

Pe'do

**MESURE DE L'ÉROSION
PRINCIPES DE BASE ET INCIDENCE
DE L'INSTRUMENTATION NOUVELLE SUR
L'ÉTABLISSEMENT DES RÉSEAUX DE MESURE**

F. FOURNIER *

L'érosion du sol par l'eau engendre la destruction des terres lorsqu'elle prend une forme accélérée. Elle engendre également l'envasement d'ouvrages construits par l'Homme sur le chemin de l'eau. Aussi conçoit-on aisément toute l'importance que revêt l'étude de ce phénomène.

Celui-ci débute par une phase de production d'éléments entraînants dans laquelle les précipitations atmosphériques jouent un rôle particulièrement important. Le sol se présente en effet sous une forme plus ou moins agrégée et c'est en grande partie sous l'effet du « splash » que les agrégats et les mottes se désagrègent et libèrent des éléments fins.

L'eau entraîne ensuite en suspension, en saltation et par traction, les matériaux détachés du sol. Elle ruisselle avec sa charge solide vers le bas des pentes où elle se concentre. Puis elle s'écoule des dépressions où elle s'est concentrée pour s'intégrer à un réseau hydrographique. Pendant tout son parcours, elle est également un agent érosif.

Les matériaux entraînés sont donc transportés par l'eau ruisselant et passent de filets d'eau en ruisselets, de ruisselets en ruisseaux, de ruisseaux en rivières, de rivières en fleuves et des fleuves à la mer. Au cours de ce voyage, certains ne sont déplacés qu'à courte distance et s'accumulent au bas des versants. D'autres vont jusqu'aux cours d'eau mais sont déposés : ils forment les alluvions. D'autres enfin vont jusqu'à la mer.

L'érosion du sol est donc un phénomène complexe et sa mesure, pour être complète et introduire des connaissances totales, doit comporter :

- la mesure du détachement d'éléments entraînants;
- la mesure directe, sur le terrain, de l'ablation subie par les sols;
- la mesure des transports solides effectués par les cours d'eau de différentes tailles : transports solides en suspension, transports solides par charriage.

Des appareils et des méthodes ont été mis au point pour effectuer ces mesures. Ils ont atteint, dans certains domaines, un certain niveau de perfectionnement, mais nécessitent encore de nouvelles recherches.

1. LA MESURE DE L'EFFET DU SPLASH

Cette mesure n'est encore que peu pratiquée sur le terrain lui-même, les chercheurs s'étant surtout orientés vers la mesure au laboratoire de la susceptibilité des sols à l'action des gouttes d'eau.

Les mesures pratiquées sur le terrain ont été effectuées à l'aide d'un appareillage simple selon le principe suivant : une très petite surface est délimitée et on essaye de recueillir des gouttes d'eau qui rebondissent de cette surface sur la surface d'un appareil de capture. Par exemple une bouteille surmontée d'un entonnoir peut être enfoncée dans

* Directeur du Bureau Interafricain des Sols. Président de la Commission d'Erosion Continentale de l'A.I.H.S. 57 rue Cuvier, Paris (5^{ème})

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

24 FEB 1967

no 11334 ex 1

le sol de manière à ce que l'entonnoir surmonte de très peu le niveau du sol (mais le surmonte assez pour éviter la capture du ruissellement). Une aire d'où proviennent des gouttes d'eau rebondissant est délimitée autour de cet appareil. Il est essayé d'évaluer le poids des particules terreuses entraînées au cours du « splash » et retombant sur la surface de l'entonnoir.

Il est évidemment difficile d'obtenir des mesures d'une très grande rigueur de l'effet du « splash », mais des ordres de grandeur du phénomène peuvent être ainsi obtenus.

2. LA MESURE DIRECTE DE L'ABLATION SUBIE PAR LES SOLS

Deux méthodes sont couramment employées pour mesurer directement l'ablation subie par les sols :

- la méthode des parcelles expérimentales;
- la méthode des repères.

2.1. LA MÉTHODE DES PARCELLES EXPÉRIMENTALES

Cette méthode consiste à délimiter un champ expérimental qui a quelques centaines de m² et qui fonctionne comme un véritable bassin hydrologique parce qu'il est limité latéralement et en amont. Ce champ représente un milieu bien défini par sa pente, son sol, sa végétation, son état.

Ses dimensions sont telles qu'un ruissellement peut s'organiser sur lui et qu'aucun effet de bordure ne vient fausser les phénomènes qui s'y produisent.

Le champ expérimental est limité à sa base par un système conçu pour recevoir l'eau et la terre qui en proviennent lors de chaque précipitation suivie d'un ruissellement.

Les parties constitutives du système récepteur sont :

- une gouttière collectrice, située à l'aval du champ et formant la limite inférieure de celui-ci. Son rôle est de collecter l'eau et la terre issues du champ;
- un canal d'adduction conduisant l'eau et la terre de la gouttière vers une première cuve réceptrice;
- plusieurs cuves successives communiquant par des partiteurs.

Le volume d'eau ruisselé après chaque pluie est facile à évaluer.

La mesure de la terre entraînée se réalise par prélèvement d'échantillons d'eau (selon différentes méthodes) pour les éléments qui se trouvent en suspension. Les éléments plus gros se déposent au fond de la première cuve grâce à des tamis qui provoquent leur sédimentation. La vidange de la première cuve se fait de haut en bas grâce à un système adapté et l'arrêt de la vidange au-dessus des dépôts de fond permet l'estimation de ceux-ci par prélèvement total et pesée.

A Coshocton (Ohio, USA) un système de prélèvement intégré a été mis au point et inclus dans le système récepteur classique décrit ci-dessus. Il consiste brièvement à faire passer l'eau et sa charge solide, amenées par le canal d'adduction, sur un disque comportant une fente unique et tournant sur lui-même à une vitesse proportionnelle à celle du ruissellement (c'est celui-ci qui imprime au disque son mouvement giratoire). Un capteur, de forme et de dimensions liées à celles de la fente, et convenablement placé sous le disque, recueille une fraction de l'eau chaque fois que la fente passe au dessus de lui et l'envoie dans un totalisateur qui permet le calcul de la perte en terre par la seule analyse de l'eau qu'il contient.

Quel que soit le système récepteur adopté, les parcelles expérimentales permettent, d'évaluer le ruissellement et l'érosion en champs après chaque pluie et, par addition pour des périodes plus longues : mois, année etc...

Mais du fait même de la taille et de la nature des champs expérimentaux, les mesures

d'érosion ainsi obtenues ont une signification très précise. Un champ expérimental de quelques centaines de m² représente une surface restreinte par rapport à celle du versant sur lequel il se situe. Il réalise un milieu étroitement défini par l'association d'une pente, d'un sol et d'un état de surface. Or les phénomènes hydriques qui se produisent en un point d'un versant dépendent de ceux qui affectent l'ensemble du versant. Étudier un point isolé de son environnement ne peut donc conduire à l'étude d'un phénomène réel.

Les données chiffrées résultant de l'étude de champs expérimentaux ne peuvent donc fournir, lorsqu'on les considère individuellement, qu'une indication approchée de l'ampleur que peut présenter un phénomène dans une région et dans des conditions données.

Elles prennent un intérêt primordial, et c'est là leur plein emploi, lorsqu'une série de champs expérimentaux fait varier un facteur de l'érosion du sol et du ruissellement, tous les autres restant identiques à eux-mêmes. Les comparaisons qui résultent de cette expérimentation permettent de déterminer les valeurs critiques de ce facteur.

En bref, les parcelles expérimentales permettent plus une analyse factorielle qu'une mesure de l'érosion réelle, mais elles peuvent fournir un bon ordre de grandeur de celle-ci sur une petite surface.

2.2. LA MÉTHODE DES REPÈRES

Le désir de mesurer le phénomène d'érosion tel qu'il se déroule réellement dans le milieu naturel a conduit à placer sur le terrain des repères stables qui permettent d'évaluer les variations du niveau du sol.

Ces repères consistent soit en un simple piquet, mince et bien stabilisé, soit en un fil tendu ou une règle placée horizontalement, selon la direction des isohypses, entre deux points d'appui fixes et stables, distants d'un à deux mètres. Ils peuvent être répétés tout le long d'un versant.

Le déchaussement ou le recouvrement des piquets, la variation de la surface comprise entre un fil ou une règle et sa projection verticale sur le terrain servent à estimer l'ablation ou l'apport de terre. Mais étant donné l'épaisseur que représente une ablation de terre annuelle, le micro-relief du terrain et la présence de débris végétaux, la méthode des repères est très délicate à employer et comporte des possibilités d'erreurs graves. La mesure directe de l'ablation subie par les sols est finalement plus sûrement fournie par les parcelles expérimentales, malgré la signification des données obtenues grâce à elles.

3. LA MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES EFFECTUÉS EN SUSPENSION PAR LES COURS D'EAU

Cette mesure s'opère depuis plus d'un siècle à la surface du globe et les caractères capitaux des transports solides effectués en suspension par les cours d'eau ont été très vite connus. Ce sont :

- la distribution inégale des substances solides dans une section mouillée. La turbidité varie latéralement et verticalement, la variation verticale étant plus importante que la variation latérale.
- la variation de la turbidité dans le temps, surtout au cours des crues. Cela a conduit récemment à essayer de construire des appareils réalisant des prélèvements continus pendant un laps de temps assez long. Des appareils réalisant des prélèvements discontinus, instantanés ou intégrés pendant un court laps de temps, sont d'ores et déjà mis au point.

3.1. PRINCIPES DES MÉTHODES DE MESURE

Étant donné le premier caractère indiqué ci-dessus, un principe fondamental règle la méthodologie des mesures. Il consiste à déterminer un certain nombre de verticales dans la section de mesure et à prélever des échantillons à différentes profondeurs le long de chaque verticale, grâce à un appareil perturbant le moins possible le régime d'écoulement.

Ces prélèvements peuvent être :

- instantanés;
- intégrés :
 - pendant un temps court dans l'espace :
intégration en profondeur;
 - dans le temps en un point :
prélèvement pendant un temps court;
prélèvement pendant un temps plus long.

3.1.1. *Prélèvements instantanés*

Lorsque les verticales ont été convenablement déterminées, la prise des échantillons s'effectue instantanément à plusieurs profondeurs le long de chaque verticale. Simultanément la vitesse d'écoulement est enregistrée en chaque point de prise. Ceci permet le calcul de la turbidité en chaque point. Les chiffres obtenus introduisent, par application de méthodes de calcul appropriées, la connaissance du débit solide en suspension de la section entière à l'instant de la mesure.

Le débit solide étant un phénomène soumis à de rapides variations dans le temps, les prélèvements doivent être fréquents, leur fréquence dépendant de l'état des eaux. La règle d'une ou deux observations par 24 heures en période normale, avec une fréquence plus grande (observation toutes les 15 ou 30 minutes par exemple), lors des crues, est en général adoptée.

3.1.2. *Prélèvements intégrés en profondeur*

Le désir d'approcher de plus près la réalité a conduit à apprécier la turbidité moyenne le long d'une verticale, non pas à l'aide de mesures ponctuelles donc discontinues, mais à l'aide du prélèvement continu d'un échantillon pendant le temps d'une descente et d'une remontée à vitesse uniforme d'un appareil de prise le long d'une verticale.

La détermination du débit solide de la section entière se fait ensuite toujours à l'aide des méthodes de calcul établies.

3.1.3 *Prélèvements intégrés en un point pendant un temps court*

La turbidité n'est pas seulement soumise à des variations périodiques mais aussi à des pulsations rapides. Maintenir un appareil de prélèvement en un point, avec une prise continue pendant un temps donné (forcément assez court du fait que le volume prélevé est de l'ordre du litre ou de quelques litres), permet d'obtenir un échantillon moyen du mélange eau-matières solides tenant compte de ces pulsations. De ce fait, la réalité est approchée de plus près.

3.1.4. *Prélèvements intégrés pendant un temps long*

Mais les transports solides s'effectuent surtout lors des écoulements maximum et leur variation au cours d'une crue est énorme. Il faudrait, en ces circonstances, pouvoir effectuer des prélèvements à des intervalles très proches, ce qui pose des problèmes techniques complexes. On en est arrivé alors à concevoir les prélèvements continus. Ils consistent à pomper l'eau de façon continue en un point de la section étudiée et à la faire passer dans un système qui permet la prise quasi-continue d'une série de très petits échantillons, avec proportionnalité entre le débit de prélèvement et le débit liquide du cours d'eau.

Lors des périodes critiques, en particulier lors des crues, les méthodes de mesure sont rigoureusement appliquées. Mais, pour des mesures courantes en période normale, il est souvent d'usage de ne prélever les échantillons qu'en un seul point bien déterminé, après une étude comparative préalable de la turbidité calculée à l'aide de ce seul point et de la turbidité calculée par la méthode rigoureuse. Un coefficient de correction est établi s'il y a lieu.

D'une façon générale, la variabilité et les caractéristiques du débit solide et du débit liquide sont les facteurs du plan d'exécution des mesures, le choix :

- du nombre minimum de verticales;
 - du nombre minimum d'échantillons à prélever le long des verticales;
 - de la localisation des points de prélèvement.
- étant fondamental.

3.2. APPAREILLAGE POUR LA MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION

Une gamme assez étendue d'appareils existe à l'heure actuelle pour réaliser des prélèvements instantanés ou intégrés pendant un temps bref (par point ou en profondeur).

La *sonde de Collet* est composée d'un corps cylindrique à axe horizontal, tronqué par deux sections obliques. Sa fermeture s'opère par le rabattement de deux opercules entraînés par un système de ressorts. Son ouverture se fait par câble. Son inconvénient réside dans les troubles de l'écoulement que provoquent les mouvements des opercules. Le laboratoire de l'Électricité de France, à Chatou (France) a substitué à ceux-ci un système de fermeture par cisaillement.

Les *Ingénieurs Britanniques* ont créé un appareil de prise d'eau composé de trois cylindres rigides liés par deux manchons en caoutchouc. La fermeture du récipient central s'obtient par une torsion des deux manchons souples.

Ces deux premiers appareils permettent surtout de faire des sondages simples.

Le *Bathimètre-Tachymètre de Glouckoff* est plus perfectionné. Il est constitué d'un tube creux de 4 mm de diamètre intérieur et 20 cm de long. L'extrémité d'admission est profilée en ogive. A l'autre extrémité se trouve une vessie en caoutchouc de 3 litres de contenance. L'appareil est immergé avec le côté admission à l'aval. Un retournement de 180° est opéré au point de prélèvement et un nouveau retournement de 180° quand la vessie est pleine au 1/3. Cet appareil a le défaut de perturber la vitesse d'écoulement au moment des retournements.

Avec les *turbidisondes* apparaissent les appareils de prélèvement les plus perfectionnés. Leurs caractéristiques générales sont les suivantes :

La vitesse de l'eau à l'intérieur du cercle de coupure de prise est égale à la vitesse du cours d'eau.

La prise est dirigée vers le courant approchant et fait une saillie suffisante pour que son orifice se situe en amont de la zone de perturbation due au corps de la turbidisonde.

Les turbidisondes sont conçues pour s'ouvrir sous l'eau et sont sujettes, de ce fait, à un afflux initial. Pour annihiler celui-ci, un équilibre est réalisé entre la pression exercée par l'air à l'intérieur de la turbidisonde et la pression de l'eau à l'extérieur.

Quand un prélèvement intégré de profondeur est réalisé, la vitesse de compression de l'air, due à une augmentation de la pression hydrostatique, ne doit jamais dépasser la vitesse normale du courant d'entrée. La vitesse idéale à laquelle la turbidisonde est déplacée en profondeur est atteinte lorsque ces deux facteurs sont égaux.

L'un des défauts des turbidisondes actuelles est leur manque d'aérodynamisme.

Les turbidisondes les plus connues actuellement sont :

- la *turbidisonde Neyrpic* et la *turbidisonde de l'« American Corps of Engineers »* (USP. 46), toutes deux fondées sur le même principe. L'air comprimé est utilisé pour commander l'entrée de l'eau;

- la *turbidisonde du Rijkswaterstraat* (Arnhem, Pays-Bas) ou *Bouteille de Delft*. Elle est fondée sur un principe différent. Un système de cloisons dans la bouteille oblige l'eau à effectuer un circuit avant de ressortir. Au cours de ce circuit, le dépôt des sédiments est obtenu par un ralentissement de la vitesse de circulation, dû à une forte dilatation de la section transversale du filet admis;
- la *turbidisonde de l'Électricité de France* utilise les phénomènes de transmission de la lumière à travers une eau chargée de sédiments. L'eau passe à travers un volume prismatique traversé d'un faisceau lumineux. L'intensité de la lumière est enregistrée dans deux directions orthogonales : sens de l'écoulement, sens perpendiculaire à l'écoulement. L'appareil est étalonné et l'étalonnage se fait pour chaque série d'observations, étant donné la diversité des matériaux à apprécier selon les cours d'eau ou même selon les crues.

Les *appareils conçus pour effectuer des prélèvements continus* sont encore peu nombreux et n'en sont qu'au stade de la mise au point. En ce domaine, les Services des Études et Recherches de l'E.D.F. (France) ont conçu un appareil. Il consiste en une pompe volumétrique qui prélève l'eau de manière continue en un point. Elle la refoule dans un bac d'où elle s'écoule par un ajutage solidaire d'un chariot dont les mouvements sont fonctions d'un limnigraphe enregistrant les variations de hauteur du cours d'eau étudié. Le chariot se déplace au-dessus d'un disque et selon le rayon de ce disque. Celui-ci présente une fenêtre traduisant en coordonnées polaires la relation « hauteur-débit » du cours d'eau et est animé d'un mouvement de rotation. L'ensemble permet d'obtenir une proportionnalité entre le débit des prélèvements à travers la fenêtre lorsqu'elle se présente devant l'ajutage et le débit liquide du cours d'eau.

Les méthodes de mesure comme les appareils dont on dispose actuellement pour évaluer les transports solides effectués en suspension par les cours d'eau permettent d'obtenir des approximations très valables. Ces transports sont exprimés en turbidité ou en dégradation spécifique.

Du fait même de leur nature, ces données expriment des pertes définitives en terre se rapportant aux bassins versants situés en amont des stations d'étude. Elles ne peuvent en aucun cas rendre compte des déplacements locaux qui s'effectuent d'un point à un autre de la topographie. Mais il est certain par contre qu'elles sont tout à fait indicatrices de l'intensité des phénomènes d'érosion qui surviennent sur les bassins fluviaux.

4. LA MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES CHARRIÉS SUR LE FOND DU LIT DES COURS D'EAU

La mesure de la quantité de matériaux charriés sur le fond du lit des cours d'eau constitue encore à l'heure actuelle un problème complexe qui est loin d'être résolu. La gamme des éléments soumis dans ce cas à la mesure s'étend des sables jusqu'à des matériaux de grosse taille, voire même des blocs rocheux dans les parcours montagneux, en passant par les graviers.

Jusqu'en 1953-1954, d'anciennes méthodes de mesure étaient seules employées. Depuis cette époque, de nouvelles méthodes, fondées sur les traceurs luminescents ou les traceurs radioactifs, ont fait leur apparition et ouvrent une nouvelle voie d'investigation.

4.1. LES ANCIENNES MÉTHODES DE MESURE DU CHARRIAGE ET LEUR EXAMEN CRITIQUE

Ces méthodes sont de différents genres.

1) Il fut tout d'abord tenté d'*appliquer aux cours d'eau des formules semi-théoriques* pour calculer les transports solides qu'ils effectuent par traction sur le fond de leur lit. Mais cette application représente une extrapolation osée et les hydrologues recherchent des méthodes de mesure directe du charriage par prélèvement d'échantillons.

2) Les capteurs d'échantillon les plus connus sont les « *nasses de prise en rivière* ».

Une nasse de prise en rivière consiste en un récipient de capture des éléments solides. L'eau peut le traverser. Elle pénètre à l'amont et ressort à l'aval mais rencontre, dans son parcours à travers le récipient, un système de retenue des éléments solides qu'elle tracte.

Deux systèmes de retenue ont été utilisés :

a) le premier consiste en un *grillage* dont les ouvertures sont déterminées en fonction de deux facteurs : la possibilité de retenir des éléments de taille donnée; la rétention des éléments sans colmatage du grillage. Les nasses présentant ce système de retenue sont celles d'EHRENTBERGER, de MUHLHOFER, d'EINSTEIN, du Service de l'Aménagement de l'Isère (France), du Rijkswaterstaat (Arnhem, Pays Bas);

b) le second, plus récent, consiste en une plaque à profil sinusoïdal placé au milieu d'un canal à parois latérales pleines. L'eau traverse le canal et s'évacue librement vers l'aval mais son passage sur la plaque à profil sinusoïdal provoque une sédimentation des éléments charriés. Cette conception est celle du Service de la Navigation des Grands Fleuves de Hongrie.

Quel que soit leur type, les nasses de prise en rivière posent des problèmes d'emploi. Elles doivent être immergées en position horizontale et parallèlement au courant. Elles doivent être déposées sur le fond du lit en position horizontale. Elles doivent être maintenues adhérentes au fond et dans le sens du courant. Pour leur remontée, elles doivent être décollées du fond sans renversement vers l'amont ni racleage. Leur remontée doit s'opérer en position identique à celle de leur descente.

Si l'on considère la nature même du phénomène mesuré et les règles qu'il faudrait respecter en maniant les nasses, on conçoit aisément que les nasses de prise en rivière n'aient pas donné une entière satisfaction. En effet, on est déjà en droit de se demander, dans des conditions normales, quels sont les effets des troubles causés par un appareil de prélèvement posé sur le fond d'un lit. Ils sont encore très mal connus. D'autre part, en supposant même qu'un charriage par unité de volume d'eau soit assez bien mesuré, une nouvelle source d'erreur apparaît avec la mesure de la vitesse de l'écoulement au fond du cours d'eau.

Déjà difficile dans des conditions normales, la mesure du charriage devient ardue dans les circonstances capitales, c'est-à-dire au cours des très grosses crues, lorsqu'existent des courants très rapides chargés d'éléments solides volumineux. Lors de ces phénomènes violents, les charriages peuvent devenir paroxysmaux et dépasser de cent fois des transports normaux. Il serait capital de les apprécier. Or, en de telles circonstances, les très gros matériaux mis en mouvement ne peuvent être captés par des nasses. Ces appareils de capture risquent d'être tordus et détériorés et d'abord de ne pouvoir même être immergés au fond du lit étant donné la violence des écoulements liquides comme solides.

Les nasses de prise en rivière ne peuvent donc donner aucune idée des valeurs paroxysmales possibles du charriage. On ne peut espérer d'elles un rendement relativement bon que dans le cas où les transports de fond sont modérés. C'est pour ce cas que leur coefficient d'efficacité (rapport de la quantité de matériaux recueillie à celle qui serait passée au droit de la nasse en l'absence de celle-ci) a été déterminé sur modèles réduits. Pour EHRENTBERGER et EINSTEIN, il se chiffrerait en moyenne à 45%, cette valeur étant indépendante du degré de remplissage tant que celui-ci ne dépasse pas 33% de la capacité totale de la nasse. Pour la Société d'Aménagement de l'Isère, le coefficient d'efficacité serait de 52% tant que 28% de la nasse ne sont pas occupés. Ces efficacités seraient obtenues pour des prises très fréquentes car la variation du débit de charriage est considérable. La fréquence des prises est souvent de l'ordre d'une fois par 2 min. 30 sec. pendant une heure (durée de chaque prise : une minute)

3) D'autres solutions ont été apportées au problème de la capture des éléments charriés par les cours d'eau en vue de leur évaluation quantitative. L'une d'elles a consisté à placer sur le fond du lit des *chicanes*. Celles-ci étaient calculées et placées de telle manière qu'elles provoquaient une turbulence suffisante pour mettre en suspension les matériaux simplement tractés. Ainsi on espérait faciliter leur capture. Mais les critiques faites à propos des nasses restent entièrement valables pour les chicanes.

4) Les *ouvrages de dessablage* ont été également proposés dans certains cas comme moyens de mesure du charriage. On peut citer parmi eux le « tube tourbillon » mis au point à la Station Expérimentale de l'Agriculture du Colorado à FORT COLLINS (USA), ou un ensemble de tubes tourbillons et de déflecteurs. Ces ouvrages éliminent des matériaux qui peuvent être recueillis et ainsi être évalués quantitativement. Mais les matériaux éliminés par eux ont seulement un calibre moyen variant en gros entre 5 mm et 150 μ , ce qui limite le champ des investigations.

5) Devant ces difficultés, une solution d'un autre genre a été recherchée dans la *cupature des dépôts dans des retenues* naturelles ou dues à l'Homme. La mesure du volume des matériaux déposés pendant un temps donné dans une retenue, liée à la connaissance de ce qui peut s'échapper à l'aval de celle-ci, semble, a priori, pouvoir conduire à une connaissance des transports solides totaux du cours d'eau qui s'y jette. L'estimation des transports en suspension à l'amont de la retenue peut introduire une estimation du charriage.

Lorsque la retenue est très petite, par exemple quelques dizaines de m³, parce que le bassin drainé est lui-même très petit, de bonnes approximations peuvent être obtenues. Mais si la retenue est très grande (grand lac par exemple), les mesures se révèlent pleines d'aléas. Un premier problème apparaît avec la nécessité d'évaluer périodiquement le volume d'un cône de déjection sans ignorer les matériaux fins qui s'étalent à l'aval du cône, souvent très loin. Si l'on admet cependant la véracité de cette donnée volumétrique, une seconde source d'erreurs dangereuses apparaît. Elle est due à la différence de nature des mesures réalisées dans un cours d'eau et une retenue. Si, en effet, les dépôts dans une retenue sont mesurés en volume, le débit solide d'un cours d'eau est mesuré en poids. Pour calculer, dans cette condition, un débit solide total ou retrancher une suspension d'un dépôt, il faut transformer l'une ou l'autre mesure au moyen de la densité apparente des éléments. Or la densité apparente d'une masse d'éléments, surtout s'ils sont fins, varie avec le dépôt et le tassement de cette masse sous l'eau. Il ne semble pas que des connaissances certaines soient déjà acquises sur l'augmentation de la densité apparente d'un ensemble de matériaux de taille donnée en fonction du temps et de la profondeur de son dépôt, en fonction de la pression exercée par de nouveaux dépôts etc... A plus forte raison, l'ignorance est encore plus grande pour un ensemble aussi hétérogène qu'un cône de déjection. A l'inverse, il est hasardeux de déterminer le volume occupé après son dépôt par un poids donné d'éléments prélevés pendant leur transport. On peut évaluer le volume qu'occupent ces éléments à l'état sec, ce qui est très différent.

En conclusion, la mesure des transports de fond effectués par les cours d'eau pose un problème ardu que les anciennes méthodes de mesure n'ont pas résolu de façon satisfaisante. C'est alors qu'en 1953-1954, les hydrologues ont fait appel à de nouvelles méthodes, fondées sur l'emploi de traceurs colorés, luminescents ou radioactifs.

4.2. LES MÉTHODES MODERNES DE MESURE DU CHARRIAGE

Ces nouvelles méthodes ne visent plus à une évaluation quantitative directe des transports solides effectués par les cours d'eau sur le fond de leur lit. Elles conduisent à l'étude d'un problème fondamental qui est le mouvement des matériaux eux-mêmes, complétée par la recherche des moyens pour passer de l'analyse qualitative des déplacements à une détermination quantitative de ceux-ci.

Elles se fondent toutes sur le *principe* suivant : placer sur le fond du lit des cours d'eau des matériaux dont les caractéristiques physiques sont identiques à celles des matériaux naturels transportés par l'eau et qui, par conséquent, se déplaceront selon les mêmes lois, mais qu'un marquage préalable permet de suivre dans leurs déplacements au milieu des éléments non marqués. La répartition dans le temps et dans l'espace des éléments marqués permet de déterminer la vitesse et l'importance des mouvements.

Les nouvelles méthodes de mesure du charriage diffèrent entre elles par le procédé de marquage adopté, les procédés actuels étant :

- le marquage par peintures ou résines;
- le marquage par matières colorantes luminescentes;
- le marquage par isotopes radioactifs.

4.2.1. *La méthode des peintures et résines*

Elle constitue la méthode la plus simple. Elle consiste à enduire les matériaux soumis à l'étude d'une matière qui y adhère fortement, qui résiste bien à l'abrasion et dont les pigments présentent une grande stabilité chimique à l'eau. Ces nécessités ont conduit à l'emploi de résines synthétiques.

Après l'immersion des éléments marqués, leur reconnaissance au milieu de matériaux prélevés à des temps et à des distances données, est simplement visuelle.

Ce procédé de marquage est peu coûteux et permet de traiter de très grosses quantités de matériaux. Mais il est obligatoire de ne pas changer la densité des éléments marqués afin de ne pas perturber leurs propriétés de déplacement dans l'eau. En conséquence la couche de marquage doit être de faible épaisseur par rapport aux dimensions des éléments marqués. Ceci limite l'emploi des peintures et résines à l'étude du déplacement des galets naturels.

4.2.2. *La méthode des traceurs luminescents*

Cette méthode est fondée sur les phénomènes lumineux produits par des sédiments enduits d'un produit colorant luminescent quand ils sont éclairés par rayonnement ultra-violet.

Dans ce cas, les sédiments enduits se distinguent nettement sous forme de points lumineux sur le fond sombre des sédiments non colorés. La netteté du contraste est tellement grande que le nombre des sédiments marqués contenus dans un prélèvement de 1 g 5 peut être déterminé en 2 à 3 minutes pour un rapport de $1/10^5$ entre grains marqués et non marqués.

L'application de cette méthode comporte le prélèvement d'une quantité déterminée de sédiments au lieu d'étude, leur marquage et leur remplacement à l'endroit du prélèvement sous une forme (par lignes, par points etc...) qui dépend de l'étude envisagée.

Les sédiments marqués sont déplacés à des distances et avec des vitesses qui caractérisent les mouvements de l'ensemble sédimentaire. Ces mouvements ne peuvent être reconnus que par prélèvements d'échantillons car les matériaux doivent être séchés et placés sous une lumière ultra-violette. Le prélèvement de tranches horizontales d'épaisseur, de longueur et de largeur données (appareil de ZENKOVITCH), à la surface des matériaux de fond, permet d'étudier la répartition des traceurs dans le sens de l'écoulement. La prise de carottes de hauteur fixée permet l'étude de leur répartition verticale.

On évalue le nombre précis des sédiments marqués contenus dans les échantillons prélevés. On l'exprime par unité de poids ou de volume (souvent par 100 g ou par 100 cm³). La comparaison des analyses effectuées à des points et à des intervalles de temps fixés à l'avance permet de caractériser les mouvements et l'étude simultanée des facteurs du déplacement permet des conclusions plus étendues.

Les traceurs luminescents (Anthracène, Lumogène, Rhodamine B, Primuline, Uvitex) peuvent être utilisés, comme les peintures et les résines, pour étudier le déplace-

ment des galets, mais c'est surtout dans *l'étude du déplacement des sables naturels* qu'ils trouvent leur plein emploi, étant donné les opérations que nécessite leur détection et la nature des résultats obtenus.

4.2.3. *La méthode des traceurs radioactifs*

Elle constitue la plus employée des nouvelles méthodes d'étude du charriage pour deux raisons :

- elle permet l'étude d'une gamme très étendue de matériaux allant des vases aux gros galets;
- elle introduit l'emploi de traceurs qu'on peut détecter dans le cours d'eau lui-même sans prélèvement; des mesures continues sont alors possibles.

a) Principe de la méthode

Le principe reste toujours le même mais, en ce cas, ce sont des traceurs rendus émetteurs d'un rayonnement à l'aide d'isotopes radioactifs qui sont placés sur le fond du lit des cours d'eau et soumis à l'action de déplacement. La répartition dans le temps et l'espace de l'intensité du rayonnement émis par les traceurs sert alors de critère pour l'étude des transports solides.

La mesure de la radioactivité s'effectue selon un rythme et en des lieux déterminés à l'aide de l'appareillage adéquat, soit dans le cours d'eau lui-même, soit sur des prélèvements (cela dépend de la nature du rayonnement émis).

Les mesures sont reportées sur des diagrammes et reliées par des courbes d'égale activité traduisant le mouvement des traceurs.

Les radioéléments et les sédiments marqués doivent naturellement répondre à un certain nombre de conditions :

- les matériaux marqués doivent se comporter sous l'action de l'eau de la même façon que les matériaux non marqués;
- ils doivent s'en distinguer par leur rayonnement dont l'activité doit pouvoir être détectée sans être dangereuse;
- si les éléments radioactifs sont fixés sur les sédiments, ils doivent l'être de façon solide car la mesure n'a de valeur que si l'activité n'est pas modifiée par des actions mécaniques ou chimiques au cours du transport des traceurs;
- les propriétés des traceurs ne doivent pas se modifier pendant la durée des expériences. Leur période doit être convenablement choisie en fonction de la durée de l'expérience et de l'intervalle de temps entre les mesures;
- les traceurs doivent enfin pouvoir être activés par des moyens simples.

b) Fabrication des traceurs : procédés de marquage

Deux procédés existent :

- les traceurs sont constitués par les sédiments eux-mêmes;
- les traceurs sont constitués par des matériaux artificiels broyés à la granulométrie des sédiments naturels.

(i) *Utilisation de sédiments naturels*

— *Irradiation de sédiments par des neutrons lents dans un réacteur.*

Lorsque la composition chimique de sables est telle que les isotopes radioactifs, pouvant servir de traceurs, se forment sous l'effet d'une irradiation, ces sables peuvent être utilisés. Cette méthode présente des inconvénients graves. En effet, l'élément qui s'irradie le mieux est le phosphore, mais celui-ci, devenu phosphore 32, n'émet que des rayons β absorbés par seulement quelques centimètres d'eau, ce qui oblige à pratiquer des prélèvements. En outre la période du phosphore 32 est courte : 14,3 jours.

— *Adsorption de nucléides radioactifs à la surface de grains de sédiments.*

Le procédé consiste à fixer à la surface de grains de sédiments une substance radioactive par un procédé chimique, physique ou physicochimique. Par exemple, au

Portugal, des sables sont immergés dans une solution de nitrate d'argent qui, irradié, donne naissance à l'argent 110. Ce procédé est applicable aux sables et aux galets.

— *Inclusion de nucléides radioactifs à l'intérieur de matériaux sédimentaires.*

Ce troisième procédé consiste à inclure dans le corps du sédiment de petites perles ou de fines aiguilles d'éléments radioactifs, le logement étant ensuite obturé à la cire. Il est surtout applicable aux galets. Il a été utilisé par exemple en France pour l'étude du mouvement des galets du Rhône, avec emploi du tantale 182 (émetteur de γ de forte énergie). Le chrome (Cr 51) et l'irridium (Ir 192), sont également utilisables.

(ii) *Utilisation de sédiments artificiels*

— *Inclusion de radio-éléments dans du verre.*

Cette méthode de fabrication consiste à fondre un traceur (par exemple Ta 182) dans du verre, puis à broyer celui-ci à la granulométrie voulue ou bien à inclure un élément dans du verre au cours de sa fabrication, l'irradiateur (obtention du scandium 46 par exemple), puis à broyer le verre.

Le sable ou les vases de verre activé sont devenus les traceurs les plus utilisés ces dernières années.

— *Inclusion d'éléments radioactifs dans des échangeurs d'ions.*

Cette méthode est fondée sur la propriété de certains corps naturels ou artificiels d'échanger de façon réversible leurs ions contre d'autres quand ils sont mis en contact avec une solution de ces derniers.

Les différents procédés de fabrication indiqués ci-dessus conduisent à l'obtention de traceurs parmi lesquels les *vases artificielles, les sables artificiels et les galets naturels sont les plus fréquemment employés.*

c) Opérations de mesure

La préparation, le transport et le dépôt des traceurs radioactifs doivent être effectués en observant les mesures de précaution contre le rayonnement émis. Les galets peuvent être jetés directement dans le cours d'eau mais le placement des sables et des vases pose des problèmes épineux : ils doivent être déposés sur le fond du lit au moyen de récipients en plomb à ouverture commandée.

La détection des traceurs radioactifs, pour étudier le charriage, se fait ensuite de deux manières :

(i) *par prélèvement d'échantillons*, selon les méthodes indiquées à propos du prélèvement des traceurs luminescents (appareil de ZENKOVITCH, carottes). Les éléments sont alors détectés soit à l'aide de compteurs (Geiger Müller ou compteur à scintillations selon la nature du rayonnement), soit à l'aide d'un moyen photographique (impression du bromure d'argent des émulsions photographiques).

Les traceurs, émetteurs de β , doivent obligatoirement être prélevés, les rayons β étant très facilement absorbés par l'eau.

(ii) *par détection sur place* dans le cours d'eau lui-même, par des compteurs placés à poste fixe ou par des compteurs trainés sur le fond du lit. Cette méthode n'est applicable qu'à la détection d'émetteurs de rayons γ .

4.2.4. Premiers résultats de l'application des méthodes modernes de mesure du charriage

a) Études qualitatives

Les premières études de charriage effectuées à l'aide de peintures, de traceurs luminescents ou de traceurs radioactifs, ont apporté immédiatement des renseignements qualitatifs sur ce phénomène. Ceci découle naturellement de l'esprit même des méthodes de mesure fondées sur l'emploi de traceurs.

b) Études quantitatives

En liaison avec une bonne conception des phénomènes de transports solides effectués par les cours d'eau, des essais sont ultérieurement apparus visant à passer

de l'analyse qualitative des déplacements à leur détermination quantitative. Deux types de méthode ont été appliqués jusqu'à présent pour essayer d'évaluer quantitativement le charriage :

- méthode indirecte;
- méthode directe.

(i) *Méthode indirecte*

Elle a surtout visé à préciser certains paramètres d'une formule de MEYER-PETER.

MEYER-PETER a en effet conçu des formules destinées à un calcul fractionné du charriage par tranches granulométriques et qui conduisent ensuite à une évaluation du charriage total à l'aide d'une formule finale.

En immergeant trois classes de galets, marquées au Ta 182 et en détectant leurs déplacements pour trois vitesses d'écoulement, il a été tenté de préciser certains paramètres de la formule finale.

Il n'en reste pas moins que la précision d'une évaluation quantitative du charriage par cette méthode indirecte reste liée au niveau de précision de la formule.

(ii) *Méthodes directes*

Deux méthodes ont été suggérées, applicables en utilisant des traceurs radioactifs-émetteurs de γ .

La méthode du centre de gravité consiste à introduire instantanément sur le lit du cours d'eau une masse d'éléments marqués, de granulométrie identique à celle des éléments que le cours d'eau charrie, et à observer la vitesse de progression du centre de gravité du nuage de traceurs. Cette vitesse constitue la vitesse moyenne de progression des éléments marqués, mais, étant donné l'identité granulométrique réalisée, elle constitue également la vitesse moyenne de progression des éléments naturels.

La connaissance de l'épaisseur moyenne des matériaux charriés conduit alors au calcul du débit solide de charriage.

Cette méthode de mesure concerne surtout les sables. Elle est délicate à appliquer car la vitesse de déplacement du centre de gravité du nuage de traceurs varie dans le temps, ce qui impose de multiplier les détections. D'autre part, il est difficile de mesurer l'épaisseur moyenne des charriages de fond.

La méthode d'intégration est la seconde méthode suggérée. Elle a été préconisée par HULL. Sa large extension a été proposée par Erik ERIKSSON. Elle est fondée sur le principe suivant : Une masse M de traceurs est immergée dans une section. En une autre section, suffisamment éloignée à l'aval pour qu'un bon mélange « traceurs-éléments naturels » soit réalisé, la masse M de traceurs détectée au moment du passage du nuage de particules marquées s'écrit

$$M = Q_s \int_0^{\infty} c \, dt$$

Q_s étant le débit solide,

c , la concentration moyenne en traceurs au temps t .

Puisque M est la masse de traceurs injectée, et donc connue, Q_s peut être évalué :

$$Q_s = \frac{M}{\int_0^{\infty} c \, dt}$$

Cette méthode de calcul n'est valable qu'en cas de brassage énergétique dans le cours d'eau. Il faut que le point de mesure soit assez éloigné du point d'immersion des traceurs pour qu'un bon mélange soit réalisé. Il faut réaliser des mesures répétées pour saisir l'allure moyenne du phénomène.

Les méthodes exposées ci-dessus s'inscrivent dans le cadre des tous premiers essais d'évaluation quantitative du charriage en utilisant des traceurs. Bien des études

restent à faire, ne serait-ce que pour tenir compte de l'influence de la stabilité du lit et du régime d'équilibre des fonds sur la précision des méthodes suggérées.

5. CONCLUSION

Il apparait, en passant en revue les méthodes et appareils qui existent actuellement de par le monde pour mesurer l'érosion du sol par l'eau, que presque toutes les phases de ce phénomène peuvent être appréciées.

Un niveau de certitude acceptable peut être atteint en ce qui concerne la mesure, au champ ou au laboratoire, de la détachabilité du sol, la mesure directe sur le terrain de l'ablation subie par le sol, la mesure des transports solides effectués en suspension par les cours d'eau de toutes tailles. Mais bien des recherches restent à être faites pour perfectionner la mesure du charriage bien que, déjà, un aspect important de ce phénomène puisse être étudié : celui de la vitesse de déplacement des éléments charriés.

Étant donné les possibilités actuelles, l'étude de l'érosion hydrique dans l'unité topographique qu'est le bassin fluvial doit comporter la mesure du débit solide, en tout cas en suspension si la mesure du charriage est encore très difficile.

Le débit solide exprime un résultat global de toutes les actions qui se sont produites à la surface du bassin en amont du point de mesure. Mais à la surface d'un grand bassin, les actions locales varient dans l'espace en fonction des valeurs que prennent localement les facteurs de l'érosion. Aussi ne faut-il pas se contenter, pour un grand bassin, de mesurer le débit solide et un point. Il faut effectuer simultanément la mesure du débit solide dans les sous-bassins qu'il comporte, tout en relevant les caractères locaux des facteurs de l'érosion : cartes climatiques, pédologiques, géologiques, topographiques et de la végétation.

La comparaison du débit solide du grand bassin et des débits solides des sous-bassins permet de déterminer d'où proviennent les éléments entraînés et de reconnaître les milieux les plus ou les moins susceptibles à l'attaque hydrique. Si les caractères locaux des facteurs de l'érosion sont connus, des conclusions sur la capacité d'intervention de ceux-ci dans le phénomène d'érosion hydrique peuvent être tirées.

Mais le débit solide ne fournit pas une mesure exacte des déplacements locaux qui se produisent sur les versants à la surface du bassin. Il est alors important de mesurer directement sur le terrain l'ablation subie par les sols afin de comparer les dégradations spécifiques des champs et de l'ensemble du bassin dans lequel ils s'incrinvent. Si l'écart est grand, cela signifie que des mouvements locaux importants existent sans affecter les cours d'eau.

Enfin, le sol peut être fortement battu sans que les particules détachées soient entraînées. La mesure de l'effet du « splash » liée à la mesure de l'érosion dans les champs expérimentaux permet d'apprécier l'importance de ce phénomène.

Cet ensemble de mesures permet une connaissance plus approfondie de l'érosion hydrique et l'établissement plus sûr des plans de lutte anti-érosive ou d'aménagement des bassins versants pour conserver au milieu naturel un niveau de productivité voulu.