre racine (plançons).

La structure mécanique et les éléments végétaux peuvent se marier de différentes façons. Ils peuvent être intimement mêlés et indissociables ou se répartir les rôles sur une pente donnée. Le fascinage suivant les courbes de niveau est typique du premier cas. Une structure alvéolée et poreuse ou un mur de soutènement bas au pied d'un déblai ou d'un remblai, surmonté d'un talus planté d'arbustes et d'arbres pour renforcer l'ensemble, est typique du deuxième cas.

Comme variante, les interstices de la structure peuvent être plantées avec une végétation ligneuse ou herbacée dont les racines finiront par pénétrer et relier le sol ou les matériaux fins de comblement à l'intérieur et derrière la structure. Les murs de pied en pierres sèches, les murs cellulaires, les murs gabions, les murs à grillages soudés, les murs en pneusol ou en texsol peuvent tous être végétalisés et tomber dans cette catégorie, ainsi que les grilles ou les structures alvéolaires de couverture.

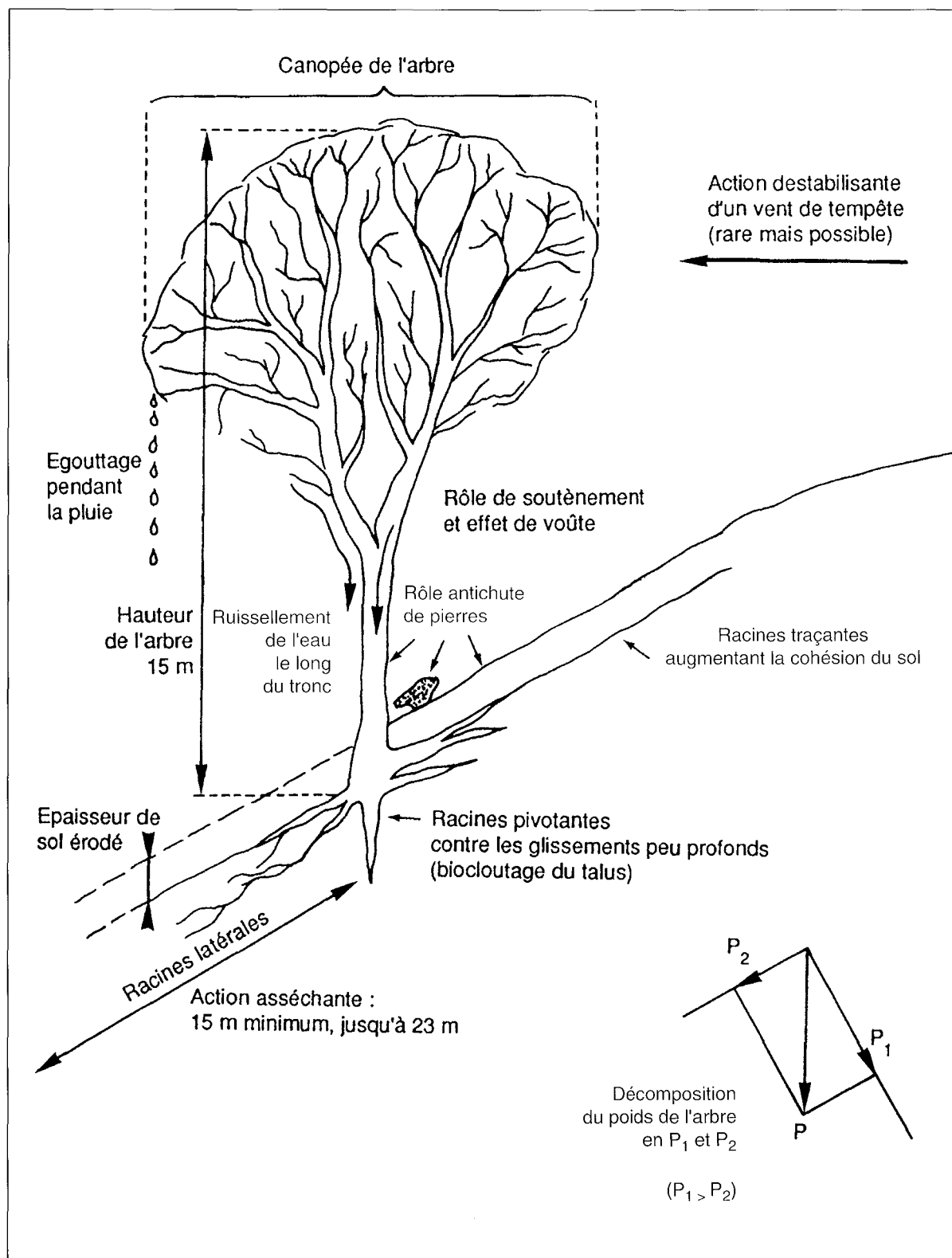


Figure 8 – Implantation d'un arbre de 15 m de haut sur une pente .
L'arbre possède des racines pivotantes et des racines latérales bien développées qui vont bien au-delà de la projection au sol de la canopée de l'arbre

Si le mur, muni évidemment de ses barbacanes, présente un parement imperméable et devient de plus en plus haut et épais, il reste peu à peu le seul à jouer un rôle de stabilisant et il en est ainsi pour les autres structures mécaniques inertes de grandes dimension, par exemple les dispositifs de drainage profond comme les éperons drainants. La végétation, dans ces cas-là, ne joue plus qu'un rôle esthétique (ce qui, bien sûr, n'est pas négligeable en soi).

On a rassemblé sur les figures 9 et 9 bis quelques exemples de biostructures classées suivant les rôles particuliers de la végétation dans ces structures.

On trouvera tout d'abord des biostructures qui font porter l'essentiel du travail de stabilisation sur l'élément végétal ligneux, généralement constitué de boutures vivantes. On peut citer dans ce groupe tous les barrages biomécaniques disposés dans les ravines pour stopper le ravinement (fig. 9 A) ; les fascines et les cordons de boutures mis en place sur les talus (fig. 9 B et 9 C), ainsi que les cordons de boutures posés au fur et à mesure de l'élévation des remblais et des merlons (fig. 9 D et 9 E).

Le rôle de stabilisant diminue un peu, pour la végétation, dans les revêtements cellulaires lourds sur talus (fig. 9 bis F et fig. 9 bis G).

La végétation sur les pentes au-dessus d'un mur bas joue surtout un rôle antiérosif. Si la structure cellulaire de pied est par contre comblée à l'aide de blocailles contenant une proportion de fines suffisante, les racines peuvent s'y développer et améliorer la liaison de l'ensemble de la structure avec les matériaux de remblaiement et le massif (fig. 9 bis H et fig. 9 bis I).

Enfin sur les plates-formes et les risbermes, derrière les murs de moyenne et grande hauteur (fig. 9 bis J et fig. 9 bis K) de différentes conceptions, la végétation ne joue plus, généralement, qu'un rôle insignifiant dans la stabilité de l'ensemble. Par contre, le rôle esthétique de la végétation est et demeure très important pour intégrer ces ouvrages dans l'environnement et le paysage.

IV. 4. LIMITATIONS, INSUFFISANCES OU INCONVÉNIENTS DES PROTECTIONS VÉGÉTALES

Dans la lutte contre l'érosion sur l'emprise des chantiers ou des ouvrages de génie civil et dans la lutte contre l'instabilité des pentes, la végétation constitue donc une solution qui semble à priori avantageuse à beaucoup de points de vue. Il ne faut pas oublier cependant certaines limitations qui font que, dans certains cas, il est nécessaire d'éviter toute végétation ou de la remplacer, au moins provisoirement, par d'autres mesures antiérosives ou d'accompagner cette végétation par des mesures de stabilisation structurelle. Ces limitations ou inconvénients sont les suivants :

IV. 4. 1. Surfaces non végétalisables, supports de chaussées

Les travaux de terrassements impliquent la création de surfaces importantes de sol nu sou-

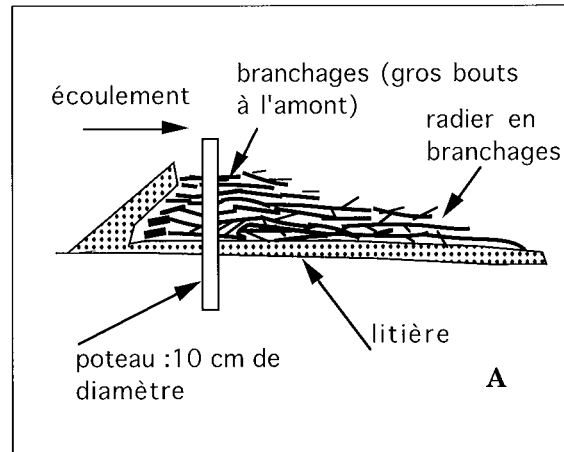
mises à forte érosion. Certaines de ces surfaces, par fonction, ne sont évidemment pas végétalisables, par exemple les couches de forme ou les sols de fondation, et il faut aussi les protéger contre l'érosion. Il se trouve heureusement que les traitements et compactages, qui sont nécessaires pour leur assurer une portance suffisante, leur confèrent le plus souvent une résistance à l'érosion leur permettant d'attendre sans trop de dégâts les futures couches de chaussée.

RÔLES JOUÉS PAR LA VÉGÉTATION DANS LA STRUCTURE

STRUCTURES OU ÉLÉMENTS DE STRUCTURE SCHÉMATISÉS

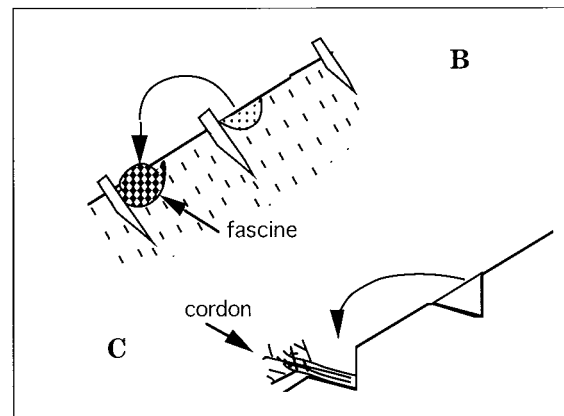
SUR RAVINES ET BERGES

- **Arrêter les ravinements**
- **Filtrer et sédimenter**
- **Diminuer les affouillements**
- Barrages biomécaniques (A)
- Embroussailllements de berges
- Tunages
- Epis en rivières, etc.



PLANTS OU BOUTURES SUR DÉBLAIS

- **Filtrer le ruissellement**
- **S'opposer au mouvement vers le bas, par effet de voûte et d'étalement**
- Plançons
- Fascinages (B)
- Clayonnages
- Cordons (C)



PLANTS OU BOUTURES SUR REMBLAIS

- **Stabiliser les remblais et les levées de terre**
- **Raidir les pentes**
- Cordons incorporés dans des remblais (D)
- Cordons dans merlons antibruit ou de sécurité (E)

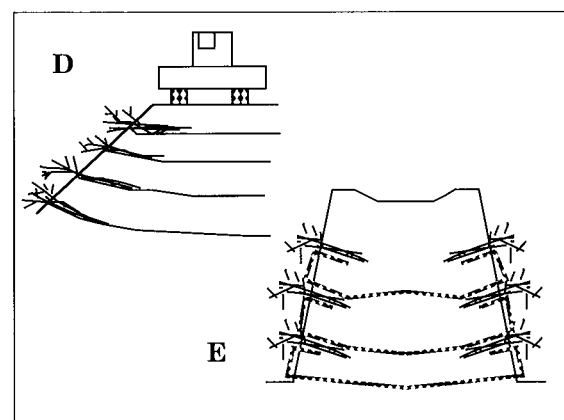


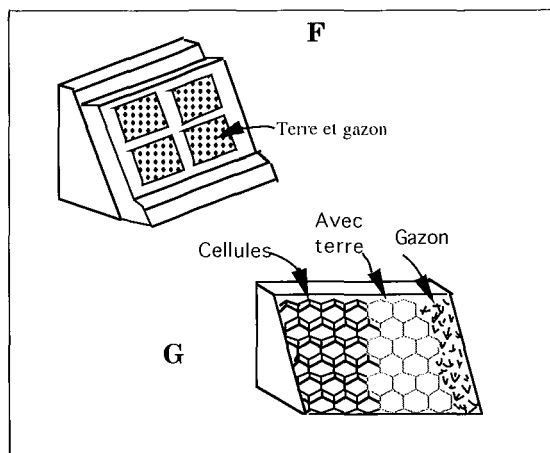
Figure 9 – Schématisation de quelques biostructures suivant les différents rôles joués par la végétation

RÔLES JOUÉS PAR LA VÉGÉTATION DANS LA STRUCTURE

STRUCTURES OU ÉLÉMENTS DE STRUCTURE SCHÉMATISÉS

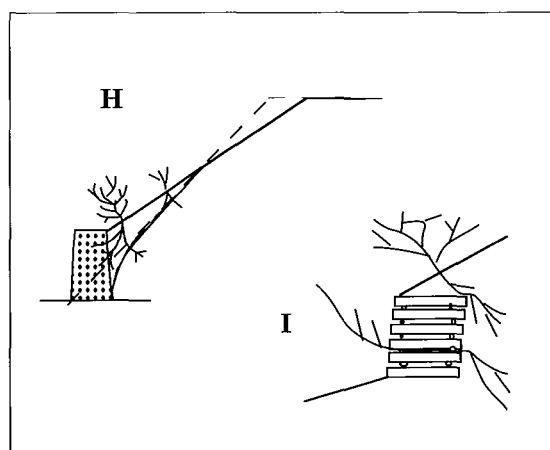
REVETEMENT DE TALUS

- Protéger la surface
- Augmenter la cohésion du sol remplissant les mailles de la structure
- Alvéoles en béton (F)
- Géotextiles tridimensionnels (G)
- Pavés autobloquants
- Pneusol, etc.



MURS BAS ÉCONOMIQUES

- Arrêter l'érosion de pentes adoucies au-dessus du mur
- Augmenter les liaisons murs + matériaux de remblaiement + massif de sol
- Murs de pied en pierres sèches ou maçonneries (H)
- Murs cellulaires (I)
- Gabions, Pneusol, etc.



MURS DE MOYENNE ET GRANDE HAUTEUR

- Augmenter l'esthétique des murs et des parements
- Murs poids (J) et cantilever
- Murs en palplanches
- Pneusol, Texusol
- Sols renforcés (K)
- Murs verts avec caissons et jardinières

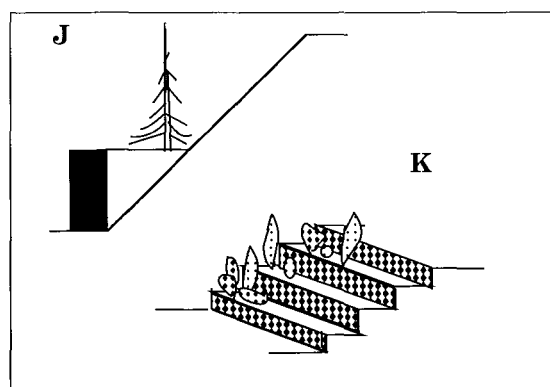


Figure 9 bis – Schématisation de quelques biostructures (de la figure 9 A à la figure 9 bis K le rôle stabilisant local de la végétation diminue, le rôle esthétique tend à augmenter).

IV. 4. 2. Résistance insuffisante des engazonnements aux agents érosifs le long de certains écoulements

Certaines surfaces sont soumises à une trop forte attaque érosive pour que la végétation employée seule (et notamment les engazonnements) puisse jamais s'y implanter rapidement et de façon satisfaisante. C'est ainsi que l'action de l'eau peut parfois être trop violente le long de certains fossés, certaines cunettes ou certaines berges de rivière soumises au clapotis et à l'affouillement des vagues et à fortiori le long et au bas des descentes et chutes d'eau.

Des règles plus ou moins précises (et qu'il y aurait sans doute lieu de préciser davantage par des recherches) voient donc le jour et essayent de répondre aux différents cas d'exclusion des engazonnements.

Ainsi, les cunettes et fossés routiers doivent être revêtus en principe toutes les fois que :

- a) la vitesse de l'eau dépasse une vitesse limite qui est de l'ordre de 1 m / s, mais qui dépend en fait de la nature du sol, de la qualité de l'engazonnement et des espèces choisies [55] [71] [74] [85]. On trouvera quelques indications, à ce sujet, dans l'annexe 1 ;
- b) la pente longitudinale dépasse une certaine valeur qui varie, selon les auteurs, entre 3,5 % et 4 % [55] [85].

Remarquons ici que des solutions graphiques basées sur la formule de Manning sont proposées par différents auteurs [36] [74] pour obtenir la vitesse admissible à partir d'autres caractéristiques des cunettes : rayon hydraulique, coefficient de rugosité, gradient de l'écoulement longitudinal, distances entre exutoires, etc. ;

- c) la pente longitudinale est inférieure à 1 % ;
- d) les infiltrations sont inacceptables, pour différentes raisons : périmètre de protection d'une nappe exploitée, crête de talus de déblai [85], pied de talus de déblai en sol sensible potentiellement instable [97].

IV. 4. 3. Délais parfois importants entre la création des surfaces par les terrassements et leur végétalisation.

Entre la date où le sol est dénudé pour les besoins des travaux de terrassement et celle où il finit par êtreensemencé ou planté, il s'écoule parfois une période de plusieurs mois. Des mesures conservatoires, autres que végétales, doivent donc être prises, autant faire se peut, pendant cette période.

Entre l'ensemencement ou la plantation et l'établissement réel de la végétation, il s'écoule aussi un délai de plusieurs mois pendant lequel la pénétration dans le sol des racines est très faible. L'effet antiérosif ou asséchant ou stabilisateur reste provisoirement faible. Les plantes doivent croître pour remplir leurs fonctions. Pendant toute la période de démarrage, des mesures d'accompagnement, provisoires ou non, doivent donc être prises.

IV. 4. 4. Besoins et exigences des végétaux parfois difficiles sinon impossibles à satisfaire.

Les besoins en eau, sels minéraux et oxygène doivent être assurés dans une épaisseur minimum de sol meuble contenant suffisamment de fines pour assurer la nourriture et l'infiltration mécanique des racines. Ces impératifs sont fondamentaux si l'on veut assurer

la réussite de la végétation.

- a) Teneur en eau minimum. La principale limitation est bien évidemment l'alimentation en eau. La réussite des bouturages, parfois assez difficile, dépend étroitement, dans les premiers mois, d'une humidité satisfaisante du sol. Les fortes sécheresses climatiques peuvent affaiblir durablement, voire supprimer, la végétation herbacée et même la végétation ligneuse, si celle-ci est d'implantation récente. Mais la teneur en eau ne doit pas être trop forte car l'oxygénation des racines est nécessaire.
- b) Epaisseur minimum de sol meuble. Une épaisseur minimum de sol meuble est indispensable pour permettre un bon enracinement. Pour un engazonnement, cette épaisseur est de l'ordre de 15 à 20 cm ; pour les plantations, elle dépend des espèces choisies : par exemple 50 cm pour les aulnes, bouleaux, pins et arbustes, 80 cm pour les tilleuls, érables, charmes, 100 cm pour les chênes, frênes, hêtres, peupliers. Sur dalle de béton, des épaisseurs de sol nécessaires pour un bon développement, mal connues aujourd'hui, devraient sans doute être doublées.
- c) Richesse minimum en éléments nutritifs N, P, K. et en oligo-éléments. C'est un facteur limitant très important, surtout en génie civil où l'on est amené à végétaliser des sols bruts dépourvus de matières organiques et d'éléments fertilisants. Il est donc absolument nécessaire d'apporter ces éléments au moyen d'engrais complets au cours du semis ou au moment des plantations. On a pu dire, à ce sujet, qu'en matière de protection contre l'érosion, un sac d'engrais est bien plus efficace qu'un sac de ciment [74]. On a d'ailleurs pu montrer expérimentalement sur des engazonnements [6], que plus la quantité d'engrais appliquée au semis était importante, plus la précocité, la densité de couverture et donc la résistance à l'érosion était grande (voir les photos n° 5 et n° 6).
- d) Quantité satisfaisante d'argile ou d'argile et d'humus (complexe argilo-humique). L'argile ou ce complexe donne au sol sa capacité de rétention en eau et empêche la disparition par lixiviation des éléments fertilisants N, P, K au cours de la percolation.
- e) pH relativement proche de la neutralité.
- f) Terrain pas trop en pente. Les sols très pentus sont difficilement végétalisables, surtout pour des raisons d'implantation mécanique, sauf recours à des nappes de géotextiles ou à d'autres méthodes biostructurelles.

IV. 4. 5. Sensibilité de la végétation à la pollution, aux maladies, au piétinement, au vandalisme.

Les troubles de fonctionnement de la végétation peuvent être dus également à certaines pollutions du sol (sel des fondants routiers, herbicides) ou de l'air (émanations d'usine).

La végétation peut être vulnérable à des maladies d'origine parasitaire (bactéries, virus ou champignons) et aux attaques des insectes. Citons par exemple le feu bactérien des rosacées, le chancre des platanes, la graphiose de l'orme, les processionnaires du pin ou du chêne, etc.

En certains lieux très fréquentés, le vandalisme (branches cassées, fleurs arrachées, troncs blessés), l'alimentation excessive des animaux sauvages ou domestiques ou encore le simple piétinement mettent en danger mortel la végétation. Ces dangers sont particulièrement importants dans les parcs et zones de loisirs urbains, les aires de repos le long des autoroutes, les zones touristiques au bord de la mer ou à la montagne, etc.

beaucoup, l'arbre le plus dangereux pour les bâtiments construits sur argile. Trois autres espèces sont également très dangereuses sur argile : le chêne, le saule et l'orme. Selon BIDDLE, ces arbres ne peuvent être acceptés qu'à une distance supérieure à 1,5 fois la hauteur de l'arbre adulte, soit environ $20 \times 1,5 = 30$ mètres. Si l'on évite ces quatre espèces, il est possible cependant, selon lui, d'accepter de rapprocher davantage les bâtiments et les arbres, mais à condition d'approfondir les fondations de 1 m (profondeur habituelle en Angleterre) à 1,50 m.

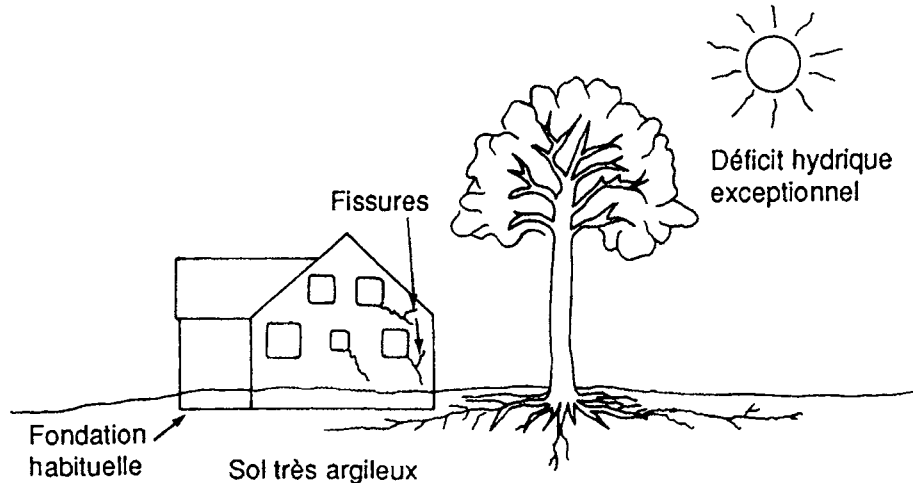


Figure 10 – Sur un sol très argileux, au cours d'une sécheresse importante, un arbre trop proche entraînera des fissures dans les superstructures d'un bâtiment (à moins d'avoir prévu des fondations plus importantes).

Pour les constructions neuves sur argile et pour éviter tout dégâts, VANDANGEON [155] demande le respect de quatre conditions :

- approfondir les fondations aussi bas que possible et, si le terrain est en pente, les encastrer dans le terrain naturel de la même hauteur à l'amont et à l'aval,
- avoir des structures aussi rigides que possible,
- éviter les plantations de peupliers, saules et chênes,
- faire des canalisations résistantes.

IV. 5. CONCLUSION PARTIELLE SUR L'UTILISATION DES VÉGÉTAUX

Les chapitres précédents nous ont montré que la végétation, matériau de construction et de protection antiérosive, n'est pas un matériau de construction comme les autres. Si la végétation a des atouts très importants : souplesse, régénération, efficacité, agrément, beauté, elle a aussi de nombreuses exigences et de nombreuses limitations. On soulignera cependant que ces limitations peuvent être, le plus souvent, atténuées voire surmontées :

- si l'on choisit le type de végétation qui convient ;
- si l'on utilise la végétation en symbiose avec des structures inertes de protection superficielle et des éléments mécaniques structuraux ;
- si l'on veille à une bonne implantation et à un bon entretien.

Il reste, bien entendu, que la mise en place d'une bonne végétation de protection n'est pas toujours possible, loin s'en faut, comme nous l'avons vu dans le chapitre IV. 4., que la végétation est le plus souvent absente pendant les travaux de terrassement, les travaux d'aménagement des sols et des cours d'eau ou les travaux agricoles de préparation des sols aux différentes cultures, alors que les terrains sont soumis, justement à ce moment là, à une très forte érosion. Les exceptions, on le voit, sont nombreuses et réclament des mesures spécifiques. D'où l'intérêt de se pencher à présent sur le panorama des techniques de lutte antiérosive, et des méthodes de protection et de stabilisation utilisées. Les techniques sont nombreuses ; sans entrer dans les détails, nous essayerons d'en faire une liste aussi complète que possible.

V. PANORAMA DES TECHNIQUES DE LUTTE

V. 1. DIVERSITÉ ET ÉVOLUTION DES MESURES ANTIÉROSIVES

Si les principes de la lutte antiérosion ou ceux de la maîtrise de la sédimentation sont relativement peu nombreux, ils s'appliquent à des conditions locales qui sont extrêmement diverses dans leurs caractéristiques topographiques, pédologiques ou climatiques et dans leur environnement économique et social. Cette mosaïque de conditions entraîne une grande diversité dans les mesures antiérosives, que ce soit dans le domaine agricole ou dans celui du génie civil.

La plupart des techniques de lutte contre l'érosion en génie civil s'inspirent des techniques utilisées en agriculture. Certaines diffèrent cependant notablement parce que les terrassements en génie civil sont souvent confrontés à des problèmes inconnus en agriculture, par exemple maîtrise des eaux de ruissellement sur de grandes surfaces bouleversées par des engins de terrassement très puissants ou bien stabilisation de très fortes pentes jamais rencontrées, au moins à cette échelle, en agriculture.

En plus des facteurs techniques et économiques, l'hétérogénéité des mesures antiérosives à un instant donné peut être due aussi à la persistance locale, surtout en agriculture, d'anciennes mesures de stabilisation. Ces mesures ont fait leurs preuves depuis longtemps localement mais, pour différentes raisons techniques, elles sont restées seulement d'usage local, peut-être parce que les régions concernées étaient isolées ou en sous-développement relatif.

Certaines de ces anciennes techniques locales ne sont plus mises en oeuvre de nos jours ou sont mal entretenues ou même abandonnées parce que les terrains ou les structures protégés n'ont plus un intérêt économique suffisant ou que le pays environnant se désertifie par attirance urbaine. Ce défaut d'entretien peut conduire parfois à une instabilité dangereuse des pentes, comme pour les anciennes zones cultivées en terrasses sur certains versants montagneux. De même, les talus des paysages de bocages sont parfois détruits de façon abusive [22] parce qu'on les considère comme des obstacles à la mécanisation, en oubliant leurs autres avantages, qui sont nombreux.

Inversement, dans les régions urbaines et industrielles et pour les ouvrages de génie civil où l'investissement consenti est parfois énorme ou du moins sans commune mesure avec les terrains agricoles avoisinants, les ingénieurs ou les aménageurs n'hésitent pas à innover. Ils expérimentent des matériaux plus performants, ils vulgarisent de nouvelles techniques en essayant si possible de leur fixer des limites d'application ou d'utilisation économique.

Dans l'essai de classification ou de taxonomie des techniques antiérosives que l'on trouvera ci-après, nous avons donc cherché à être le plus exhaustif possible de façon à ce que l'ingénieur ou l'aménageur ait en tête toutes les techniques disponibles, les anciennes et les nouvelles, non seulement pour le cas particulier qui l'intéresse, mais aussi dans des situations analogues y compris dans d'autres domaines d'activité que les siennes propres.

V. 2. TAXONOMIE DES TECHNIQUES

L'ensemble des actions, procédés, matériaux et dispositifs qui sont utiles pour diminuer, au maximum, les risques d'érosion ou la charge solide des eaux quittant les terres cultivées, les chantiers et les ouvrages de génie civil en général, peut être subdivisé en cinq groupes. Les différentes rubriques de chacun des groupes concernés ont en commun le fait qu'ils agissent dans un certain domaine. On distinguera donc successivement :

- 1 les actions sur la physique du sol,
- 2 les protections des surfaces,
- 3 la modulation de l'inclinaison des talus,
- 4 la maîtrise des eaux superficielles,
- 5 les protections spéciales pour zones très attaquées ou sensibles.

On a reporté de façon synthétique ces cinq groupes sur les cinq tableaux que l'on trouvera ci-après. On remarquera que chacun de ces tableaux est subdivisé à son tour en sous-groupes et que chacun de ceux-ci comporte des procédés ou des traitements élémentaires eux-mêmes diversifiés en fonction des techniques ou des matériaux spéciaux utilisés.

On trouvera ci-après une description succincte de ces cinq tableaux.

V. 2. 1. Tableau N° 1 – Actions sur la physique du sol.

Les actions sur la physique du sol peuvent entrer dans deux catégories :

- 1 Les actions et dispositifs modifiant le partage des eaux de surface entre infiltration et ruissellement,
- 2 Les traitements et matériaux diminuant, dans leur masse, l'érodabilité des sols superficiels.

Le partage entre l'infiltration et le ruissellement peut être modifié :

- 1 En jouant sur la perméabilité des sols superficiels à l'aide de façons culturales ou de compactages divers ;
- 2 Par l'assainissement du sol, soit par façonnage de la surface (de manière à guider le ruissellement sur un système de drainage externe) soit par diminution des teneurs en eau grâce à un drainage interne (de manière à augmenter l'infiltration pendant les pluies) ;

TABLEAU N° 1 – ACTIONS SUR LA PHYSIQUE DU SOL

AGIR SUR LE COUPLE INFILTRATION-RUISSELLEMENT

- Assainissement

- drainage externe
 - Augmentation et réglage des pentes en terrain subhorizontal
 - Ados
 - Fossés à ciel ouvert
- drainage interne

- Traitements mécaniques jouant sur la perméabilité

- Façons culturales des sols à végétaliser
 - Labours. Quasi-labours (avec dents, disques, rotovator, etc.)
 - Sous-solage. Épierrage, etc.
- Compactage
- Dangers de l'imperméabilisation des surfaces

- Augmentation ponctuelle de la détention

- Travail isohypse (suivant les courbes de niveau)
- Redan
- Gaufrage
- Crantage par chenilles

- Structures poreuses pour parkings, chaussées et accotements

- Bassins de retenue et d'absorption

DIMINUER L'ÉRODABILITÉ DES SOLS SUPERFICIELS DANS LEUR MASSE

- Conditionneurs de sol

(Produits divers à base de polyacrylamide ou polybutadiène ou silicates ou urée et formaldéhyde, etc.)

- Amendements organiques et humus

- Lisiers et fumiers
- Empaillage et engrais verts
- Déchets végétaux et composts
- Gadoues et boues organiques des stations d'épuration

- Amendements minéraux pour augmenter le pH

- Chaux vive éteinte. Marnes. Calcaires broyés. Laitiers, etc. (relèvement du pH d'un sol argileux de 0,5 unité : environ 0,15 kg/m² de chaux vive sur 10 cm)

- Traitements des sols tendant à la cimentation

- Ciments. Chaux vive. Chaux éteinte (Dosage moyen de ciment 5 % – Dosage moyen de chaux vive 2,5 % soit environ 4,5 kg/m² sur 10 cm)

- Compactage

- Compactage de bords de remblai
- Fermeture des couches superficielles avant l'orage

- 3 Par l'augmentation ponctuelle de la détention des eaux (de manière à ce qu'elles s'infiltreront au maximum sur place sans ruisseler), par exemple façons culturales suivant les courbes de niveaux, billonnage et gaufrage du terrain.

On peut rattacher également à l'action précédente les structures et dispositifs spéciaux qui permettent la retenue prolongée des eaux de ruissellement, comme par exemple, les structures poreuses pour parkings, chaussées et accotements et les bassins de retenue et d'absorption sur autoroutes.

La diminution de l'érodabilité des sols superficiels se fait généralement, de son côté, grâce à l'incorporation de différents produits chimiques qui apportent une certaine cohésion ou une certaine charpente à la texture des sols. Il peut s'agir :

- soit de produits utilisés pour faciliter la création d'un complexe argilo-humique autorésistant à l'érosion et favorable à la végétation,
- soit de produits corrigeant un grave déséquilibre de pH nuisible à la végétation et donc à la lutte antiérosive,
- soit encore de produits de traitement utilisés sur les plates-formes routières et qui tendent à une certaine cimentation du sol afin d'assurer une portance et une résistance mécanique minimales, tout en luttant de façon radicale contre les dangers d'érosion.

Il est rappelé enfin que le compactage se montre toujours efficace pour augmenter la résistance du sol à la battance des gouttes de pluie et au ruissellement.

V. 2. 2. Tableau N° 2 – Protection des surfaces

Le groupe des protections de surface est divisé en deux sous-groupes. L'un a trait aux protections végétales et l'autre aux protections inertes.

Remarquons tout d'abord que certaines surfaces, bien que très peu végétalisées, ne sont pratiquement pas érodables ; c'est le cas par exemple de certains éboulis calcaires dans lesquels le pourcentage de fines est très faible (voir la photo n° 7). Les autres surfaces non végétalisées sont toutes plus ou moins érodables. La protection des surfaces avec des couverts végétaux est alors très efficace contre l'érosion. On cherchera donc toujours, par principe, à conserver au maximum la végétation existante et à retarder au maximum son enlèvement avant les travaux.

Les sols recouverts d'une couche de terre végétale au moins supérieure à 10 cm sont généralement végétalisables parce que cette couche renferme le plus souvent une quantité minimum d'éléments nutritifs (essentiellements N, P, K). Mais ce n'est pas le cas pour les sols fins bruts découverts par les terrassements ou l'érosion naturelle (voir la photo n° 8). Il faut donc apporter, par des engrais, les éléments nutritifs nécessaires.

Ensuite, il faut résoudre le problème pratique de la mise en végétation, soit par semis, plantations, boutures, soit à l'aide de structures biomécaniques (voir les photos 9 à 12), et enfin prévoir un entretien suivi des surfaces végétales. On a ici un ensemble de techniques et d'applications pratiques, agronomiques et horticoles, relativement spécifiques au génie civil et aux travaux publics .

Le deuxième sous-groupe du tableau n° 2 est relatif aux protections inertes qui, le cas échéant, peuvent être végétalisables ou non végétalisables. C'est à la fois le critère de capacité de végétalisation et celui du poids de la protection à mettre en oeuvre par unité de surface qui nous paraissent les plus pertinents pour différencier les différentes protections dans ce deuxième sous-groupe.

TABLEAU N° 2 – PROTECTION DES SURFACES

PROTÉGER LES SURFACES AVEC DES COUVERTS VÉGÉTAUX

- **Maintien ou enlèvement de la couverture végétale initiale**
- **Satisfaction des besoins élémentaires de la végétation**
 - Aération du sol - Rétention en eau - pH - Eléments nutritifs
 - Apports éventuels : terre végétale - amendements - engrais (N, P2 05 , K 20) arrosage et irrigation
- **Adaptation des espèces choisies au climat et aux fonctions recherchées**
- **Mise en place avec ou sans matériaux inertes végétalisables**
 - Engazonnements
 - Semis classique • Semis hydraulique • Gazon en plaque
 - Nattes et géotextiles préensemencés
 - Plantations des ligneux
 - semis • jeunes plants • boutures
 - Structures biomécaniques
 - Plançons • Fascinages • Clayonnages et Tunages • Cordons de branchages
 - Paillassonnages de branches
- **Entretien et gestion de la végétation**

PROTÉGER LES SURFACES AVEC DES MATÉRIAUX INERTES

- **Protections perméables légères, végétalisables**
 - Fixateurs et stabilisants
 - Alginates et polyuronides • Emulsions de latex ou de bitume
 - Dispersions de polymères de vinyle ou d'éthylène, etc.
 - Paillis divers (avec ou sans fixateurs et engrais)
 - Paille, Foin, Paille-bitume • Tourbe, cellulose et déchets de bois • Broussailles broyées • Fibre de verre • Filets de jute, nattes et paillasons • Géotextiles (filets et non tissés) • Nappes géosynthétiques tridimensionnelles • Films de paillage en polyéthylène basse densité (PE bd) autour ou entre les plants (plasticulture)
 - Géogrilles, grillages, filets avec ancrages
 - Placage et confinement des matériaux évolutifs • Dispositifs antichute de pierres
- **Revêtements perméables lourds, végétalisables**
 - Couche de terre végétale
 - Mélange boueux épais (5 à 10 cm) + fils ou grillages
 - Structures cellulaires remplies de terre végétale
 - Géotextile tridimensionnel alvéolé • Alvéoles en béton préfabriqué ou projeté • Couverture de pneus • Pavés de béton ajourés jointifs autobloquants ou fixés sur géotextiles, etc.
- **Revêtements perméables lourds, difficilement ou non végétalisables**
 - Perrés non cimentés de couverture ou couches de cailloux • Gabions de couverture
 - Enrochements et tétrapodes
- **Protections totales par imperméabilisation, non végétalisables**
 - Géomembranes (protections légères provisoires et protections permanentes pour étanchéité)
 - Bitumage épais • Gunitage armé ou non • Bétonnage • Perrés maçonnés

On distingue donc :

- Les protections perméables légères végétalisables (voir photo n° 13)
- Les revêtements perméables lourds végétalisables (voir photo n° 14)
- Les revêtements perméables lourds non végétalisables (voir photo n° 15)
- Les protections totales par imperméabilisation non végétalisables.

On remarquera ici que les protections totales par imperméabilisation non végétalisables sont en réalité de deux types :

- Il y a tout d'abord les protections pour lesquelles l'imperméabilité est véritablement la caractéristique recherchée. C'est le cas par exemple des géomembranes utilisées, soit à titre provisoire sur les talus des ouvrages d'art ou les bâtiments en construction, pour les protéger de l'érosion des pluies (voir photo n° 16), soit à titre permanent en parement amont des barrages en terre ou en couverture des bassins de stockage, des réserves d'eau ou même à présent des canaux ;
- Il y a ensuite les protections pour lesquelles l'imperméabilisation n'est qu'un sous-produit. C'est le cas par exemple du bétonnage des berges de rivières, pour lesquelles on recherche essentiellement la résistance mécanique à l'érosion hydraulique.



Photo n° 7 : Talus calcaire autoroutier résistant à l'érosion, dans le Midi de la France. Noter la végétation clairsemée. Quelques plantes pourront néanmoins se développer et améliorer l'esthétique du talus (qui n'est pas mauvaise).



Photo n° 8 : Érosion spectaculaire des marnes noires, dans la région de Digne. Une fois le processus engagé, l'érosion semble irréversible. Remarquer la partie non attaquée ausommet de l'escarpement et, en bas, une station limnigraphique du Cemagref [31].



Photo n° 25 : Vignoble implanté en marche d'escalier.



Photo n° 26 : Paysage de terrasses dans le Midi méditerranéen.



Photo n° 27 : Déblai rocheux autoroutier en marches d'escalier.



Photo n° 28 : Exploitation d'une carrière en marches d'escalier.

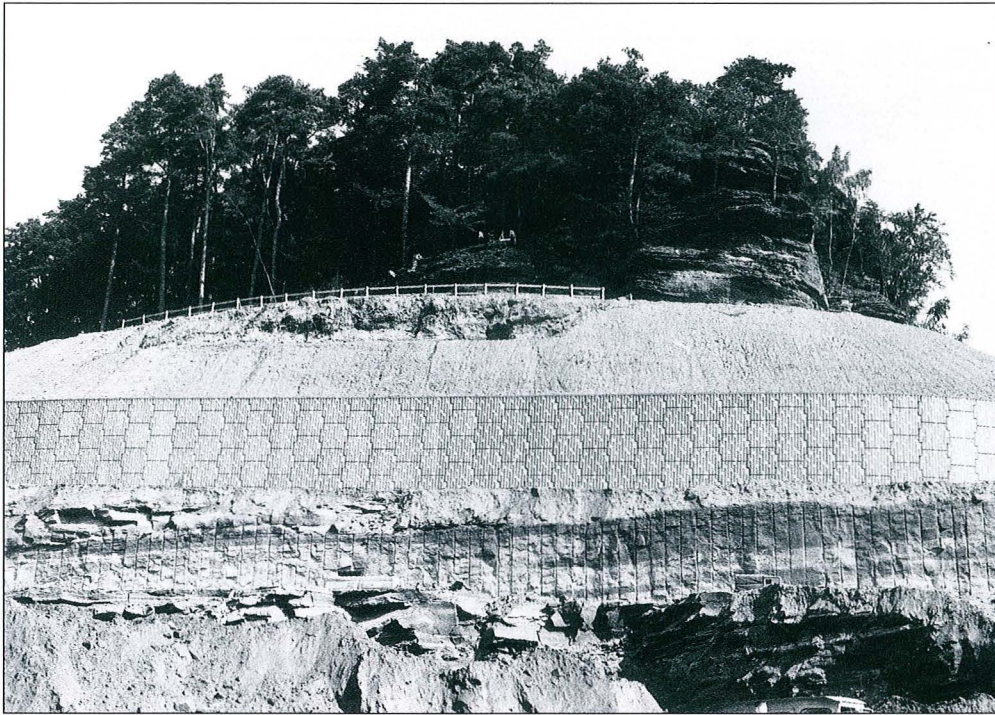


Photo n° 29 : Mur en Terre Armée.



Photo n° 30 : Sous le tablier d'un pont, mur armé d'une grille avec paillis pour engazonnement.



Photo n° 31 : Merlon de protection en pneusol.



Photo n° 32 : Massif en Texsol engazonné supportant une voie ferrée.



Photo n° 33 : Mur cellulaire à encoffrement.



Photo n° 34 : Mur poids en béton. Une vigne vierge commence heureusement à le tapisser.

V. 2. 4. Tableau N° 4 — Maîtrise des eaux superficielles

L'un des aspects de la lutte contre l'érosion a trait à la maîtrise des eaux superficielles. Ces dernières sont évidemment dangereuses toutes les fois qu'elles se concentrent et que leur vitesse dépasse une certaine valeur. La maîtrise des eaux superficielles consistera donc à empêcher ou retarder au maximum la concentration et, une fois que celle-ci est créée ou impossible à éviter, à canaliser les eaux concentrées et à les empêcher de nuire.

On le fait évidemment avec des modalités et une ampleur différentes aux différents stades des travaux ou de la vie de l'ouvrage. Il va de soi que les plus importantes mesures sont appliquées au cours des travaux de terrassement ; autant que faire se peut, certaines de ces mesures temporaires sont conçues pour s'intégrer dans l'ouvrage définitif et devenir ainsi permanentes.

Le tableau n° 4 ventile les méthodes et les dispositifs utilisés dans les différentes actions. Celles-ci consistent à :

– Maintenir ou rétablir les écoulements naturels permanents.

Le plus urgent et le plus important dans la maîtrise des eaux superficielles est d'assurer un libre passage de l'écoulement naturel permanent, à l'endroit où il est prévu de construire un remblai. Pour cela, avant d'élever le remblai, on construira dans le thalweg les aqueducs nécessaires, buses ou ponceaux (voir photo n° 35). Certains de ceux-ci peuvent être provisoires, comme ceux destinés au passage des pistes de chantier (voir photo n° 1 page 17). Le dimensionnement des aqueducs définitifs sous les futurs remblais doit évidemment faire l'objet d'études préalables. On consultera à ce sujet la Recommandation pour l'Assainissement Routier du L.C.P.C.-S.E.T.R.A. [85] ;

– Dériver les eaux en amont des chantiers.

On limite ainsi beaucoup les quantités d'eau dont on doit assurer la maîtrise à l'intérieur de la zone de chantier. Cette dérivation permet au chantier de rester le plus au sec possible ; seules les précipitations tombant sur l'emprise du chantier seront à prendre en compte. Pour cela les petits ruisseaux seront déviés vers l'émissaire principal avant l'aqueduc sous remblai ; par ailleurs, les eaux de ruissellement en amont de l'emprise seront captées, avant le début des travaux, par exemple par un fossé de crête (voir photo n° 36) ;

– Filtrer les ruissellements.

On élimine ainsi, très près de leur source, la plus grosse partie de la charge solide des eaux de ruissellement ;

– Stopper ou canaliser les ruissellements sur l'emprise du chantier.

Les quantités d'eau qui ruissellent sur les surfaces au cours d'une pluie dépendent de la perméabilité de ces surfaces, de leur rugosité et de leur pente. La réunion des différents filets d'eau qui résultent de ce ruissellement crée des courants qui divaguent sur les surfaces, en détruisant l'agencement géométrique nécessaire à toute bonne exploitation (agricole, industrielle ou de transport). On intervient donc pour briser ces filets d'eau avant qu'ils ne prennent trop d'importance et empêcher ainsi des concentrations anarchiques et dangereuses. Suivant la perméabilité du terrain, on peut soit faciliter l'infiltration des eaux (terrasses d'absorption), soit assurer une évacuation vers un exutoire protégé ;

– Évacuer les eaux concentrées.

Cette nécessité impérieuse impose que l'on prenne un soin particulier dans la réalisation et le dimensionnement des ouvrages de drainage superficiel, en fonction notamment des débits maximaux prévisibles. Ceux-ci différeront suivant la pente et les caractéristiques des surfaces et notamment suivant leur perméabilité. En effet, ce qui distingue d'une part les terrains cultivés et d'autre part les zones urbanisées et industrielles ou les ouvrages linéaires de transport, c'est essentiellement la grande rapidité de réponse hydraulique du

deuxième groupe de surfaces, qui est dû à leur forte imperméabilité. Ceci peut être dangereux car l'eau arrive sans retard, par les différents fossés et aqueducs de l'ouvrage, aux différents exutoires et à l'émissaire principal. Celui-ci peut subir alors des débits de pointe fortement accrus. Par exemple, l'implantation d'une route à proximité d'un petit cours d'eau (ou d'un torrent en montagne) peut donner naissance dans ce cours d'eau à des affouillements et plus loin à des dépôts dus à ces débits de pointe accrus. Pour atténuer les dangers ainsi encourus, notamment pendant les pluies d'orage, on agira sur le couple infiltration-ruissellement en utilisant certains des procédés cités dans le tableau n° 1 (p. 53)

Les collecteurs le long des chantiers et des ouvrages linéaires leur sont évidemment plus ou moins parallèles. Les fils d'eau ou fossés drainants sur risberme doivent être reliés à des descentes d'eau (voir photo n° 37) et être entretenus périodiquement de façon à pouvoir purger tout éboulement pouvant conduire les eaux sur une pente de talus non préparée à l'avance (voir photo n° 38).

Une particulière attention doit être apportée au traitement des fossés et cunettes au pied des déblais pour ne pas avoir à subir des accidents comme celui représenté sur la photo n° 39. Si le sol est peu érodable, on peut considérer qu'un revêtement est inutile et seulement encourager la pousse d'un gazon (photo n° 40). Par contre, si la pente est forte et le sol très érodable, le bétonnage du fossé est conseillé (photo n° 41). Les limites pour lesquelles on doit passer du gazon au béton sont sujettes à variation suivant les pays et les niveaux de service des ouvrages. On trouvera certaines données à ce sujet en annexe.

Lorsque la pente des écoulements concentrés devient très élevée (descentes d'eau et déversoirs de barrage), la vitesse de l'eau est telle qu'elle peut devenir extrêmement agressive. Il est donc nécessaire d'y concevoir spécialement les revêtements et d'y briser la force de l'eau à l'aide de dissipateurs d'énergie. Les descentes d'eau qui conduisent les écoulements d'un niveau à l'autre coupent au plus court, suivant la ligne de plus grande pente et celle-ci peut être très élevée, par exemple égale à 100%. La partie la plus fragile de ces ouvrages se trouve à leur début et à leur fin, là où il y a une rupture de pente. Pour éviter des accidents, tel celui représenté sur la photo n° 42, il est nécessaire de protéger ces endroits à l'aide d'entonnoirs bétonnés et parfois même d'enterrer l'écoulement dans un tuyau bétonné comme celui représenté sur la photo n° 37 ;

– Maîtriser la sédimentation et le stockage des eaux.

Sur l'emprise de certains chantiers ainsi qu'aux différents exutoires de ces chantiers, ce sont des mesures indispensables si l'on ne veut pas que les eaux claires des cours d'eau environnants ne se troublent de façon dommageable.

TABLEAU N° 4 - MAÎTRISE DES EAUX SUPERFICIELLES

MAINTENIR ET RÉTABLIR LES ÉCOULEMENTS PERMANENTS

- Etude et calcul des débits potentiels
- Buses et ponceaux sous remblais

DÉRIVER LES EAUX EN AMONT DES CHANTIERS

- Détournement des petits ruisseaux
- Fossés de crête ou d'interception

FILTRE LES RUISSELLEMENTS

- Dispositifs sur terres cultivées
 - Bandes d'arrêts en gazon • Bandes de cultures isohypses
 - Cordons de pierres sèches
- Barrages linéaires sur chantiers pendant les travaux
 - Balles de paille et de foin • Barrières de broussailles
 - Géotextiles filtrants verticaux

STOPPER OU DÉVIER LES RUISSELLEMENTS

- Dispositifs isohypses sur terres cultivées
 - Levées de terre ou terrasses américaines à pente longitudinale nulle (terrasse d'absorption) ou faible 0,1 à 1 % (terrasse de canalisation)
 - Haies végétatives et rideaux • Certains talus du bocage
- Dispositifs isohypses sur terrains en forte pente
 - Fascinages • Clayonnages • Cordons de boutures
 - Minibanquettes et banquettes D.R.S.
 - Risbermes

ÉVACUER LES EAUX CONCENTRÉES (DRAINAGE SUPERFICIEL)

- Fossés et chemins d'eau sur terres cultivées
- Collecteurs le long des chantiers et des ouvrages linéaires
 - Cunettes, fils d'eau ou fossés drainants sur risbermes et au pied des déblais
 - Banquettes ou bourrelets au haut des remblais
- Collecteurs spéciaux à pente très élevée
 - Descentes d'eau sur talus routiers • Déversoirs d'orage • Dissipateurs d'énergie

MAÎTRISER LA SÉDIMENTATION ET LE STOCKAGE DES EAUX CONCENTRÉES

- Barrages filtrants provisoires sur les ouvrages de drainage
- Bassins de sédimentation pendant les terrassements
- Traitements floculants
- Bassins de retenue d'orage sur autoroutes et en milieu périurbain (y compris stations de sports d'hiver)
- Stockage agricole des eaux
 - Diguettes d'infiltration avec déversoirs
 - Bassins collinaires et barrages



Photo n° 35 : Buse permettant le rétablissement d'un écoulement naturel sous un futur remblai.



Photo n° 36 : Fossé de crête au sommet d'un déblai autoroutier.

*Photo n° 37 :
La descente d'eau provenant
d'un fil d'eau sur risberme
(photo n° 24, page 58) arrive ici
dans un exutoire bétonné installé
sur une risberme de niveau inférieur.
La descente des eaux continue ensuite
par un tuyau enterré vers le fossé
de l'accotement autoroutier.*



*Photo n° 38 :
Les fils d'eau doivent
être entretenus pour
éviter le débordement
des eaux sur des
terrains non préparés.*



Photo n° 39 : Plateforme routière, en sable, ravinée après une pluie d'orage.



*Photo n° 40 : Fossé autoroutier en sol graveleux. Un équilibre satisfaisant peut s'établir.
Un meilleur engazonnement semble cependant souhaitable.*



Photo n° 41 : Dans un fossé très pentu le bétonnage est conseillé. Remarquer au premier plan dans le fossé un petit déversoir pour briser l'énergie des eaux.



Photo n° 42 : Mauvaise conception et implantation d'un fil d'eau et de sa descente.

V. 2. 5. Tableau N° 5 — Protections spéciales pour zones très attaquées ou sensibles.

Les méthodes classiques que nous avons vues dans les tableaux précédents sont insuffisantes lorsque les dégâts sont déjà créés et que les ravinements canalisent et amplifient l'effet érosif en le rendant très dangereux, ou bien encore quand les agents érosifs sont extrêmement puissants (torrents, rivières, courants et vagues de bords de mer) ou que les risques économiques d'une dégradation, même minime, par l'érosion, sont trop importants.

Des actions spécifiques sont donc mises en oeuvre dans différents cas de figure. Elles sont rappelées dans le tableau n° 5.

Il s'agira, par exemple, de contrôler les ravinements et les torrents, soit en protégeant les berges, soit en créant des barrages derrière lesquels se déposeront des atterrissements généralement très importants (voir photo n° 43). Des chutes d'eau artificielles se produisent alors, dont il faudra parfois briser l'énergie à l'aide de radiers et de contre-barrages.

Il s'agira de protéger contre l'effet des vagues ou le batillage la face amont des barrages hydrauliques et les berges de rivières. Les berges, qui jouent un rôle économique et social très important, devront donc être très bien protégées contre les affouillements et érosions diverses, surtout quand la rivière est navigable ou qu'elle traverse une zone urbaine ou qu'elle peut se gonfler dangereusement pendant les crues.

Il s'agira encore de protéger les rivages marins, les hauts de plage et les passes. Mais, avant toute réalisation dans ces domaines, on devra étudier soigneusement l'évolution dans le temps des budgets sédimentaires locaux (engraissement ou érosion) en appréciant les conséquences éventuelles, sur ces équilibres, de l'ouvrage projeté.

Il s'agira aussi de prendre des mesures spécifiques pour la protection des décharges ou du stockage de produits dangereux ou nocifs. On fera alors appel à des nappes géosynthétiques très solides et complexes, résistant aux poinçonnements, tassements différentiels et glissements de terre végétale.

Enfin, nous avons introduit dans ce tableau le sous-groupe des procédés de lutte contre l'érosion éolienne qui, on le sait, sont nécessaires pour protéger de l'ensablement certaines zones côtières ou certains pays désertiques. Dans plusieurs régions du Sahel, par exemple, les sables envahissent les cultures, les chaussées et les zones urbaines. Nous rappelons que deux groupes de méthodes peuvent être utilisées : les fixations à terre et les brise-vent (voir photo n° 44). Parmi les fixateurs, nous retrouvons les produits divers cités dans le tableau n° 2. L'empaillage consiste à enfouir grossièrement une couche de paille dans le sol superficiel à l'aide d'une charrue à disque. Les végétaux utilisés pour la fixation à terre doivent avoir une très bonne résistance à la sécheresse, au vent et, en milieu marin, à la salinité. Ils doivent de plus pouvoir échapper à l'enfouissement en s'exhaussant progressivement au-dessus du sable ; on peut citer l'oyat (*Ammophila arenaria*), le chiendent des sables (*Agropyrum junceum*), l'élyme des sables (*Elymus arenarius*), le chardon bleu des sables (*Eryngium maritimum*).

TABLEAU N° 5 – PROTECTIONS SPÉCIALES POUR ZONES TRÈS ATTAQUÉES OU SENSIBLES

CONTROLLER LES RAVINEMENTS ET LES TORRENTS

- **Embroussailllements et plantations des berges de ravins**
 - Sacs de terre avec engrais et jeunes plants
- **Barrages**
 - Barrages biomécaniques • Barrages gabionnés, cellulaires et à enrochements • Barrages bétonnés pleins • Barrages bétonnés perméables et curables (à pertuis, à fentes, à grilles)
- **Radiers et contre-barrages**

PROTÉGER LES BERGES DE RIVIERE

- **Végétalisation des berges et structures biomécaniques (tunages)**
- **Revêtements lourds contre le batillage**
 - Enrochements et blocs en béton, libres ou liaisonnés par câblage ou par nappe géotextile • Conteneurs textiles (tapis, sacs, matelas, boudins, paniers) • Systèmes bitumineux
- **Etanchéité des digues contre les inondations**
 - Palplanches • Parois • Rideaux d'injection • Revêtements imperméables
- **Epis**
- **Protections des fonds de rivière**

PROTÉGER LES RIVAGES MARINS, LES HAUTS DE PLAGE ET LES PASSES

- **Etude obligatoire des budgets sédimentaires**
- **Rechargement des plages (avec ou sans géotextiles)**
- **Ouvrages**
 - Épis et brise-lames • Murs non réfléchissants et digues • Gabions, enrochements, tétrapodes • Protections spéciales des dunes

PROTÉGER LES DÉCHARGES ET LES DÉPOTS DANGEREUX OU NOCIFS

- **Nappes géosynthétiques composites évitant le glissement de la terre végétale et résistant aux tassements différentiels :**
 - Géotextiles anticontaminants • Nappes tridimensionnelles drainantes et anti-glissement • Géogrilles pour la résistance mécanique • Membranes étanches et rugueuses sur les deux faces

LUTTER CONTRE L'ÉROSION ÉOLIENNE

- **Fixation à terre**
 - Fixateurs • Paillis divers • Empaillage • Plantes herbacées (oyat, élyme et chien-dent des sables, chardon bleu)
- **Brise-vent**
 - Plantations d'arbustes et d'arbres (espèces tempérées et tropicales) • Ganivelles • Filets géotextiles et géogrilles sur poteaux



Photo n° 43 : Barrages de stabilisation de marnes noires dans le torrent de la Ravoire (Savoie).



Photo n° 44 : Fixation d'une dune à l'aide de brise-vent (ganivelles, filets plastiques, branchages) et d'une fixation à terre (oyats).

VI. LE CHOIX DES TECHNIQUES ANTIÉROSIVES ET DE PROTECTION

VI. 1. REMARQUES PRÉALABLES SUR LES TECHNIQUES

VI. 1. 1. Ambivalence de certaines techniques. Exemple du couple infiltration-ruissellement

Certaines techniques sont parfois ambivalentes en ce sens qu'elles peuvent à la fois jouer un rôle immédiat positif vis-à-vis de l'érosion et entraîner dans certain cas des conséquences dommageables pour la conduite du chantier.

L'un des exemples qui vient à l'esprit est celui du couple infiltration-ruissellement. Ce couple est antinomique : si l'infiltration augmente, le ruissellement diminue (et inversement). Si l'infiltration augmente, cela veut dire que l'érosion superficielle diminue, mais cela peut aussi entraîner une augmentation dangereuse des teneurs en eau sur les chantiers de génie-civil. Sur les sols très sableux, ce risque est pratiquement inexistant et on peut donc rechercher une bonne infiltration sur ces terrains, par exemple en élargissant les fossés pour favoriser un cheminement lent ou une divagation des eaux de ruissellement. Par contre, en terrain cohérent mais relativement perméable (limon, marne calcaire), l'infiltration doit généralement être combattue. Sur ces terrains, l'augmentation des teneurs en eau entraîne des retards, des difficultés accrues dans le mouvement général des terres au cours des travaux et un risque éventuel de glissements ou de coulées boueuses. Si l'infiltration diminue au contraire, grâce au compactage par exemple, et à condition que la surface du terrain soit suffisamment en pente, les teneurs en eau peuvent diminuer, les terrassements sont généralement plus faciles, mais par contre le ruissellement accru entraîne érosion et sédimentation dans l'environnement ; d'où la nécessité de capter rapidement les eaux concentrées dans des chemins d'eau adaptés.

Quand la teneur en eau des sols à décaper est trop élevée pour permettre une bonne réutilisation et un bon compactage de ces sols en remblai, on peut être amené parfois, par beau temps et si aucun orage ne menace, à labourer la couche superficielle du sol et favoriser ainsi l'évaporation de la couche foisonnée. Évidemment, si un orage survient alors, les teneurs en eau du sol foisonné augmentent beaucoup et le remède devient pire que le mal.

Par ailleurs, après les travaux de terrassement, pour les talus revêtus d'une végétation temporaire ou permanente, une meilleure infiltration peut être recherchée pour accroître la réserve en eau vitale des plantes. Mais on ne peut évidemment pas aller trop loin dans ce sens, car les sols trop perméables comme les sables ne retiennent pas suffisamment l'eau et sont très infertiles.

VI. 1. 2. Polyvalence de certaines techniques. Exemples de la végétation et des risbermes

Certaines mesures, à côté de leur rôle antiérosif, jouent, en même temps, d'autres rôles techniques. Ainsi la végétation ligneuse, comme nous l'avons vu dans le chapitre IV, outre son rôle antiérosif, peut jouer sur les routes et autoroutes à la fois un rôle mécanique de soutènement, des rôles contre le bruit, le vent, le soleil, les chutes de pierres, etc., et enfin un rôle esthétique d'intégration au paysage. Bien entendu, cette polyvalence n'est possible que si la végétation est entretenue et gérée dans des limites précises.

De même, les risbermes des grands talus autoroutiers ont des rôles multiples :

- elles ont un rôle antiérosif qui est dû à la diminution de la longueur des parcelles de talus (ou interbermes) au-dessus et en-dessous de la risberme. Pour jouer ce rôle antiérosif de façon efficace, les risbermes doivent être inclinées à la fois vers le talus, pour empêcher toute arrivée d'eau sur la parcelle inférieure, et longitudinalement, de façon à pouvoir évacuer vers un exutoire à l'aide d'un fossé drainant les eaux de ruissellement de la risberme et de la parcelle de talus supérieure (voir fig. 11) ;
- elles permettent l'accès sur les talus des machines et du personnel pour l'implantation et l'entretien des ouvrages de drainage et de la végétation sur les talus. Si les risbermes sont suffisamment larges, elles peuvent également être utilisées pour y planter des arbres ;
- elles ont un rôle d'arrêt pour les chutes de pierre provenant des parcelles de talus supérieures ;
- elles stabilisent mécaniquement les talus en empêchant certains glissements profonds (voir figure 11). On peut expliquer ce rôle de différentes façons [50] : soit par exemple par le fait que la risberme repousse vers l'extérieur la limite de l'emprise autoroutière si bien que la pente moyenne du bas en haut du talus s'en trouve ainsi réduite, soit par le fait que la création de la risberme fait disparaître un moment moteur qui aurait pu être constitué par la partie des terres qu'on a enlevé en créant la risberme, soit encore par le fait que la risberme met en place un moment stabilisateur constitué par les terrains non enlevés en bas du talus.

VI. 1. 3. Techniques temporaires et techniques permanentes

Les techniques antiérosives utilisées peuvent être soit temporaires soit permanentes.

Les techniques temporaires servent uniquement pendant la période de construction des ouvrages. Les mesures spécifiques de cette période sont évidemment dues à l'accroissement parfois énorme pendant les travaux des taux d'érosion sur l'emprise des ouvrages et des taux de sédimentation dans l'environnement. Cet accroissement est imputable, comme on l'a déjà dit, à la destruction de la végétation et des réseaux de drainage naturel et au foisonnement des sols pendant le terrassement des déblais et des remblais. Les techniques temporaires utilisées sont par exemple :

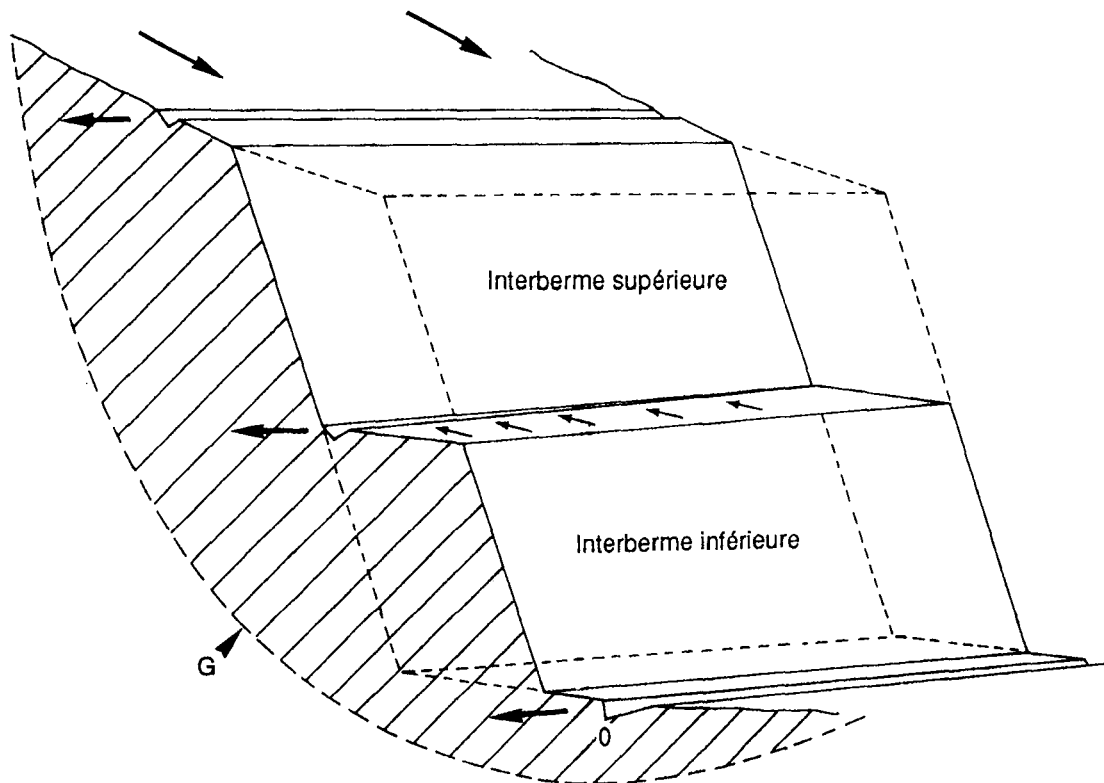


Figure 11 – Schéma d'une risberme. La risberme contrecarre la rupture potentielle G (glissement profond).
Pour éviter les glissements partiels au pied des interbermes, les drainages longitudinaux doivent être bien entretenus.

- les filtres de ruissellement comme les digues en balles de paille,
- les barrières à limons et les barrages filtrants,
- les bassins et trappes temporaires à sédiments,
- les fixations temporaires de sols grâce à certains paillis,
- Certains engazonnements temporaires à l'aide de graminées annuelles, etc.

Les techniques temporaires ont généralement une durée de vie courte, par exemple un an ; certaines, cependant, restent en place à l'achèvement des travaux et peuvent s'intégrer dans l'ouvrage et jouer un rôle permanent.

Les techniques permanentes sont nécessaires toutes les fois que l'on a affaire à des ouvrages fondés pour durer très longtemps. Les techniques doivent donc être mises en oeuvre pendant les travaux pour qu'elles puissent durer, avec l'entretien nécessaire, aussi longtemps que l'ouvrage lui-même. Cette durée de vie doit évidemment être prise en compte dans le dimensionnement des techniques permanentes. Il est à noter, en effet, que si les pointes de ruissellement qu'il est nécessaire d'évacuer en toute sécurité en dehors des ouvrages peuvent être en moyenne assez faibles, leur effet peut se poursuivre pendant toute la vie de l'ouvrage. Elles peuvent donc donner naissance à des processus cumulatifs. Il faut prévoir en outre, pour ces techniques permanentes, l'évacuation des pluies décennales voir centennales selon le niveau de service désiré pour l'ouvrage.

VI. 2. NIVEAU DE SERVICE ET SCHÉMA DE PRISE DE DÉCISION

VI. 2. 1. Niveau de service et risques acceptables

On a vu dans le chapitre V que l'éventail des techniques utilisables pour résoudre tel ou tel problème de stabilité ou de lutte antiérosion était large et, au début du chapitre VI, que certaines techniques posaient parfois problème ou, au contraire, présentaient des avantages multiples. Chaque technique a bien entendu son domaine d'utilisation et c'est grâce à sa science et à son expérience que l'ingénieur est à même de choisir la technique qui peut convenir dans chaque cas, compte tenu du niveau de service choisi pour l'ouvrage.

Tout dépendra en effet, en premier lieu, du niveau de service souhaité pour l'ouvrage. Ce niveau de service, pour une route par exemple, est fonction du trafic, de la vitesse de base prévue et de l'intégration de l'ouvrage dans son environnement et dans le paysage.

Plus le niveau de service est élevé, moins les risques admissibles sont élevés. Ces risques sont, par exemple, de voir le trafic ralenti, voire interrompu, à cause d'une dégradation de talus ou d'une obstruction des fossés et cunettes par les produits d'érosion. Il y a aussi le risque de subir une perte d'intégration dans le site à cause de plaies mal cicatrisées et d'un manque d'entretien.

En fonction du niveau de service requis, on devra donc définir les risques acceptables pour les usagers et pour l'environnement de l'ouvrage.

VI. 2. 2. Efficacité et qualité

Cette notion de risques acceptables suppose de la part de l'ingénieur une bonne connaissance ou une bonne évaluation de l'efficacité des mesures de protection qu'il est possible de mettre en oeuvre. En effet, sur un tracé routier, à moins de recouvrir par exemple tous les talus de perrés très onéreux (ce qui ne serait d'ailleurs guère esthétique !) aucune mesure de protection n'est efficace à 100 %.

Une technique peut être en elle-même très efficace lorsqu'elle est utilisée avec certains sols ou dans certaines limites de lieu, de temps, de climat. Mais la même technique peut aussi être utilisée à contretemps, à contre-emploi et d'une façon antiéconomique. Certaines erreurs d'appréciation sont parfois commises, comme par exemple construire un fossé de crête bétonné dans un terrain sableux alors même que le terrain naturel amont n'existe pratiquement pas, ou encore placer des fascines vivantes dans un terrain rocailleux et sableux, ce qui les voue à une mort certaine.

Une erreur technique que l'on rencontre parfois est celle d'un dimensionnement insuffisant des ouvrages de drainage. Cela se traduit par un engorgement ou un débordement sur un terrain non préparé à l'avance et éventuellement par des sapements, des soutirages et la ruine de l'ouvrage. L'erreur inverse (surdimensionnement) est bien entendu beaucoup moins visible.

La technique étant choisie, la notion de qualité, voisine et parallèle de celle d'efficacité, doit à son tour être prise en compte. Une technique n'est pleinement efficace, du moins pendant un certain temps, que si elle est de qualité. Des différences de qualité peuvent exister cependant, si l'efficacité dure plus ou moins longtemps. Des mesures temporaires, par exemple, n'ont pas la nécessité d'être efficace longtemps et en ce sens leur qualité est moindre que celles des mesures permanentes.

VI. 2. 3. Condition d'un maintien prolongé de l'efficacité : l'entretien

L'efficacité d'une technique peut être battue en brèche pendant la durée de vie prévue de cette technique si un entretien minimum n'est pas assuré. En ce qui concerne, par exemple, les filets d'eau recueillis par le réseau de drainage superficiel, ils sont normalement transportés vers un exutoire de façon adaptée et de manière à ne créer aucune érosion. Cependant, si le réseau de drainage superficiel est mal entretenu, il peut se produire un colmatage par éboulement, ce qui peut entraîner, soit un débordement des filets d'eau sur des terrains non adaptés et un ravinement important, soit une infiltration dangereuse, au moins pour certains sols sensibles à l'eau. Le remède pourrait alors être pire que le mal !

VI. 2. 4. Le schéma de prise de décision en matière de lutte contre l'érosion

Une fois le projet et ses objectifs bien cadrés, le niveau de service et les normes de protection et d'entretien choisis, l'ingénieur pendant la construction aura à prendre, cas par cas, déblai par déblai, remblai par remblai, un grand nombre de décisions locales. Pour ce faire, il utilisera sans doute un schéma général de prise de décision proche de celui de la figure 12, proposé par MEZIANE [97].

Remarquons qu'il serait possible de remplacer en partie, dans ce schéma, les données de climat, hydrogéologie, géotechnique et géométrie par les paramètres R, K, L, S de l'Equation Universelle de Perte de Sol que nous avons vue au chapitre I. 2. Les paramètres C et P de l'Equation Universelle relèvent par contre plutôt dans ce schéma du domaine de l'efficacité des mesures envisageables. Les risques acceptables indiqués sur la figure 12 sont ceux qui le sont en fonction d'un niveau de service donné.

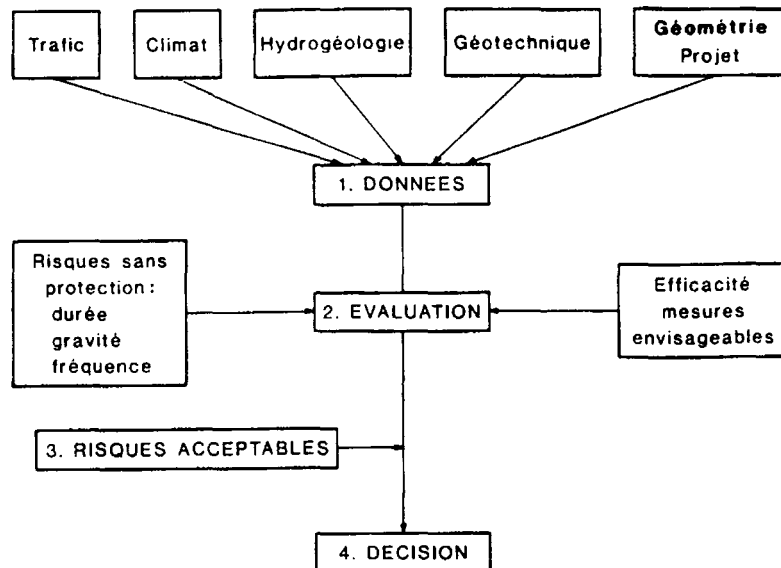


Figure 12 – Schéma général de prise de décision en matière de lutte contre l'érosion.
Selon MEZIANE [97].

VI. 3. LES RAPPORTS EFFICACITÉ/COÛTS

Passer d'un niveau de service donné au niveau de service immédiatement supérieur suppose un coût supplémentaire qui peut être parfois trop élevé et entraîner une chute trop importante du rapport efficacité/coût.

Il est difficile d'avoir une estimation très précise des rapports efficacité/coût. Si l'on pouvait un jour présenter une liste complète de ces rapports elle ne serait sans doute valable que momentanément et dans quelques cas de figure seulement.

Cela tient bien entendu au fait qu'il est impossible de réunir au même endroit et dans les meilleures conditions d'approvisionnement tous les matériaux utilisables. Un matériau peut-être disponible en grande quantité dans un endroit donné et introuvable ailleurs.

C'est souvent le cas par exemple pour les boutures de saule (ou d'autres plantes faciles à bouturer comme les peupliers) utilisées en fascinage et plançonnage ; si les saules sont trop éloignés, les boutures peuvent mourir ou être trop chères ; si les saules se trouvent à proximité, on a à sa disposition un matériau de construction à la fois vivant, précieux et bon marché. Mais encore faut-il que le sol du talus à stabiliser soit suffisamment fin et humide, que l'on ne soit pas dans une période de temps trop sèche, que l'ingénieur ait la possibilité de préparer ou d'acquérir ces boutures et qu'il ait aussi à sa disposition une main d'œuvre possédant le savoir-faire minimum...

On touche là d'ailleurs à un autre facteur de l'hétérogénéité et de la variation des prix d'un pays à l'autre. Ce facteur est le coût de la main d'œuvre, qui peut être différent et peut expliquer, par exemple, l'utilisation de procédés très gourmands en main d'œuvre dans les pays sous-développés, alors que ces procédés seraient prohibitifs dans les pays développés.

On peut cependant trouver, ici ou là, notamment auprès de certains services centraux de l'administration, quelques bonnes indications d'efficacité et de coût. Dans certains domaines de protection, quelques publications permettent de faire des comparaisons utiles à une date donnée. Par exemple, pour les engazonnements et les plantations, on peut citer le document de MARCESSE et AULAGNIER [91] ; pour les protections des surfaces avec des matériaux inertes, on peut se référer au document américain GRAY et LEISER [56] et aux quelques indications, malheureusement très limitées, que nous avons donné dans les paragraphes II. 2. 4. et II. 2. 5. sur l'efficacité comparée de certaines mesures de stabilisation superficielle.

Rappelons enfin que le choix des ingénieurs ne peut pas seulement être une question de coût ou d'efficacité à court terme. Le long terme est à prendre en compte parfois de façon impérative. Un surcoût au moment de l'exécution des travaux peut être parfaitement justifié, nous pensons par exemple au surcoût des plantations par rapport aux engazonnements, s'il se traduit, par la suite, pendant de longues années, par de notables économies d'entretien.

CONCLUSION

Pour lutter contre l'érosion et protéger l'environnement, pendant et après les travaux de génie civil, les ingénieurs doivent disposer d'un certain nombre d'informations et d'éléments. Nous avons essayé de les rassembler dans ce document.

Il est bien évident que la lutte contre l'érosion joue un rôle de sauvegarde fondamental pour les ouvrages, dans certaines régions ou zones sensibles, avec pluies très érosives ou sols très érodables ou géométrie très défavorable. Mais la lutte contre l'érosion et pour la protection de l'environnement est en fait, de nos jours, de plus en plus nécessaire un peu partout. Il en va de la bonne tenue technique et esthétique des ouvrages et du maintien d'un environnement agréable et non pollué.

La lutte contre l'érosion est d'abord nécessaire pendant la vie même de l'ouvrage. Elle est assurée en principe par les différentes protections mises en place de façon permanente pendant les travaux de construction. Ces dispositifs antiérosion permanents sont en fait intégrés à l'ouvrage : les talus sont recouverts de végétation (gazons, arbustes et plantation de ligneux), les accotements sont stabilisés, les cunettes sont engazonnées ou bétonnées suivant le cas, etc. En fait, à peu près toutes les surfaces de l'emprise supportant des eaux de ruissellement (y compris la surface même des pistes et des routes en terre) doivent bénéficier d'un traitement antiérosif.

Mais c'est surtout pendant la phase des travaux que la lutte contre l'érosion est nécessaire, parce que la végétation et les protections antérieures sont détruites, les ruisseaux détournés, les sols foisonnés et donc facilement entraînés par les eaux concentrées.

Nous avons vu que l'ingénieur routier devra se montrer particulièrement vigilant pendant certains travaux et encore plus si la saison est pluvieuse, le terrain érodable et le pays accidenté. Ces dernières notions sont évidemment trop vagues pour être vraiment utiles et nous avons indiqué que l'Équation Universelle de Perte de Sol (E.U.P.S.) développée par des agronomes américains, pour les besoins de l'agriculture, a été extrapolée pour les besoins routiers et qu'elle peut rendre de bons services. L'E.U.P.S. permet, en effet, d'indiquer au moins grossièrement les dangers encourus dans telle région climatique d'érosivité R , avec tel sol d'érodabilité K , avec telle topographie de terrain (longueur L et pente S des parcelles), tel état de surface C ou tel aménagement de terrain P . Théoriquement donc, appliquer l'E.U.P.S. serait, au stade du projet, pouvoir choisir, pour le tracé routier, les zones et les sols à priori les moins érodables, les périodes ou la saison la plus favorable aux travaux, prévoir l'érosion que l'on pourrait avoir en laissant faire les choses, être à même de juger de l'impact protecteur des mesures que l'on pourrait être susceptible d'utiliser.

Il ne faut cependant pas avoir trop d'illusions sur la précision actuelle de l'Équation Universelle. D'importantes inconnues subsistent, notamment dans la définition de l'érosivité dans un lieu donné. Ce lieu peut être relativement éloigné de la station météorologique la plus proche et situé par exemple dans une zone montagneuse soumise à des disparités dans le régime des pluies, suivant les versants, l'exposition ou l'altitude. Des progrès sont

également à obtenir dans le domaine de l'érodabilité, car celle-ci est en fait en étroite relation avec le compactage des sols. Or la caractéristique de densité n'apparaît que par le biais de la perméabilité dans l'abaque de WISHMEIER. On pourrait donc se demander si une autre voie ne serait pas possible, par exemple faire appel à une mesure d'érodabilité à l'aide d'un appareil utilisé in situ et permettant de situer le sol testé sur une échelle empirique d'érodabilité. Enfin, les valeurs qu'il est possible d'attribuer dans chaque cas aux paramètres C et P (état de surface et aménagement du terrain) demanderaient encore à être fortement précisées et enrichies par l'expérience et les comparaisons indispensables effectuées sur le terrain même par les ingénieurs de travaux.

Dans le domaine de l'hydraulique et du rétablissement des écoulements, on a souligné par ailleurs que les études préalables revêtent une très grande importance pour assurer, sans danger d'érosion, les écoulements sous les voies routières.

Il nous semble bon de souligner également, dans cette conclusion générale, les principes d'action qu'il est souhaitable d'appliquer pendant les travaux proprement dit. Tout d'abord, dans le domaine de la lutte contre le déclenchement de l'érosion :

- veiller à l'adéquation en temps et en lieu des mesures antiérosives,
- maintenir la plus faible possible à un instant donné la superficie des zones perturbées,
- protéger les zones perturbées le plus vite possible,
- dévier les eaux de ruissellement extérieures à l'emprise,
- étaler le ruissellement tant que cela est possible puis organiser la concentration,
- briser, quand c'est nécessaire, l'énergie des eaux concentrées.

Ensuite, dans le domaine de la sédimentation :

- freiner et filtrer le ruissellement diffus,
- diminuer la charge solide des eaux quittant le chantier,
- entretenir tous les ouvrages de protection et, enfin,
- limiter l'extension de la turbidité autour des travaux en rivière.

Il s'agit là surtout de principes d'action au jour le jour. Ce ne sont pas, à proprement parler, des techniques. Les principes peuvent être mis en oeuvre en même temps que l'on applique sur le terrain les techniques même de lutte contre l'érosion. On a rappelé, dans la seconde moitié de ce document, combien ces techniques sont diverses et comment elles débordent largement sur les techniques de renforcement de la stabilité des talus.

On a cru bon d'insister particulièrement sur une technique omniprésente : la végétation. Lorsqu'un engazonnement, par exemple, est bien implanté sur un terrain, il couvre totalement le sol et assure une protection parfaite contre l'érosion de battance de la pluie. Cette protection peut défier le temps car elle possède un pouvoir de renouvellement étonnant. La végétation ligneuse, de son côté, arme le sol et assure une prévention contre les mouvements de masse peu profonds.

La capacité qu'ont certaines espèces de pouvoir bouturer très facilement (saules, peupliers, etc.) peut être exploitée pour établir des biostructures, c'est-à-dire des ouvrages confortatifs mariant des éléments structurels inertes et des éléments structurels vivants. Ces biostructures peuvent être établies dans les ravines et le long des berges pour garantir les terrains contre l'action des eaux à l'aide de tunages ou d'embroussailllements ou pour constituer des barrages ou des épis en rivière permettant l'atterrissement des eaux, c'est-à-dire la formation des dépôts de sédiments. Les biostructures peuvent également être établies sur les déblais et les remblais à l'aide de plançons, de fascinages, de clayonnages, de cordons. Enfin, le caractère esthétique de la végétation peut être mis à profit pour égayer certaines structures inertes, des revêtements lourds alvéolaires sur les talus, certains murs bas, les murs cellulaires de faible hauteur. La végétation est également disposée pour agrémenter les terrasses ménagées par les murs ou les structures mécaniques de moyenne et grande hauteur. Certains murs spéciaux sont même conçus à présent pour faire apparaître de place en place des ouvertures constituant de véritables jardinières superposées.

Malheureusement, dans la lutte contre l'instabilité des sols et l'érosion proprement dite, la végétation présente certaines insuffisances ou certains défauts que nous avons soulignés dans ce document. L'ingénieur fait donc appel pendant les travaux à d'autres techniques provisoires ou permanentes de protection. Celles-ci sont en fait très nombreuses et, pour faciliter leur vue d'ensemble ou leur choix, nous les avons classées dans cinq tableaux regroupant :

- 1 – les actions sur la physique du sol (agir sur le couple infiltration-ruissellement et diminuer l'érodabilité des sols superficiels dans leur masse) ;
- 2 – la protection des surfaces (protéger les surfaces avec des couverts végétaux et protéger les surfaces avec des matériaux inertes) ;
- 3 – la modulation de l'inclinaison des talus (intégrer les talus autoroutiers dans le paysage, stabiliser et permettre l'entretien des talus, raidir et conforter les pentes) ;
- 4 – la maîtrise des eaux superficielles (dériver les eaux en amont des chantiers, filtrer, stopper ou dévier les ruissellements, évacuer les eaux concentrées et maîtriser la sédimentation) ;
- 5 – les protections spéciales pour zones très attaquées ou très sensibles (contrôler les ravinements et les torrents, protéger les berges de rivière, les rivages marins, les hauts de plage, les décharges et les dépôts dangereux ou nocifs, lutter contre l'érosion éolienne).

Ces cinq tableaux, même si chacun d'eux est décomposé en sous-ensembles, sont évidemment insuffisants pour permettre un choix objectif entre les techniques. Le dernier chapitre du présent document constitue en quelque sorte une introduction au problème du choix. Un choix objectif exigerait d'abord, selon nous, une connaissance minimum de chacune des techniques citées. Il serait donc intéressant à ce sujet, de chercher à obtenir une sorte de manuel précisant, schémas à l'appui, les principales caractéristiques et les quelques avantages ou inconvénients (obtenus de façon si possible contrôlée) de chacune des techniques signalées dans les tableaux du présent document.

Il ne serait évidemment pas réaliste d'ignorer, pour un tel manuel, les problèmes économiques. Chaque technique en effet a un prix. Si des procédés aussi différents que le compactage superficiel des sols, l'engazonnement du terrain ou la construction d'un mur de soutènement concourent tous à la lutte contre l'érosion et à la stabilité, leur prix n'est évidemment pas le même. La solution la plus chère, le mur de soutènement, n'est jamais utilisée en fait dans le but de limiter l'érosion ; ce n'est donc que par surcroît qu'elle facilite la lutte contre l'érosion.

À géométrie identique, on sait bien, par ailleurs, que l'on peut livrer un produit fini, par exemple une surface de talus ou une cunette ou un accotement de chaussée, ayant différentes résistances à l'érosion. La meilleure résistance, et donc le prix en principe le plus élevé, sera dévolue à l'ouvrage dont le niveau de service sera également le plus élevé. Cependant, la nécessité aujourd'hui reconnue, surtout en milieu urbain ou périurbain, d'offrir au regard de l'automobiliste ou du riverain le maximum de verdure entraîne une dérive vers des solutions techniques qui en comportent également, si possible, un maximum. Mais cela entraîne aussi l'obligation d'entretenir soigneusement cette végétation. Ici, le niveau de service élevé exige donc aussi un entretien élevé.

Finalement, le problème du choix des techniques doit s'effectuer selon un certain chemin ou un schéma général de prise de décision. Nous avons donc rappelé celui proposé par MEZIANE, qui paraît relativement logique d'un point de vue technique. Ce schéma, cependant, ne faisant pas référence à des besoins ou à des exigences d'ordre esthétique ou environnemental, il faudrait à notre sens insérer aussi ces besoins au niveau de la prise de décision finale.

***Tableaux donnant les pentes limites
des cunettes ou les vitesses limites de l'eau
autorisant la présence de gazon***

Tableau 1 : En France et en Allemagne, suivant la nature des surfaces, pentes longitudinales limites des cunettes à ne pas dépasser

Nature de la surface de la cunette	Pentes longitudinales I	
	En France ¹	En Allemagne ²
Fond lisse • exemple : semelle de béton	$I < 1 \%$	$I < 1 \%$
Gazon	$1 \% < I < 3,5 \%$	$1 \% < I < 4 \%$
Revêtement cohérent peu à moyennement rugueux	$3,5 < I < 7 \%$	$4 < I < 10$
Revêtement très rugueux	$I > 7 \%$	$I > 10 \%$

¹ Recommandation pour l'assainissement routier LCPC - SETRA, 1982.

² R.A.S. Entwässerung - Forschungsgesellschaft FG à Köln, 1987.

Tableau 2 : Suivant leur état de recouvrement par le gazon, résistances différentes de différents sols à l'érosion, mesurées par la vitesse limite des écoulements à ne pas dépasser. D'après HUDSON [74]

	Vitesses limites en m/s		
	Sol nu	Engazonnement moyen	Très bon Engazonnement
Sable limoneux très léger	0,3	0,75	1,5
Sable grossier	0,75	1,25	1,7
Limon argileux	1	1,7	2,3
Argile raide	1,5	1,8	2,5
Gravier grossier	1,5	1,8	Impossible
Cailloux ou galets	3	Impossible	

Tableau 3 : Suivant l'érodabilité des sols et pour des pentes inférieures à 5 %, résistances différentes des graminées à l'érosion, mesurées par la vitesse limite des écoulements - D'après HRB n° 18 [71]

	Vitesses limites en m/s pour des pentes < 5 %	
	Sols érodables	Sols peu érodables
Fétuque rouge Agrostis alba	0,8	1,1
Mélange graminées- légumineuses	1,2	1,5
Alpiste roseau Fétuque élevée Paturin des prés	1,5	2,1
Cynodon dactylon (en climat chaud)	1,8	2,4

BIBLIOGRAPHIE

1. ADRIANI M.J., TERWINDT J.H.J. (1974)
Sand stabilization and dune building,
Rijkswaterstaat Communications, n° 19, The Hague, 68 p.
2. AIPCN (1987)
Recommandations pour le dimensionnement et la construction de revêtements
souples incorporant des géotextiles pour les voies navigables intérieures,
Supplément au bulletin de l'AIPCN, n° 57, Résidence Palace 1040 Bruxelles, 144 p.
3. AIPCR (1991)
Erosion des sols pendant et après la construction des routes,
Rapport du Comité CT 12 au XIXe Congrès Mondial de la Route (Marrakech), pp.
48-84.
4. ANTOINE J. (1969)
Cours de procédés généraux de construction,
Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
5. ARNAL G., GARNIER G. (1978)
Engazonnements des abords routiers,
Paysage Actualités - juillet, pp. 35-45.
6. ARNAL G., HENENSAL P. (1979)
Etude de la fertilisation d'établissement,
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 101, pp. 113-128.
7. ARNAL G. (1980)
Les gazons pour végétalisation,
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 107, pp. 137-140.
8. ARNAL G. (1979)
Caractérisation et condition d'utilisation des terres végétales rencontrées en Ile de France,
Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien - Trappes, 53 p.

9. ATELIER CENTRAL DE L'ENVIRONNEMENT (1984)
Les dunes de Bretagne,
Ministère de l'Environnement Neuilly - Décembre.
10. AUTRET P. (1989)
Routes dans des régions en développement,
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Rapports des Laboratoires.
Série Construction Routière CR 12, 64 p.
11. BAKER R.F. (1983)
Roadside vegetation : implementation of fine fescue grasses,
T R R n° 913 - Washington, pp. 23-28.
12. BARKER D.H. (1991)
Geotextile - reinforced vegetated environmental barriers,
Geotechnical Fabrics Report, octobre, pp. 16-21.
13. BARNES R. C. (1973)
Erosion control structures,
Highway Research Board - Special Report 135 - Washington, pp. 16-21.
14. BCEOM - CEBTP (1992)
Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques,
Tome 2 : études techniques et construction,
Ministère de la Coopération et du développement, 663 p.
15. BIDDLE P.G. (1983)
Patterns of soil drying and moisture deficit in vicinity of trees on clay soil,
Géotechnique, Volume 23, n° 2, pp. 94-98.
16. BIETH J.L., BERTRAND L. (1989)
Etude technique de l'assainissement des chaussées,
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg (Rapport interne), 182 p.
17. BIMBARD J. (1982)
Traitement de surface pour imperméabilisation des sols traités,
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 119, pp. 103-113.
18. BONVALLOT J. (1986)
Tabias et jessour du Sud tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion,
Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, vol. XXII, n° 2, pp. 163-171.
19. BOURGERY C., CASTANER D. (1988)
Plantations d'alignements le long des routes, canaux, chemins et allées,
Revue Générale des Routes et des Aéroports, n° 650, pp. 5-8.

20. BRAMLEY M., COPPIN N. (1989)
Control of soil erosion : the role of vegetation,
Proceedings of a symposium "Soil erosion and its control"
Regents college, Regent's Park, London 21 st April, pp. 33-42.

21. BRUNAUD A., CERVEAUX P., BERT G.D. (1988)
La végétation des milieux handicapés : cas de gravières en eau et de talus routiers,
Bull. Soc. Hist. Nat., Autun n° 126, pp. 7-40.

22. CARNET C. (1979)
L'effet anti-érosif du bocage en région granitique de Bretagne,
Colloque sur l'érosion - Université Louis Pasteur - Strasbourg, pp. 153-156.

23. CARTIER G. (1986)
La stabilisation des pentes instables par clouage,
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 141, pp. 45-56.

24. CASSARD A., DERN F., MATHIEU G. (1979)
Utilisation des techniques de renforcement dans les barrages en terre,
C.R. Coll. Int. Renforcement des Sols, Paris, Presses de l'ENPC, pp. 229-233.

25. CASTAN A. (1980)
Arbres et arbrisseaux le long des autoroutes,
Thème d'étude d'Ingénieur-élève - ENGREF, Centre de Nancy, 50 p.

26. CAZZUFI D. (1989)
Bank and channel erosion,
Proceedings of the Symposium "Soil Erosion and its control",
Regents college - Regent's Park, London 21 st April, pp. 21-32.

27. CEMAGREF (1983)
Le réaménagement des carrières par la revégétalisation,
Cemagref, Informations techniques, Cahier 50, n° 5 et n° 6, juin, 12 p.

28. CEMAGREF (1983)
Les débits en matière d'assainissement agricole,
Cemagref, Informations techniques, Cahier 51, n° 4, septembre, 4 p.

29. CEMAGREF (1984)
Glissements de terrain,
Division Protection contre les érosions, Grenoble, Etude n° 194, juillet, 171 p.

30. CEMAGREF (1984)
Les produits d'accompagnement du semis de reverdissement en milieu naturel dégradé,
Cemagref - Bulletin d'Information. n° 320, septembre, pp. 49-53.

53. FOOKES P.G., SWEENEY M., MANBY C.N.D., MARTIN R.P. (1985)
Geological and geotechnical engineering aspects of low-cost roads in mountainous terrain,
Engineering Geology, Vol. 21, pp. 1-152.
54. FORSCHUNGSGESELLSCHAFT Für STRASSENWESEN (1983)
Richtlinien RAS - LG 3 Landschaftsgestaltung, Köln, 39 p.
55. FORSCHUNGSGESELLSCHAFT Für STRASSENWESEN (1987)
Richtlinien RAS - EW Entwässerung, Köln, 70 p.
56. GRAY D.H., LEISER A.T. (1982)
Biotechnical slope protection and erosion control,
Van Nostrand Reinhold Company, 271 p.
57. GRAY D.H., LEISER A.T., WHITE C.A. (1980)
Combined vegetative-structural slope stabilization,
Civil Engineering, ASCE, January, pp. 82-85.
58. GRECO J. (1978)
La défense des sols contre l'érosion,
La Maison Rustique, 181 p.
59. GRIL J.J., DUVOUX B. (1992)
Maîtrise du ruissellement et de l'érosion,
Cemagref, Dicova, 92162 Antony, 154 p.
60. GRIL J.J., LAVABRE J. (1987)
Maîtrise du ruissellement et de l'érosion aux USA,
Rapport de mission du Cemagref, Antony, 34 p.
61. GROUPE D'ETUDES DES FALAISES (1978)
Eboulements et chutes de pierre sur les routes,
Rapport de recherche LPC, n° 81, 252 p.
62. GUITON M. (1988)
Ruissellement sol et végétation dans les travaux d'infrastructure,
D.E.A. Techniques de l'Environnement, Université Paris XII, (rapport de stage), 42 p.
63. HENENSAL P. (1971)
La végétation sur les routes et autoroutes ; Rôle ; Importance ; Problèmes techniques,
Revue Générale des Routes et des Aéroports, n° 468, pp. 78-101.
64. HENENSAL P. (1972)
Les techniques d'engazonnement des talus d'autoroute,
Revue Forestière Française, Vol. 24, n° 2, pp. 141-151.

65. HENENSAL P. (1981)
Météorologie et Terrassements,
Rapport de recherche LPC, n°99, 170 p.
66. HENENSAL P. (1986)
L'érosion externe des sols par l'eau ; approche quantitative et mécanismes,
Rapport de recherche LPC, n° 138, 76 p.
67. HENENSAL P. (1987)
Le risque d'érosion hydrique des sols,
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 150-151,
pp. 117-129.
68. HENENSAL P., ARNAL G., PUIG J. (1977)
Research into turfing of right-of-way of highways, carried out in France
by the French Road Research Laboratories,
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées,
Suppléments n°92, "Pavements 1977", pp. 104-109.
69. HENENSAL P., DUCHATEL F. (1990)
L'érodimètre à jets mobiles
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 167, pp. 47-52.
70. HEUSCH B. (1986)
Cinquante ans de banquette de D.R.S. - C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan,
Cahiers Orstom, série Pedologie, Vol 22, n° 2, pp. 153-162.
71. HIGHWAY RESEARCH BOARD (1973)
Erosion control on highway construction,
NCHRP Synth. Highway Practice, n° 18, 52 p.
72. HILDITCH T.W., GRUSPIER J.E., MC QUAY D.F. (1988)
Right-of-way rehabilitation of sandy roadside slopes in Ontario, Canada,
Transportation Research Record, 1189, Washington, pp. 72-77.
73. HOEK E., BRAY J.W. (1977)
Rock slope engineering,
The Institution of Mining and Metallurgy, London, 402 p.
74. HUDSON N. (1981)
Soil Conservation,
Batsford Academic, London, 324 p.
75. ISRAELSEN C.E. et al. (1980)
Erosion control during highway construction,
NCHRP, Report 220, Transportation Research Board, Washington, 30 p.

76. ISRAELSEN C.E. et al. (1980)
Erosion control during highway construction ;
Manual on principles and practices,
NCHRP, Report 221, Transportation Research Board, Washington, 103 p.
77. IZZARD C.F. (1967)
Aesthetics of highway drainage design,
Highway Research Record, n° 161, H.R.B., Washington, pp. 54-57.
78. JACKOBS J.A. et al. (1967)
Turf establishment on highway right-of-way slopes ; a review,
Highway Research Record, n° 161, H.R.B., Washington, pp. 71-103.
79. JOHNSON W.N. (1979)
Water-quality consideration for highway planning and construction of the Vail Pass Project
Transportation Research Record, n° 717, Washington, pp. 40-47.
80. JONES C. (1984)
Earth reinforcement and soil structures,
Butterworths, 181 p.
81. JOSSEAUME H. (1986)
Etude des anciennes digues de canaux ; rapport de synthèse,
Rapports des Laboratoires, Série GT-18, L.C.P.C., Paris, 146 p.
82. KINORI B.Z. (1970)
Manual of surface drainage engineering,
Elsevier Publishing Company, 209 p.
83. LARGILLIER J.F., VIGNES J. (1983)
Vallée de la Garonne ; enquête sur les ruptures de digues de décembre 1981,
Rapport interne du L.R. des Ponts et Chaussées de Bordeaux, 34 p.
84. L.C.P.C., S.E.T.R.A. (1976)
Recommandation pour les terrassements routiers.
fascicule 1 : Etablissement des projets et conduite des travaux de terrassements,
Ministère de l'Equipement, 33 p.
85. L.C.P.C., SETRA (1982)
Recommandation pour l'assainissement routier,
Ministère des Transports, 66 p.
86. L.C.P.C., SETRA (1986)
Météorologie et terrassements ; recommandation,
Ministère de l'Equipement, du Logement, de l'Aménagement du Territoire et
des Transports, 41 p.

87. LE DAIN A.Y., MARCESSE M., PAYANI M. (1988)
Stabilisation superficielle et végétalisation naturelle des talus en zone méditerranéenne française - Tome III,
SETRA, IARE, CETE Méditerranée - Juillet, 48 p.
88. LORENZ H., HEUBLING W. (1962)
Grünverbau in Strassenbau (aménagement paysager dans la construction des routes)
Conférence au Congrès d'Aménagement Paysager de la Société Allemande
de Recherche Routière, Coblenz, Cahier 51, (traduction du Setra, sept. 1968), 77 p.
89. LUCIEN - BRUN B. (1978)
La remise en culture des sols de carrière,
Equipement Mécanique, Carrière et Matériaux, n° 165, pp. 97-101.
90. MACHAN G. et al. (1977)
Laboratory study of the effectiveness of cement and of lime stabilization for erosion control
T.R.R., n° 641, Washington, pp. 24-28.
91. MARCESSE M., AULAGNIER H. (1980)
Revégétalisation des talus en zone méditerranéenne,
C.E.T.E. d'Aix-en-Provence et SETRA, juin, 26 p.
92. MARCESSE M., PAYANI M. (1986)
Mise en place d'expérimentations sur la végétalisation des talus en région
méditerranéenne Tome III, SETRA et CETE Méditerranée, mars, 207 p.
93. MAREK C.R. (1984)
Quarried stone for erosion control
ASTM Standardization News, may, pp. 32-35.
94. MASSON B. (1979)
L'engazonnement des pistes de ski,
CTGREF Grenoble, Division Protection Contre les Erosions, Etude n° 151, 135 p.
95. MELLIER G. (1968)
La route en terre ; structure et entretien,
Editions Eyrolles, 150 p.
96. MEYER L.D., WISHMEIER W.H., FOSTER G.R. (1970)
Mulch rates required for erosion control on steep slopes,
Soil Science Society of American Proceedings, Vol 34, pp. 928-931.
97. MEZIANE A. (1983)
Drainage des talus et protections contre l'érosion, XVII Congrès Mondial de la
Route (AIPCR), Sydney, Australie, Séminaire : "Drainage dans les régions en voie de
développement", pp.3348.

98. MICHALSKI E.R., CLERDOUET D. (1987)
La sécurité des petits barrages,
B.R.G.M., Ministère de l'Environnement, décembre, 137 p.
99. MIETTON M. (1986)
Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso,
Cahiers Orstom, Série Pédologie, vol XXII, n° 2, pp. 181-196.
100. MIEUSSENS C. (1967)
La stabilisation chimique des sols,
Thèse Faculté Sciences Grenoble, 184 p.
101. MIGNIOT C., BOULOC J. (1981)
Erosion et sédimentation en mer et en rivière,
Chap. 16 de "Pratique des sols et Fondations" G.Filliat - Edition du Moniteur, pp. 629-731
102. MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES TRANSPORTS (1979)
Cahier des clauses techniques générales,
CCTG Fascicule n° 2 : Terrassements Généraux, 220 p.
103. MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS (1992)
Guide Technique sur la Réalisation des remblais et des couches de forme ;
Fascicule I : Principes généraux ; Fascicule II : Annexes techniques,
SETRA et LCPC, septembre, 98 et 101 p.
104. MONADIER P. (1987)
Protection contre les risques côtiers,
Actes du Colloque Mer et Littoral, Délégation aux Risques Majeurs,
Ministère de l'Environnement, septembre, pp. 362-397.
105. MORGAN R.P.C. (1979)
Soil erosion,
Longman (London), 113 p.
106. NAHAL I. (1984)
Facteurs édaphiques ; lutte contre l'érosion, et désertification, en région méditerranéenne,
Sols n° 14, Institut National Agronomique Paris Grignon, 103 p.
107. NAULT M. (1990)
Ingénieurs, paysagistes et autoroutes ; la réconciliation du béton et de la nature,
Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, N° 676, pp. 15-27.
108. NEBOIT R. (1991)
L'homme et l'érosion,
Faculté des lettres de l'Université de Clermont-Ferrand II, Fascicule 34, 269 p.

109. NGUYEN THANH LONG (1985)
Le pneusol,
Rapports des Laboratoires, Série GT-7, L.C.P.C., Paris, 36 p.
110. NICHOLS H.L. (1976)
Moving the earth,
North Castle Books, Greenwich, Connecticut, 700 p.
111. OTTO H. (1986)
Ingenieurbiologische Bauweisen, Route et Trafic, n° 4, pp. 212-217.
112. OUVRY J.F. (1989)
Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion
par ruissellement concentré. Expérience du Pays de Caux (France),
Cahiers Orstom, Série Pédologie, Vol XXV, n° 1-2, pp. 157-169.
113. PAYSAGE - ACTUALITES (1986)
Les dunes : une richesse à protéger et à mettre en valeur,
Auteur-editeur de la revue 92100 BOULOGNE, août, pp. 72-75 et octobre, pp. 66-73.
114. PERINET F. (1982)
Stations de sport d'hiver. Réflexion à propos d'un accident,
Revue Forestière Française, n° 5 spécial, pp. 99-111.
115. PERRY H.D., WRIGHT D.L., BLASER R.E. (1975)
Producing vegetation on highway slopes concurrently with and subsequent
to highway construction, Virginia Polytechnic Institute et State University,
décembre, 97 p.
116. PEYRE Y., MICHELIN J. (1990)
Remembrement et lutte contre l'érosion dans le département de l'Oise,
ADEPRINA, 16 rue Claude Bernard 75005 PARIS, 47 p.
117. PHILIPPONNAT G. (1970)
Problèmes routiers de lutte contre l'érosion en zone tropicale,
Annales de l'I.T.B.T.P., n° 276, 20 p.
118. PIHAN J. (1978)
Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France,
Colloque sur l'érosion agricole. Éditeur H. et T. VOGT, Université Louis Pasteur,
Strasbourg, 1979, pp.13-16.
119. PROVOST E. (1989)
L'érosion superficielle des sols et des ouvrages en terre. Fiches techniques
de protection des talus en milieu tropical, Agro-études ENSA Montpellier - août, 37 p.

120. PUECH J.P. (1990)
Géotechnique et projets de terrassements autoroutiers,
Travaux, juillet-août, pp. 7-17.
121. PUECH S., PUECH J.P.(1990)
Revégétalisation des ouvrages en terre et des espaces remaniés par les terrassements,
Scetauroute, 78181 Saint-Quentin,décembre, 40 p.
122. PUGLISI S. (1982)
Quelques aspects de la R.T.M. en Basilicate,
Revue Forestière Française, n° 5 (n° spécial), pp. 182-196.
123. PUIATTI D., QUIBEL A. (1982)
Imperméabilisation des plates-formes de Terrassement,
Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 122, pp. 82-92.
124. PUIG J. et al. (1986)
Les techniques de remblai,
Compte rendu de l'Atelier VI du Colloque innovations dans les techniques de la route,
Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, n° 628, pp.18-25.
125. PUIG J., SCHAEFFNER M. (1985)
Un géotextile tridimensionnel pour reprendre les problèmes d'érosion des talus,.
Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, n° 617, pp. 5-9.
126. RACIN J.A., HOWELL R.B. (1988)
Detention basins for water quality improvement at a high mountain maintenance station,
TRR, n° 1201, Washington, pp. 62-72.
127. RANCHET J., RUPERD Y. (1982)
Moyens d'action pour limiter la pollution due aux eaux de ruissellement en système sépa-
ratif et unitaire, Rapport de Recherche LPC, n° 111, 103 p.
128. RANKILOR P.R. et al. (1989)
The reduction of erosion by pre-formed systems,
Proceedings of the Symposium "Soil Erosion ant its control"
Regents college, Regent's Park, London, 21 st April, pp. 55-70.
129. RAT M.et al. (1982)
Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroutes,
Note d'information technique, L.C.P.C., 111 p.
130. REED L.A. (1978)
Effectiveness of sediment control techniques used during highway construction in
central Pennsylvania,
Geological Survey Water-Supply, paper 2054, Washington, 57 p.

131. RESSE C., VENUAT M. (1981)
Projection des mortiers, bétons et plâtres,
Auteurs-éditeurs (Resse 78230 Le Pecq) (Venuat 92320 Châtillon), 382 p.
132. ROOSE E. (1977)
Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest - 20 années de mesures,
Travaux et Documents de l'Orstom, n° 78, 108 p.
133. ROOSE E. (1986)
Terrasses de diversion ou microbarrages perméables ? Analyse dans la zone soudano-sahélienne, Cahiers Orstom, Série Pédologie, vol. XXII, n° 2, pp. 197-208.
134. ROOSE E., (1991)
Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et proposition
d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la GCES,
Cahiers Orstom, Série Pédologie, Vol XXVI, n° 2, pp. 145-181.
135. ROUSSEL J.P. (1965)
Techniques d'habillage des talus par placage de terre végétale et fascinage,
Revue Générale des Routes et Aérodromes, n° 398, pp. 125-129.
136. ROZIER J.F. (1786)
Dictionnaire universel d'agriculture,
Hôtel Serpente, Rue Serpente PARIS, 6900 p.
137. SCHAEFFNER M., PUIG J. (1989)
La protection des talus contre l'érosion pluviale à l'aide d'un géotextile tridimensionnel.
Compte rendu d'une expérience réalisée sur le chantier du chemin de fer transgabonais,
ISTED, Etudes, LCPC, 31 p.
138. SELLERS T.H. (1976)
Making erosion control work,
Highway Focus, n° 3, pp. 76-85.
139. SETRA (1985)
Stabilisation chimique des sols par les produits organiques,
Note d'information, CD 12, D 8520, juin, 4 p.
140. SETRA (1987)
Routes et pollution des eaux,
Note d'information, B 8716, janvier, 4 p.
141. SETRA (1988)
Protection des remblais contigus aux ouvrages hydrauliques,
Note d'information, CD 41, D 8822, mars, 4 p.

142. SETRA (1990)
Traitement des sols à la chaux et (ou) aux ciments,
Note d'information, CD 59, D 9042, juillet, 4 p.
143. SETRA (1990)
Plantations routières : un nouveau procédé de paillage,
Note d'information, B 9069, octobre, 4 p.
144. SHERARD J.L., DECKER R.S., RYLER N.L. (1972)
Piping in earth dams of dispersive clays,
Proceedings, Specialty Conference on the performance of earth and earth-supported
structures, American Society of Civil Engineers, Vol 1, June, pp. 589-626.
145. SHERWOOD W.C., WYANT D. (1979)
Installation of straw and fabric filter barriers for sediment control,
TRR, n° 705, Washington, pp. 23-29.
146. SIDDIQI R., MOORE J. (1981)
Polymer stabilization of sandy soils for erosion control,
TRR, n° 827, Washington, pp. 30-34.
147. SIMPSON B. (1989)
Effective establishment of vegetation for erosion control,
Proceedings of the symposium. "Soil Erosion and its control",
Regents college, Regent's Park, London, 21 st April, pp. 47-54.
148. SORIAL M., LACHARITE M. (1988)
Les projets d'infrastructures routières et l'érosion des sols,
Ministère des Transports du Québec, RTQ-88-28, juillet, 247 p.
149. STEPHENSON D. (1979)
Rockfill in hydraulic engineering,
Elsevier, 215 p.
150. TRICART J. (1978)
Géomorphologie applicable,
Masson, 190 p.
151. TUPA M.J. (1979)
Landscape treatments on the Vail Pass Project : slope design procedures,
Transportation Research Record, n° 717, Washington, pp. 27-29.
152. TURELLE J.W. (1973)
Factors involved in the use of herbaceous plants for erosion control on roadways,
H.R.B., Special Report 135, Washington, pp. 99-104.

153. U.S.ARMAY CORPS OF ENGINEERING (1981)
The streambank erosion control evaluation and demonstration act of 1974,
Section 32, Public Law 93-251, December, 130 p.
154. VANDANGEON P. (1992)
Les sécheresses de 1989 et 1990. Exemples de sinistres en région parisienne,
Revue Française de Géotechnique, n° 58, pp. 7-14.
155. VAN CAILLIE X.D. (1989)
Erodabilité des terrains sableux du Zaïre et contrôle de l'érosion,
Cahiers Orstom, Série Pédologie, vol XXV, n° 1 - 2, pp. 197-200.
156. WALDRON L.J. (1977)
Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil,
Soil Science Soc. Amer. Journal, 41, pp. 843-849.
157. WATSON A. (1985)
The control of wind blown sand and moving dunes : review of the methods of sand
control in deserts, with observations from Saudi Arabia,
Quarterly Journal of Engineering Geology, London, vol 18, pp. 237 - 252.
158. WEBER W.G. (1977)
Factors that affect erosion from construction areas,
Transportation Research Record, 642, Washington, pp. 62-67.
159. WILLISON J. et al. (1977)
Preventive approaches to stormwater management,
Environmental Protection Agency, Washington D.C., Water Planning Division, 200 p.
160. WISHMEIER W.H., SMITH D.D. (1978)
Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning,
U.S. Department of Agriculture, Handbook n° 537, 58 p.
161. WYANT D.C. (1981)
Evaluation of filter fabrics for use in silt fences,
TRR, n° 832, Washington, pp. 6-12.

