

UTILISATION DE METHODES TOPOGRAPHIQUES (PHOTOGRAMMETRIE TERRESTRE
ET TELEMETRIE SANS REFLECTEUR) POUR LA MESURE DE L'EROSION
DE PETITS BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX ET COMPARAISON
AVEC LES MESURES DE TRANSPORT SOLIDE A L'EMISSAIRE

Y. EGELS (1), M. KASSER (1), M. MEUNIER (2), T. MUXART (3) et C. GUET (2)

- S O M M A I R E -

1 - INTRODUCTION	2
2 - LE SITE DES BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX DE DRAIX ET LA MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES	4
2.1 - Description sommaire	4
2.2 - La mesure des transports solides	4
2.3 - Les résultats	5
2.4 - L'incertitude sur les mesures	5
3 - LES METHODES TOPOMETRIQUES UTILISEES	6
3.1 - La photogrammétrie	6
3.2 - Mesures de distances sans réflecteur	6
4 - RESULTATS DES METHODES TOPOGRAPHIQUES	7
4.1 - La photogrammétrie	7
4.2 - La télémétrie sans réflecteur	7
5 - DISCUSSION	10
5.1 - Les contraintes opérationnelles	10
5.2 - Analyse d'erreurs	10
5.3 - La comparaison des résultats obtenus	11
BIBLIOGRAPHIE	16

UTILISATION DE METHODES TOPOGRAPHIQUES (PHOTOGRAMMETRIE TERRESTRE
ET TELEMETRIE SANS REFLECTEUR) POUR LA MESURE DE L'EROSION
DE PETITS BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX ET COMPARAISON
AVEC LES MESURES DE TRANSPORT SOLIDE A L'EMISSAIRE

Y. EGELS (1), M. KASSER (1), M. MEUNIER (2), T. MUXART (3) et C. GUET (2)

PIREN Milieu Rural. Programme "érosion"

1 - INTRODUCTION

La mesure de la perte en terre qui résulte des processus érosifs opérant sur une unité territoriale donnée (bassin versant, parcelle expérimentale...) se fait, habituellement au moyen de méthodes pouvant, en gros, être rangées dans deux catégories :

- la mesure du transport solide dans un chenal (émissaire principal ou secondaire drainant respectivement le bassin versant ou les versants, "gouttières" de réception à l'aval des parcelles). On obtient ainsi des valeurs globales du point de vue spatial, intégrant l'ensemble des phénomènes d'érosion et d'accumulation qui ont pu se produire en différents points de l'espace étudié. A l'échelle temporelle, le rythme des mesures dépend du type d'appareillage : la détermination de la quantité de sédiments exportés peut être globale (piège à sédiments), continue (sonde radioactive ou à ultrasons, turbidimètre) ou discontinue (préleveurs) ;
- la mesure de l'ablation (ou de l'accumulation) superficielle fondée, le plus souvent, sur le suivi des variations de l'altitude d'un sol (d'une formation superficielle ou d'une roche) le long de piquets-repères. On obtient une série de mesures locales, ponctuelles d'un point de vue spatial, d'où l'on tire la tranche moyenne (ou le volume moyen) de matériau érodé (ou déposé) dans le secteur expérimental. La donnée obtenue est forcément globale du point de vue temporel, car l'épaisseur d'ablation (ou de sédimentation) est en général très faible, sauf en cas d'érosion concentrée.

(1) IGN, 2, avenue Pasteur, 94160 Saint-Mandé

(2) CEMAGREF, Domaine Universitaire, BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères

(3) Laboratoire de Géographie Physique, UA-0141 CNRS,
1, Place Aristide Briand, 92190 Meudon

Cette dernière méthode offre l'avantage, par rapport à la précédente, d'apprécier l'ampleur et le sens des transformations locales du milieu, selon la grille d'implantation des piquets-repères. Toutefois, ces derniers faisant partiellement obstacle au déplacement des matériaux, peuvent perturber les processus naturels de l'érosion (ou de la sédimentation) et ainsi risquent de fausser quelque peu les mesures. Dès lors, il était intéressant de tenter de s'affranchir de cet inconvénient en utilisant des méthodes topographiques (photogrammétrie terrestre et télémétrie sans cible coopérative) qui ne perturbent pas l'environnement, tout en offrant la possibilité de déterminer, à la fois, les variations locales et globales du milieu physique. La pertinence de ce choix est renforcée par le fait que ces méthodes ont connu récemment des progrès technologiques importants qui se traduisent par un gain appréciable de précision des mesures effectuées.

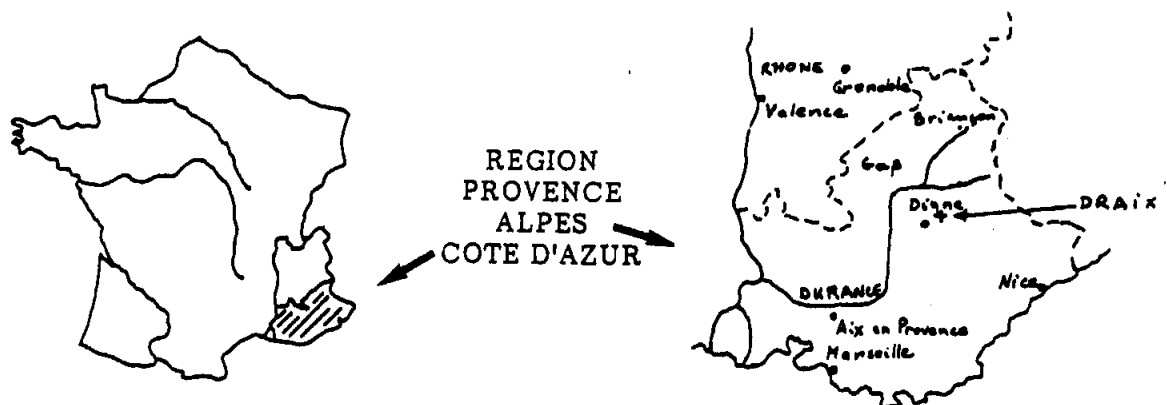
Une opération test a été conduite sur le site des bassins versants expérimentaux de Draix, gérés par le CEMAGREF, à l'initiative du CNRS (Laboratoire de Géographie Physique, à Meudon) avec le support de l'IGN (Groupe "Météologie de l'Erosion") et l'aide financière du PIREN "Milieu rural".

Les objectifs retenus étaient à la fois d'ordre méthodologique et scientifique. Il s'agissait de :

- contrôler la validité d'utilisation des deux méthodes topographiques précitées, à des fins de mesures de l'érosion ;
- comparer le degré de précision des résultats obtenus ;
- apprécier les avantages et inconvénients techniques et les coûts d'exploitation de chacune d'entre elles ;
- déterminer la position exacte au temps $t = \text{zéro}$ de la surface topographique du bassin versant de la ravine étudiée, par rapport à un système référentiel connu ;
- mesurer précisément les variations topographiques locales et globales au cours du temps ;
- évaluer le volume moyen annuel érodé et le comparer avec celui mesuré dans le collecteur drainant la ravine.

Dans ce qui suit, seront décrits successivement le site d'expérimentation et le dispositif de mesures de transport solide utilisé, puis les deux méthodes topographiques testées, les résultats obtenus à une année d'intervalle et le volume de matériau solide érodé correspondant. Enfin, il sera discuté d'une part, des méthodes topographiques employées et d'autre part, du modèle physique implicite permettant de comparer ces résultats avec ceux des mesures du transport solide.

2 - LE SITE DES BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX DE DRAIX ET LA MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES



2.1 - Description sommaire

Les Bassins Versants Expérimentaux de Draix sont situés sur des marnes dans les Alpes du Sud (1), à 15 km au Nord-Est de Digne, à une altitude variant entre 800 et 1 300 m (1). Ils sont composés de trois bassins de l'ordre de la centaine d'hectares (un boisé, les deux autres étant dénudés), un bassin de 8 ha (dont 4 ha nus) et un bassin versant de 1 300 m² composé d'une ravine élémentaire (la Roubine). Pluies, débits liquides et solides sont mesurés sur ces bassins depuis plusieurs années.

Deux raisons ont milité pour effectuer le test des méthodes topographiques à Draix : d'une part l'érosion y est importante : 60 à 90 m³/ha/an en moyenne, dont sont responsables l'altération et la désagrégation des marnes à l'air ; d'autre part les pentes des versants sont fortes (70 %), ce qui permet d'appréhender une partie significative du bassin versant à partir des appareils topographiques situés au sol.

2.2 - La mesure des transports solides

C'est le plus petit des bassins, celui de la Roubine qui a été choisi ; les débits solides et liquides y sont mesurés depuis 1983 (2) : une fosse de 4 m³ barrée par une grille à maille carrée de 20 mm permet de stocker l'essentiel des transports solides ; en aval de la grille un déversoir triangulaire permet d'assurer la

correspondance hauteur - débit ; le niveau est mesuré par deux limnigraphes, l'un à flotteur et l'autre à ultrasons aériens ; enfin un préleveur d'échantillons, asservi au limnigraphe selon deux variables de commande (le niveau et le temps), permet de mesurer le transport solide traversant la grille de séparation de la fosse de dépôts, en assimilant la mesure ponctuelle effectuée à la concentration moyenne.

La mesure par cubage est faite une fois par semaine, au seau pour les petits volumes, par relevés du niveau pour les gros ; la vidange de la fosse est faite à la pompe ; on obtient donc un volume hebdomadaire de dépôts, correspondant la plupart du temps à un seul évènement pluvieux, et un hydrogramme solide (sauf en cas de fonctionnement défectueux des appareils).

2.3 - Les résultats

Entre les deux dates de prise de mesure par les méthodes topographiques, c'est-à-dire entre le 17/10/85 et le 4/11/86, la plage de dépôts a fait l'objet de mesures à 12 reprises pour un volume total de $13,939 \text{ m}^3$; les trois premières mesures correspondent à des épisodes de coulées boueuses consécutives soit au dégel, soit à une saturation longue entraînant une reptation et/ou une solifluxion ; on a admis, le préleveur étant hors service, que le volume écoulé en suspension était nul. Par contre, pour les 9 autres relevés, cette hypothèse semble peu acceptable ; on a obtenu 5 épisodes complètement mesurés pour lesquels le rapport (volume de transport solide) / (volume relevé dans la fosse de dépôts) varie entre 8 et 18 % avec une moyenne à 10 % ; on peut compléter pour les crues mal observées en adoptant la formule d'extension des volumes de MES calculée par ailleurs (voir autre communication), soit en ajoutant $1,828 \text{ m}^3$ de MES aux volumes de dépôt ; on obtient donc un volume total de transport solide de $15,8 \text{ m}^3$.

2.4 - L'incertitude sur les mesures

Comme on le voit, l'incertitude de nos résultats provient de deux causes :

- d'une part toutes les crues ne sont pas complètement observées à cause de défaillance du système de prélèvements ; on est alors obligé d'adopter une valeur du volume transité extrapolé à partir des autres mesures ;
- d'autre part les unités des deux mesures ne sont pas les mêmes puisque le transport solide en transit est connu d'après son poids, alors que c'est un volume de dépôts qui est mesuré ; pour se ramener de l'un à l'autre, on a adopté une densité de 1.7, valeurs souvent mesurées sur les plages de dépôts mais dont on connaît mal la variabilité.

Quoiqu'il en soit, cette incertitude est relativement peu importante puisque 90 % des volumes solides sont recueillis dans la plage de dépôts et que les erreurs éventuelles portent sur les 10 % restants.

3 - LES METHODES TOPOMETRIQUES UTILISEES

3.1 - La photogrammétrie

Il s'agit d'un procédé exploité depuis longtemps pour effectuer des levés à partir de photographies aériennes. Schématiquement, une photographie "métrique", issue d'un appareil de prise de vues conçu pour ne pas déformer l'image, représente une archive d'où on peut extraire des mesures de directions entre le centre de l'optique et n'importe quel détail que l'on identifie sur le cliché. L'exploitation stéréoscopique de deux clichés se résume géométriquement à l'intersection dans l'espace de deux de ces "faisceaux perspectifs", ensembles de droites passant par les centres optiques et les différents points identifiés comme homologues sur les deux clichés. On conçoit que lors d'une telle exploitation, l'injection de données complémentaires (positions réelles de certains des points vus) permette le calcul de position de tous les points identifiés sur deux ou plusieurs images. Ce procédé, généralement aéroporté, peut également être mis en oeuvre au sol lorsque le relief localement est suffisant. Il permet en tous cas une métrologie d'objets de taille quelconque, même très grands, et ceci sans contact. En adaptant correctement les paramètres techniques (nombre de points de vue successifs, échelle des clichés, etc ...), on peut aujourd'hui déterminer un nombre de points quasiment illimité avec une précision de quelques millimètres sur plusieurs centaines de mètres, ou du centimètre sur plusieurs kilomètres de chantier.

Les travaux de terrain sont, pour un site comme la Roubine, effectués en une demie journée sur le site, et exigent des conditions météorologiques un peu restrictives (éclairage diffus optimal, ombres portées à proscrire). En aval, les traitements d'exploitation des clichés (appelés "restitution") varient évidemment suivant le résultat recherché. L'exemple présenté ici a requis une semaine de traitement.

3.2 - Mesures de distances sans réflecteur

Les appareils de mesure de distances utilisent généralement une lumière infrarouge modulée, une mesure du déphasage sur la modulation entre l'aller et le retour de cette lumière permettant de calculer la distance. Depuis quelques années, une autre technique est aussi employée, qui consiste à analyser une série d'impulsions lumineuses brèves fournies par une diode laser pulsée. En mesurant le temps de vol mis par chaque impulsion pour faire l'aller - retour entre l'appareil et la cible, tel un radar, on peut obtenir une mesure de distance avec une précision excellente (quelques millimètres).

L'intérêt particulier de cette technologie est qu'elle permet des mesures aussi sur des cibles non coopératives (murs, sol, etc ...) sans aucun réflecteur. Ces appareils commercialisés par FENNEL et par WILD permettent ainsi d'accéder à des mesures sans contact jusqu'à des portées importantes (50 m, 100 m, voire bien plus selon les

modèles) sans pour cela devenir dangereux pour l'oeil humain comme les télémètres militaires à laser YAG qui portent jusqu'à 10 km ou plus.

Nous avons employé ainsi un Fennel FET 2 qui comporte un télémètre de ce type monté sur un théodolite électronique, aimablement mis à disposition par la Société le Pont Equipements. Trois repères ont été implantés sur le site de la Roubine. Sur deux d'entre eux, successivement l'instrument a été mis en station, la hauteur de l'axe au-dessus du repère étant évidemment la même lors des opérations successives, et le troisième repère servant à orienter les mesures angulaires de la même façon chaque fois. Une série de mesures consiste alors à comparer, d'année en année, les distances obtenues pour des valeurs données de la direction du faisceau laser mesurées sur le théodolite (cf. figure).

4 - RESULTATS DES METHODES TOPOGRAPHIQUES

4.1 - La photogrammétrie

Compte tenu des zones visibles sur les clichés pris en 1985 et en 1986, des 1 300 m² de la ravine seuls 500 m² ont été l'objet de mesures comparatives, avec une prédominance des zones de pentes fortes qui sont évidemment plus visibles que les bas de versants. La précision est d'environ 1 à 2 mm, portant sur plusieurs milliers de points, le résultat étant fourni comme un levé au 1/50 avec une équidistance de 20 cm ; l'écart entre les positions temporelles successives de la même courbe de niveau traduit les déplacements de la surface topographique entre les deux opérations (voir figure A). Les données étant obtenues sous forme numérique, il est facile de calculer le volume total des matériaux disparus entre les opérations 85 et 86. Rapporté à la surface mesurée (500 m²), cela représente 41 mm d'ablation ; ces chiffres sont à tempérer car, comme nous l'avons déjà mentionné, ils ne sont représentatifs que des parties moyenne et haute de versant, et guère de la partie basse où précisément il y a fréquemment des dépôts de matériaux.

4.2 - La télémétrie sans réflecteur

Les données de télémétrie ont fait l'objet de deux types de traitements :

- Le calcul de la distance entre chaque point de la surface 1986 et la surface 1985 représentée par le plan des "moindres carrés" passant par les 9 points 1985 les plus proches du point 1986 considéré ; les mesures ont été effectuées de manière à ce que les visées aient une incidence assez faible sur chaque facette considérée. Toutefois lorsque cet angle, localement, dépasse par exemple 40°, l'incertitude sur la mesure devient importante (jusqu'à 1 cm). De plus les 9 points utilisés sont sur une surface qui peut être très éloignée d'un plan, ce qui est aussi une source sérieuse d'indécision sur le résultat. Toutefois ce traitement ne devrait pas introduire de biais sensible, le bruit étant quant à lui réduit par le

nombre élevé de mesures au niveau de quelques millimètres sur le résultat. Il subsiste toutefois un biais difficile à analyser qui résulte du fait que lors des deux opérations ce sont des appareils légèrement différents qui ont été employés. Ce cas de figure qui, évidemment, n'apparaîtra pas pour des opérations menées par une même équipe travaillant avec son matériel propre, est certainement l'origine d'un biais de quelques millimètres (2 ou 3).

L'analyse des résultats montre une assez grande variabilité des résultats et si des valeurs positives de la distance ainsi calculée (indiquant un dépôt) se trouvent effectivement en pied de versant, nombre d'entre elles se trouvent en haut des versants, indiquant soit une imprécision de la mesure soit un gonflement différent des altérations aux deux dates de la mesure. Il est possible que des mesures ultérieures permettront de sélectionner les parties de versant avec dépôt et les parties à érosion ; pour l'instant nous nous contenterons d'effectuer la moyenne de toutes les valeurs obtenues sans en éliminer ; les résultats n'auront donc qu'une valeur indicative.

On peut présenter les résultats sous la forme suivante (N = nombre de mesures, \bar{x} = valeur moyenne de la distance calculée et σ = écart type).

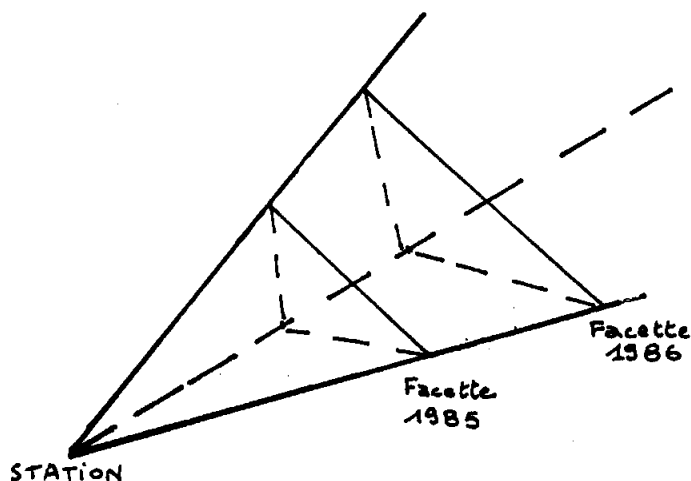
	Dépôts			Ablation			Total		
	N	\bar{x} mm	σ mm	N	\bar{x} mm	σ mm	N	\bar{x} mm	σ mm
Station basse	31	24,9	40	299	-29,2	17,9	330	-24	26
Station haute	24	25	27,6	69	-28	23,0	93	-14,4	33,4

Les ablations totales verticales sont donc les suivantes :

Station haute : -29,3 mm

Station basse : -17,6 mm

- Le calcul des volumes élémentaires séparant les surfaces 1986 et 1985 pour chaque triplet de trois droites de visée adjacentes. La surface de la facette est également calculée ; ce qui permet de connaître les volumes d'ablation, les volumes de dépôts et les surfaces développées correspondantes. Le calcul a été fait seulement pour les triplets où les droites de visée sont adjacentes, de façon à obtenir des valeurs raisonnables.



Les résultats sont les suivants :

	Station basse		Station haute	
	érodé	déposé	érodé	déposé
Volume de terre (m ³)	- 5,774	0,328	- 2,627	0,598
Surface développée (m ²)	252,637	40,529	121,671	56,574
Epaisseur correspondante (mm)	- 22,8	8,0	- 21,6	10,6
Epaisseur (mm)	- 18,6		- 11,38	
Ablation verticale (mm)	- 22,7		- 13,9	

5 - DISCUSSION

5.1 - Les contraintes opérationnelles

Ces mesures de suivi d'une surface topographique sans contact ont finalement des spécificités très distinctes :

- La photogrammétrie représente une opération de terrain relativement courte si l'on a pris soin, pour les opérations de répétitions ultérieures, de mettre un nombre suffisant de repères fixes dans le paysage photographié, faute de quoi il faut à chaque opération reprendre les mesures complémentaires de terrain qui, pour la Roubine, représentent plusieurs heures de travail. Donc les opérations de terrain sont courtes, par contre le dépouillement des clichés est une affaire de spécialistes d'une part, et par ailleurs il prend beaucoup de temps (une semaine pour notre site test). Par ailleurs le nombre de points qui peut être l'objet de mesures est quasiment illimité, ce qui peut améliorer par effet statistique la précision de la mesure individuelle (qui est déjà de quelques millimètres ou même moins). Enfin, notons que l'on a besoin d'un éclairage naturel de bonne qualité (lumière du jour diffuse), sinon les ombres sont violentes et donnent des zones inexploitable.

- Les mesures de télémétrie sans réflecteur ne peuvent pas fournir un nombre très élevé de points (par exemple 500 par jour). Par contre, ces mesures sont directement interprétables par l'utilisateur sans qu'il y ait lieu de faire intervenir de spécialistes de la mesure. La précision (5 mm) pose quelques problèmes lorsque l'incidence de la visée sur le sol est trop faible, ce qui limite quelque peu l'emploi de cette méthode. Mais le matériel nécessaire est un matériel de topographie, que l'on peut donc louer, ou acheter si l'on doit l'employer souvent. Il se connecte directement à un micro-ordinateur de terrain, ce qui limite la manipulation de données au strict minimum. Enfin, pour les cas où le surcoût serait justifié, c'est un ensemble qui peut être entièrement automatisé (théodolite motorisé) pour une surveillance dans des lieux difficiles d'accès ou pour des cas où les mesures doivent être fréquentes.

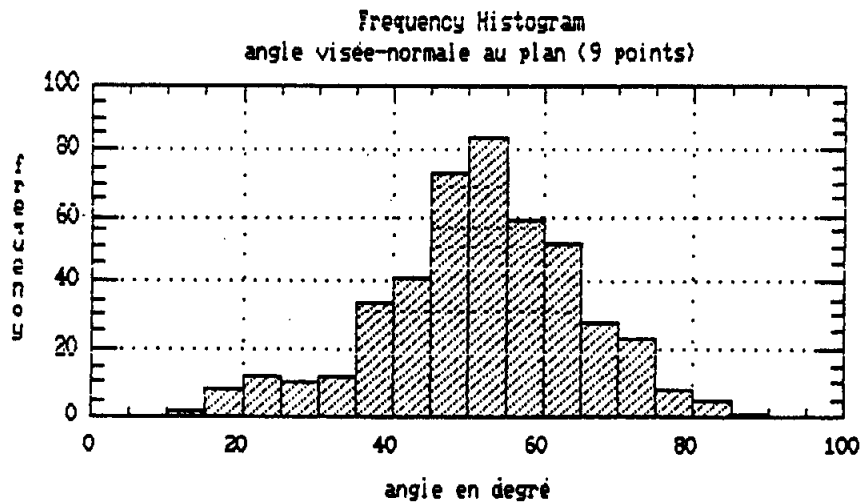
5.2 - Analyse d'erreurs

a/ En photogrammétrie on sait descendre aux alentours de quelques cent millièmes de la dimension maximale de l'objet, et les irrégularités liées au grain local sont lissées par l'opérateur. Sur notre exemple, la précision d'appréciation de la surface du sol est de 1 à 2 mm.

b/ En télémétrie, le faisceau du laser possède une certaine dimension spatiale, ce qui donne quelque complexité à son interaction avec le sol en termes métriques. Il semble que la mesure représente en fait le barycentre des distances sur tous les points éclairés pondérés par leur albedo. On aura donc intérêt :

- à avoir une tache d'analyse très réduite (montage éventuel d'une optique complémentaire) ;
- à avoir un faisceau le plus proche possible de l'incidence normale ;
- à employer le même appareil lors des opérations successives.

Dans l'opération expérimentale citée, nous estimons que la précision de mesure est de l'ordre de 5 mm tant que l'incidence de la visée n'excède pas 30°, puis doit atteindre près de 1 cm vers 50°. Le graphique ci-dessous de l'histogramme des fréquences permet de situer la précision moyenne obtenue.



5.3 - La comparaison des résultats obtenus

La mesure des transports solides a donné un volume de 15,8 m³ en cumulant les volumes déposés dans la fosse et les volumes transités. Nous allons maintenant nous préoccuper de la comparaison entre cette valeur et les valeurs d'ablation obtenues par les méthodes topographiques, et pour cela, nous devons imaginer un modèle d'érosion qui nous permettra d'établir les liaisons supposées entre les variables.

Nous allons simplifier le problème en supposant qu'il y a une séparation tranchée entre la roche saine et le volume d'altération qu'elle génère pendant sa désagrégation ; nous supposerons de plus que les densités des trois composantes (dépôts dans le piège à sédiments, roche saine et altérations) sont constantes, dans l'espace et le temps, ce qui est une simplification importante d'un point de vue physique, mais inévitable, faute d'avoir les mesures correspondantes.

Nous surlignerons les moyennes temporelles et noterons les moyennes spatiales entre crochets. On a donc :

$Z_s(t, M)$: Altitude du sol au temps t et au point M

$$\overline{Z_s}(M) = \left(\frac{1}{t_1 - t_0} \right) \int_{t_0}^{t_1} Z_s(t, M) dt$$

$$\langle Z_s(t) \rangle = \frac{1}{S} \int_{MES} Z_s(t, M) d$$

$$\langle \overline{Z_s} \rangle = \frac{1}{S \cdot (t_1 - t_0)} \int_{t_0}^{t_1} \int_{MES} Z_s(t, M) dt \cdot dS$$

Les notations sont les suivantes (t = temps, M = point d'abscisse x, y) :

$Z_s(t, M)$: Altitude du sol au temps t et au point M .

$Z_R(t, M)$: Altitude de la roche saine au temps t et au point M .

$p(t, M)$: Epaisseur verticale d'altération ($p = Z_s - Z_R$)

ρ_a, ρ_d, ρ_R : Densité des altérations, des dépôts, et de la roche.

$e(t, M)$: Vitesse d'abaissement de l'altitude du sol en place, à cause de l'érosion.

$\alpha(t, M)$: Vitesse d'abaissement de l'altitude de la limite roche-altération, en conséquence la désagrégation de la roche.

t_0, t_1 : Instants de mesure.

$V(t_0, t_1)$: Volume de matériau solide mesuré entre t_0 et t_1 (avec la densité ρ_d)

On a la relation évidente suivante :

$$Z_R(t_1, M) = Z_R(t_0, M) - \int_{t_0}^{t_1} a(t, M) dt \quad (1)$$

L'abaissement de l'altitude de la roche, donné par $\int_{t_0}^{t_1} a(t, M) dt$, provoque un accroissement de l'épaisseur d'altération donné par $\frac{\rho_R}{\rho_a} \int_{t_0}^{t_1} a(t, M) dt$;

l'épaisseur d'altération au point M au temps t1 est donc :

$$p(t_1, M) = p(t_0, M) + \frac{\rho_R}{\rho_a} \int_{t_0}^{t_1} a(t, M) dt - \int_{t_0}^{t_1} e(t, M) dt \quad (2)$$

et on obtient :

$$Z_S(t_1, M) = Z_S(t_0, M) + \left(\frac{\rho_R}{\rho_a} - 1\right) \int_{t_0}^{t_1} a(t, M) dt - \int_{t_0}^{t_1} e(t, M) dt \quad (3)$$

Toutes ces relations sont valables ponctuellement ; les mesures obtenues par les méthodes topographiques permettent bien d'accéder à ce degré de finesse spatiale puisqu'on obtient :

$$\Delta Z_S(t_0, t_1, M) = Z_S(t_1, M) - Z_S(t_0, M)$$

Mais pour les relier aux mesures globales de dépôts, on voit avec la formule (3) qu'il nous faut connaître $\langle e \rangle$ mais aussi $\langle a \rangle$.

En ce qui concerne $\langle e \rangle$ on a la relation :

$$V(t_0, t_1) = \frac{\rho_a}{\rho_d} \int_{t_0}^{t_1} \int_{mes} e(t, M) dt dS = \frac{\rho_a}{\rho_d} S \int_{t_0}^{t_1} \langle e(t) \rangle dt \quad (4)$$

La relation 4 nous permet donc d'obtenir, à partir de la mesure du volume de dépôts V (t0, t1), une valeur de la moyenne spatiale de l'érosion ; pour faire des comparaisons avec les variations d'altitude, il nous faut utiliser les relations 1, 2, 3 en moyenne spatiale.

$$\langle \Delta Z_R(t_0, t_1) \rangle = -\frac{1}{S} \int_{t_0}^{t_1} \int_{mes} a(t, M) dt dS = - \int_{t_0}^{t_1} \langle a(t) \rangle dt \quad (1 \text{ bis})$$

et de même :

$$\langle p(t_1) \rangle = \langle p(t_0) \rangle + \frac{\rho_R}{\rho_a} \int_{t_0}^{t_1} \langle a(t) \rangle dt - \int_{t_0}^{t_1} \langle e(t) \rangle dt \quad (2 \text{ bis})$$

$$\langle \Delta Z_s(t_0, t_2) \rangle = \left(\frac{\rho_R}{\rho_a} - 1 \right) \int_{t_0}^{t_2} \langle a(t) \rangle dt - \int_{t_0}^{t_2} \langle e(t) \rangle dt \quad (3 \text{ bis})$$

Avec (4), la relation (3 bis) devient :

$$\langle \Delta Z_s(t_0, t_1) \rangle = \left(\frac{\rho_R}{\rho_a} - 1 \right) \int_{t_0}^{t_1} \langle a(t) \rangle dt - \frac{\rho_d}{\rho_a} \frac{V(t_0, t_1)}{S} \quad (5)$$

Il nous faut donc maintenant obtenir une estimation de $\langle a(t) \rangle$

Remarquons que celle-ci serait possible à partir de l'équation (2 bis) ; il faudrait pour cela mesurer les profondeurs d'altération ; cela ne peut se faire sur le site même de la Roubine puisqu'on la préserve des méthodes de mesure destructrices ; il faudrait donc trouver une zone dont on pourrait penser que la profondeur d'altération et la roche suivent des évolutions similaires, et mesurer régulièrement cette épaisseur d'altération.

Ceci n'ayant pas été fait, nous allons utiliser la relation (2 bis) d'une autre façon, en admettant que sur un intervalle assez grand (5 ans, 10 ans), la fourniture en sédiments par la désagrégation de la roche compense la perte de sédiments par l'érosion. On a donc :

$$\frac{\rho_R}{\rho_a} \langle \bar{a} \rangle = \langle \bar{e} \rangle \quad (6)$$

Si on admet que ce rythme moyen $\langle \bar{a} \rangle$ d'altération de la roche a été à peu près suivi entre t_0 et t_1 (ce qu'on ignore bien évidemment), on peut écrire (5) sous la forme suivante :

$$\langle \Delta Z_s(t_0, t_1) \rangle = \left(\frac{\rho_R}{\rho_a} - 1 \right) \int_{t_0}^{t_1} \langle \bar{a} \rangle dt - \frac{\rho_d}{\rho_a} \frac{V(t_0, t_1)}{S}$$

$$\langle \Delta Z_s(t_0, t_1) \rangle = \left(\frac{\rho_R}{\rho_a} - 1 \right) \frac{\rho_a}{\rho_R} \cdot \langle \bar{e} \rangle \cdot (t_1 - t_0) - \frac{\rho_d}{\rho_a} \frac{V(t_0, t_1)}{S} \quad (7)$$

Voilà l'équation qui va nous permettre de comparer les mesures topographiques (qui donnent $\langle \Delta Z_s(t_0, t_1) \rangle$), aux mesures de transports solides (qui donnent $V(t_0, t_1)$) ; il faut pour cela connaître les trois valeurs de densité ρ_R , ρ_a , ρ_d et la valeur moyenne de l'érosion $\langle \bar{e} \rangle$.

Valeurs numériques :

Les quatre années de mesure de l'érosion (de 1984 à 1987) sur la Roubine donnent comme volume moyen de l'érosion une valeur annuelle de $11,26 \text{ m}^3/\text{an}$. A partir de l'équation (4) et en prenant $\rho_a = 1,3$ et $\rho_d = 1,7$, nous obtenons :

$$\langle \bar{e} \rangle = 11,26 \text{ mm/an.}$$

Avec $\rho_R = 2,75$, $t_1 - t_0 = 1 \text{ an } 18 \text{ jours} = 1,05 \text{ an}$, $V(t_0, t_1) = 15,8 \text{ m}^3$, $S = (1\ 050 \text{ m}^2)$, on obtient, à partir de l'équation (7) :

$$\langle \Delta Z_S(t_0, t_1) \rangle = 7,7 - 19,67 = -11,93 \text{ mm} = -12 \text{ mm}$$

Cette valeur est à comparer à celles obtenues par les méthodes topographiques soit :

téléométrie : calcul des distances :

station basse - 29,3 mm
station haute - 17,6 mm

calcul des volumes :

station basse - 22,7 mm
station haute - 13,9 mm

- photogrammétrie : - 41 mm

Critiques :

L'assez grand écart qui existe entre tous ces résultats peut vraisemblablement s'expliquer par les deux hypothèses qui nous ont permis de donner des valeurs numériques aux paramètres intervenant dans le modèle théorique développé ci-dessus.

- Les valeurs de densité sont prises constantes dans le temps et leurs valeurs sont hypothétiques : la densité de la roche ($\rho_R = 2,75$) a été mesurée et reste constante, celle des dépôts ($\rho_d = 1,7$) varie entre 1,5 et 1,8, mais surtout, celle des altérations (qu'on a prise égale à 1,3 : résultat d'une mesure), est difficile à faire sur des versants à forte pente, elle doit varier, et peut-être fortement, au cours du temps. Il faudrait, pour progresser, améliorer notre connaissance de son évolution au cours des cycles d'érosion et peut-être reformuler notre modèle pour tenir compte de cette variation.

- La valeur de $a(t, M)$, vitesse d'abaissement de la roche en place est inconnue ; pour lui donner une valeur numérique, il a fallu admettre qu'entre le 17/10/85 et le 4/11/86, elle avait la valeur moyenne qu'on pouvait déduire des mesures de transport solide sur 4 ans (équation 6) ; ceci n'est évidemment pas certain.

Enfin, il faut rappeler que si les mesures de transport solide traduisent l'érosion sur la totalité du bassin, les méthodes topographiques n'en mesurent qu'une partie, ce qui explique sans doute aussi les différences entre les résultats des méthodes topographiques puisque les zones couvertes par les deux méthodes ne se rejoignent pas exactement.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Les Bassins Versants Expérimentaux de Draix.
Note de présentation. CEMAGREF, ONF - RTM, 2ème version, mai 88.

- (2) Les Bassins Versants Expérimentaux de Draix.
Compte-rendu de recherche n° 1 en érosion et hydraulique torrentielle.
CEMAGREF, ONF - RTM, septembre 87.