

Compte-rendu de recherches n°3 BVRE de Draix

Coordination : Maurice Meunier



Compte-rendu de recherches n° 3 BVRE de Draix

Coordination : Maurice Meunier



GROUPEMENT DE GRENOBLE
BP 76 - 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex
Tél. : 76 76 27 27 - Fax : 76 51 38 03

Photo de couverture (Didier Richard) : Site des bassins versants représentatifs expérimentaux de Draix

Compte-rendu de recherches n°3 BVRE de Draix - Coordination : Maurice Meunier - © Cemagref 1995, 1^{re} édition. ISBN 2-85362-417-X, ISSN 1258-276X. Dépôt légal 3^e trimestre 1995. Collection *Études* du Cemagref, série *Equipements pour l'eau et l'environnement n° 21*, dirigée par Rémy Pochat, chef du département - Impression et façonnage : Imprimerie Louis Jean, BP 87, 05003 Gap - Édition et diffusion : Cemagref Dicova, BP 22, 92162 Antony Cedex, tél. (1) 40 96 61 21 et Cemagref Grenoble, division Protection contre les érosions, BP 76 - 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex, tél. 76 76 27 27. Diffusion aux libraires : TEC et DOC, 14, rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex, tél. (1) 47 40 67 00 - Prix : 249 F TTC

Le Cemagref, institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement, est un établissement public sous la tutelle des ministères chargés de la Recherche et de l'Agriculture.

Ses équipes conçoivent des méthodes et des outils pour l'action publique en faveur de l'agriculture et de l'environnement. Leur maîtrise des sciences et techniques de l'ingénieur contribue à la mutation des activités liées à l'agriculture, à l'agro-alimentaire et à l'environnement.

La recherche du Cemagref concerne les **eaux continentales**, ainsi que les **milieux terrestres** et **l'agriculture**. Elle a pour objectif d'élaborer des méthodes et des outils d'une part de **gestion intégrée** des milieux, d'autre part de conception et d'exploitation d'**équipements**.

Les équipes, qui rassemblent un millier de personnes réparties sur le territoire national, sont organisées en **quatre départements scientifiques** :

- Gestion des milieux aquatiques
- Équipements pour l'eau et l'environnement
- Gestion des territoires
- Équipements agricoles et alimentaires

Les recherches du département *Équipements pour l'eau et l'environnement* s'orientent vers :

- l'ingénierie et la prévention des risques naturels en montagne,
- l'ingénierie et la sécurité des barrages et des ouvrages hydrauliques,
- la maîtrise et la gestion des déchets,
- les techniques et la gestion de l'irrigation et du drainage,
- les techniques et la gestion d'équipements publics pour l'eau et les déchets,
- l'ingénierie des interactions eau-matériaux-ouvrages.

Résumé

Créés dans les années 83-84, les bassins versants expérimentaux de Draix - Le Brusquet ont pour principale caractéristique la mesure du transport solide dans des conditions de forte torrencialité. Situés sur des terrains marneux des Alpes du sud-est de la France, ils permettent des travaux de recherche sur des sujets très variés, qui portent sur l'étude des phénomènes physiques (crues, transport solide, érosion, etc ...), et celle des phénomènes biologiques (revégétalisation, dynamique de la végétation en période de déprise agricole, etc ...), thèmes auxquels il faut ajouter les recherches en instruments de mesure adaptés aux conditions particulièrement difficiles qu'on y rencontre.

Les deux premiers comptes rendus de recherche (1987, 1989) traduisaient de manière incomplète le large éventail de recherches conduites sur Draix ; ce troisième compte rendu est au contraire très représentatif puisqu'il regroupe 14 communications qui ont été rassemblées selon les 5 thèmes suivants : instrumentation (5), hydrologie (2), érosion physique et chimique (4), hydraulique torrentielle (1) et génie biologique (3).

Abstract

The Draix - Le Brusquet experimental research basins were created in the years 83-84. Measurements mainly concern solid transport under severe torrential conditions. Situated in the marly country of south eastern French Alps, various kinds of studies are carried out, from physical phenomena (floods, solid transport, erosion, etc ...) to biological (rehabilitation, vegetal dynamics after agriculture abandonment, etc ...). In addition, specific measuring systems for mountainous conditions are devised.

The two first research reports (1987, 1989) did not render this variety of research fields as does the present one which provides 14 reports distributed in 5 different topics : instrumentation (5), hydrology (2), physical and chemical erosion (4), stream hydraulic (1) and biological engineering (3).

Sommaire général

Introduction	7
---------------------------	---

Instrumentation

L'Ellan, un limnigraphe adapté aux mesures J.E OLIVIER - J.C. PEBAY PEYROULA ..	13
en conditions difficiles	

Caractérisation des matières en suspension N. MATHYS	25
Mise au point d'une méthode rapide d'estimation des concentrations des prélèvements	

Matériel de mesure de matières en suspension : J.E. OLIVIER - M. JUGE.....	43
préleveur d'échantillon et capteur de pression différentielle. Test et étalonnage en canal	

Mesure in situ de la concentration des matières L. BERGOUGNOUX - J.L. FIRPO.....	63
en-suspension : mise au point d'une sonde optique	J. MISGUICH-RIPAULT - J. ANDRE J.P. CAMBON - N. MATHYS J.E. OLIVIER

Mesure du débit solide des écoulements G. MEYER - M. MEUNIER.....	79
hyperconcentrés en matériaux fins par une jauge à absorption du rayonnement gamma	J.E. OLIVIER

Hydrologie

Modèle débit-durée-fréquence et conceptualisation G. GALEA - C. PRUDHOMME.....	97
d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le bassin versant représentatif expérimental de Draix	

La forêt de montagne : un remède aux crues F. COMBES - A. HURAND.....	113
	M. MEUNIER

Erosion

Panorama synthétique des mesures d'érosion effectuées sur trois bassins du site expérimental de Draix	M. MEUNIER - N. MATHYS J.P. CAMBON	125
Erosion de badlands dans les Alpes du sud. Synthèse	S. BROCHOT - M. MEUNIER	141
Erosion and sediment transport under simulated rainfall on steep marly hillslopes, Draix	D.J. OOSTWOUW WIJDENES P. ERGENZINGER	175
Contribution à l'étude des mécanismes et bilans de l'érosion chimique des "Terres Noires" du bassin de la Durance. Exemple des BVRE de Draix	J.P. SIMONNET P. RICHY C. PARRON	189

Hydraulique torrentielle

Modèle hydrosédimentologique des écoulements hyperconcentrés d'un petit torrent des Alpes du sud	A.L. BORGES S. BROCHOT - M. MEUNIER	203
--	--	-----

Génie biologique

Le matériel végétal : un outil pour la protection des sols	Y. CROSAZ	225
Expérimentation de végétalisation de marnes noires par hydrosemis à Draix	M. GOUEFFON H. MATHELIN	237
Les régosols du bassin du Brusquet : sensibilité à l'érosion et facteurs de la pédogenèse. Synthèse des travaux réalisés	D. VALLAURI	243

Introduction

Situés dans les Alpes du sud-est de la France, les bassins versants expérimentaux de Draix - Le Brusquet, ont été sélectionnés pour l'étude des processus érosifs en montagne et celle des moyens de protection correspondants. Ils sont gérés par la division protection contre les érosions du Cemagref de Grenoble, la division ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation du Cemagref d'Aix-en-Provence et le service de restauration des terrains en montagne des Alpes-de-Haute-Provence. Les bassins étant situés sur des marnes du callovo-oxfordien très érodables, l'érosion, et par conséquent les transports solides y sont particulièrement importants : les valeurs d'ablation sont supérieures à 10 000 t/km².an : si les installations comprennent classiquement des mesures de pluie et de débit liquide, il y a aussi et surtout des appareils de mesure du transport solide desquels on déduit les valeurs d'érosion au niveau événementiel. Situés en zone de montagne méditerranéenne, les bassins subissent l'agression d'hivers rudes et de pluies intenses. En conséquence, instrumenter correctement le projet a nécessité de nombreux développements dont il a été partiellement rendu compte dans les premier et deuxième comptes rendus de recherche et dans un symposium de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique¹ ; on en trouvera encore la manifestation dans la première partie du présent compte rendu de recherche consacrée aux projets d'instrumentation qu'il a fallu conduire pour améliorer les mesures sur les bassins versants, tant sur la partie limnigraphie que sur le volet mesure des transports solides.

Quatre petits bassins versants ont été équipés d'instruments de mesure. Pour une information plus détaillée, on se reportera à la notice descriptive des bassins (Cemagref-ONF-RTM, 1988). On trouvera aussi des présentations plus sommaires dans certains articles de ce compte rendu de recherche. Les deux grands bassins (d'une taille avoisinant le km²) sont fortement différenciés par le taux de végétation (le Laval est très peu végétalisé, le Brusquet beaucoup), ce qui permet de quantifier les effets d'un boisement sur l'érosion et le ruissellement à une échelle d'espace significative. Un autre bassin (la Roubine) de taille très réduite (de l'ordre de 1 000 m²) est quasi complètement dénudé et constitue à ce titre l'unité morphologique de base pour l'étude des processus de ruissellement et d'érosion ; il représente l'échelle spatiale immédiatement supérieure à celle des parcelles d'érosion classiques en érosion agricole ou sur des versants de bassins naturels et a sur elles l'avantage d'être un "vrai" bassin versant. Le quatrième et dernier bassin, celui du Moulin, largement dénudé lui aussi, est d'une taille intermédiaire et permet l'étude de l'évolution de l'érosion en fonction de la taille du bassin, par comparaison avec les résultats des mesures obtenues sur le petit et le grand bassin.

¹CAMBON J.P., MATHYS N., MEUNIER M., OLIVIER J.E., 1990 "Mesures des débits solides et liquides sur des bassins versants de montagne". Symposium : Hydrology in Mountainous Regions. Lausanne. AIHS Publ. n° 194, 231-238.

Sur le plan scientifique, les premiers résultats sont évidemment donnés par les valeurs obtenues pour l'érosion de ce type de substrat, inconnu avant ce projet, et qui sont de grand intérêt pour le sud-est de la France (et notamment le bassin de la Durance) mais aussi pour toutes les zones marneuses méditerranéennes. On a fait figurer ici la synthèse de ces résultats, après un peu moins d'une dizaine d'années de mesures ; mais on trouvera aussi les résultats des études des phénomènes érosifs et de ruissellement qui ont été conduites à partir de ces données ou directement sur le terrain : étude de la dynamique interne des phénomènes (par simulation de pluie ou de ruissellement), modèles statistiques de l'érosion, modèle hydrosédimentologique des transports solides, érosion chimique, etc ...

L'intérêt des bassins versants de Draix comme laboratoire de terrain ne se limite pas à l'étude fine des mécanismes de l'érosion et du ruissellement ; ils permettent d'améliorer les outils existant en matière de protection contre les risques torrentiels : en hydrologie de crue par exemple où les données sur les très petits bassins de montagne manquent cruellement, en hydrologie forestière aussi par la comparaison des résultats entre le Laval et le Brusquet. On en trouvera les premiers signes dans les articles consacrés à l'hydrologie. Les bassins versants expérimentaux de Draix permettent enfin des expérimentations sur la possibilité de végétaliser des terrains aussi minéraux que des Terres Noires, sur la nature du matériel végétal le plus adapté à cette tâche. Ils sont un endroit privilégié pour étudier la dynamique de la végétation naturelle ou implantée et effectuer des comparaisons pédologiques entre sols de même nature lithologique avec ou sans transformation par un couvert végétal sur une longue période.

Le présent compte rendu de recherche est le troisième du nom. Les sommaires des deux premiers étant indiqués dans la bibliographie ci-après, on pourra constater par comparaison que les bassins versants de Draix se sont véritablement ouverts aux aspects pluridisciplinaires qu'ils autorisent puisque coexistent des articles ou rapports traitant d'instrumentation, d'hydrologie, d'érosion mécanique ou chimique, de dynamique des transports solides ou des processus érosifs, et aussi de génie biologique relatif à du matériel herbacé ou arboré.

Enfin, la liste des travaux effectués sur le site de Draix, l'accueil des équipes universitaires régionales, nationales et européennes et l'intégration des bassins versants dans deux projets européens (EROSLOPE et DM2E) témoignent de son intérêt pour tous les chercheurs en instrumentation, hydrologie, érosion et transport solide ; on ne peut donc qu'espérer pour lui un avenir encore plus fructueux.

Que les rédacteurs des articles présentés dans ce compte rendu de recherche soient vivement remerciés pour leur contribution ainsi que Louise JUVY qui a eu la lourde charge de la frappe, de la mise en page et de l'harmonisation des présentations.

J.P. FEUVRIER

Chef de division protection contre les érosions

Bibliographie

Brochure de présentation

Les bassins versants expérimentaux de Draix. Etude et mesure de l'érosion. Présentation et synthèse. Cemagref Grenoble et Aix-en-Provence, Service ONF-RTM Digne, 38 p.

Sommaire des précédents comptes rendus de recherche édités par le Cemagref de Grenoble

Compte rendu de recherche n° 1, 1987, 105 pages

- *Obtention des mesures*
- *Les résultats acquis depuis le début du projet jusqu'à fin 86.*
- *Etude des écoulements très chargés.*
- *Quelques éléments sur la géomorphologie et les processus érosifs observés dans le bassin du Laval.*

Compte rendu de recherche n° 2, 1989, 113 pages

- *Utilisation de méthodes topographiques pour la mesure de l'érosion et comparaison avec des mesures de transport solide.*
- *Mesure et interprétation du processus d'érosion dans les marnes des Alpes du sud à l'échelle de la petite ravine.*
- *Un modèle d'érosion et d'altération des marnes et le problème du gonflement de la couche d'altération.*
- *Etude de canaux jaugeurs sur modèle réduit. Détermination de la courbe de tarage d'un canal triangulaire de pente 4 %.*

Liste des travaux postérieurs à 1990 effectués sur le site des BVRE de Draix - Le Brusquet

Thèses

BORGES (A.L.), 1993 - *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du sud.* Cemagref P.E. Thèse de l'Université Joseph Fourier. Grenoble. 205 p. + tab., fig.

PHAN (T.S.H.), 1993 - *Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres Noires du sud-est de la France.* IRIGM. Thèse de l'Université Joseph Fourier. Grenoble. 246 p.

Etude

BROCHOT (S.), 1993 - *Erosion de badlands dans le système Durance - Etang de Berre.* Cemagref P.E. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. 269 p. + cartes.

Diplômes d'études approfondies

LAROCHE (H.), 1991 - *Les sols sur matériaux d'altération et d'érosion dérivés des Marnes Noires (Toarcien-Aalénien) d'un bassin versant reboisé dans les Alpes du sud (Le Brusquet)*. Université Joseph Fourier. DEA Géographie, écologie et aménagement des montagnes. Cemagref P.E. 101 p.

RICHY (P.), 1992 - *Contribution à l'étude des mécanismes et bilans de l'érosion chimique des Terres Noires du bassin de la Durance. Exemple des BVRE de Draix*. Mémoire de DEA. Université d'Aix-Marseille III.

CAZAUX (P.L.), 1993 - *Transport solide en torrent : Etude théorique et expérimentale de la dispersion d'échantillons*. Université Joseph Fourier. DEA : Mécanique des Milieux géophysiques et Environnement. Cemagref P.E. 36 p. + annexes (106 p.).

Mémoires

GRITZBACH (H.), 1992 - *Modélisation du comportement pluie-débit sur le bassin versant expérimental Le Brusquet dans les Alpes-de-Haute-Provence*. Université de Munich - Cemagref P.E. 40 p.

SCHUBETZER (C.), 1992 - *Représentativité des bassins versants expérimentaux de Draix par rapport au bassin versant de la Durance*. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires - Cemagref P.E. 31 p. + annexes + cartes.

BUTTAFUOCO (G.), 1993 - *Bilan de la production d'érosion des marnes noires dans le bassin versant du Brusquet*. Institut d'Ecologie et d'Hydrologie Forestière de Castiglione - Cemagref P.E. 20 p. + fig.

LEYDET (J.C.), 1993 - *Acquisition de la composition chimique des eaux de la Durance : altération expérimentale des Terres Noires de la région de Digne*. Mémoire d'initiation à la recherche. Université d'Aix-Marseille III.

SARTORE (L.), 1993 - *Etude des stations de deux bassins versants caractérisés par une différente réponse à l'érosion hydrique (le Brusquet et le Moulin, bassin de Draix, Alpes-de-Haute-Provence)*. 84 p. ENITA de Clermont-Ferrand / Université d'agronomie de Turin.

SECKEL (K.), 1993 - *Etude de la méthodologie de mesure de la dynamique du transport solide dans les biefs du torrent du Laval (BVRE de Draix) à l'aide de traceurs naturels et magnétiques*. Université de Karlsruhe - Cemagref - P.E. 46 p. + annexes (texte français), 71 p. + annexes (en allemand).

VERITE (F.), 1993 - *Hydrologie des bassins versants méditerranéens. Calage de modèles déterministes pluie-débit à partir des caractéristiques des bassins versants*. Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg - Cemagref - P.E. 119 p.

CONTRERAS (G.), 1994 - *Analyse et interprétation des mesures de pluie, de débit, d'érosion sur le bassin versant du Moulin (BVRE de Draix, Alpes du sud)*. Ecole Nationale des Travaux Publics d'Etat - Cemagref P.E. 48 p. + annexes.

MARIN (A.J.), 1994 - *Erosione et trasporto di sedimenti intensi in un torrente delle alpi di Provenza*. Università degli studi di Padova. Cemagref P.E., Mémoire de bourse Erasmus. 100 p. + annexes (en italien).

SAUTENET (C.), 1994 - *Comportement hydrologique et érosif de bassins versants méditerranéens*. Ecole Supérieure de Géologie de Nancy - Cemagref P.E. 90 p.

I n s t r u m e n t a t i o n

L'Ellan, un limnigraphe adapté aux mesures en conditions difficiles	13
Jean-Emmanuel OLIVIER ; Jean-Claude PEBAY PEYROULA	
Caractérisation des matières en suspension. Mise au point d'une méthode rapide d'estimation des concentrations des prélèvements	25
Nicolle MATHYS ; Maurice MEUNIER	
Matériel de mesure de matières en suspension : préleveur d'échantillon et capteur de pression différentielle - Test et étalonnage en canal	43
Jean-Emmanuel OLIVIER ; Michel JUGE	
Mesure in situ de la concentration des matières en suspension : mise au point d'une sonde optique.....	63
Laurence BERGOUGNOUX ; Jacqueline MISGUICH-RIPAULT ; Jean-Luc FIRPO ; Jacques ANDRE ; Jean-Pierre CAMBON ; Nicolle MATHYS ; Jean-Emmanuel OLIVIER	
Mesure du débit solide des écoulements hyperconcentrés en matériaux fins par une jauge à absorption du rayonnement gamma.....	79
Gérard MEYER ; Maurice MEUNIER ; Jean-Emmanuel OLIVIER	

L'Ellan, un limnigraphe adapté aux mesures en conditions difficiles

Jean-Emmanuel OLIVIER

Cemagref, division protection contre les érosions, 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

Jean-Claude PEBAY PEYROULA

Laboratoire de spectrométrie physique, UFR de physique, Université Joseph Fourier, rue de la Houille Blanche, BP 53X, 38041 Grenoble Cedex, France

Introduction

La division protection contre les érosions du Cemagref de Grenoble exploite depuis 1983 des bassins versants représentatifs et expérimentaux situés à proximité de Digne (Alpes-de-Haute-Provence) à Draix. Ces bassins (actuellement au nombre de cinq) d'une taille variant entre 0,1 et 100 ha, sont localisés dans des faciès de marnes noires très fortement érodables. Les transports solides sont importants (# 100 t/ha/an) et les conditions climatiques assez rudes (altitude de 800 à 1200 m, glace l'hiver, sécheresse estivale entrecoupée de violents orages).

Les mesures effectuées concernent les pluies et les débits liquides et solides.

Si la mesure de la pluie ne pose pas de problèmes particuliers, il en va tout autrement pour les transports solides (ce qui était attendu) mais aussi pour les débits liquides.

Les stations de mesures types sont composées, d'amont vers l'aval, d'une plage de dépôt qui arrête les éléments grossiers du transport solide et permet leur mesure globale, tout en protégeant les installations à l'aval, et de la station de mesures des débits et matières en suspension. La mesure des débits consiste à mesurer la hauteur d'eau, soit dans un canal auto-jaugeur (type Parshall), soit à l'amont d'un déversoir triangulaire pour le plus petit bassin. C'est à ce niveau que sont mesurées les matières en suspension, dont la concentration peut atteindre 500 g/l lors des fortes crues.

Les visites sur site sont quasi hebdomadaires, c'est à ce moment que sont effectués la collecte des données et le réglage éventuel des appareils.

Les écoulements à mesurer ont les caractéristiques suivantes :

- les débits de base sont très faibles, voire inexistantes en été et les canaux ne permettent pas d'en faire une mesure très précise ; de plus les transports solides qui sont le centre d'intérêt principal du projet sont quasi inexistantes, en dehors des crues ;
- les crues sont en général très brèves, quelques heures et violentes. Les montées de niveau sont très rapides, jusqu'à 1 m en 5 mn et les transports solides importants.

Ces caractéristiques particulières, dans le domaine de la limnimétrie, soumettent le matériel à un certain nombre de contraintes : abrasion et corrosion (l'eau contient des sulfates qui attaquent le béton), colmatage des puits et des tuyauteries.

A ces contraintes, dues aux écoulements, s'ajoutent celles liées au climat, en particulier le froid hivernal et le gel. On a observé des extrêmes de - 15 °C à - 30 °C et jusqu'à 70 cm de glace dans les canaux.

Le matériel utilisé pour la limnimétrie doit supporter ces contraintes. On va donc lui demander à la fois d'être robuste, d'un coût modéré, d'être fidèle et de permettre une précision de mesures de l'ordre du cm, suffisante dans le domaine de l'étude.

Les limnigraphes installés à Draix sont des appareils du commerce utilisés couramment pour les mesures en rivières, sélectionnés au départ en fonction de leur réputation de robustesse ou de leurs performances dans les eaux chargées.

Nous allons passer rapidement en revue les problèmes rencontrés avec ces matériels, avant de décrire l'Ellan qui a été mis au point en tenant compte des contraintes liées à la mesure dans les torrents de montagne.

1 - Problèmes posés par les appareils classiques

1.1 - Les appareils à flotteurs

C'est le système le plus classique en hydrométrie pour l'enregistrement des niveaux.

1.1.1 - Principe

Un flotteur métallique est posé sur socle au fond d'un puits. La base du puits communique avec le cours d'eau. Le flotteur est relié à un contrepois par un câble qui passe sur une poulie. Quand l'eau monte dans le puits, le flotteur est soulevé et la poulie tourne. En comptant le nombre de tours de la poulie, on connaît le déplacement du flotteur, donc du niveau d'eau (figure 1).

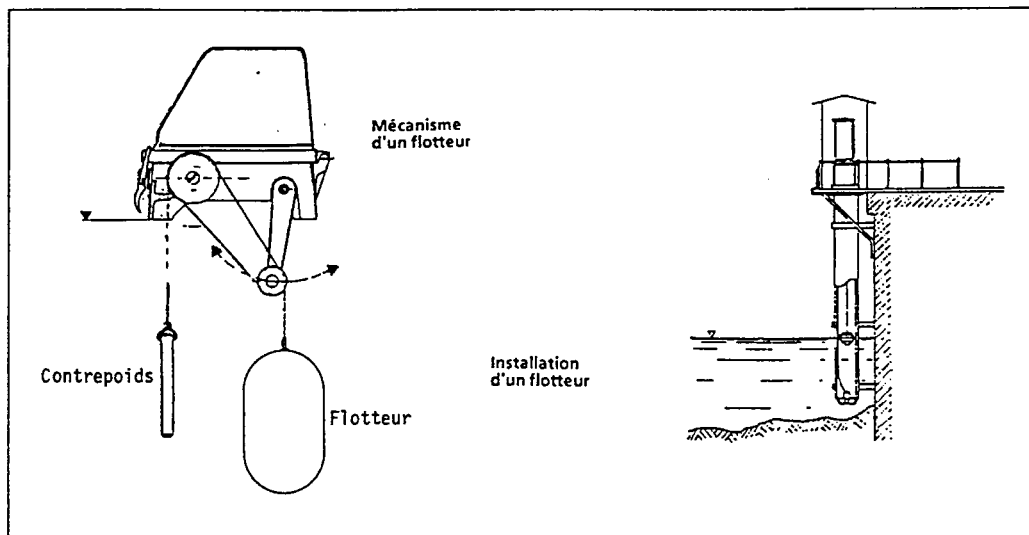


Figure 1 : Appareil à flotteur

Ce type d'appareil est en général robuste et fiable, il possède une certaine inertie, ce qui atténue les petites variations liées au batillage, mais peut aussi aplatis légèrement les pointes de crues rapides comme à Draix.

Les améliorations technologiques ont porté essentiellement sur le guidage du câble et la diminution du glissement sur la poulie, avec éventuellement une roue à picot et un ruban perforé à la place du câble.

Le montage d'un potentiomètre sur l'axe de la poulie permet d'obtenir un signal analogique avec un enregistreur de données à mémoire. L'installation est relativement lourde à cause du puits et du respect de la verticalité de l'ensemble, le flotteur ne devant, à aucun moment, frotter contre la paroi du puits.

1.1.2 - Problèmes rencontrés

Le plus courant est le colmatage du puits par les sédiments. Le flotteur se trouve alors posé au-dessus de son socle, parfois de travers, ce qui a pour conséquences :

- de diminuer la gamme de mesures ;
- de provoquer des à-coups et parfois une perte de verticalité lorsqu'il est à nouveau soulevé ;
- de nécessiter un nettoyage régulier du puits, pas toujours aisé sur le terrain.

Le deuxième problème est lié au gel qui bloque le flotteur à l'intérieur du puits. Les conséquences sont du même type que précédemment lorsque la crue survient alors que l'intérieur du puits est encore gelé.

La qualité des mesures est altérée de la même façon dans les deux cas (figures 2 et 3).

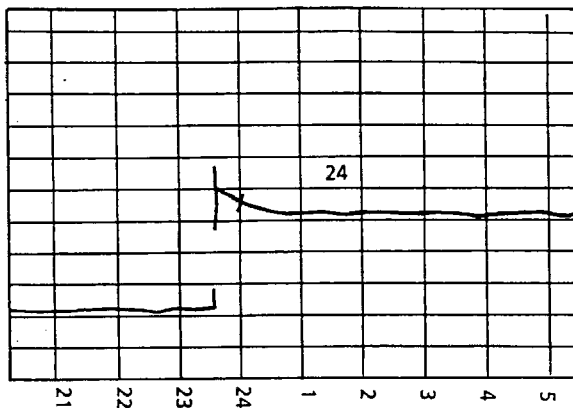


Figure 2 : Le flotteur jaillit hors de sa gangue de boue

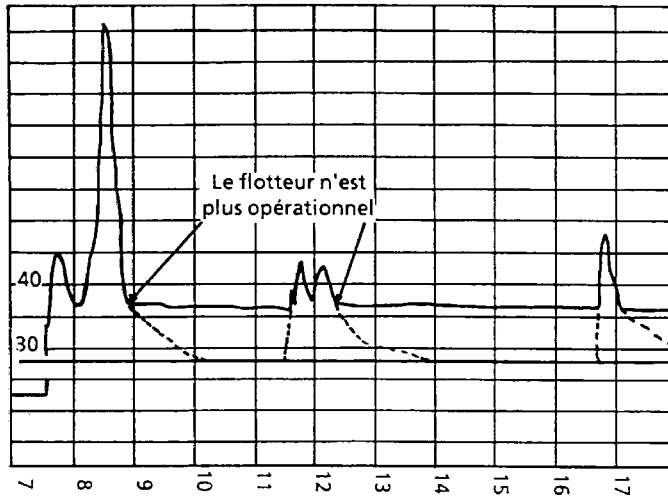


Figure 3 : Le flotteur se pose sur les dépôts. Les décrues ne sont pas enregistrées

Pratiquement, dans ces conditions le flotteur ne fonctionne plus que comme une échelle à maximum

Sur le site de Draix il en reste deux. Un qui n'est utilisé que pour les maxima, le deuxième sur le plus petit bassin (0,1 ha) où les problèmes de sédimentation sont moins marqués.

1.2 - Les appareils à pression

- Les appareils à injection d'air dits : bulle à bulle.

1.2.1 - Principe de fonctionnement

Une bouteille d'air comprimé alimente, à pression et débit constants, une tuyauterie étanche dont l'extrémité débouche dans le cours d'eau. Le débit d'air est réglable et un capteur enregistre la pression nécessaire pour que les bulles d'air s'échappent ; cette pression représente la hauteur d'eau qui surplombe l'extrémité du tuyau.

La seule contrainte d'installation est d'éviter que la tuyauterie ne comporte des boucles ou des points bas qui provoquent de la condensation.

Il existe un dispositif de purge manuelle du tuyau.

1.2.2 - Problèmes rencontrés

Le problème principal est le bouchage du tube :

- bouchage total de la tuyauterie par le gel en hiver et plus rarement par des transports solides. Ces bouchages, en plus de la perte d'informations, provoquent des décalages de l'appareil. Actuellement, ces appareils sont mis hors service en hiver. Il peut arriver alors de rater les premières crues de printemps.
- bouchage partiel, souvent en décrue, qui se traduit au niveau de l'enregistrement par une série d'oscillations. Ces oscillations peuvent arriver à saturer la mémoire de l'enregistreur, donc provoquent une lacune de mesures jusqu'au prochain passage sur le site.

En résumé : les principaux reproches adressés à ce type de matériel sont :

- incertitudes importantes sur les données ;
- apparition de faux débits donc plus ou moins de données à traiter, et important travail de critique des données (figure 4).
- Les capteurs piézométriques : une courte période d'essais d'un appareil de ce type à fait apparaître le même genre de problèmes qu'avec les bulles à bulles.

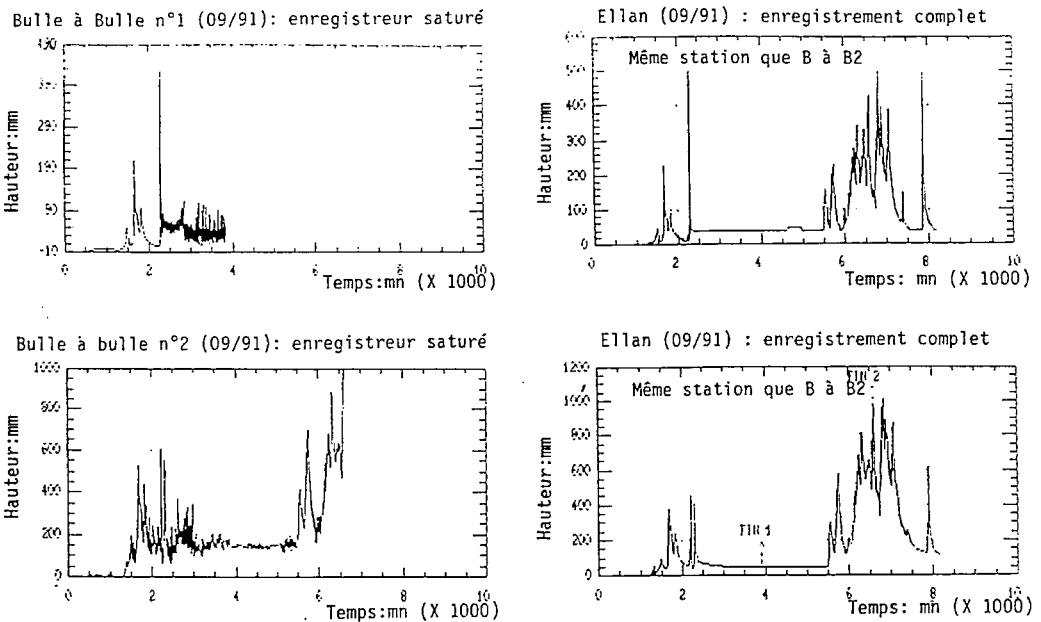


Figure 4 : Bulle à bulle : oscillations et saturation de mémoire

1.3 - Les capteurs à ultrason

1.3.1 - Principe

Le principe consiste à émettre un train d'impulsions ultrasonores et de mesurer le temps jusqu'à réception d'un écho.

Connaissant la vitesse du son dans le milieu traversé on en déduit la distance parcourue.

En hydrométrie on trouve deux familles principales : les ultrasons immergés qui captent la réflexion sur l'interface eau-air et les ultrasons aériens qui captent la réflexion sur l'interface air-eau. Seul le deuxième type est utilisé à Draix, le premier étant extrêmement sensible aux transports solides.

La vitesse du son dans l'air dépend principalement de sa température. La mesure de celle-ci se fait en général à l'aide d'un thermomètre incorporé au support du capteur.

Les capteurs utilisés actuellement sont gérés à partir de la centrale d'acquisition qui fournit l'alimentation et déclenche les cycles de mesures.

La mesure est gérée par un algorithme dont les fonctions sont :

- de déclencher un cycle de mesures (cinq dans notre cas) ;
- de comparer les valeurs obtenues et d'attribuer un label de qualité suivant l'écart-type calculé (ce label n'est pas enregistré, il n'est accessible qu'en mode conversationnel avec l'enregistreur) ;
- de faire les calculs permettant de connaître la distance d'après le temps de parcours et la température estimée ;
- de comparer le résultat avec le résultat du cycle précédent et de pondérer éventuellement la puissance d'émission ou d'initier un nouveau cycle de mesures.

1.3.2 - Principaux problèmes rencontrés

La mesure de températures est peu représentative de celle de l'air sur le trajet, en particulier les jours ensoleillés. Conséquences : le calage de l'appareil est délicat, la mesure enregistrée en période sèche (donc à niveau constant) fluctue suivant un cycle de 24 h.

La mise au point d'un algorithme de gestion de puissance satisfaisant. Suivant la pondération affectée à partir de la mesure précédente, le comportement du système change : soit la mesure est précise mais dérive lentement, ce qui amène des pertes d'écho, soit la précision diminue et les oscillations sont plus marquées.

La précision peut aussi être altérée par la résonance du support (portiques métalliques) et oblige à soigner particulièrement l'installation du capteur. En particulier le montage ne doit pas être trop rigide.

En résumé malgré des avantages importants (pas de contacts avec le liquide, échelle de mesures importante), les systèmes à ultrasons aériens manquent de mise au point pour être complètement satisfaisants (figure 5).

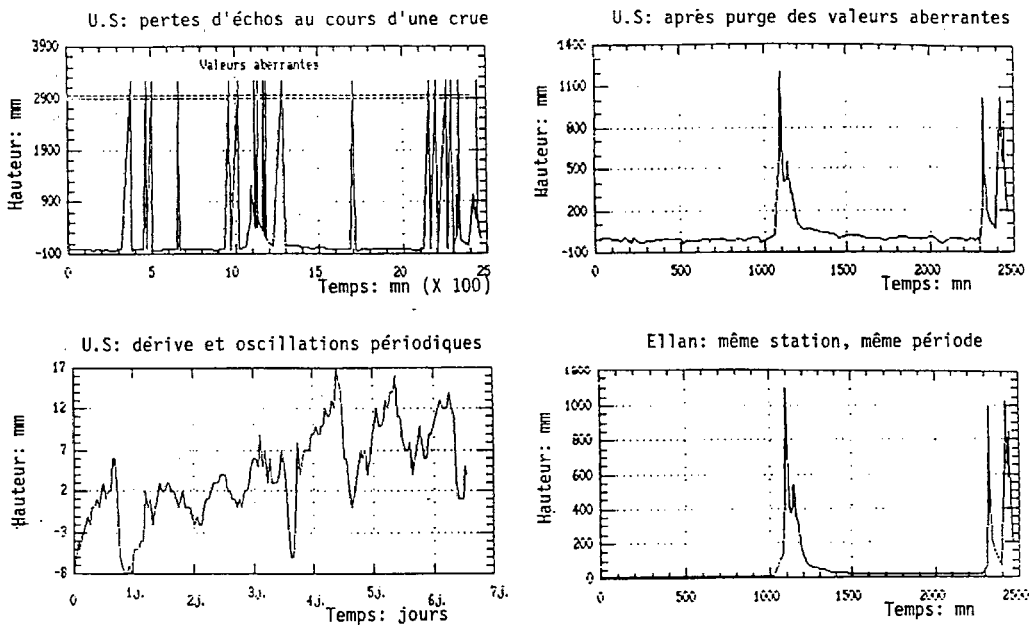


Figure 5 : Ultrason : pertes d'écho, oscillations et dérivés

La solution "idéale" ne semble pas exister parmi les appareils disponibles sur le marché ; Nous nous sommes tournés vers d'autres principes. La première voie explorée a été l'optique qui concilie l'avantage de n'avoir pas de contact avec le milieu à mesurer tout en étant pratiquement insensible aux variations climatiques (dans la gamme de mesures utilisées).

Des essais ont montré que cette voie était très intéressante du point de vue performance mais débouchait, malheureusement, sur une réalisation très onéreuse en regard des critères du marché limnimétrique.

La deuxième voie a été l'idée d'utiliser la conductivité électrique de l'eau ce qui a amené la conception et la réalisation de l'Ellan.

2 - Principe et réalisation du limnigraphe Ellan

2.1 - Principe de base

Un capteur, placé verticalement (figure 6b) comporte une série d'électrodes conductrices B, numérotées de 1 à N, placées au voisinage d'une électrode conductrice A ayant la longueur totale de l'appareil. L'idée est de détecter, pour déterminer la hauteur, le nombre d'électrodes immergées en :

- utilisant le fait que l'eau est conductrice de l'électricité ;
- utilisant une méthode indépendante des variations de résistivité de l'eau ;
- en s'affranchissant des conductibilités accidentelles apparaissant sur la partie non immergée du capteur (humidité, film d'eau lors de la pluie).

2.2 - Principe de fonctionnement (comptage du nombre d'électrodes immergées)

Des séquences de mesures ont lieu de façon répétitive, séparées par un temps T (par exemple $T = 1$ minute, 10 minutes ...).

Une séquence de mesures se déroule de la façon suivante : un générateur d'impulsions fournit $p \times N$ impulsions (fréquence de l'ordre de 100 à 1 000 Hz). Ces impulsions sont envoyées successivement sur les électrodes B suivant les affectations suivantes :

- l'électrode 1 reçoit les impulsions 1, $N + 1$, ..., $[(p-1)N + 1]$;
- l'électrode i reçoit les impulsions i , $N + i$, ..., $[(p-1)N + i]$.

L'électrode A ne reçoit, par suite de la conductibilité de l'eau, que des impulsions provenant des électrodes immergées. Si j électrodes sont immergées elle reçoit $n = p j$ impulsions.

p étant fixé par réglage de l'appareil, le décompte d'impulsions reçues par électrode A lors d'une séquence fournit donc le nombre $j = n/p$ d'électrodes immergées, c'est-à-dire la hauteur d'eau.

Le résultat - valeur j - est soit directement affiché pour une lecture immédiate, facilement convertible en unité de hauteur d'eau, soit mis en mémoire, sous forme digitale ou analogique pour permettre une consultation par une centrale de mesures ou un dispositif de télémesures.

L'existence au cours d'une séquence de mesures de p cycles de test des électrodes B permet de fournir une valeur moyenne de la hauteur d'eau, compte tenu des fluctuations de niveau (clapotis, houle, etc.). Les valeurs de p et la durée du train de $p \times n$ impulsions sont choisies pour optimiser cet effet de moyenne.

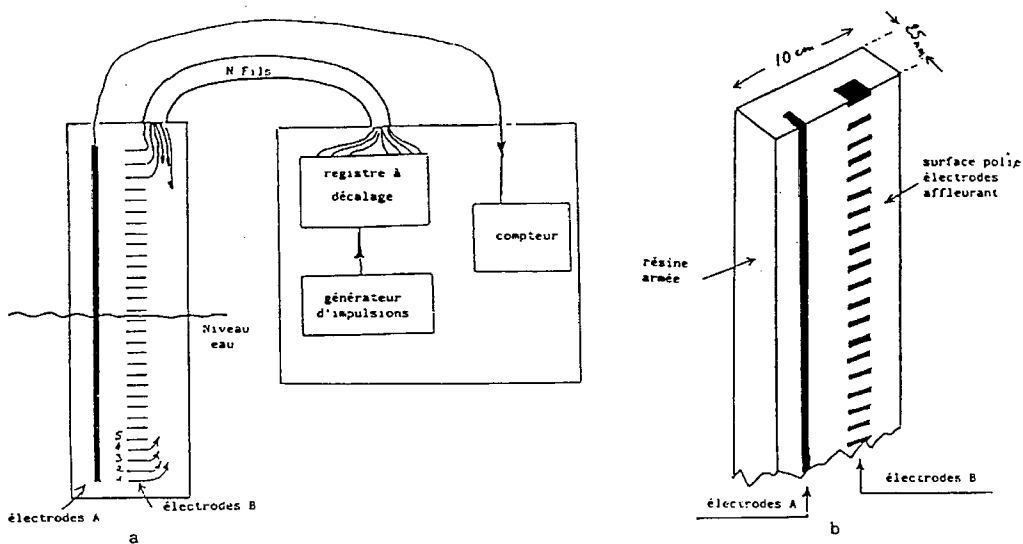
2.3 - Réalisation

La précision absolue des mesures est évidemment déterminée par la distance entre deux électrodes B consécutives.

Le nombre de configurations d'appareils est infini car il varie selon l'espacement et le nombre des électrodes.

Au point de vue réalisation aussi, les possibilités de variante sont grandes : on peut par exemple produire les séquences d'impulsion dans le coffret d'électronique, ce qui impose un câble de liaison de $(N + 2)$ fils de liaison (cf. figure 6a). On peut aussi placer des circuits générateurs d'impulsions dans le capteur lui-même ; on peut également adopter une technique de multiplexage qui autorise un nombre de fils inférieur au nombre d'électrodes.

C'est cette dernière solution qui a été retenue pour la réalisation de deux prototypes de 1,2 m de haut qui fonctionnent donc selon les caractéristiques suivantes.



Figures 6a et 6b : Principe et réalisation du limnigraph Ellan

2.3.1 - Choix de l'impédance des sources d'impulsions et de l'impédance d'entrée des circuits de comptage

Des valeurs optimales permettent de rendre le résultat de la mesure indépendant de la résistivité de l'eau et d'éliminer les signaux parasites causés par des projections d'eau, par la pluie, par des dépôts organiques ou minéraux sur la partie émergée du capteur.

Le réglage peut être effectué in situ à l'aide de potentiomètres accessibles à l'extérieur du boîtier.

2.3.2 - Définition des séquences de mesure, adaptation du dispositif d'enregistrement de données

Le train de N impulsions a une durée de l'ordre de la seconde. Il s'est avéré utile de calculer des moyennes sur plusieurs trains successifs.

La partie électronique comporte une horloge définissant l'intervalle (1 ou 10 minutes) entre chaque mesure, le nombre de trains d'impulsions définissant une mesure, le temps nécessaire pour transférer les données sur le dispositif d'enregistrement.

L'ensemble est conçu pour minimiser la consommation d'énergie (0,1 watt heure/jour) ; à noter que cette consommation est due surtout à la conversion digitale analogique rendue obligatoire par l'utilisation des centrales de mesures déjà utilisées sur le site d'expérimentation.

2.3.3 - Le capteur

Le capteur se présente sous la forme d'un parallélépipède allongé de section 10 cm X 2 cm et dont la longueur est celle de hauteur utile à mesurer. C'est un bloc moulé de résine polyester dans lequel ont été incluses les électrodes en acier inoxydable, ainsi que les fils de liaison et une partie des circuits électroniques relatifs au multiplexage. La face sur laquelle affleurent les électrodes a été planifiée par usinage et polissage après le démoulage.

Ce capteur présente :

- une bonne tenue mécanique,
- une résistance satisfaisante à l'abrasion,
- une insensibilité à l'action de l'eau et du soleil,
- un comportement superficiel maintenant le meilleur isolement possible entre électrodes non immergées.

3 - Essais des prototypes

3.1 - Au laboratoire

Une maquette de 40 cm sans multiplexage avec un espacement des électrodes de 1 cm a été testée avec succès au laboratoire (suivi de remplissages et vidanges successifs d'un bac).

3.2 - Sur une station de jaugeage EDF

Un prototype de 1,20 m de long avec aussi un espacement de 1 cm entre électrodes a été installé dans un puits de mesures de limnigraphe à flotteur, sur la Romanche, durant le mois de juillet 88.

Le niveau de la Romanche influencé par la gestion du barrage du Chambon varie rapidement plusieurs fois par jour.

Les données enregistrées se sont révélées remarquablement concordantes avec celles du flotteur.

3.3 - Sur les bassins versants expérimentaux de Draix

Un premier prototype, puis un deuxième ont été ensuite installés sur deux stations des bassins versants expérimentaux de Draix : l'une équipée d'un capteur de pression "bulle à bulle" (LSA de la Société Hydrologie) et l'autre un flotteur.

Comme il n'y a aucun appareil dont le fonctionnement puisse être considéré comme sûr dans de telles conditions, il n'y a donc pas de références auxquelles comparer un nouvel appareil. Il faut donc effectuer la comparaison de manière "relative", analyser à chaque crue le fonctionnement de tous les appareils, et ne les comparer que lorsque les fonctionnements ont été jugés satisfaisants.

La première année 1989 a été très sèche, cette comparaison n'a pu être faite que sur peu de crues ; de plus les différences entre les mesures de notre prototype (mesure de niveau) et celles du LSA (mesure de pression) sont souvent explicables par la présence de transport solide ; il faut donc

s'appuyer surtout sur la comparaison entre l'Ellan et le flotteur installés sur le même site de la Roubine, équipé d'un déversoir dont la cote de déversement est à 23 cm. La figure 7 montre un exemple de cette comparaison, malheureusement sur de petites crues (quelques centimètres de hauteurs d'eau déversées).

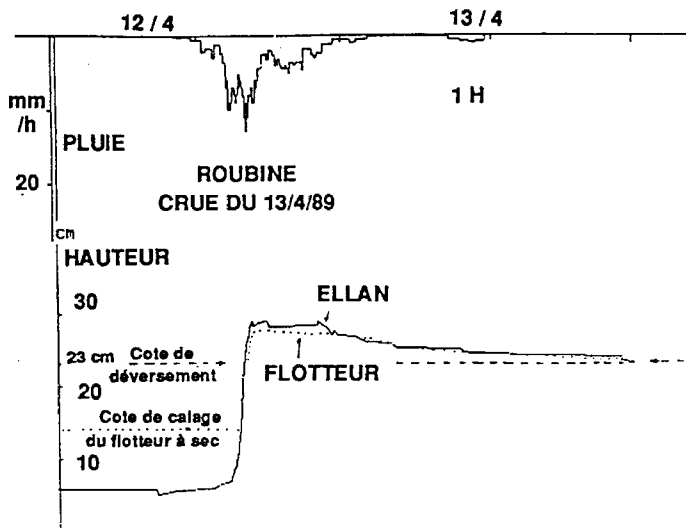


Figure 7 : Essais comparatifs flotteur - Ellan à Draix

3.4 - Résultats

Après tous ces essais et ces comparaisons, le bon fonctionnement, la simplicité du principe de mesures, et ses nombreux avantages, vis-à-vis des écoulements torrentiels (insensibilité aux transports solides, pas de pièces mécaniques, insensibilité au gel, etc.) ont conduit le Cemagref et le Laboratoire de Spectrométrie Physique de l'UJF à déposer une demande de brevet.

Depuis plus de deux ans les deux prototypes Ellan fonctionnent à temps plein à Draix et se montrent les plus précis et les plus fiables des limnigraphes sur le site. Aucun problème majeur n'est à signaler.

L'Ellan a été breveté et une licence d'exploitation a été concédée à une PME. Actuellement une présérie est en cours de fabrication et les tests devraient débuter dans l'année.

Cet appareil convient particulièrement aux mesures d'écoulements chargés et d'une façon générale peut rendre service lorsque les variations de niveaux ont une amplitude moyenne. L'installation est relativement simple et l'appareil peut remplacer avantageusement la traditionnelle échelle limnimétrique des stations de jaugeage. Le seul inconvénient est sa longueur limitée qui nécessite le couplage de plusieurs appareils si la gamme de mesures souhaitée est plus importante.

Bibliographie

ANDRE (H.), AUDINET (M.), MAZERAN (G.), RICHE (C.), 1976 - *Hydrométrie pratique des cours d'eau*. Eyrolles.

CAMBON (J.P.), 1984 - *Eléments pour définir les appareils à mettre en service sur les torrents de montagne*. Cemagref, division hydraulique générale, Aix-en-Provence - 28 février 1984.

CAMBON (J.P.), COMBES (F.), MURA (R.), NARBONNE (A.), OLIVIER (J.E.), 1984 - *Communication sur les bassins versants expérimentaux de Draix (France). Mesures de l'érosion*. Commission européenne des forêts - Torremolinos, octobre 1984.

CAMBON (J.P.), 1985 - *Bassins versants expérimentaux de Draix : mesure des transports solides. Test d'une chaîne de mesure*. Cemagref. Juillet 1985.

MEUNIER (M.), CAMBON (J.P.), OLIVIER (J.E.), MATHYS (N.), COMBES (J.F.), 1987 - *Bassins versants expérimentaux de Draix : compte rendu de recherche n° 1*. Cemagref, ONF-RTM, septembre 1987.

BOUYE (J.M.), FERRY (M.), 1989 - *Etude sur les appareils et les pratiques limnimétriques AFEE - Plan Urbain*, Cemagref.

CAMBON (J.P.), MEUNIER (M.), MATHYS (N.), OLIVIER (J.E.), 1990 - *Mesures des débits solides et liquides sur des bassins versants expérimentaux de montagne*. International conference on resources in mountainous regions - IAH - IAHS - Lausanne, septembre 1990.

Caractérisation des matières en suspension. Mise au point d'une méthode rapide d'estimation des concentrations des prélèvements

Nicolle MATHYS

Cemagref, division protection contre les érosions
2, rue de la Papeterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

1 - Introduction

Les bassins versants expérimentaux de Draix (04) ont pour objectif l'étude et la mesure de l'érosion dans les marnes noires, terrains représentatifs de grandes surfaces érodées dans les Alpes du sud.

Les stations de mesure des débits sont constituées de seuils auto-jaugeurs à l'amont desquels ont été placées des plages de dépôts ou pièges à sédiments. La mesure des transports solides se fait par le relevé des volumes déposés dans la plage de dépôts, complété par l'estimation des quantités de sédiments qui n'ont pas été piégés. En l'absence de dispositif capable de mesurer en continu les concentrations souvent élevées des écoulements en crue (de quelques dizaines à quelques centaines de grammes par litre), des préleveurs d'échantillons ont été placés au droit des stations de mesure. Ils sont programmés à la fois en fonction du temps et des variations de hauteur, pour prélever des échantillons représentatifs de la crue.

Leur bon fonctionnement est souvent difficile à assurer mais depuis 1983, un certain nombre de crues ont pu être ainsi échantillonnées. Les principales observations faites sont présentées ci-après.

La mesure des teneurs en sédiments secs -ou concentrations- est faite au laboratoire, à Grenoble, par séchage et pesée. La méthode étant relativement longue et contraignante, une méthode d'évaluation plus rapide a été étudiée.

1.1 - Concentrations observées dans les écoulements

Cinq stations de mesure sont en service actuellement et plus d'un millier d'échantillons ont été traités sur les différents points de mesure. Les concentrations mesurées sont extrêmement variables (figure 1).

Les concentrations les plus fortes ont été mesurées au Laval (489 g/l le 18 août 1986) et 13 crues de cette station atteignaient des valeurs de plus de 300 g/l.

Les valeurs mesurées à la station du Brusquet -bassin entièrement végétalisé- n'ont jusqu'à maintenant pas dépassé 30 g/l.

Pour les bassins dénudés, les concentrations mesurées pour la petite Ravine sont plus faibles que pour les bassins plus grands (Laval, Francon et même Moulin), ainsi que le montrent les maximums de concentrations observés au cours des crues :

- Roubine : 22 %
 - Laval : 60 %
 - Francon : 50 %
 - Moulin : 62 %
- } des crues ont des maximums supérieurs à 100 g / ℓ

Le bassin de la Roubine étant nettement plus petit, les particules transportées sont plus grosses et donc plus facilement piégées dans la plage de dépôts : les écoulements à l'aval sont, de ce fait, moins chargés.

Cependant, cette comparaison est un peu biaisée car les crues de la Roubine sont plus fréquemment échantillonnées. En effet les préleveurs du Laval ont souvent mal fonctionné. Celui du Moulin a un seuil de prélèvement (en hauteur de fluide) assez élevé du fait de la géométrie de la station au droit de la crépine du préleveur.

Station	Période de fonctionnement du préleveur	Nombre d'échantillons prélevés	Nombre de crues traitées	Concentration maximum observée (g/ℓ)
Roubine	1983-1993	597	98	260
Laval	1985-1993	595	57	489
Francon	1987-1989	204	18	333
Brusquet	1987-1990	74	8	29
Moulin	1988-1993	274	27	330
Total		1744	208	

Tableau 1 : Prélèvements réalisés sur les cinq stations

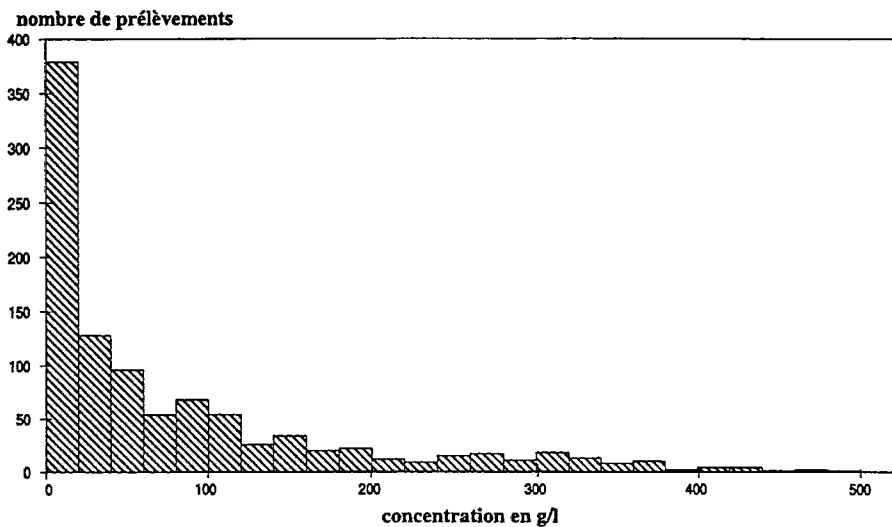


Figure 1 : Répartition de la concentration des échantillons prélevés

Ces valeurs élevées des concentrations sont proches de celles rencontrées dans les oueds maghrébins : 50 à 150 g/l en crue avec des valeurs maximales de 400 à 670 g/l (DEMMAK, 1982). Il faut noter cependant que, dans le cas de Draix, les prélèvements sont effectués à l'aval des plages de dépôts et que dans l'écoulement non décanté les concentrations sont beaucoup plus fortes : pour la Roubine, par exemple, des prélèvements manuels réalisés le 16 mai 1988 (au cours d'une crue non échantillonnée) avaient des concentrations de 470 g/l à l'amont du piège à sédiments et 300 g/l à l'aval. Au cours de cette crue, des coulées boueuses ont pu être observées ; leur teneur en sédiments atteignait 1 500 g/l. Une autre coulée boueuse, observée au Laval et échantillonnée manuellement, contenait 1 420 g/l.

1.2 - Caractéristiques physico-chimiques

La densité du matériau en suspension est en moyenne 2,75. Ce sédiment est essentiellement minéral avec une teneur en matières organiques inférieure à 1 %.

Les argiles constituant la fraction fine sont composées d'illite, de chlorite et d'interstratifiés illite/smectite dans les proportions suivantes :

- illite : 40 - 45 %
- chlorite : 20 - 25 %
- interstratifiés : 30 - 40 %

Des analyses physico-chimiques ont été réalisées sur des échantillons prélevés à la Roubine (tableau 2) mais elles n'ont pas été poursuivies et ne sont données qu'à titre indicatif.

Date	Débit (l/s)	Concentration (g/l)	Ph	Conductivité (μS)	Eléments dissous (mg/l)							
					A	Ca	Mg	Cl	Na	K	N03	S04
13/6/84	0,8	1,9	8,25	889	114	95	72	1,4	30	3,3	3,2	482
	0,01	0,1	8,40	979	140	105	82	1,4	34	3,4	3,6	525
3/10/84	7,1	43,9	7,65	765	61	100	51	1,0	16	6,0	5,4	415
	7,1	53,9	7,85	702	57	92	46	1,8	14	5,1	5,5	315
	0,1	4,2	7,85	680	57	82	51	1,4	10	2,3	3,9	367
	0,6	2,6	7,95	575	57	67	43	1,0	7,6	1,8	3,2	297
	1,3	2,9	7,80	465	55	53	34	0,6	6,0	1,4	2,6	255
	0,1	1,5	7,85	537	56	62	39	0,4	6,5	1,6	3,0	275
5/10/84	-	2,7	7,95	552	61	65	36	1,2	6,9	2,1	3,1	280
21/11/84	1,3	1,0	7,95	854	76	97	64	1,6	29	6,8	3,5	487
	0,51	2,2	8,00	591	61	72	39	1,6	15	3,5	2,9	302

Tableau 2 : Analyse physico-chimique des prélèvements de la Roubine (eau surnageante après centrifugation)

1.3 - Granulométrie

Les préleveurs d'échantillons sont installés à l'aval de plages de dépôts. Ces plages piègent les éléments grossiers transportés par charriage. Elles retiennent également une partie des éléments fins ainsi que le montrent les courbes granulométriques (figures 2.1 et 2.2) réalisées sur des échantillons prélevés à l'amont, au milieu, et à l'aval du piège de la Roubine.

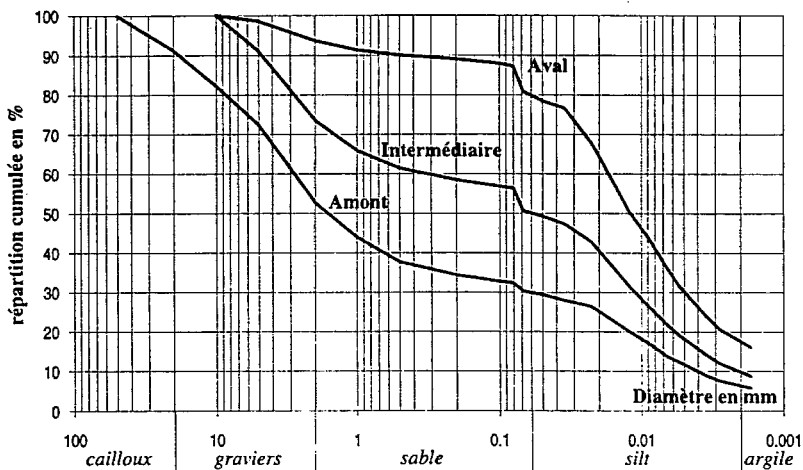


Figure 2.1 - Avril 1984

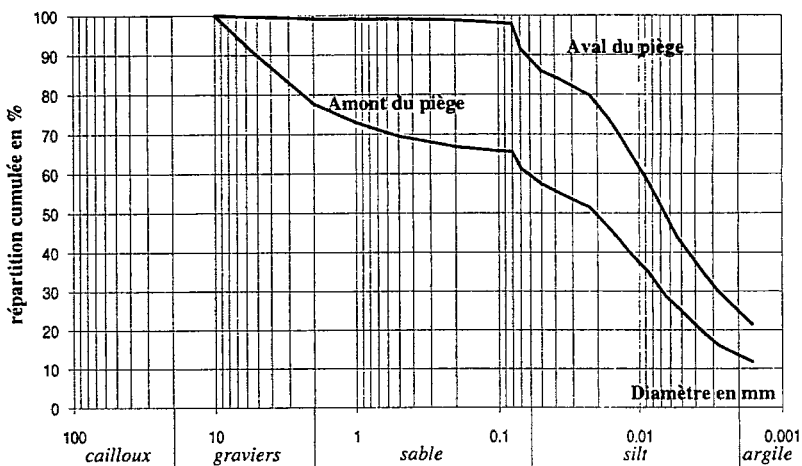


Figure 2.2 - Juin 1986

Figures 2.1 et 2.2 : Granulométrie des dépôts dans le piège de la Roubine

La capacité de pompage du préleveur, de même que le diamètre du tuyau d'aspiration, limitent la taille des matériaux prélevés. Toutefois, dans la mesure où le prélèvement se fait dans les matériaux fins exportés du piège, cette capacité n'est pas un facteur limitant ainsi que le montre le graphique (figure 3).

Les teneurs en argile des échantillons prélevés sont en général comprises entre 15 et 25 %, tandis qu'à l'amont des pièges on trouve des teneurs inférieures à 15 %.

Ces valeurs sont voisines des teneurs en argile des vases des retenues sur le Durance (20 %) ou l'Isère (28 %) (LCHF, 1987). Les silts (diamètre compris entre 0,002 et 0,05 mm) représentent la plus grosse fraction des échantillons prélevés (de l'ordre de 60 %) alors qu'en amont des pièges à sédiments, les éléments supérieurs à 0,005 mm représentent 45 à 70 % des matériaux transportés.

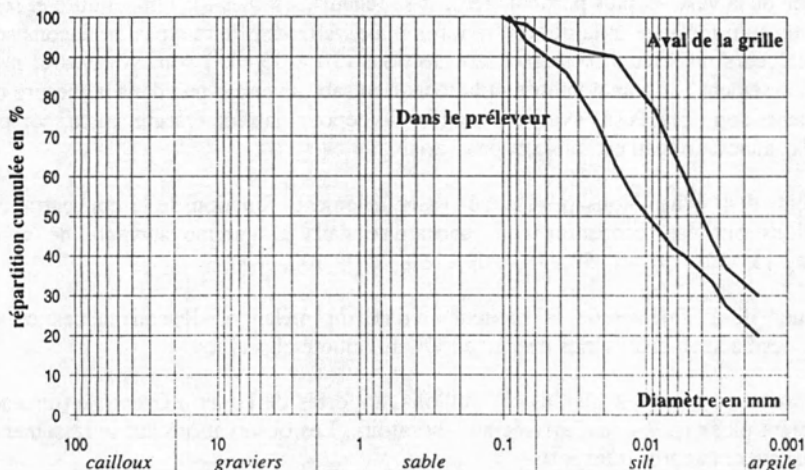


Figure 3 : Granulométrie des sédiments déposés à l'aval de la grille et des sédiments prélevés par l'échantillonneur. Roubine, juin 1986

1.4 - Tassement

1.4.1 - Objectifs et méthodes

Les échantillons prélevés aux différentes stations sont collectés périodiquement et rapportés au laboratoire à Grenoble pour en mesurer la teneur en sédiments par séchage et pesée. Lorsque la concentration est suffisante -au-delà de 30 à 50 g/l- on observe la formation d'un culot de sédiments et la limite entre le dépôt et l'eau surnageante est nette ainsi que le montre la figure 4.

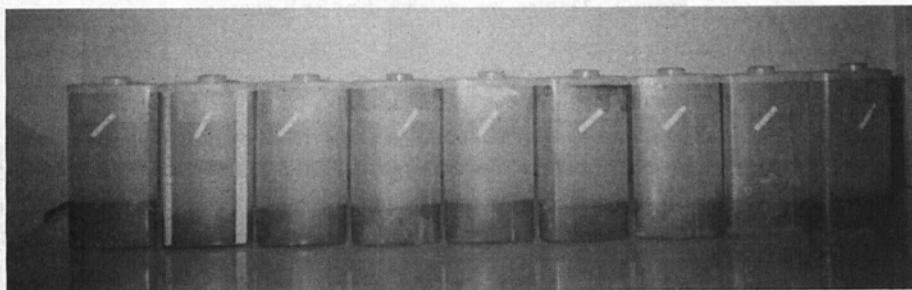


Figure 4 : Série d'échantillons de Draix

Cette observation permet d'envisager une estimation rapide des concentrations ; il nous a donc paru intéressant d'étudier plus complètement les conditions de sédimentation et de tassement des échantillons prélevés.

Les travaux de MIGNIOT C. sur le tassement des vases (LCHF, 1987) ont montré que différents facteurs pouvaient influencer la concentration finale du culot : le diamètre du récipient, la granulométrie de la vase -et plus particulièrement sa teneur en sables-, la température et la salinité de l'eau, la hauteur du mélange et la concentration initiale. A Draix, deux types de flacons sont utilisés dans les préleveurs mais leurs formes et leur sections (30 à 35 cm²) sont voisines et n'influencent donc pas le tassement ; la granulométrie et la teneur en sables varient peu dans la mesure où tous les échantillonneurs sont placés à l'aval des plages de dépôt ; la température reste comprise entre 15 et 25° ; la salinité de l'eau est faible et peu variable.

Le tassement des échantillons sera donc essentiellement fonction de la concentration initiale ; des échantillons ont été reconstitués au laboratoire dans la gamme suivante de concentration (en g/l) : 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400.

Afin de juger de l'influence de la hauteur initiale du mélange, dépendant des conditions de remplissage des flacons, deux séries de 250 et 500 ml ont été observées.

Par ailleurs, on a pu constater que les échantillons rapportés de Draix à Grenoble (distance environ 200 km) étaient plus tassés à leur arrivée au laboratoire. Les observations sur le tassement ont donc été conduites avant et après transport.

Des échantillons sont reconstitués avec des matériaux prélevés à Draix. Après agitation énergique du mélange initial, on observe le tassement en mesurant au cours du temps la hauteur h_s de la surface de séparation eau-sédiments (figure 5).

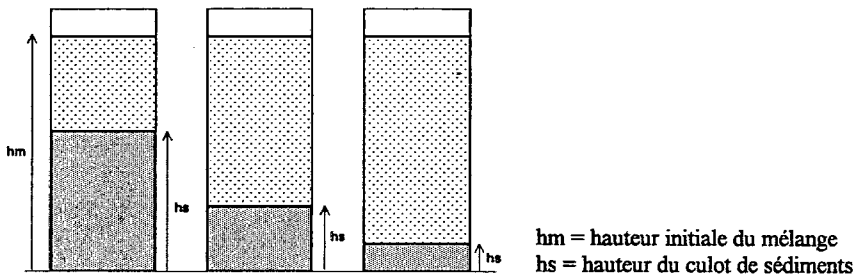


Figure 5 : Mesure des hauteurs dans les flacons

1.4.2 - Tassement avant transport

Pour les faibles teneurs en sédiments, les hauteurs de culot h_s sont difficilement lisibles ; c'est pourquoi seuls 10 échantillons de la série de 500 ml ($C \geq 20$ g/l) et 8 de la série de 250 ml ($C \geq 50$ g/l) sont utilisables. On observe pour les deux séries d'échantillons un tassement d'autant plus rapide que la concentration est faible (figures 6.1 et 6.2). Les courbes obtenues ont une forme analogue à celles trouvées au LCHF (figure 6.3) mais le temps de tassement est beaucoup plus court pour les vases de Draix : on obtient l'équilibre en quelques heures pour les échantillons jusqu'à 100 g/l, en 24 à 48 h pour les autres.

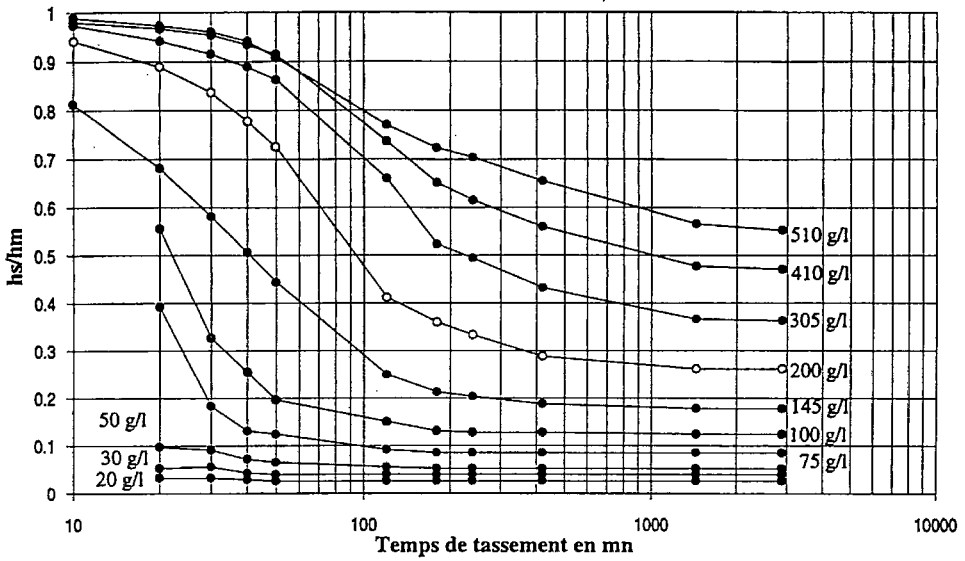


Figure 6.1 : Tassement des échantillons au cours du temps - volume initial 500 ml

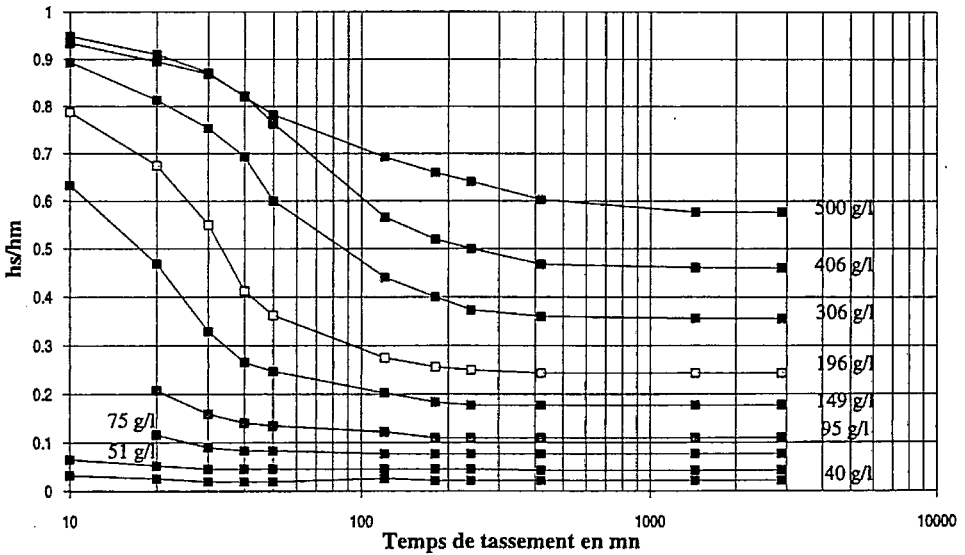


Figure 6.2 : Tassement des échantillons au cours du temps - volume initial 250 ml

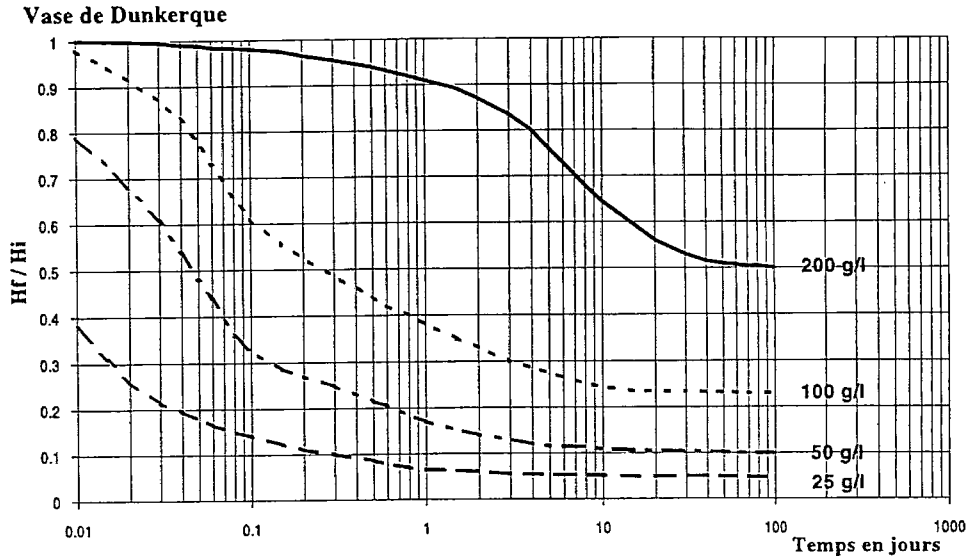


Figure 6.3 : Influence de la concentration initiale sur le tassement (LCHF, 1987)

A concentrations égales, le tassement se fait plus vite pour les échantillons de faible hauteur mais le résultat final n'est pas très différent (figures 7.1 et 7.2). Les deux courbes se rejoignent plus vite lorsque la concentration est plus faible.

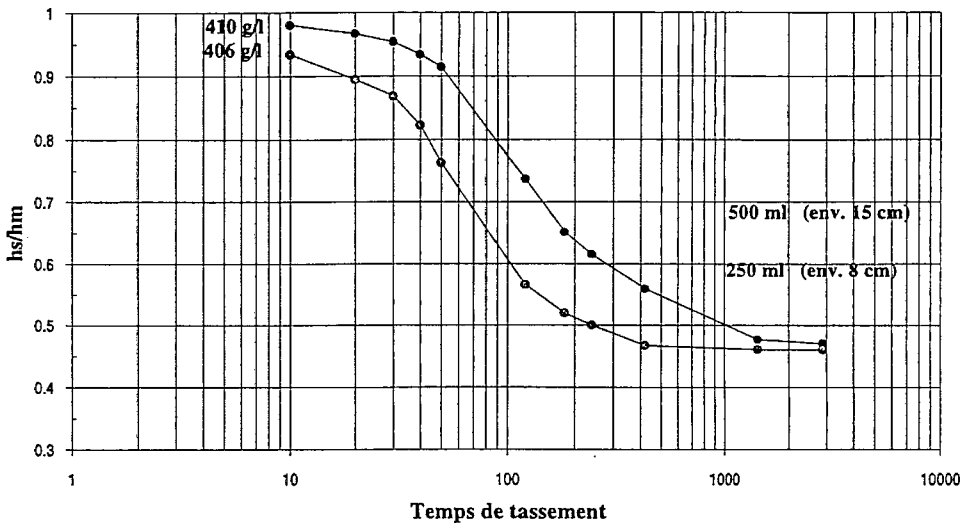


Figure 7.1 $C = \sim 400 \text{ g/l}$

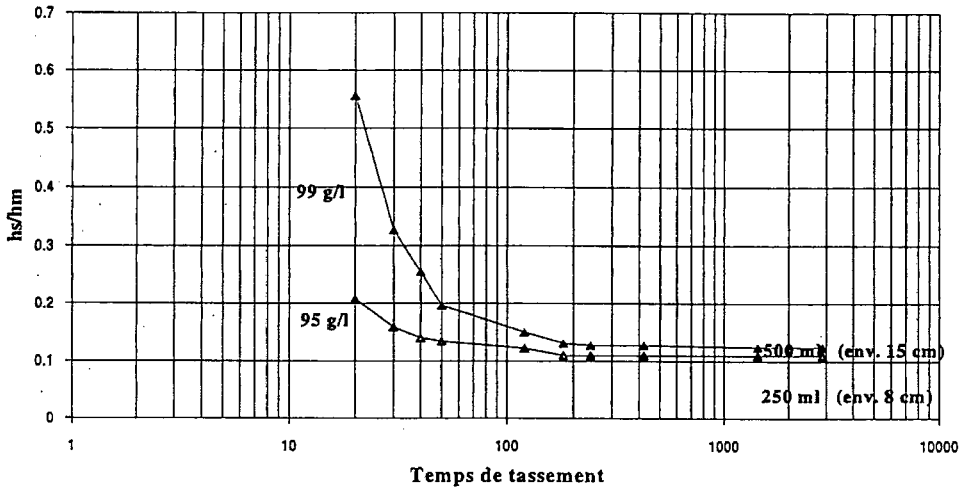


Figure 7.2 $C = \sim 100 \text{ g/l}$

Figures 7.1 et 7.2 : Influence de la hauteur initiale sur le tassement

Dans les essais menés par le LCHF, la concentration finale du culot est d'autant plus importante que la hauteur initiale du mélange est plus grande. Nous n'avons pu mettre en évidence ce phénomène mais la gamme de hauteur de mélange testée sur les échantillons de Draix (0,08 à 0,15 m) est beaucoup plus faible qu'au LCHF (0,25 à 3,00 m).

La mesure des concentrations finales des culots de sédiments est rendue plus délicate par l'imprécision de la mesure du volume pour les faibles hauteurs. Pour la gamme de concentrations où ces valeurs sont calculables on obtient les valeurs figurant dans le tableau 3.

Concentration initiale (g/l)	Concentration du culot (g/l)	
	$V_i = 500 \text{ ml}$	$V_i = 250 \text{ ml}$
510	933	
500		839
410	893	862
305	857	833
200	820	
195		746
145	789	
150		750
100	758	
95		714

Tableau 3 : Concentrations des culots de sédiments

Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles trouvées au LCHF sur les vases fluviales (750 g/l pour la Durance).

On constate que la concentration finale est d'autant plus élevée que la concentration initiale est forte.

1.4.3 - Tassement après transport

Les échantillons reconstitués ont été transportés dans des conditions semblables à celles des échantillons de Draix. L'essai a été reconduit avec une deuxième série d'échantillons dans une gamme de concentration allant jusqu'à 800 g/l.

On observe que le transport produit un tassement complémentaire, le rapport des hauteurs de culot avant et après transport étant compris entre 0,68 et 0,95. Si on ne peut établir de relation nette entre tassement complémentaire et concentration, on observe cependant que les échantillons fortement concentrés subissent en moyenne un tassement complémentaire plus limité (figure 8.1) et qu'à concentration égale le tassement supplémentaire est plus important pour les échantillons de 250 ml (figure 8.2).

Ainsi, le transport est plus efficace pour les échantillons dont la concentration moyenne du culot était la plus faible avant transport. Le transport augmente le tassement et rend plus uniforme la concentration du culot qui passe de 840 à 1 140 g/l en moyenne, l'écart type se réduisant de 68 à 58.

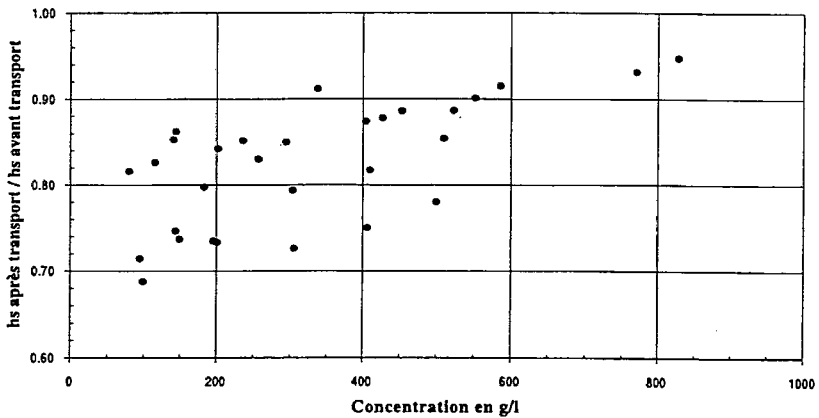


Figure 8.1 : Relation entre tassement et concentration

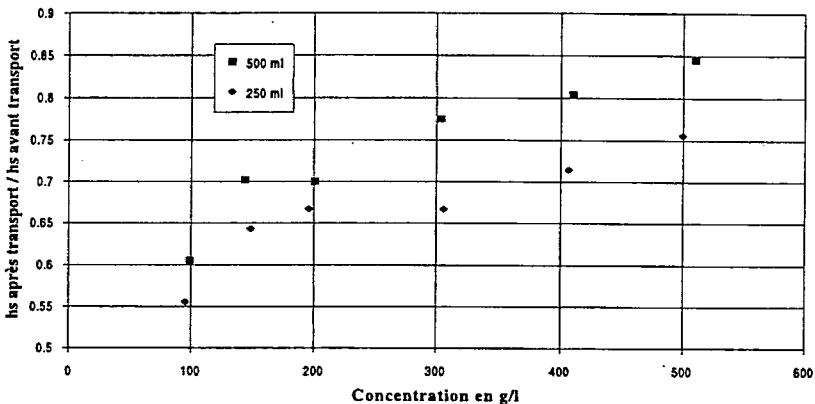


Figure 8.2 - Comparaison entre échantillons de 250 et 500 ml

Figures 8.1 et 8.2 - Tassement des échantillons après transport

2 - Mise au point d'une méthode rapide d'estimation des MES

Les sédiments des échantillons prélevés sur les différentes stations du site de Draix étant assez homogènes du point de vue de leur nature et de leur granulométrie, il semble possible d'estimer les concentrations des échantillons au moyen du rapport [hauteur du culot de sédiment/hauteur initiale du mélange], à condition d'opérer dans de bonnes conditions de tassement des sédiments. Afin de vérifier cette possibilité et d'étalonner la méthode, pendant deux ans les hauteurs ont été relevées sur les flacons avant la mesure des teneurs en sédiments secs par séchage à l'étuve et pesée.

Le relevé de ces hauteurs à Draix simplifierait matériellement les tâches de renouvellement des flacons dans les échantillonneurs mais on peut craindre que l'absence de transport rende le tassement insuffisant. Afin de juger de la qualité du tassement sans transport les hauteurs d'un certain nombre d'échantillons ont été mesurées à la fois à Draix et au laboratoire à Grenoble.

2.1 - Mise en évidence d'une relation entre C et (hs/hm)

Sur les 325 prélèvements pour lesquels les hauteurs h_s et h_m définies sur la figure 5 ont été relevées, on peut mettre en évidence par une régression linéaire la relation (1) existant entre la concentration déterminée par séchage et pesée, et le rapport h_s/h_m (tableau 4, figure 9.1). Sur l'échantillon des prélèvements supérieurs à 25 g/l , ce qui permet d'éliminer les éléments pour lesquels l'irrégularité du fond du flacon perturbe la mesure, on obtient la régression linéaire n° 2 et si l'on veut imposer le passage par l'origine, la régression curviligne n° 3.

	Taille de l'échantillon	Régression n°	Equation R	R ²	Erreur standard	N° du graphique
Echantillon total	325	1 linéaire	$C = 1\,058 \frac{h_s}{h_m} - 26$	0,985	13,6	9a
Echantillon avec $C > 25 \text{ g/l}$	239	2 linéaire	$C = 1\,092 \frac{h_s}{h_m} - 34$	0,985	13,5	-
"	239	3 curviligne	$C = 1\,291 \left(\frac{h_s}{h_m}\right)^{1,23}$	0,986	12,8	9b

Tableau 4

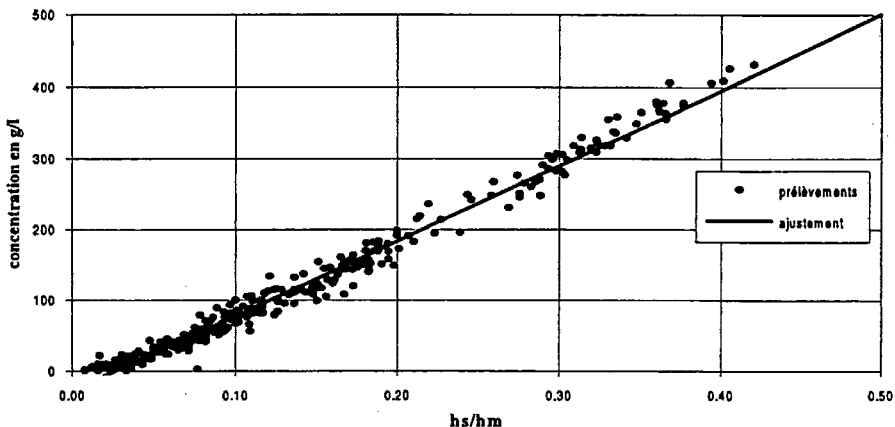


Figure 9.1 : Relation entre C et h_s/h_m tous prélèvements confondus

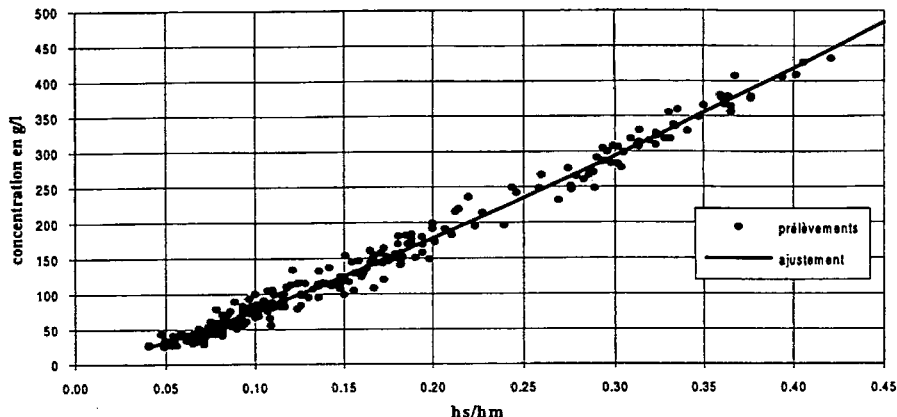


Figure 9.2 : Régression curviligne $C = f(hs/hl)$ pour $C > 25$ g/l

2.2 - Utilisation des mesures sur le site

Pour 140 prélèvements on dispose des mesures de hauteur à Draix et à Grenoble, que l'on peut relier aux concentrations par les régressions linéaires suivantes (figure 10) :

- à Draix $C = 968 (hs/hm) - 42$ $R^2 = 0,974$ $ES = 19$
- à Grenoble $C = 1\,091 (hs/hm) - 34$ $R^2 = 0,986$ $ES = 13,9$

Le coefficient de détermination reste donc très satisfaisant pour les mesures à Draix mais la dispersion est plus importante, ce qui confirme la remarque faite au § 1.4.3.

La régression curviligne, plus logique puisque $C = 0$ pour $hs/hm = 0$ et mieux adaptée au nuage de points, donne :

$$C = 1\,200 (hs/hm)^{1,325} \quad R^2 = 0,98 \quad ES = 16,8$$

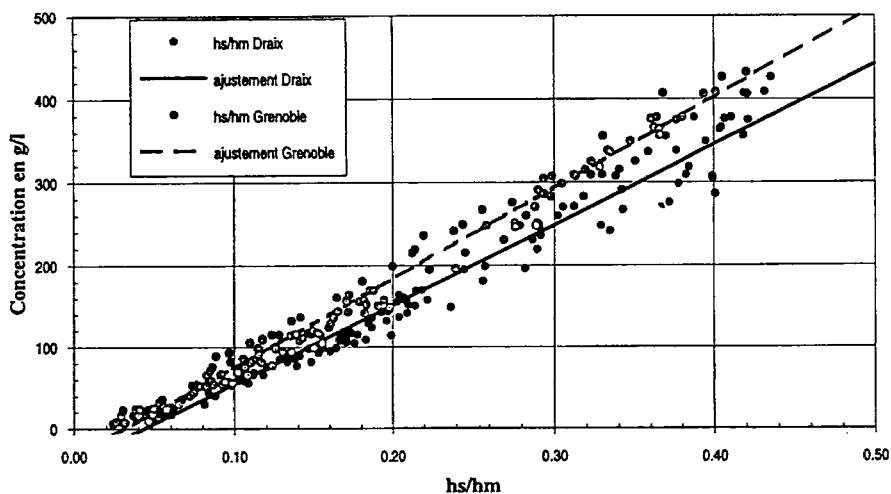


Figure 10 : Comparaison des mesures à Draix et à Grenoble

2.3 - Confirmation par des essais au laboratoire

Afin de vérifier les relations ci-dessus pour une gamme de concentration plus étendue -jusqu'à 800 g/l- les mesures ont été renouvelées sur des échantillons reconstitués.

Si on ajoute ces 24 valeurs à l'échantillon du § 2.1 ($C > 25$ g/l) on met en évidence les relations suivantes (figure 11) après transport :

régression linéaire	$C = 1\,130 (hs/hm) - 38$	$R^2 = 0,986$	ES = 15,3
régression non linéaire	$C = 1\,157 (hs/hm)^{1,2}$	$R^2 = 0,988$	ES = 14,0

Ces deux formulations sont bien adaptées au nuage de points mais la régression linéaire a tendance à sous-estimer les fortes concentrations ($C > 450$ g/l) et la régression non linéaire à les surestimer.

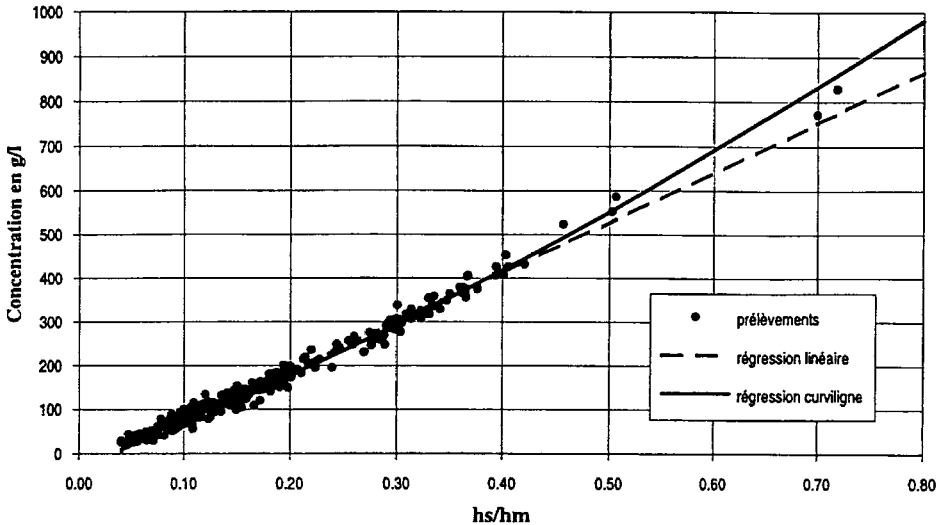


Figure 11 : Relation $C = f(hs/hm)$ pour $25 < C < 850$ g/l

2.4 - Précision des méthodes utilisées

2.4.1 - Méthode par séchage et pesée

L'erreur sur la valeur de la teneur en sédiment est due principalement à l'erreur sur la mesure du volume de mélange : évaporation dans le préleveur, pertes au cours du transport (palliées par un repérage du niveau dans le flacon avant transport), précision de la mesure à l'éprouvette au laboratoire. L'erreur absolue étant de 10 à 20 ml, pour des volumes de l'ordre de 500 ml, l'erreur relative est de 2 à 4 %.

2.4.2 - Méthode par mesure des hauteurs au laboratoire

Il faut prendre en compte l'erreur de mesure des grandeurs hs et hm . Pour hm elle est principalement due à la hauteur du ménisque, importante sur les parois en plastique du flacon, et à la difficulté de la mesure à travers cette paroi. Pour hs , elle est liée au défaut d'horizontalité fréquent du culot. Ces incertitudes sont de l'ordre de 2 à 3 mm.

Les difficultés de lecture laissent plus de place à l'appréciation de l'observateur : les observations faites par quatre observateurs différents sur la série de 24 échantillons de 25 à 800 g/l avaient des écarts atteignant 3 mm pour hm et 4 mm pour hs.

Selon le flacon utilisé et son remplissage, hm est compris entre 12 et 15 cm ; l'erreur relative sur hm est comprise entre 2 et 2,5 %.

hs varie avec la concentration et le remplissage du flacon. Pour hm : 15 cm, hs va de 0,8 cm (25 g/l) à 10 cm (800 g/l) et l'erreur relative de 3 à 38 % !

L'erreur relative sur C est de ce fait comprise entre 5 % et 40 %.

On observe que l'erreur standard des régressions des § 2.1 et 2.3 est de 13 à 15 g/l, ce qui représente plus de 50 % de la valeur estimée pour 25 g/l et moins de 2 % pour 800 g/l. On peut attribuer dans nos observations la variabilité de l'estimation de C par hs/hm à la variabilité des conditions de tassement combinée aux incertitudes de mesure des hauteurs. Le calcul de l'erreur sur C fait ci-dessus montre que les écarts sont principalement dus aux mesures de hs et hm.

2.4.3 - Méthode par mesure des hauteurs à Draix

L'erreur de mesure des hauteurs est comparable à celle des mesures au laboratoire ; elle est peut-être plus faible pour hs car la surface de séparation eau-sédiment est plus horizontale avant transport. L'erreur standard du § 2.2 est plus élevée (19 g/l) et ceci est lié au tassement moins régulier des culots de sédiments.

2.4.4 - Incidence sur le calcul du volume solide exporté

Les mesures de concentrations effectuées sont utilisées pour estimer les débits solides et les volumes de sédiments transitant par la station au cours d'une crue.

Pour chaque point de l'hydrogramme enregistré on détermine la teneur en sédiments, soit par la valeur mesurée s'il y a eu prélèvement, soit par interpolation dans le cas contraire. L'interpolation est faite sur une courbe concentration-débit établie pour la crue considérée, qui a souvent la forme d'une courbe d'hystérésis (cf. Draix, compte rendu n° 1). Lorsque les mesures limnimétriques résultent d'une mesure de pression, la hauteur du limnigraphe est également corrigée pour tenir compte de la densité du mélange. L'utilisation de valeurs estimées par mesure des hauteurs peut donc modifier le résultat final, en modifiant les concentrations des échantillons prélevés et en modifiant les valeurs interpolées. Le calcul a été réalisé pour quelques crues et on donnera ci-dessous deux exemples :

- la crue du 14/6/89 au Laval avec des concentrations comprises entre 250 et 400 g/l ;
- la crue du 11/9/89 à la Roubine avec des concentrations comprises entre 20 et 60 g/l.

Les valeurs citées ont été calculées :

- 1 par séchage
- 2 par hauteurs lues au laboratoire
- 3 par hauteurs lues à Draix

Les pourcentages sont donnés par rapport à la valeur obtenue en utilisant les concentrations mesurées par séchage.

	Laval 14/6/89			Roubine 11/9/89		
	1	2	3	1	2	3
Débit liquide	2 130 ℓ/s	2 290 ℓ/s	2 290 ℓ/s	2,15 ℓ/s	2,14 ℓ/s	2,15 ℓ/s
Débit solide maximum	317 ℓ/s	304 ℓ/s + 4 %	304 ℓ/s + 4 %	0,04 ℓ/s	0,05 ℓ/s + 25 %	0,04 ℓ/s + 0 %
Volume liquide	2 270 m^3	2 317 m^3	2 322 m^3	2 810 ℓ	2 803 ℓ	2 817 ℓ
Volume solide	308 m^3	302 m^3 - 2 %	300 m^3 - 3 %	39 ℓ	46 ℓ + 18 %	32 ℓ - 18 %

On constate que les approximations introduites par l'utilisation des hauteurs peuvent atteindre 20 à 25 % si les concentrations atteintes au cours de la crue sont faibles mais que les différences peuvent devenir négligeables lorsque les crues sont chargées en transport solide.

2.5 - Conclusion : méthode rapide d'estimation des MES

On peut donc proposer une méthode plus rapide des teneurs en MES des prélèvements de Draix par mesure des hauteurs dans les flacons décantés. Pour assurer une précision relative suffisante, cette méthode sera réservée aux échantillons suffisamment concentrés pour que la hauteur hs soit facilement lisible : $hs \geq 1,2$ cm, soit des concentrations de l'ordre de 50 g/l (pour $hm = 15$ cm).

Si les échantillons sont rapportés à Grenoble :

$$C = 1\,290 (hs/hm)^{1,23}$$

Les mesures à Draix permettent un tassement un peu moins bon, mais autorisent une rotation plus rapide des flacons. L'estimation de la concentration sera obtenue par la formule :

$$C = 1\,200 (hs/hm)^{1,325}$$

Les mesures de hauteur seront faites au village de Draix 24 h au moins après l'arrivée des flacons au "laboratoire". La fabrication d'un support muni d'un régle gradué devrait permettre de mesurer les hauteurs plus facilement avec une meilleure précision.

D'autres méthodes d'estimation rapide des taux de MES ont été proposées ailleurs, en particulier des mesures de densité au pycnomètre. Elles ont été testées mais n'ont pas été retenues car elles nécessitent une remise en suspension des sédiments et le prélèvement d'un échantillon représentatif. Ceci est très difficile à obtenir dès que les concentrations sont élevées. De plus, la présence des sédiments gêne la fermeture au bouchon rodé du pycnomètre.

2.6 - Validation de la méthode

2.6.1 - Validation pour les types de flacons ayant servi au calage

La méthode d'estimation rapide mise au point en 1990 a été utilisée sur les échantillons prélevés dès lors que les hauteurs mesurées étaient suffisantes (> 1 cm).

Cependant un certain nombre de flacons ont été contrôlés par passage à l'étude et on peut observer (figure 12) que les estimations à l'aide des mesures de hauteur sont satisfaisantes

$$C_{\text{calculées}} = 0,98 * C_{\text{observées}} \quad R^2 = 0,99 \quad n = 28$$

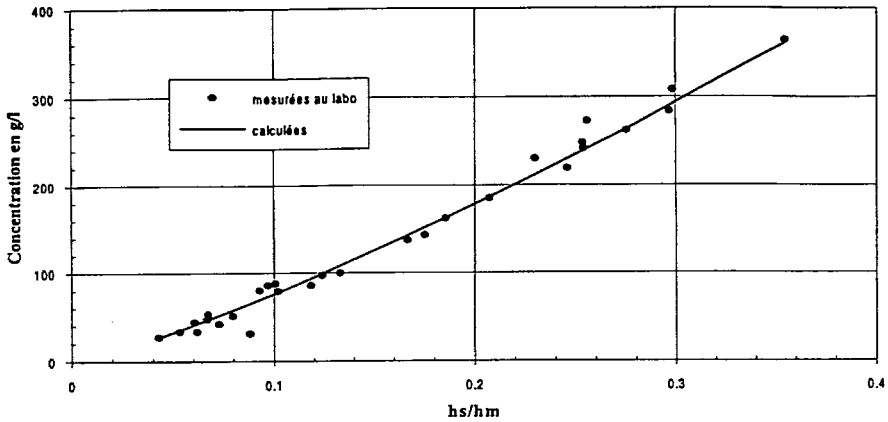


Figure 12 : Mesure sommaire des concentrations. Validation flacons Manning

2.6.2 - Validation pour d'autres types de flacons

A partir de 1992, de nouveaux préleveurs ont été utilisés sur le site de Draix munis de flacons de forme légèrement différente. On a donc souhaité vérifier que ces modifications ne remettaient pas en cause la méthode d'estimation rapide. Aussi, lorsque l'obtention de la mesure ou plutôt la libération des flacons n'était pas trop urgente, on a procédé à des mesures complètes des concentrations avec passage à l'étuve.

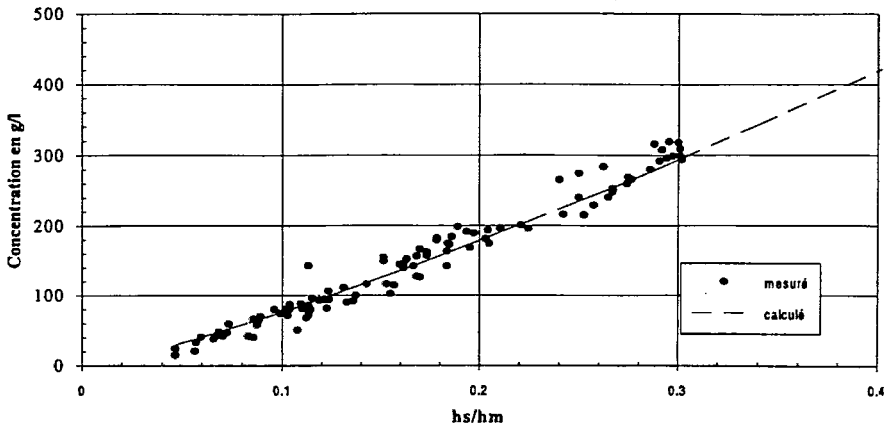


Figure 13 : Relation $C = f(hs/hm)$ pour les flacons ISCO

La figure 13 montre que la relation préalablement obtenue $C = 1\,290 (hs/hm)^{1,23}$ permettait une bonne estimation des concentrations (corrélation calculée mesurée $R^2 = 0,96$).

3 - Conclusion

Tant que des méthodes fiables de mesure en continu des transports solides n'auront pu être mises en place, la quantité de sédiments transportés au cours d'une crue sera évaluée d'une manière discrète par la mesure des concentrations d'un certain nombre d'échantillons prélevés judicieusement au cours de la crue.

L'observation du tassement des échantillons prélevés a permis de proposer une méthode rapide d'estimation des teneurs en sédiments, utilisable dès que les concentrations dépassent environ 50 g/l.

Pour les échantillons moins chargés, la méthode par séchage et pesée reste la solution la plus fiable. Des méthodes de mesure rapides au laboratoire par l'emploi de turbidimètres à ultrasons ou de turbidimètres optiques devraient être testées pour les concentrations inférieures à 50 g/l mais ces méthodes exigent la remise en suspension et l'homogénéisation des sédiments qui sont délicates à obtenir.

4 - Bibliographie

Cemagref Grenoble, Aix-en-Provence - ONF - RTM, 1987 - *Bassins versants expérimentaux de Draix - Compte rendu de recherche n° 1 en érosion et hydraulique torrentielle.*

DEMMAK, 1982 - *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale.* Thèse de docteur-ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.

MIGNIOT (C.) - LCHF, 1987 - *Synthèse des connaissances sur le tassement et la rhéologie des vases.* Service technique central de la Direction des ponts et des voies navigables.

Matériel de mesure de matières en suspension : préleveur d'échantillon et capteur de pression différentielle Test et étalonnage en canal

Jean-Emmanuel OLIVIER et Michel JUGE

Cemagref, division protection contre les érosions,
2, rue de la Papeterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

Introduction

Dans le cadre des bassins versants expérimentaux de Draix la mesure des matières en suspension (MES) est confiée à des préleveurs automatiques d'échantillon du commerce. Ces appareils sont pilotés par les centrales d'acquisition de mesure programmées pour déclencher les préleveurs en fonction de la hauteur d'eau dans le canal. Cette chaîne de mesure pose un certain nombre de problèmes ; tout d'abord en terme fiabilité, les pannes et les dysfonctionnements attribuables à l'un ou l'autre élément de la chaîne sont nombreux ; ensuite il s'agit d'une série de mesures discrètes et le suivi des variations de concentration pendant la crue n'est pas optimal ; enfin l'autonomie des appareils est faible (24 prélèvements maximum), le traitement des échantillons est lourd (transport, séchage, pesée, mesure du volume), et le prix du matériel assez onéreux (25 000 F). Les fortes concentrations mesurées à Draix (jusqu'à 500 g/l), ne permettent pas l'utilisation de turbidimètres du commerce. Pour améliorer ces mesures des solutions sont envisagées en collaboration avec d'autres organismes, soit une solution lourde et intransportable, par mesure de l'absorption de rayons gamma (avec le CEA), soit deux autres plus faciles à mettre en oeuvre et transportables, d'une part un système optique utilisant la mesure de la rétrodiffusion (piloté par la division HIAX du Cemagref avec l'Université de Provence) et d'autre part une mesure différentielle de la pression (avec l'ORSTOM). Ces deux derniers appareils ont été testés en canal en même temps que deux des préleveurs d'échantillon utilisés à Draix.

Le but initial était de reprendre l'étalonnage des appareils optiques qui avait été fait à l'origine dans un récipient avec agitateur, et qui donnaient des résultats systématiquement très différents de ceux des préleveurs d'échantillon installés sur le site. Il a donc été décidé de procéder à un nouvel étalonnage en utilisant des matériaux en provenance de Draix recyclés sur le canal à pente variable du Cemagref. Le dernier prototype de capteur de pression différentielle étant disponible il a été joint aux essais.

Le présent compte rendu ne traite pas des résultats des capteurs optiques dont on trouvera un compte rendu dans le rapport final de convention publié par l'Université de Provence. Après avoir présenté l'ensemble de l'installation et le protocole de mesure, on comparera les résultats fournis par les préleveurs d'échantillons aux prélèvements manuels, puis on s'intéressera aux résultats fournis par le capteur de pression.

1 - Présentation générale

Le but des essais est donc de tester et d'étalonner les appareils de mesure dans des conditions de fonctionnement aussi proches que possible de celles du terrain tant du point de vue de la nature des matériaux, granulométrie et couleur (important pour le système optique), que des concentrations en MES (plusieurs centaines de grammes par litres).

1.1 - Description de l'installation

1.1.1 - L'ensemble canal pompe

Nous disposons d'un canal à pente variable par palier de 3 %, de 4 m de long et 60 cm de large. La circulation du mélange eau-matériaux est assurée par une pompe à membrane de débit nominal 18 m³/h, avec de l'eau et en fonctionnement horizontal. La circulation du mélange eau-matériaux est réalisée en circuit fermé, la pompe prélève le mélange dans une cuve, l'injecte dans le canal qui se déverse dans la cuve. Le diamètre maximal des grains admissibles est de 25 mm.

La limite inférieure de hauteur de mélange nécessaire pour installer correctement le matériel de mesure est de 15 cm pour une largeur minimale de 10 cm. Cette limite est fixée par l'encombrement du capteur de pression (cf. la description de ce capteur plus loin). Pour remplir ces conditions compte tenu du débit de la pompe, inférieur à 15 m³/h dans les conditions de l'installation, il a été nécessaire de limiter la largeur du canal et de lui donner une forme convergente (voir figure 1).

La pompe à membrane est mue par un moteur électrique qui actionne une bielle, le régime de rotation de ce moteur est lent (64 tours/mn), ce qui provoque des pulsations importantes. Pour régulariser le débit il a été nécessaire d'installer un "brise-jet" et une chicane à l'amont du canal (figure 1).

A la sortie du canal le mélange se déverse dans une cuve d'environ 350 ℓ, légèrement inclinée pour limiter les dépôts de matériaux, et une pompe immergée facilite la recirculation du mélange du moins aux concentrations moyennes ; en effet au-dessus de 300 g/ℓ elle se bouche et il est nécessaire d'agiter manuellement le mélange.

1.1.2 - Les mesures

1.1.2.1 - Le matériel

Les matériaux solides utilisés sont des marnes noires provenant d'un talus du bassin versant du Brusquet. La granulométrie d'origine est assez étalée avec de nombreuses plaquettes dont la plupart seront broyées après quelques passages dans le canal.

Le matériel en test est installé comme représenté sur la figure 1, les appareils optiques étant placé sur un support coulissant verticalement un peu en amont du capteur de pression, ce qui permet d'explorer l'homogénéité du mélange sur un axe vertical et latéralement ou en long en déplaçant l'ensemble. Un capteur ultrasonique de déplacement Weidmuller LRS3 mesure la hauteur de l'écoulement.

L'acquisition des données est faite par une carte de conversion A/N DAS 1601 de Keithley et un programme sur P.C. gère le nombre, la fréquence et le stockage des résultats.

1.1.2.2 - Le mode opératoire

L'augmentation de concentration se fait par ajout successif de marnes, c'est-à-dire que les mesures commencent en eau claire et on augmente progressivement la concentration. Les quantités de marne à ajouter sont estimées grossièrement en fonction des paliers de concentration souhaités. Cette estimation est trop grossière pour pouvoir servir de référence pour la mesure de la concentration du mélange, celle-ci sera effectuée par des prélèvements pendant la période d'acquisition des mesures. Ces prélèvements sont stockés et préparés en fin de journée, la mesure des concentrations imposant un passage à l'étuve, les résultats ne sont connus que le lendemain.

Ce procédé empêche tout retour en arrière. La grossièreté de l'estimation des quantités à ajouter explique le saut brutal de concentrations explorées de 10 à 70 g/l. En fin d'essais, après nettoyage du canal on a recommencé une courte série de mesure pour 0, 10 et 20 g/l (voir plus loin, le capteur de pression).

A chaque changement de concentration le mélange circule le temps nécessaire à son homogénéisation ce qui demande plusieurs minutes et nécessite l'enlèvement des particules les plus grossières piégées dans la grille du "brise-jet", puis il est procédé à une série de trois mesures dans chaque gamme de concentration. Chaque mesure dure une minute pendant laquelle on acquiert 1000 valeurs pour chacun des capteurs, soit une fréquence de 16.7 Hz, entre 10 et 20 secondes après le début de l'acquisition le préleveur d'échantillon est déclenché et il est procédé à un prélèvement manuel dans un bécher.

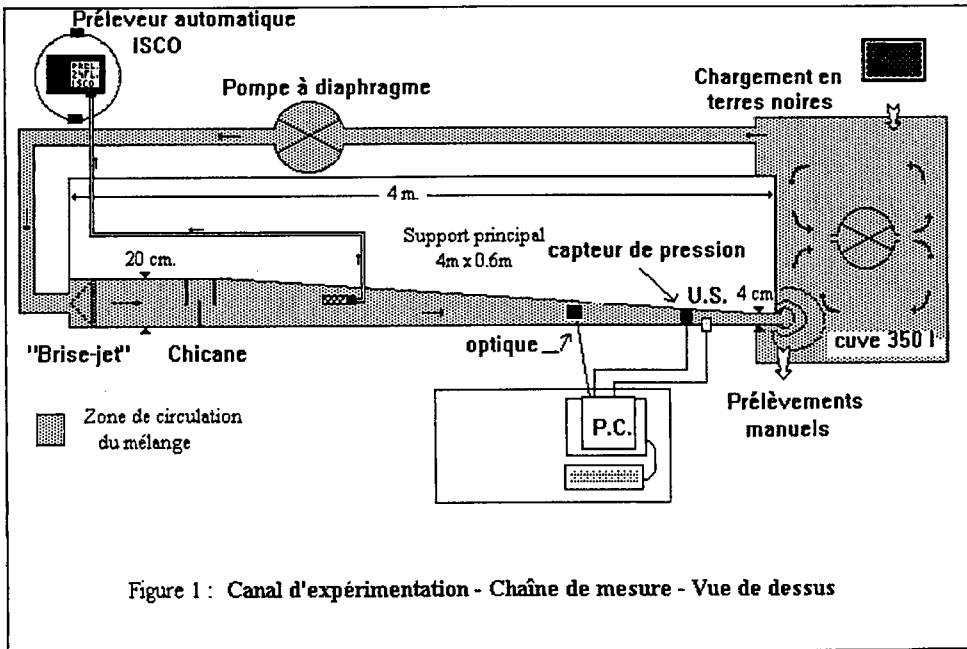


Figure 1 : Canal d'expérimentation - Chaîne de mesure - Vue de dessus

2 - Comparaison prélèvements automatiques-prélèvements manuels

2.1 - Mode opératoire

Les préleveurs automatiques sont des ISCO 3700, ils sont destinés à être utilisés à Draix sur la station du Laval. Ils sont placés sur un échafaudage à environ 2 m au-dessus du canal, le tuyau de prélèvement est conservé dans sa longueur nominale (7 m), ce qui rapproche des conditions de fonctionnement sur site. Le mode de fonctionnement est programmé en mode débit avec déclenchement du prélèvement après une impulsion. Le prélèvement commence par une purge qui dure environ 10 s, puis le préleveur aspire pendant environ 20 s et purge de nouveau pour vider le tuyau. Le volume de prélèvement est fixé à 500 ml. Le déclenchement est effectué en fermant manuellement un contact, cette façon de faire a entraîné occasionnellement la prise de deux échantillons successifs, probablement à cause d'un phénomène de rebond du contact.

Le prélèvement manuel est effectué au même moment dans un béccher placé à la sortie du canal. Sa durée est beaucoup plus brève, moins d'une seconde (les bécchers utilisés font soit 1 l soit 500 ml et le débit est de l'ordre de 3.5 l/s). La prise d'échantillon manuelle est donc effectuée pendant que le préleveur automatique est encore dans la phase de purge.

Incidents de fonctionnements :

- deux doubles déclenchements du préleveur automatique, ce qui est peu gênant, on obtient simplement deux mesures successives ;
- un dysfonctionnement d'un préleveur vis-à-vis du volume d'échantillon a entraîné la répartition de la prise sur deux flacons. La concentration retenue est la moyenne des deux flacons.

2.2 - Résultats

Le tableau ci-dessous donne l'ensemble des résultats obtenus en grammes/litres, sauf celui concernant le dysfonctionnement du préleveur. Nombre de couples de mesures : 36.

Pmanuel	P Isco	Pmanuel	P Isco	Pmanuel	P Isco
9.3	9	195	208	381	396
10.3	11.6	243	259	423	443
10.3	11.3	256	264	444	452
10	10.7	259	270	446	449
9.4	9.7	265	281	470	440
76.4	75.9	320	284	588	581
68.6	72.2	300	303	577	600
82.3	85.6	311	305	582	600
79.2	84.6	303 *	314	681	677
140	140	303 *	309	679	694
148	188	388	379	682 *	688
191	198	393	399	682 *	685

* Il s'agit du même prélèvement manuel, il y a eu 2 prélèvements automatiques.

Analyse

A l'exception d'un cas (148, 188) les résultats sont très proches. En effectuant des régressions linéaires entre ces valeurs on obtient les résultats suivants en g/l.

$$P \text{ auto} = P \text{ manuel} + 4.5 \quad (1)$$

$$P \text{ manuel} = 0.995 * P \text{ auto} - 3.34 \quad (2)$$

Taux de Variance Expliquée : $R^2 = 0.996$

Coefficient de corrélation : $R = 0.998$ (limite à 0.1 % : 0.42).

Validité du coefficient de régression (pente) : pour (1) $t_a = 6369$, pour (2) $t_a = 7107$, la limite à 0.1 % est $t = 3.646$.

Erreur d'étalement à 5 % : ± 30 g/l.

Cette erreur est importante en particulier pour les faibles valeurs. L'importance de la gamme traitée (~ 0 - 700 g/l) explique ce résultat.

L'erreur moyenne relative est dans ce cas beaucoup plus intéressante : ± 4.4 %.

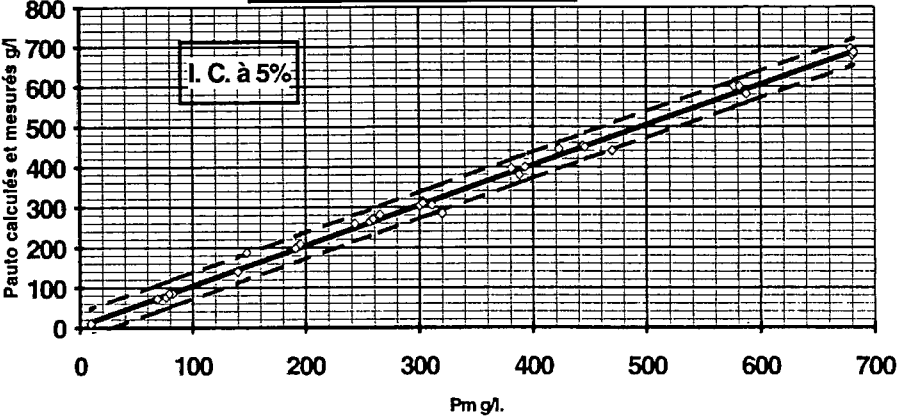
Avec un intervalle de confiance à 5 %, on obtient : ± 8.8 %. Soit une incertitude absolue variant de $\sim \pm 0.9$ g/l pour 10 g/l à $\sim \pm 60$ g/l pour 700 g/l.

Conclusion

La représentativité des prélèvements automatiques par rapport aux prélèvements manuels est très bonne. L'échantillonnage automatique, en moyenne, surestime légèrement la valeur mesurée, une explication peut être la subsistance de matière dans le tuyau malgré la purge préalable, en particulier pour les fortes concentrations. Il convient aussi de remarquer qu'il n'a pas été tenu compte de l'incertitude de mesure liée au processus d'estimation de la concentration (pesée, mesure du volume), ni de l'hétérogénéité éventuelle du transport dans le canal.

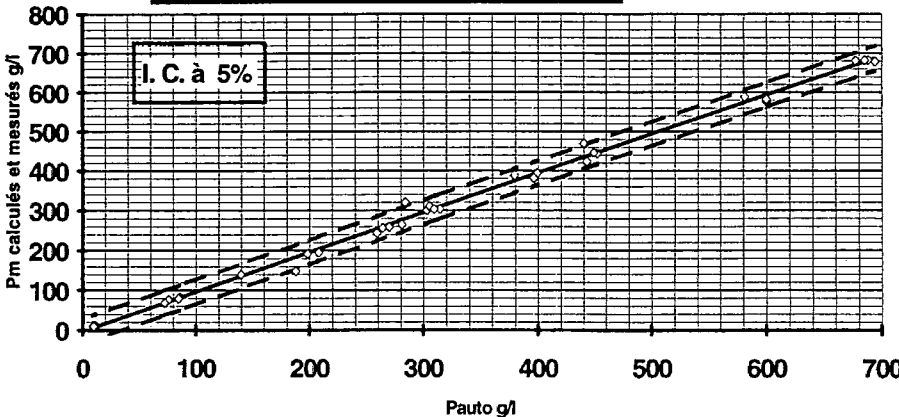
Droite Pauto = f(Pm), avec intervalles de confiance et points mesurés

Equation : $P_{auto} = P_m + 4.5$

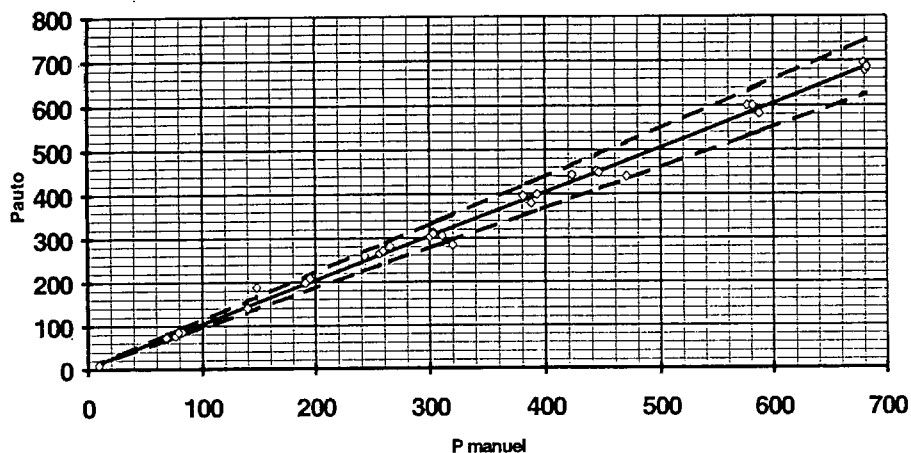


Droite $P_m = f(P_{auto})$ avec intervalles de confiance et points mesurés

Equation : $P_{manuel} = 0.995 \cdot P_{auto} - 3.34$



$P_{\text{auto}} = f(P_{\text{manuel}})$. Avec écart relatif à 5%



3 - Le capteur de pression différentielle

3.1 - Présentation, historique rapide et description du capteur

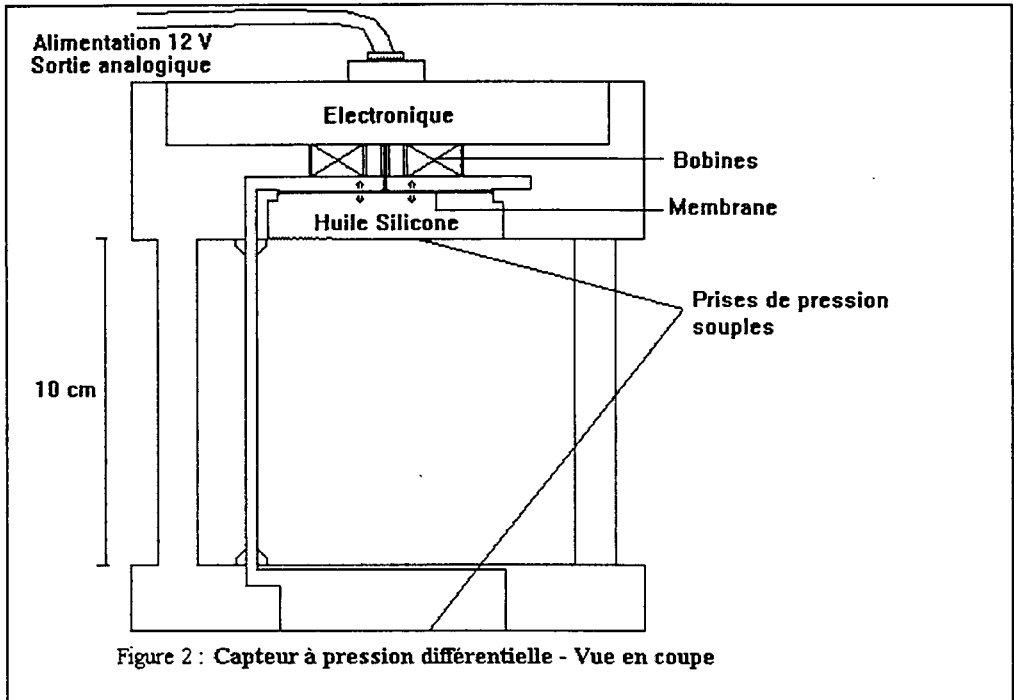
Dans un précédent rapport de recherche (B.V.R.E de Draix - C.R. n°1, 1987), on étudiait la possibilité de mesurer les concentrations des matières en suspension (M.E.S.), soit en mesurant simultanément pression et hauteur d'eau par deux appareils différents, soit en mesurant deux pressions à deux hauteurs différentes ; le problème de la précision de la mesure était présenté comme devant être crucial.

Dans le cadre d'une étude financée par le MRT, une convention a été passée entre le Cemagref et l'ORSTOM en 1988 pour étudier le principe de mesure et mettre au point un prototype.

Après vérification en laboratoire dans une cuve avec agitateur de la validité du principe, un appareil formé de deux capteurs placés à une distance connue l'un au-dessus de l'autre a été testé à Draix. Les résultats se sont avérés peu satisfaisants essentiellement à cause des problèmes de dérive relative des deux capteurs. L'étude a alors évolué vers la réalisation d'un appareil comportant un capteur de précision mesurant la différence de pression produite par deux membranes externes situées verticalement à 10 cm l'une de l'autre (voir figure 2). C'est cet appareil qui fait l'objet du test relaté.

Les premiers tests ont été faits au laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM à Montpellier : l'appareil était placé en immersion dans un tube avec une circulation verticale d'un mélange dont la densité variait de 1 à 1.7. Les résultats obtenus ont été tout à fait satisfaisants.

Une première série de mesures in situ a été effectuée dans des fleuves à forte charge solide en Tunisie et à Bordeaux (C.R. ORSTOM, R. CHARTIER, G. JACCON, juin 1993), mais ces études n'ont pas donné de résultats exploitables pour valider le fonctionnement de l'appareil.



Il a donc été décidé d'adjoindre le capteur de pression aux essais prévus sur le canal du Cemagref. La version testée a subi quelques modifications par rapport aux précédents exemplaires, en particulier en ce qui concerne la liaison entre les membranes externes qui était trop exposée à l'écoulement. Ce capteur n'avait pas encore été étalonné avec le procédé décrit plus haut.

Pour ce capteur nous disposons de données d'étalonnage statique réalisé en cuve avec des solutions salines par EDF-DTG. La gamme de densité explorée va jusqu'à 1.158, ce qui correspond à une concentration d'environ 250-260 g/l avec les marnes noires de Draix.

3.2 - Etalonnage

3.2.1 - Mode opératoire

Les principes généraux sont ceux exposés précédemment. Les problèmes particuliers posés par ce capteur sont, d'une part son encombrement qui implique une hauteur d'eau importante dans le canal, relativement au débit disponible, d'autre part l'utilisation de sa grille de protection. En effet le capteur tel qu'il est représenté figure 2 est inclus dans une grille de protection profilée fermée par un socle grillagé, l'ensemble est sensé laisser passer les MES. Le premier essai d'immersion à faible concentration nous a conduit à retirer la grille qui se bouche rapidement ce qui entraîne une fluctuation importante de la mesure. Le capteur a donc été posé sans protection sur son socle. En arrivant à des concentrations de l'ordre de 70-80 g/l, il est apparu que le socle provoquait à l'amont un important atterrissement qui perturbait la mesure. Le socle a donc été retiré et le capteur suspendu à la paroi.

Le capteur n'étant pas disponible au début des essais, les tests en eau claire ont été effectués ultérieurement ainsi qu'une partie des mesures à faible concentration. Dans ce dernier cas la mesure des concentrations a été effectuée uniquement à partir de prélèvements manuels.

3.2.2 - Résultats

On a utilisé la moyenne entre les résultats des prélèvements manuels et automatiques comme référence de concentration lorsqu'il y a eu les deux types de mesures, sinon on a pris la mesure disponible.

Le tableau suivant présente l'ensemble des valeurs mesurées. La variable "pression" est en fait la tension analogique fournie par le capteur de pression différentielle.

Cmes moy	Pression (V.)	Cmes moy	Pression (V.)	Cmes moy	Pression (V.)
0	1.278	9.55	1.222	301.5	2.742
0	1.282	76.15	1.443	308	2.808
0	1.08	70.4	1.575	307.25	2.802
0	1.175	83.95	1.53	383.5	3.182
0	1.201	81.9	1.698	396	3.158
0	1.205	113.65	1.705	388.5	3.103
0	1.22	140	1.908	433	3.361
0	1.267	168	1.895	448	3.233
11.4	1.321	194.5	2.139	584.5	3.778
12.6	1.343	201.5	2.185	588.5	3.852
12.9	1.329	251	2.2	591	3.907
19.4	1.38	260	2.301	679	4.528
20.9	1.388	264.5	2.366	686.5	4.524
22.5	1.404	273	2.403	684.25	4.583
10.35	1.295	302	2.743		

Ensemble des résultats (prélèvement manuel uniquement)

Comme dit précédemment les mesures ont été faites par gammes de concentration, avec un saut parfois trop important, avec en général trois séries de mesures par gamme. Toutefois la recirculation n'étant pas parfaite les prélèvements effectués montrent des différences non négligeables entre séries de la même gamme. Afin de déterminer si ces différences sont dues uniquement à l'incertitude de mesure des prélèvements, ou à des différences dans le recyclage des matériaux (agitation plus ou moins intense, importance de la destruction des plaquettes de marnes), on a procédé à un double étalonnage, le premier en prenant en compte toutes les mesures effectuées, le deuxième en considérant la moyenne des valeurs obtenues pour chaque gamme de concentration.

3.2.2.1 - Etalonnage à partir de l'ensemble des mesures

Les valeurs utilisées sont celles du tableau général, sauf pour C = 0 où on a pris la moyenne des tensions mesurées. Ce qui nous donne 37 couples de valeurs.

Une régression linéaire sur ces valeurs donne les résultats suivants

$$P \text{ volts} = 0.0047 * Cg/\ell + 1.227 \quad (4)$$

Soit $C = 0$ pour $P = 1.227$ volts, et comme relation d'étalonnage

$$Cg : l = 212.8 * P\text{volts} - 261 \quad (5)$$

Avec un taux de variance expliquée de $R^2 = 0.9903$

Le coefficient de corrélation est $R = 0.9951$, la limite à 1 % de confiance étant de 0.37.

Le test de Student de dépendance sur la pente de la droite donne une valeur $Ta = 51.8$, la limite avec une confiance à 1% est 3.5.

Ces résultats montrent une forte liaison entre la tension mesurée et la concentration en MES.

Le calcul de l'intervalle de confiance à 5 % (voir graphique) permet d'estimer l'erreur de mesure liée à l'étalonnage à environ ± 52 g/ℓ.

3.3.2.2 - Etalonnage par gammes de concentrations

On considère que chaque gamme de concentration est représentée par la moyenne des mesures de tension et de MES. Ce qui nous donne les 15 couples de valeurs suivants.

Concentration g/ℓ	Pression volts	Concentration g/ℓ	Pression volts
0	1.23	251	2.2
9.95	1.259	265.8	2.357
12.3	1.331	304.7	2.774
20.9	1.391	289.3	3.148
78.1	1.562	440.5	3.297
113.7	1.705	588	3.846
154	1.902	685.4	4.554
198	2.162		

Une régression linéaire sur ces valeurs donne les résultats suivants :

$$P \text{ volts} = 0.0047 * Cg/\ell + 1.212 \quad (6)$$

Soit $C = 0$ pour $P = 1.212$ volts, et comme relation d'étalonnage

$$Cg/\ell = 212.8 * P\text{volts} - 257.8 \quad (7)$$

Avec un taux de variance expliquée de $R^2 = 0.9916$

Le coefficient de corrélation est $R = 0.9958$, la limite à 1 % de confiance étant de 0.64.

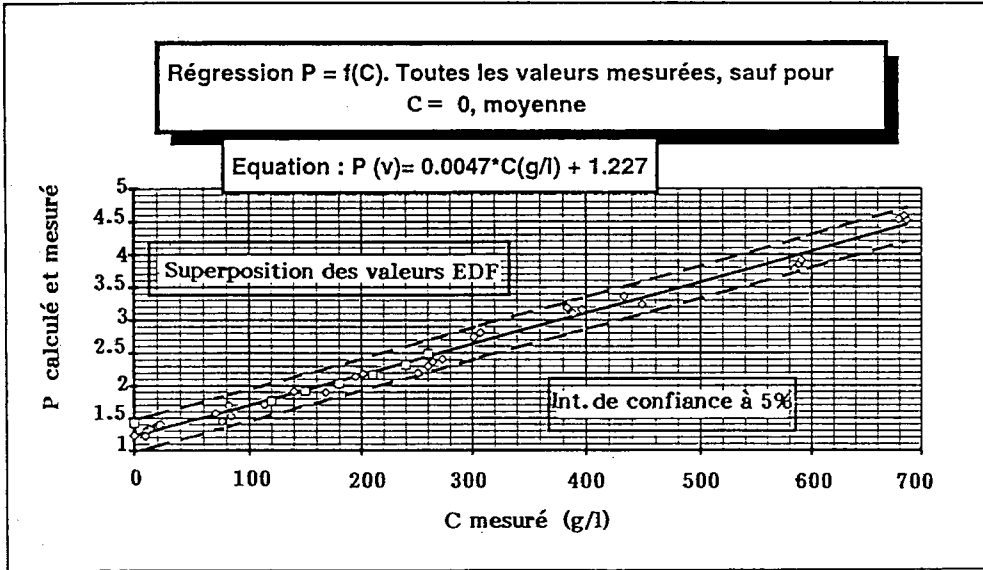
Le test de Student de dépendance sur la pente de la droite donne une valeur $Ta = 33.12$, la limite avec une confiance à 0.1 % est 4.2.

Ces résultats montrent une forte liaison entre la tension mesurée et la concentration moyenne en MES.

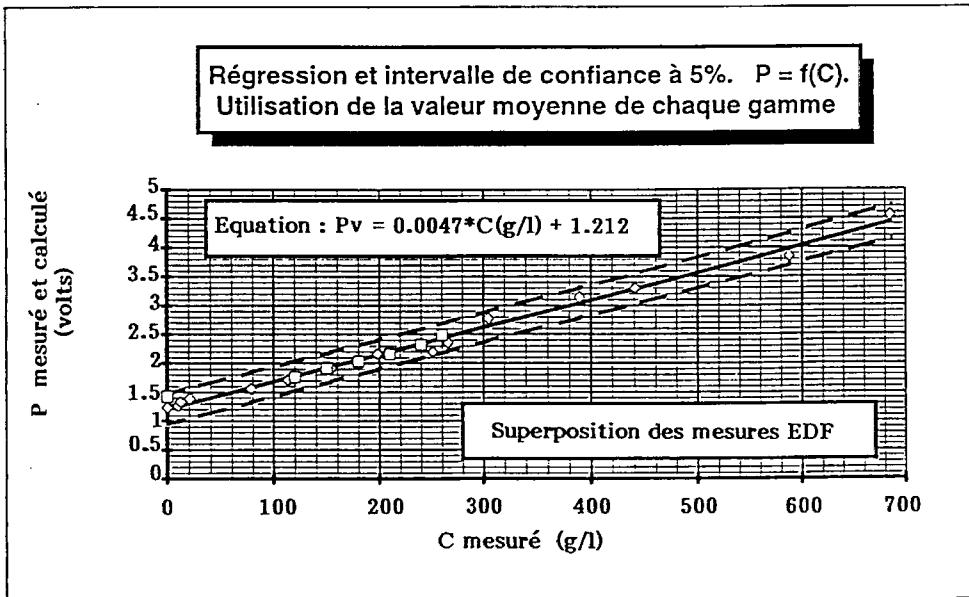
Le calcul de l'intervalle de confiance à 5 % (voir graphique) permet d'estimer l'erreur de mesure liée à l'étalonnage à environ ± 54 g/ℓ.

On constate que ces résultats sont très proches des précédents, en pratique la seule différence est une translation de la droite d'étalonnage d'une valeur de concentration de 3 g/l, l'erreur de mesure est aussi du même ordre de grandeur, il sera donc indifférent d'utiliser l'une ou l'autre de ces relations.

La valeur du zéro varie, ceci devra être examiné plus loin. L'erreur de mesure étant de plus de 50 g/l, indique que l'appareil ne pourra raisonnablement être utilisé dans l'état actuel pour des valeurs inférieures à 100 g/l.



Les valeurs mesurées par EDF sont représentées par des carrés, les autres par des losanges.



Afin d'essayer d'obtenir une réduction de cette erreur de mesure on a recommencé les calculs d'une part pour les faibles valeurs mesurées (en pratique < 100 g/l) et d'autre part en négligeant ces faibles valeurs (en pratique > 70 g/l).

Remarque : Sur les graphiques représentant les relations (6) et (7) on a porté les points mesurés en conditions statiques par EDF-DTG. On peut constater qu'ils sont alignés sur les droites calculées de façon très satisfaisante.

3.2.2.3 - Etalonnage des faibles valeurs

On considère toutes les valeurs mesurées inférieures à 100 g/l., y compris toutes celles obtenues pour le zéro. Le nombre de couples de valeurs est de 20.

Une régression linéaire sur ces valeurs donne les résultats suivants.

$$P \text{ volts} = 0.0043 * Cg/l + 1.238 \quad (8)$$

Soit $C = 0$ pour $P = 1.238$ volts, et comme relation d'étalonnage

$$Cg/l = 232.6 * P \text{ volts} - 288 \quad (9)$$

Avec un taux de variance expliquée de $R^2 = 0.7846$

Le coefficient de corrélation est $R = 0.8858$, la limite à 1 % de confiance étant de 0.56.

Le test de Student de dépendance sur la pente de la droite donne une valeur $T_a = 16.8$, la limite avec une confiance à 0.1 % est 3.965.

Ces résultats montrent une moins bonne linéarité que pour l'ensemble des mesures, ainsi qu'un changement de pente. Le saut relativement brutal dans les gammes de concentrations (de ~ 20 g/l à ~ 0 g/l) est trop important pour pouvoir mettre en évidence une non linéarité de la relation entre concentration et pression mesurée pour les faibles valeurs, mais une présomption existe qu'il faudrait confirmer ou infirmer par de nouvelles mesures.

Le calcul de l'intervalle de confiance à 5% (voir graphique) permet d'estimer l'erreur de mesure liée à l'étalonnage à environ ± 15 g/l, ce qui représente une amélioration non négligeable.

3.2.2.4 - Etalonnage à partir des fortes valeurs

On n'utilise que les valeurs supérieures à 70 g/l. Ce qui représente 28 couples de mesures.

Une régression linéaire sur ces valeurs donne les résultats suivants.

$$P \text{ volts} = 0.0048 * Cg/l + 1.186 \quad (10)$$

Soit $C = 0$ pour $P = 1.186$ volts, et comme relation d'étalonnage

$$Cg/l = 208.3 * P \text{ volts} - 247 \quad (11)$$

Avec un taux de variance expliquée de $R^2 = 0.9825$

Le coefficient de corrélation est $R = 0.992$, la limite à 1% de confiance étant de 0.487.

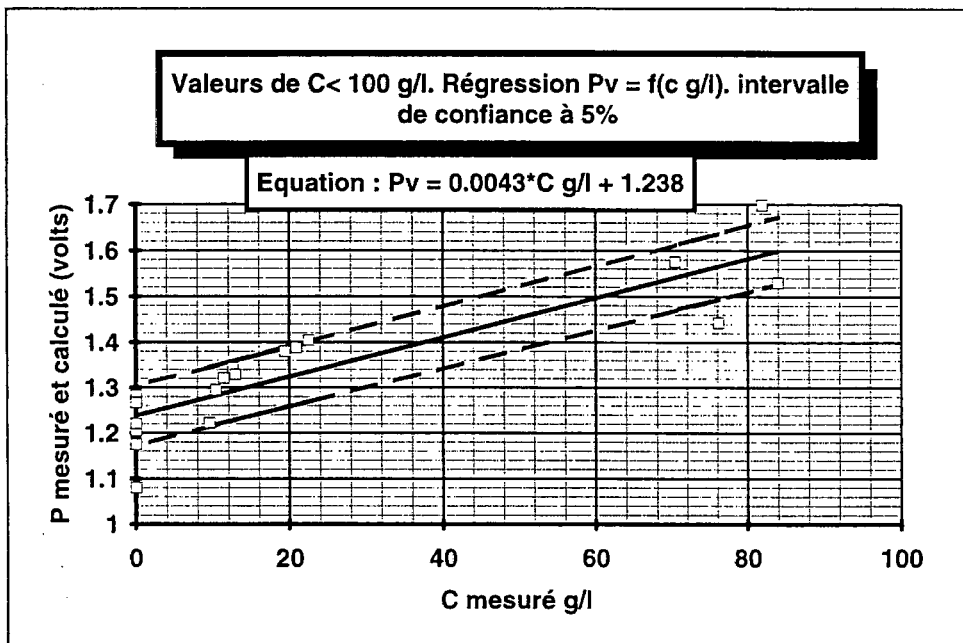
Le test de Student de dépendance sur la pente de la droite donne une valeur $T_a = 42.7$, la limite avec une confiance à 0.1 % est 3.7.

L'erreur de mesure à 5 % de l'estimation est de ± 50 g/l.

Ces valeurs sont très proches de celles trouvées sur l'ensemble de la gamme, et l'estimation de l'erreur est comparable, seul le zéro est décalé de façon notable.

Conclusion

La réponse de l'appareil en fonction de la concentration en MES est linéaire. L'erreur d'étalonnage est d'environ $\pm 50 \text{ g/l}$. On peut considérer que l'appareil donnera des résultats satisfaisants à partir de 100 g/l . Il existe une présomption de non linéarité de la réponse pour les faibles valeurs de concentration, mais les écarts entre les gammes de concentrations explorés sont trop importants pour pouvoir en être certain.



3.3 Comparaison des mesures statiques et dynamiques

3.3.1 - Mesures en statique, résultats disponibles

P EDF Volts	Densité EDF	Concentration g/l pour d = 2.6	Concentration g/l pour d = 2.7
1.42	1	0	0
1.76	1.072	120	114
1.91	1.093	150	148
2.03	1.11	180	175
2.16	1.128	210	203
2.32	1.144	240	229
2.49	1.158	260	251

Résultats obtenus par EDF-DTG en statique

Les concentrations équivalentes sont estimées en prenant respectivement des densités de 2.6 et 2.7 pour les matériaux de Draix. Nous ne connaissons pas la dispersion de ces mesures. En linéarisant ces résultats sans tenir compte du zéro on obtient les relations suivantes :

EDF 1

$$P(\text{volts}) = 0.005 * C(\text{g/l}) + 1.149 \quad \text{soit} \quad C(\text{g/l}) = 200 * P(\text{volts}) - 230$$

$$C = 0 \text{ pour } P = 1.149 \text{ volts.}$$

EDF 2

$$P(\text{volts}) = 0.0052 * C(\text{g/l}) + 1.138 \quad \text{soit} \quad C(\text{g/l}) = 192 * P(\text{volts}) - 218$$

$$C = 0 \text{ pour } P = 1.138 \text{ volts.}$$

On peut remarquer l'écart des valeurs calculées (1.149 et 1.138) et mesurée (1.42) pour une concentration nulle. Par contre à partir d'une tension de 1.5 volts les résultats fournis par ces relations sont proches de ceux de l'étalonnage en dynamique (voir § 3.4) et toujours compris dans l'intervalle de confiance. Il se pose donc un problème de stabilité de la mesure du "zéro". Les mesures en eau claire regroupent des essais avec des vitesses d'écoulement différentes dans le canal. Il convient donc d'examiner si on peut mettre en évidence une influence de la vitesse sur la mesure.

3.3.2 - Stabilité du zéro et impact de la vitesse d'écoulement

3.3.2.1 - Stabilité du zéro

Le "zéro" correspond à la tension fournie par le capteur lorsque la concentration est nulle, c'est-à-dire que l'appareil est plongé dans de l'eau claire.

Les séries de mesures faites à concentration nulle dans le canal (1000 enregistrements/série) ont des écarts type compris entre 0.003 et 0.005 volts par série, la valeur retenue pour la série étant la moyenne des 1000 enregistrements. La moyenne de l'ensemble des mesures est de **1.233 volts** avec un écart type de **0.04 volts**, les extrêmes étant de **1.08** et **1.282 volts**. On observe que la variance inter-séries de mesures est d'un ordre de grandeur plus importante que la variance intra-série. Ces séries de mesures ont été effectuées pour trois valeurs de pente du canal, respectivement zéro, trois et six pour-cents.

La valeur trouvée par EDF, 1.42 volts, correspond à une vitesse nulle. On ne connaît pas la variance de cette mesure, si on l'ajoute à l'ensemble des résultats la moyenne devient **1.236 volts** et l'écart type passe à **0.09 volts**.

En regroupant les résultats par catégories de vitesses on obtient :

Catégorie de Vitesse	Tension (v) moyenne	Ecart type (v)
Nulle	1.42	inconnu
Pente 0	1.276	0.008
Pente 3%	1.152	0.06
Pente 6%	1.212	0.01
Moyenne	1.265	0.12
Moyenne sans EDF	1.213	0.06

On constate une importante instabilité de la mesure du zéro. Il convient d'examiner l'impact de la vitesse de l'écoulement sur cette valeur.

3.3.2.2 - Impact de la vitesse

La mesure de la hauteur d'eau dans le canal permet par un calcul hydraulique d'estimer la vitesse de l'eau à l'endroit où se trouve le capteur. Ce calcul ne tient pas compte de la présence du capteur dans l'écoulement, difficile à modéliser, bien que son encombrement ne soit pas négligeable.

Les valeurs trouvées sont les suivantes :

- Pente nulle, $V \sim 19.25$ cm/s.
- Pente 3%, $V \sim 20.5$ cm/s.
- Pente 6%, $V \sim 22$ cm/s.

On constate que ces valeurs sont faibles, par rapport à celles rencontrées habituellement sur les sites de mesures, et les écarts sont très réduits.

Une régression linéaire sur l'ensemble des valeurs donne la relation suivante :

$$\text{Pression (volts)} = -0.0105 * V(\text{cm/s}) + 1.424 \quad (3)$$

Avec un taux de variance expliquée, $R^2 = 0.6$

Un coefficient de corrélation $R = 0.777$, correct à 2 % (limite : 0.7498) mais mauvais à 1% (limite : 0.7943).

Le test de Student de dépendance sur la pente de la droite donne une valeur $T_a = 3.546$, la limite avec une confiance à 1 % est 3.499.

On constate donc que si cette régression peut être acceptée aux tests statistiques usuels, c'est de justesse. L'intervalle de confiance à 5 % (voir graphique) est énorme autour de $V = 0$, ce qui est logique étant donné la distance entre ce point et le suivant, il est toutefois de l'ordre de 0.15 mv autour des trois valeurs de vitesse non nulles. Cet intervalle est donc plus important que l'écart entre les valeurs moyennes trouvées pour ces vitesses, il semble donc difficile d'utiliser ce type de relation.

Il est difficile dans ces conditions de tirer des conclusions définitives concernant l'impact de la vitesse sur la qualité des mesures.

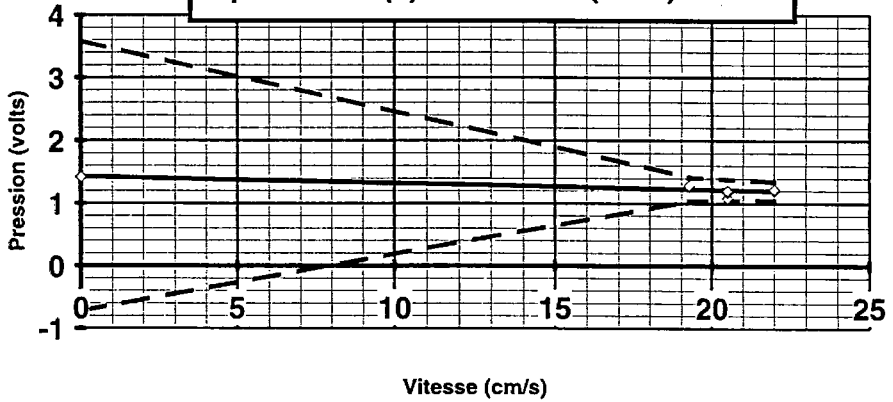
Ceci tend à confirmer le problème de stabilité du zéro qu'il convient d'éclaircir. Doit-on l'attribuer au fonctionnement propre du capteur, à l'influence de la vitesse ou à des perturbations de l'écoulement, dans les conditions des essais, qui seraient atténuées par l'augmentation de la viscosité des écoulements chargés ?

Conclusion

Il existe un problème de stabilité du zéro (concentration nulle). L'influence de la vitesse n'a pu être mis en évidence de façon catégorique aux cours de ces essais, les vitesses atteintes étant à la fois trop faibles en valeur absolue et trop peu différentes les unes des autres. Il semble nécessaire de progresser par rapport à ce problème, d'abord en étudiant la stabilité du zéro en statique et en l'améliorant si nécessaire puis ensuite en reprenant des essais orientés vers la mesure de la vitesse s'il est possible d'adapter l'installation pour atteindre des vitesses plus élevées.

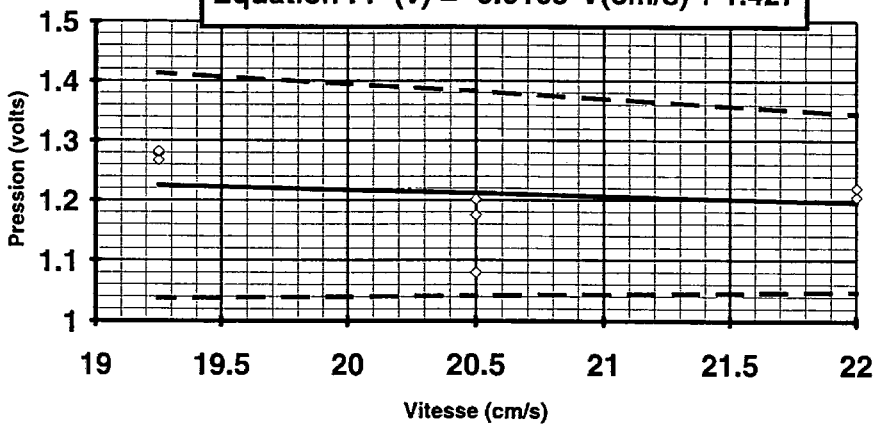
Régression $P(v) = f(V \text{ cm/s})$ avec intervalle de confiance à 5%

Equation : $P(v) = -0.0105 \cdot V(\text{cm/s}) + 1.427$



Régression $P(v) = f(V \text{ cm/s})$ avec intervalle de confiance à 5%

Equation : $P(v) = -0.0105 \cdot V(\text{cm/s}) + 1.427$



3.4 - Comparaison des différentes relations obtenues

Le tableau suivant donne les valeurs de concentration en g/l obtenues à partir des diverses relations. Entre parenthèses figure l'écart relatif par rapport à la moyenne des valeurs calculées, pour la tension concernée, en pour-cent.

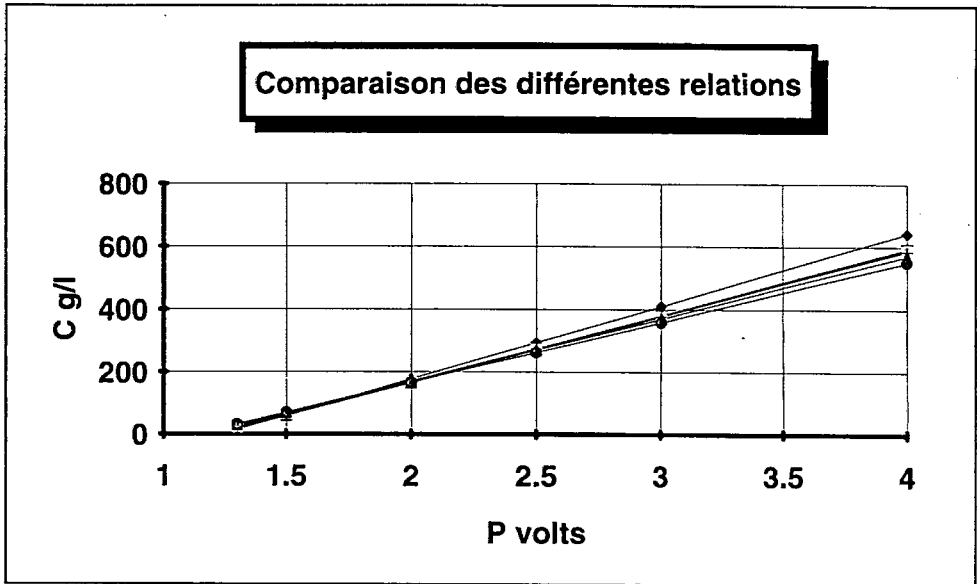
P en volts	Toutes valeurs Formule 5	Par gammes Formule 7	Faibles valeurs Formule 9	Fortes valeurs Formule 11	EDF 1	EDF 2
1.3	16 (30)	19 (17)	14 (36)	24 (6)	30 (34)	32 (41)
1.5	58 (9)	61 (5)	61 (5)	70 (2)	70 (0.9)	70 (9)
2	165 (3)	168 (9)	177 (5)	170 (0.3)	170 (0.5)	166 (2)
2.5	271 (1)	274 (0.01)	294 (7)	274 (0.1)	270 (1)	262 (4)
3	377 (0.4)	380 (0.4)	409 (8)	378 (0.3)	370 (2)	358 (6)
4	590 (0.3)	593 (0.08)	642 (9)	586 (0.4)	570 (3)	550 (7)

Ces résultats mettent en évidence l'importance de la dispersion pour les faibles valeurs de concentration où les écarts relatifs sont beaucoup plus importants, par contre rapidement, à partir 1.5 volt les valeurs se rapprochent pour devenir très proches à partir de 2 volts, exception faite de la relation 9 qui a été établie justement à partir des faibles valeurs mesurées.

Par ailleurs il n'apparaît pas, compte tenu des remarques précédentes de différences significatives entre les mesures en dynamique et les mesures statiques.

Conclusion

Le capteur de pression différentielle fonctionne correctement sur une gamme importante de concentrations en MES. La précision de mesure, de l'ordre de ± 50 g/l, ne permet pas de l'utiliser pour de faibles valeurs de concentrations, elle reste toutefois acceptable pour les très fortes concentrations. Les points à étudier de façon plus fine sont, en premier lieu la stabilité du zéro et ensuite l'influence de la vitesse sur la mesure. Les conditions expérimentales n'ont pas permis d'aborder ces points, les gammes de vitesse et de débit disponibles sont trop faibles, en particulier la section de l'écoulement est trop petite pour pouvoir affirmer que le capteur n'influe pas sur les conditions d'écoulement en provoquant des accélérations locales voir des remous qui perturbent la mesure. La comparaison des résultats avec les valeurs mesurées en statique prêche en faveur d'un problème interne au capteur ou d'une perturbation hydraulique due à son encombrement relatif dans l'écoulement qui s'estomperait avec l'augmentation de la viscosité du mélange. La connaissance de l'écart type des mesures statiques en eau claire fournirait déjà des indications intéressantes à ce sujet.



Conclusion générale

Ces mesures en canal ont permis de confirmer la représentativité des échantillons fournis par un préleveur automatique jusqu'à des valeurs rencontrées exceptionnellement dans la nature (sans préjuger de l'hétérogénéité des écoulements naturels).

Le capteur de pression différentielle apparaît comme tout à fait apte à fournir des mesures exploitables en continu pour des concentrations supérieures à 100 g/l.

Ces performances pourraient être notablement améliorées si le problème de stabilité de la mesure du "zéro" pouvait être résolu.

Pour être tout à fait rigoureux il faudrait étudier l'impact de la vitesse d'écoulement sur la mesure, mais ceci ne semble pas facile à mettre en oeuvre avec les installations dont nous disposons à l'heure actuelle.

Bibliographie

Mesures générales de transports solides

Cemagref, divisions protection contre les érosions, Grenoble et hydraulique générale, Aix-en-Provence ; ONF-RTM, Service RTM, Alpes de Haute-Provence - *Bassins versants représentatifs de Draix*. Compte rendu de recherche en érosion et hydraulique torrentielle. C.R. n° 1 septembre 1987. C.R. n° 2 mai 1989.

Mesures des MES par pression

CALLEDE (J.), CHARTIER (R.), JACCON (G.), 1989 - *Contribution à la mesure d'écoulements très chargés. Utilisation de capteurs de pression (Tests en laboratoire)*. ORSTOM, laboratoire d'hydrologie. Convention MRT/Cemagref/ORSTOM, novembre 1989).

CHARTIER (R.), JACCON (G.), 1993 - *Mesure en continu des niveaux d'eau et de la concentration des matières transportées en suspension des fleuves à forte charge solide*. Convention MRT/ORSTOM, juin 1993. (ORSTOM, laboratoire d'Hydrologie).

MEUNIER (M), 1987 - *Etude des écoulements très chargés*. B.V.R.E. de Draix C.R. n° 1, septembre 1987, Cemagref Grenoble, division protection contre les érosions.

Mesure des MES par rétrodiffusion optique

BERGOUGNOUX (L.), MISGUICH (J.) FIRPO (J.L.), 1994 - *Prototype pour la mesure des transports solides*. Convention Cemagref/IUSTI, mars 1994. Université de Provence, GIPSE.

Mesure in situ de la concentration des matières en suspension : mise au point d'une sonde optique

Laurence BERGOUGNOUX
Jacqueline MISGUICH-RIPAULT
Jean-Luc FIRPO
Jacques ANDRE
GIPSE - UMR 139 IUSTI
Université de Provence, Case 117
3, place Victor Hugo,
13331 Marseille Cedex 3, France

Jean-Pierre CAMBON
Cemagref, groupement
d'Aix-en-Provence
division ouvrages
hydrauliques et
équipements pour l'eau
Le Tholonet, BP 31
13612 Aix-en-Provence
Cedex 1, France

Nicolle MATHYS,
Jean-Emmanuel OLIVIER
Cemagref, groupement de
Grenoble, division protection
contre les érosions
2, rue de la Papeterie, BP 76,
38402 St-Martin-d'Hères Cedex
France

Motivations

La mesure de la perte en terre qui résulte des processus érosifs opérant sur un bassin versant se fait habituellement au moyen de méthodes pouvant être rangées dans deux catégories :

- la mesure de l'ablation superficielle.
- la mesure du transport solide dans un chenal.

Dans ce cas, le rythme des mesures dépend du type d'appareillage. La détermination de la quantité de sédiments peut être globale (piège à sédiments), continue (sonde radioactive, turbidimètre) ou discontinue (préleveurs).

Les bassins expérimentaux de Draix sont équipés de pièges à sédiments et de préleveurs. Comme le note le rapport *Les bassins versants expérimentaux de Draix - Présentation et synthèse - Mai 1988* [1]¹ : "La mesure des matières en suspension à partir de prélèvements est lourde et difficile ; en outre elle présente l'inconvénient de donner des mesures discontinues. Il est nécessaire de mettre au point des instruments nouveaux permettant une mesure en continu des transports".

Pour cela, le groupement d'Aix-en-Provence du Cemagref a pris contact avec la filière Instrumentation de l'Université de Provence, en vue de mettre au point un prototype pour la mesure des transports solides.

Une étude préliminaire de faisabilité [12] en 1990 - 1991 a permis de conclure à la possibilité de réaliser un turbidimètre optique pouvant mesurer des concentrations de matières en suspension allant jusqu'à 1 000 grammes par litre d'eau. C'est ainsi qu'une convention entre le Cemagref et l'Université de Provence - I.U.S.T.I - a été signée le 7 décembre 1992. La région PACA s'est associée financièrement pour contribuer au succès de ces études dans le cadre des subventions au secteur technologie - recherche.

¹ Le numéro entre crochets renvoie à la bibliographie en fin d'article.

La convention Cemagref / I.U.S.T.I. contenait le cahier des charges pour la réalisation de deux prototypes à installer sur site.

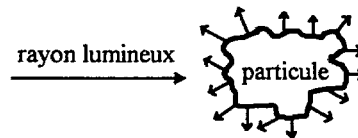
Le turbidimètre devra avoir les caractéristiques suivantes :

- faible consommation d'énergie
- mise en oeuvre simple
- peu coûteux
- robuste
- non intrusif
- nécessitant peu de maintenance
- respectant l'environnement
- la gamme de mesure devra être de 30 à 1 000 g/l de matière sèche.

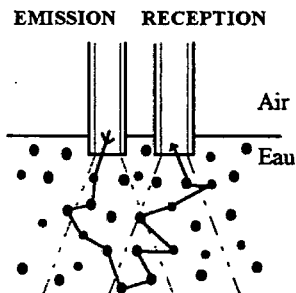
Pour respecter le cahier des charges, la solution retenue est un capteur à fibres optiques fonctionnant sur le principe de la lumière rétrodiffusée par les particules en suspension.

1 - Analyse du fonctionnement du turbidimètre optique

Lorsqu'un rayon lumineux vient frapper une particule, celle-ci va, selon sa nature et ses caractéristiques géométriques, absorber et diffuser le rayon lumineux.



1.1 - Le principe de la mesure



Une fibre optique est destinée à l'émission d'un faisceau lumineux, de longueur d'onde λ , vers les particules en suspension dans l'eau.

La fibre adjacente reçoit la lumière rétrodiffusée par les particules éclairées. Nous avons représenté en pointillé les cônes d'ouverture numérique (d'acceptance) des deux fibres.

La puissance rétrodiffusée par les particules en suspension est fonction du nombre, de la taille, de la forme, de la couleur des particules et du dimensionnement du capteur.

1.1.1 - Caractéristiques physiques d'une suspension

Une suspension va être définie par :

- sa **fraction ou concentration volumique C** représentant le rapport entre le volume occupé par les particules et le volume total ;
- sa **distribution en taille ou granulométrie**, le paramètre intéressant pour nous est la surface spécifique des particules en suspension, et plus particulièrement son inverse, qui a la dimension d'une longueur, et qui sera considéré comme la taille "moyenne" des particules. Par la suite ce paramètre sera noté d ;
- son **coefficient d'extinction K** , qui traduit la capacité d'une particule à absorber et à diffuser la lumière incidente.

1.1.2 - Considérations théoriques

Le rapport d/λ détermine le type de phénomènes rencontrés lors de l'interaction d'un faisceau lumineux avec une particule.

Remarque : l'étude de l'absorption et de la diffusion de la lumière par une particule fait l'objet de plusieurs ouvrages [2] à [6], où sont abordées :

- l'influence de la forme de la particule (sphérique ou cylindrique),
- l'influence de sa nature (\pm absorbante et diffusante).

Lorsque le milieu est très peu concentré, après la rencontre entre le faisceau incident et la particule, on peut supposer que la radiation diffusée traverse le milieu sans rencontrer d'autre particule ; c'est la **diffusion simple**.

Cependant lorsque la concentration volumique augmente, la radiation diffusée rencontre d'autres particules qui, à leur tour, vont diffuser ou absorber cette radiation. Cet effet de **diffusions multiples** devient très important avec la concentration.

Il existe un autre type de diffusion qui peut intervenir lors des mesures : la **diffusion secondaire** qui est un effet assimilable à la lumière parasite. Il provient des objets à l'extérieur du volume de suspension qui sont illuminés par la lumière incidente. Les réflexions de la lumière sur les parois d'une cuve peuvent être considérées comme de la diffusion secondaire.

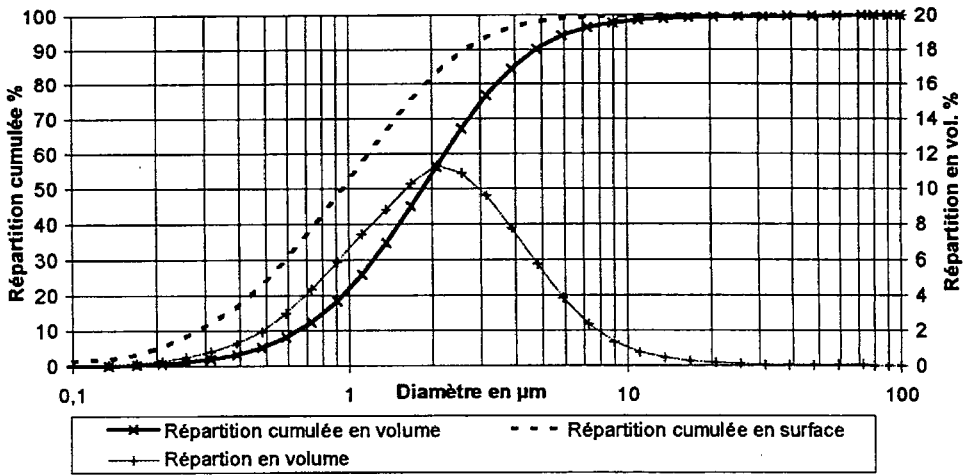
Ce problème complexe des diffusions multiples accompagnées d'absorption n'est pas sans rapport avec ceux rencontrés dans la diffusion de la lumière par les poussières interstellaires. Dans ce cadre, un nombre important de travaux théoriques a vu le jour, notamment les ouvrages cités en [2] et [6].

1.2 - Analyse granulométrique

Pour caractériser une suspension, on utilise un granulomètre laser. Cet appareil délivre la distribution en volume d'un échantillon de volume total V , en supposant les particules sphériques.

Soit ΔV_i le volume des particules dont le diamètre D_{moy_i} est compris au milieu de l'intervalle $[D_i, D_i + \alpha D_i]$.

Le granulomètre nous fournit :



- la répartition en volume $\frac{\Delta V_i}{V}$ en fonction de D_{moy_i} ,

- la répartition cumulée en volume $\sum_{i_{min}}^i \frac{\Delta V_i}{V}$ en fonction de D_{moy_i} .

A partir de ces données, il est possible de calculer la répartition cumulée en surface $\sum_{i_{min}}^i \frac{\Delta S_i}{S}$ en fonction de D_{moy_i} .

La surface spécifique est la surface développée $\sum_i \Delta S_i$ des particules par unité de volume de l'échantillon. Elle est calculée à partir de la distribution en volume :

$$\text{Surface spécifique} = \frac{\sum_i \Delta S_i}{V} = \sum_i \frac{\Delta V_i}{V} \times \frac{\text{Surface d'1 particule de diamètre } D_{moy_i}}{\text{Volume d'1 particule de diamètre } D_{moy_i}}$$

$$\text{Surface spécifique} = 6 \times \sum_i \frac{\Delta V_i}{V \times D_{moy_i}} = \frac{6}{\mathcal{D}} \text{ avec } \mathcal{D} \text{ le diamètre moyen volume / surface.}$$

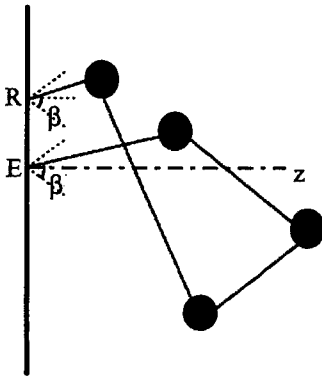
1.3 - Coefficient d'absorption

La présence de particules dans un milieu est responsable de l'extinction d'un faisceau lumineux traversant ce milieu. Nous avons mesuré le taux d'absorption des marnes grâce au montage optique connu sous le nom de sphère intégratrice ou sphère d'Ulbrich.

Le principe de la mesure est le suivant : l'intérieur de la sphère est considéré comme un diffuseur parfait. Si on place un petit volume de suspension, éclairé depuis son centre, au milieu de la sphère, on peut mesurer en tout point de la paroi l'atténuation par absorption de l'intensité lumineuse incidente.

1.4 - Modélisation

Afin de prévoir la réponse du capteur pour une suspension donnée à une concentration donnée, nous avons réalisé une simulation numérique qui s'appuie sur le modèle suivant².



E : Emission de photons

β : Cône d'Ouverture Numérique

R : Réception dans le plan $z = 0$

d : Taille moyenne d'une particule

C : Concentration volumique

Soit un photon émis d'un point E avec une direction aléatoire comprise dans le cône d'angle β .

Ce photon parcourt entre chaque diffusion une distance l donnée par une loi de probabilité exponentielle.

$$P(l) = \frac{1}{\bar{l}} \exp\left(-\frac{l}{\bar{l}}\right) \text{ Avec } \bar{l} = \frac{d}{C} \text{ le libre parcours moyen.}$$

Lors de la rencontre avec la particule, le photon a la probabilité τ d'être absorbé. S'il est diffusé, il repart avec une direction aléatoire donnée par la loi de Henyey Greenstein [8].

On étudie le nombre de photons qui arrivent sur le plan $z = 0$ en fonction de la distance à l'origine E. Ceci permet d'obtenir numériquement la courbe de réponse du capteur.

² Les développements ne figurent pas dans cet article, mais seront développés dans la thèse en cours de L. BERGOUIGNOUX.

2 - Réalisation

2.1 - Le matériau

Les marnes noires formant le substrat des bassins versants de Draix sont attribuées au Callovo-Oxfordien. Elles se présentent en masse compacte avec une puissance de plusieurs centaines de mètres. A l'affleurement, elles sont fortement érodées sur une épaisseur variable. C'est le produit de cette érosion qui est entraîné par le ruissellement vers le chenal où il est l'objet de la mesure.

Les marnes noires ont une densité de 2,65.

2.2 - L'analyse granulométrique du matériau de Draix

Pour les essais en laboratoire un échantillon a été prélevé dans les dépôts de Draix. Les caractéristiques de cet échantillon sont les suivantes :

Diamètre à 10 % = 1,27 μm

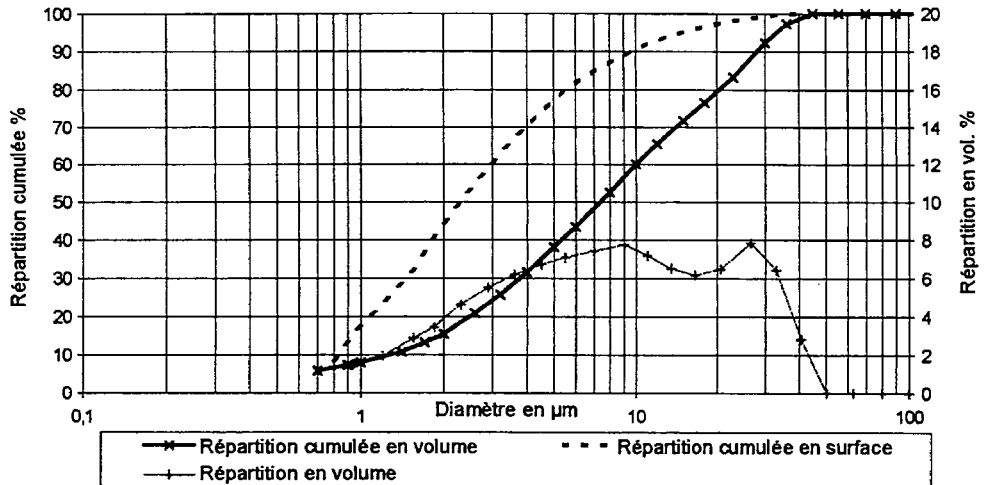
Diamètre moyen = 11,27 μm

Diamètre à 50 % = 7,37 μm

Surface spécifique = $1,83 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$

Diamètre à 90 % = 28,01 μm

Diamètre \mathcal{D} = 3,24 μm



2.3 - Le dimensionnement des capteurs

Afin de respecter le cahier des charges, en ce qui concerne la gamme de concentration, une étude tant théorique qu'expérimentale a été menée afin d'optimiser la géométrie du capteur, la dimension des fibres, leur nombre, leurs positions relatives.

Pour mener à bien cette étude, 17 capteurs ont été réalisés en laboratoire et testés suivant une procédure exposée dans le rapport de fin de contrat [7].

3 - Les essais en laboratoire

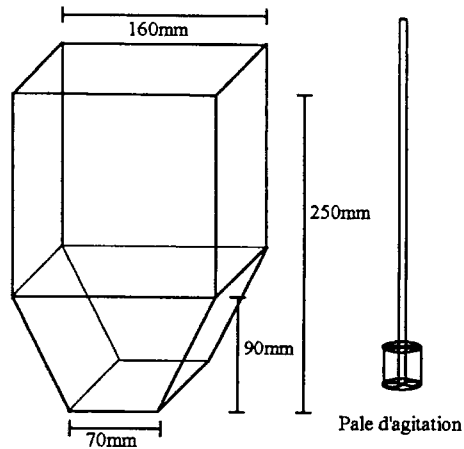
3.1 - La procédure d'étalonnage

La procédure d'étalonnage est nécessaire pour la détermination de l'équation permettant de trouver la valeur de la concentration du mélange dans lequel est plongé le capteur, à partir d'une mesure de tension. Avant de présenter l'allure des courbes obtenues, nous décrivons le matériel utilisé et le plan de l'expérimentation.

3.1.1 - Le matériel utilisé

Lors d'un étalonnage, il est capital d'avoir un *milieu homogène*, dont on soit sûr de la mise en suspension, pour faire des mesures reproductibles. Pour la mise en suspension des marnes de Draix dans l'eau, nous avons, après plusieurs essais, choisi le matériel suivant :

- *1 récipient carré* pour éviter les phénomènes de centrifugation, réalisé en PVC opaque et avec une base en tronc de pyramide. Des essais effectués avec un récipient cylindrique n'ont pas été concluants : le mélange n'était pas homogène ;
- *1 pale d'agitation à deux hauteurs*, et à haut rendement pour milieux visqueux et suspension solide ;
- *1 agitateur* ayant une vitesse maximale de 3 000tr/mn.



3.1.2 - Plan de l'expérimentation

Dans un volume initial d'eau de 1, 2 ou 4 litres, on ajoute successivement des masses connues (à $\pm 1g$) de marnes noires sèches.

Pour chaque ajout, il est nécessaire d'agiter le mélange pendant quelques minutes, avant homogénéisation et donc stabilité du signal : c'est le *temps d'homogénéisation*. Pour chaque ajout et après 5 mn au maximum, c'est la prise de la mesure.

Le *temps de réponse* du conditionneur varie avec les puissances lumineuses détectées ; il augmente quand celles-ci diminuent. On l'évalue en mesurant le temps de montée τ du signal, lorsque le capteur (initialement dans l'air) est plongé dans la boue agitée depuis quelques minutes. Pour les boues de Draix et pour une concentration de 530 g/l, ce temps de réponse est inférieur à 10 secondes.

3.2 - La reproductibilité des mesures

3.2.1 - Aux fortes concentrations $>100\text{g}/\ell$

Des étalonnages successifs montrent que la reproductibilité est meilleure qu'aux faibles concentrations. Les mesures sont indépendantes :

- de la position du capteur dans la cuve grâce à l'homogénéité du mélange,
- de l'éclairement ambiant,
- du volume de mesure (1, 2 ou 4 litres),
- de l'opérateur.

3.2.2 - Aux faibles concentrations $\leq 100\text{ g}/\ell$

La reproductibilité est moins bonne en raison :

- des effets de bords

Le milieu est suffisamment "transparent" pour que le capteur voie les bords du récipient carré. On estime que les effets de bords sont négligeables si une paroi parallèle au capteur est située à une distance ℓ , telle que : $\ell.C \geq 40\text{ (cm.g}/\ell)$.

- de l'éclairement ambiant

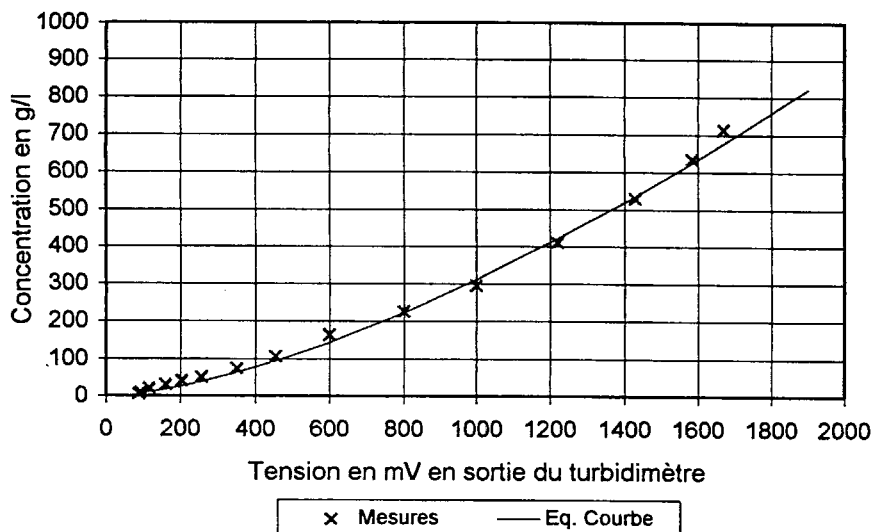
Le niveau d'éclairement ambiant modifie aussi la réponse du capteur. Cet effet est d'autant moins important que le volume de mesure est grand. On estime que pour un capteur immergé sous 2 cm de boue, l'influence de l'éclairement ambiant est négligeable si la concentration $C > 20\text{ g}/\ell$.

Lors des études préliminaires, nous avons pu identifier d'autres causes possibles du manque de reproductibilité. Par exemple, des vibrations mécaniques peuvent entraîner un déblocage de la vis couplant les fibres optiques aux photodétecteurs. Ceci se traduit par une translation de la courbe d'étalonnage, mais il n'y a pas modification de l'allure.

3.3 - L'étalonnage en laboratoire

Rappels : la courbe d'étalonnage exprime la correspondance entre les valeurs de la grandeur mesurée (la concentration en g/ℓ) et les valeurs indiquées par l'instrument (la tension de sortie en mV). Elle concerne un instrument individuellement désigné.

Le Moulin - Etalonnage novembre 1993



La courbe d'étalonnage figurant ci-dessus peut être ajustée par :

$$C = 0,01 \times (V - 10)^{1,5} \quad \text{pour } C \geq 5\text{g/l}$$

4 - L'analyse des résultats sur le site du Moulin

L'installation sur le site du Moulin d'un prototype nous a permis, dans un premier temps, de tester le capteur in situ au niveau des résultats obtenus, mais aussi au niveau de sa conception (robustesse, étanchéité, vieillissement).

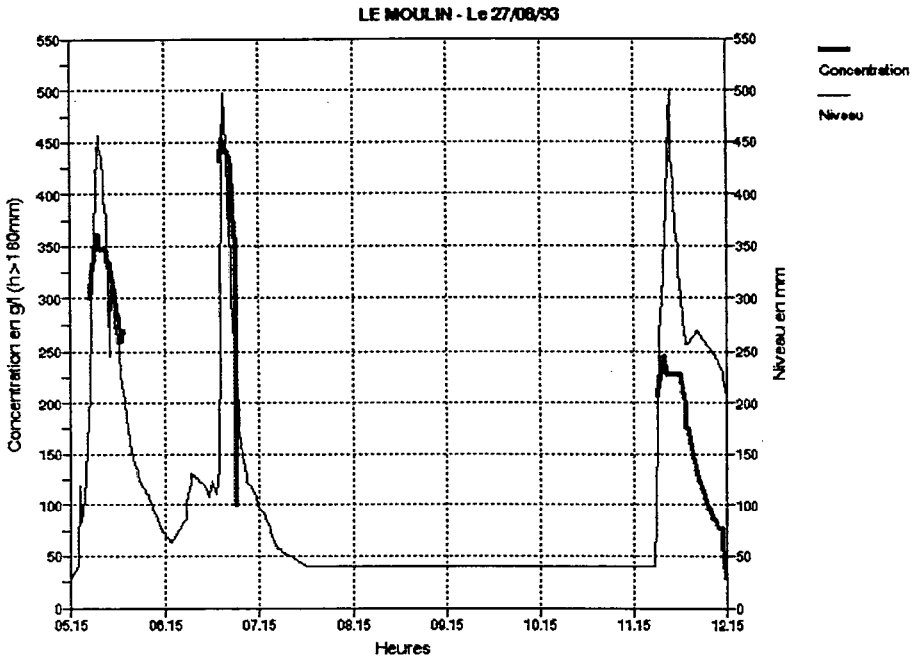
Un premier cycle d'essais s'est déroulé entre mai et novembre 1993. Durant cette période, deux prototypes ont été installés aux bassins versants du Moulin (8 ha) et du Laval (86 ha).

Les mesures enregistrées par la centrale SAB 600 HDL nous ont été communiquées périodiquement et nous avons pu traiter ces données en les corrélant aux mesures de niveau pour s'assurer de l'immersion de la tête du capteur. *Car la condition première de fonctionnement du capteur est l'immersion de la tête de mesure dans un fluide chargé.* Lorsque le capteur est dans l'air, il se comporte en détecteur de luminosité ambiante, ce qui permet de vérifier le bon fonctionnement de l'électronique et du système d'horloge.

Durant cette période d'installation, nous avons pu comparer nos résultats avec ceux du préleveur d'échantillons. Les points obtenus ont mis en évidence un désaccord entre les deux systèmes de mesure. Nous avons dans un premier temps attribué cela à l'électronique.

En effet, l'alimentation 12V cc, fournie sur le site, nous a amené à rajouter un convertisseur cc/cc pour alimenter le conditionneur en $\pm 15\text{V cc}$ tout en gardant une faible consommation (2,5 Watt). Le convertisseur cc/cc est une véritable source de parasites haute fréquence, qui se sont avérés très gênants et dont l'identification et l'élimination ont été délicates.

Malgré cela, nous avons pu constater la bonne tenue dans le temps du dispositif, qui ne manifeste pas de problème de vieillissement, ni de condensation et aucun dommage sur la tête du capteur. Suite à cela, nous avons réétalonné le capteur et obtenu la courbe présentée au § 3.3.



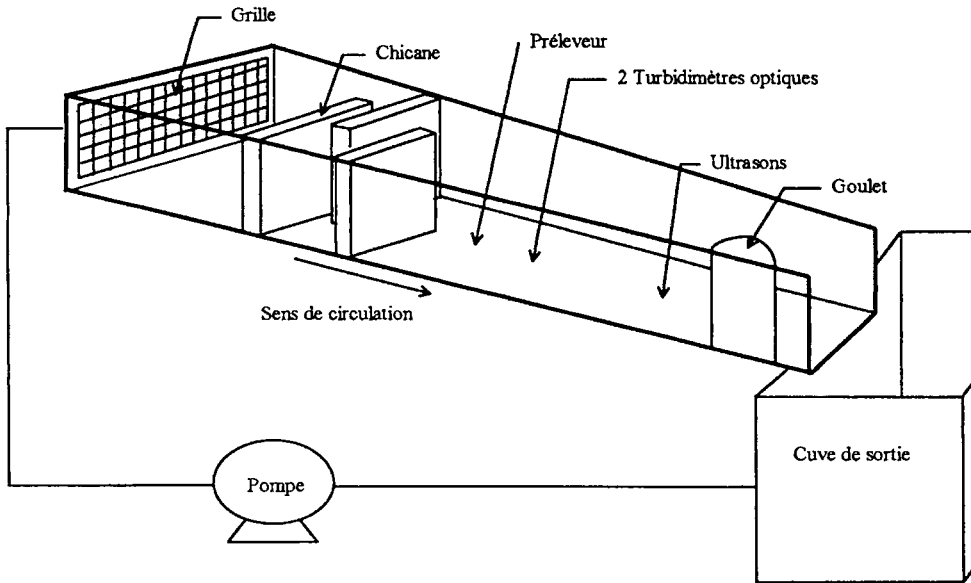
Exemple d'enregistrement obtenu au Moulin.
 Après traitement, on représente la concentration déduite de l'étalonnage en laboratoire et la mesure de niveau en fonction du temps.

5 - Réalisation d'un cycle d'essais en canal

En l'absence d'autres points de comparaison sur site pour les deux prototypes installés (en raison du peu de crues et des défaillances des préleveurs) et afin d'accélérer la validation des prototypes, une campagne de mesure en canal a été menée du 14 au 18/02/1994 avec la division protection contre les érosions du Cemagref, groupement de Grenoble.

En effet, le Cemagref dispose d'un canal à pente variable permettant de reproduire sur modèle réduit des écoulements torrentiels chargés. Les essais réalisés permettaient de tester en écoulement différents matériels dans des conditions aussi proches que possible de celles rencontrées à Draix, du point de vue de la charge solide en particulier. Le but de ces essais est donc de comparer les mesures obtenues avec ce dispositif à la courbe d'étalonnage effectuée en laboratoire, les essais sur le site de Draix n'ayant pas été suffisamment nombreux et concluants pour cela (voir § 4).

5.1 - Description du canal



Le dispositif de mise en circulation des boues est un canal de 4 m de long et d'environ 20 cm de large, avec un rétrécissement à la sortie.

En amont, une grille permet d'arrêter les cailloux et une petite plage de dépôt avant la chicane permet la sédimentation des grosses particules.

Nous avons réalisé des mesures dans une plage de concentrations de matières en suspension (déterminées par les préleveurs) de 0 à 700 g/l.

5.2 - L'exploitation des résultats

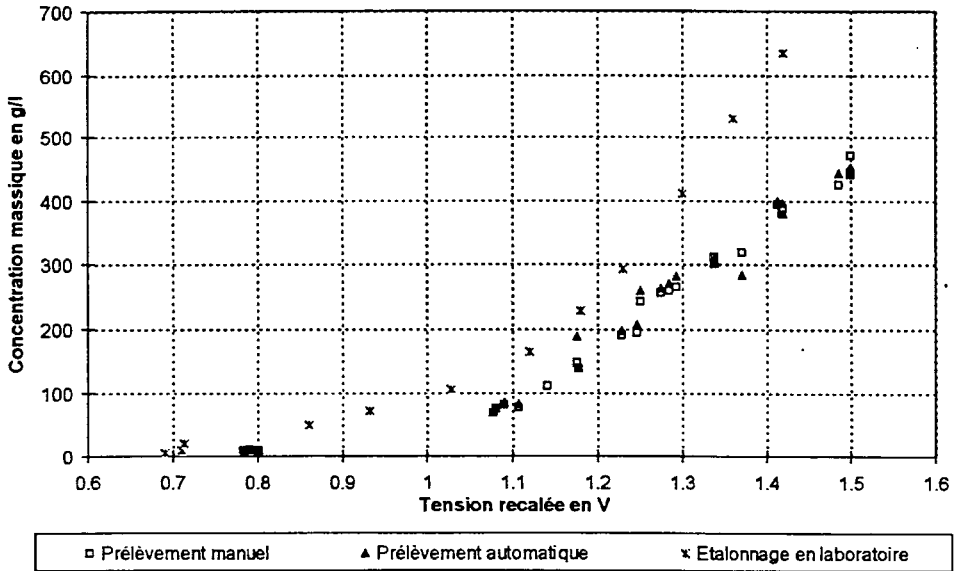
L'exploitation des résultats a mis en évidence un décalage entre les mesures effectuées en canal et celles en laboratoire, pour les deux turbidimètres optiques.

On a représenté, pour l'un des deux turbidimètres, la courbe d'étalonnage obtenue en laboratoire avant la campagne de mesure et la courbe d'étalonnage obtenue en canal grâce aux prélèvements manuels et automatiques.

Afin de déterminer l'origine de ce désaccord entre les résultats en canal et ceux en laboratoire, nous avons refait un étalonnage des deux prototypes dans les conditions décrites au § 3. Les mesures obtenues sont en bon accord avec la courbe d'étalonnage établie précédemment au laboratoire. *Le désaccord entre les résultats en canal et ceux en laboratoire n'est donc pas un défaut de reproductibilité des deux appareils (par exemple le vieillissement du capteur).*

La sensibilité du capteur étant fonction de la taille "moyenne" des particules en suspension (voir § 1), le désaccord observé est imputable à la différence de granulométrie des M.E.S. (Matières En Suspension) lors des deux séries de mesures.

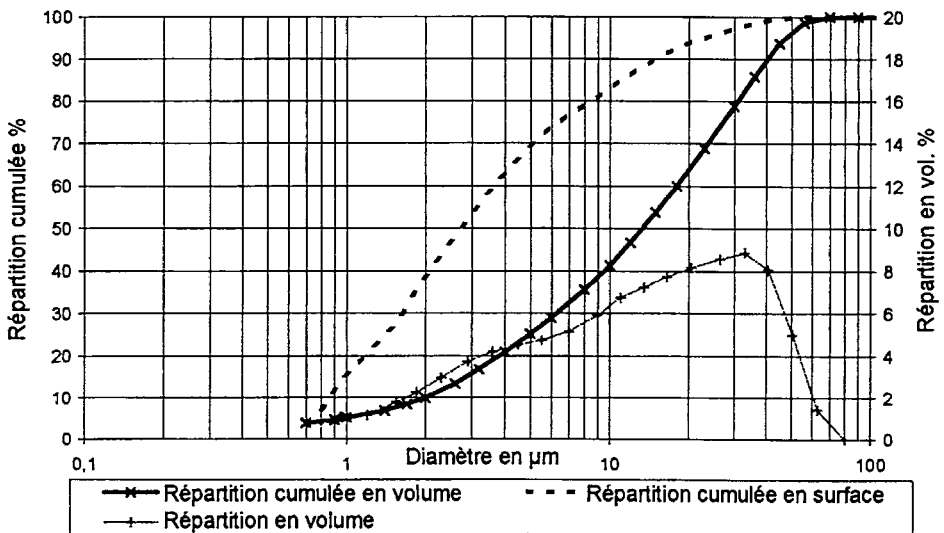
Capteur (15) - Comparaison entre les résultats en canal et ceux en laboratoire



5.3 - Analyses granulométriques des échantillons prélevés

La distribution en volume d'échantillons prélevés en sortie du canal lors des essais est la suivante :

Diamètre à 10 % = 2,02 μm	Diamètre moyen = 17,7 μm
Diamètre à 50 % = 13,31 μm	Surface spécifique = $1,26 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$
Diamètre à 90 % = 40,42 μm	Diamètre \mathcal{D} = 4,74 μm



5.4 - Interprétation

Ces essais nous ont permis de mettre en évidence l'influence de la surface spécifique sur la sensibilité du capteur de turbidité : elle est 1,5 fois moins grande lors des expériences faites en canal que lors des expériences effectuées en laboratoire. En effet, la méthode d'agitation employée au laboratoire est plus efficace pour la mise en suspension que le simple écoulement dans un canal.

Ces résultats ne mettent pas en cause le fonctionnement du turbidimètre optique mais posent le problème d'obtenir des échantillons de boues représentatifs de la suspension lors d'une crue, ceci pour pouvoir étalonner le turbidimètre dans les conditions réelles de fonctionnement.

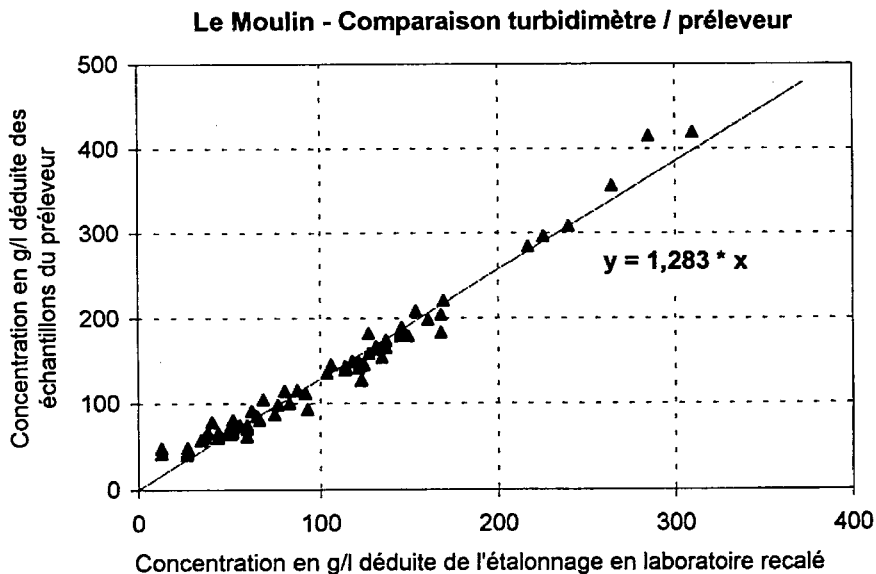
6 - Le Moulin - Comparaison turbidimètre / préleveur

6.1 - Courbe de comparaison

Les crues, qui se sont produites entre juin et septembre 1994, nous ont permis de comparer pour le site du Moulin les résultats du turbidimètre avec les résultats des prélèvements.

Ces 80 points de comparaison vont nous permettre d'établir la courbe d'étalonnage sur site du turbidimètre installé au Moulin.

Cette courbe met en évidence la bonne corrélation entre la concentration déduite des mesures du turbidimètre, à partir de l'étalonnage fait au laboratoire en novembre 1993 (voir § 3.3), et la concentration des échantillons du préleveur du Moulin.



Les points de comparaison s'alignent sur une droite passant par l'origine et d'équation :

$$\text{Concentration échantillon préleveur} = 1,28 \times \text{concentration recalée / nov. 93}$$

6.2 - Interprétation

La pente de 1,28 indiquerait que la surface spécifique moyenne des matières en suspension lors des crues est 1,28 fois plus faible que les échantillons utilisés au laboratoire pour faire l'étalonnage et 3 fois plus forte que lors des essais en canal faits à Grenoble. Une analyse granulométrique des échantillons prélevés est prévue afin d'accréditer cette hypothèse.

7 - Conclusion

Les études théoriques et expérimentales menées au sein du Groupe d'Instrumentation des Procédés et Systèmes en Ecoulement (GIPSE) ont abouti à la mise au point d'un turbidimètre à fibres optiques utilisant les mécanismes de rétrodiffusion et d'atténuation de la lumière par des particules en suspension dans l'eau.

La sensibilité et l'étendue de mesure de ce type de capteur dépendent du rayon moyen des particules en suspension ; on a obtenu typiquement une sensibilité de 2 mV par g/l et une étendue de mesure de 10 à 700 g/l pour des boues de densité 2,5 et dont le diamètre moyen volume/surface est de l'ordre de 3 µm.

A ce stade de développement, l'utilisation des turbidimètres, que nous avons réalisés, nécessite un étalonnage dans les conditions réelles d'utilisation. Néanmoins nous rappelons que ces turbidimètres satisfont au cahier des charges en ce qui concerne l'encombrement, la consommation électrique et la bonne tenue dans le temps face aux conditions climatiques.

8 - Bibliographie

- [1] Cemagref, division protection contre les érosions, groupement de Grenoble, 1988 - *Les bassins versants de Draix - Présentation et synthèse*. Mai 1988
- [2] CHANDRASEKHAR (S.), 1950 - *Radiative transfer*. Dover Publications, New York.
- [3] KERKER (M.), 1969 - *The scattering of light and other electromagnetic radiation*. Academic Press, New York, 1969).
- [4] VAN de HULST (H.C.), 1957 - *Light scattering by small particles*. Wiley, New York.
- [5] BOHREN (C.F.), HUFFMAN (D.R.), 1983 - *Absorption and scattering of light by small particles*. Wiley, New York.
- [6] RYTOV (J.M.), KRAVTSOV YU (A.), TATARSKII (V.I.), 1989 - *Principles of Statistical Radiophysics*. Springer Verlag, Berlin.
- [7] ANDRE (J.), BERGOUIGNOUX (L.), FIRPO (J.L.), MISGUICH-RIPAULT (J.), 1994 - *Prototype pour la mesure des transports solides*, Rapport final de la convention signée entre le Cemagref, groupement d'Aix-en-Provence et l'I.U.S.T.I., Université de Provence, mars 1994.
- [8] GROENHUIS (R.A.J.), FERWEDA (H.A.), TEN BOSCH (J.J.), 1983 - , Appl. Opt., **22**, 2456.
- [9] CAMBON (J.P.), 1984 - *Eléments pour définir les appareils à mettre en service sur les bassins de montagne*. Cemagref, division hydraulique générale, Aix-en-Provence.

[10] CAMBON (J.P.), COMBES (F.), MURA (R.), NARBONNE (A.), OLIVIER (J.E.), 1984 - *Communication sur les bassins versants expérimentaux de Draix - France - Mesures de l'érosion*, Commission Européenne des Forêts, 14^{ème} session du groupe de travail sur l'aménagement des bassins versants de montagne, Torremolinos.

[11] MEUNIER (M.), CAMBON (J.P.), OLIVIER (J.E.), MATHYS (N.), COMBES (F.), 1987 - *Bassins versants expérimentaux de Draix : compte rendu de recherches n°1 en érosion et hydraulique torrentielle*. Cemagref - O.N.F. - R.T.M..

[12] GAILLAC (B.), MAS (O.), ZUANON (G.), 1991 - *Etude de la faisabilité d'un turbidimètre optique*. Rapport de projet dans le cadre du DESUP Instrumentation Capteurs et Communication Industrielle, Université de Provence.

Mesure du débit solide des écoulements hyperconcentrés en matériaux fins par une jauge à absorption du rayonnement gamma¹

Gérard MEYER

Centre d'Etudes Atomiques,
Département d'Applications et de
Météorologie des Rayonnements
Ionisants, Service d'Applications
des Rayonnements, BP 52,
91193 Gif-sur-Yvette Cedex, France

Maurice MEUNIER - Jean-Emmanuel OLIVIER

Cemagref, division protection contre les érosions,
2, rue de la Papeterie, BP 76,
38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

1 - Introduction

La mesure du débit solide dans les cours d'eau reste une entreprise délicate et ardue. De nombreux dispositifs ont été conçus au cours du temps, comme on peut s'en rendre compte en lisant la littérature spécialisée : "Etude de la faisabilité de la mesure du transport solide en rivière", BOIS P., UJF-IMG, avril 1989. Mais aucun n'est universellement adaptable à chaque situation particulière et il est donc nécessaire d'effectuer pour chaque site une étude spéciale et choisir le principe de mesure qui semble le plus adéquat.

Sur les bassins versants de Draix, la mesure du débit solide a été conçue dès l'origine selon deux dispositifs :

- les matériaux grossiers et une partie des fines se déposent dans une plage de dépôts fermée par un barrage filtrant. Un suivi topographique permet d'obtenir le volume global de ces sédiments pour chaque crue ;
- les matériaux fins échappés de la plage transitent et leur concentration est mesurée à partir de prélèvements effectués dans le canal autojaugeur qui sert à la mesure des niveaux.

Les prélèvements sont effectués grâce à des préleveurs automatiques du commerce déclenchés à partir des enregistrements des niveaux. Il se trouve que les défaillances d'appareillage sont nombreuses et que les lacunes des mesures sont nombreuses (de l'ordre de 60 à 70 %). De plus, la gestion de ces appareils est lourde et l'obtention des résultats de mesure contraignante en travail de laboratoire (voir l'article de MATHYS N. dans le présent compte rendu de recherche : "Caractérisation des matières en suspension. Mise au point d'une méthode rapide d'estimation des concentrations des prélèvements").

¹ Cet article est un résumé des rapports effectués par le CEA pour le compte du Cemagref pour l'étude de la jauge.

Un projet de recherches a donc été lancé pour tester la mesure de ces fortes concentrations de matières en suspension à partir de l'absorption de rayonnements gamma. Le site choisi est celui du Laval où les concentrations mesurées ont atteint 500 g/l.

2 - Solution adoptée

Le principe (figure 1) consiste à installer une ou plusieurs sources radioactives dans un mur du canal autojaugeur et à mesurer dans le mur opposé le rayonnement gamma reçu par un scintillateur.

L'absorption du rayonnement gamma par les matériaux solides diminue l'intensité recueillie, l'absorption variant exponentiellement en fonction de la concentration, ce qui permet de la calculer. L'analyse théorique de l'absorption est possible, mais un étalonnage est en général nécessaire. Des procédés s'inspirant du même principe sont utilisés hors de France ("The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems"), CRICKMORE M.J., TAZIOLI G.S., APPLEBY P.G., OLDFIELD F., UNESCO.PHI, Paris, 1990).

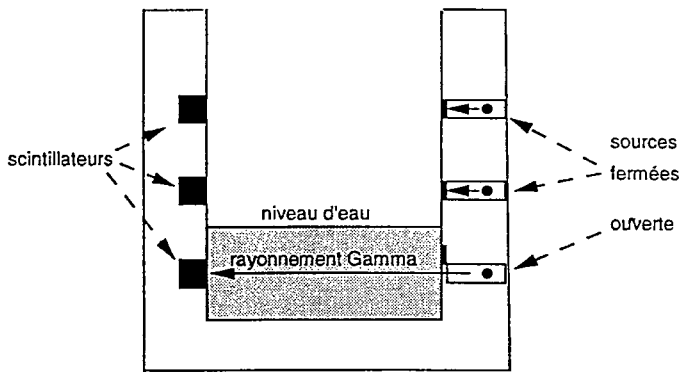


Figure 1 : Schéma de principe

Des études préliminaires ont montré que pour les gammes de concentrations susceptibles d'être rencontrées dans les eaux de ruissellement, l'utilisation du rayonnement de 662 keV émis par le césium 137/baryum 137 se révélait bien adaptée. L'emploi du cobalt 60 aurait pu être envisagé, mais ce radioélément aurait nécessité une protection biologique plus importante, à performance égale.

Ainsi, ont été définis les différents éléments constituant la jauge :

- **le porte-source** assurant la collimation des faisceaux et la protection biologique. Ces appareils ont été conçus pour s'ouvrir de façon automatique lors de l'arrivée de la crue et se refermer lorsque le niveau de l'eau a baissé ;
- **le détecteur** est d'un modèle classique. Il est constitué d'un cristal d'iodure de sodium et d'un préamplificateur, fournissant des impulsions de hauteur proportionnelle à l'énergie des photons incidents ;
- **la chaîne de mesure** et d'acquisition est composée d'une petite station d'acquisition (Rustrasck) interfacée avec le détecteur de rayonnements au moyen de cartes développées spécialement à cette fin. Elle est d'une grande souplesse d'emploi et les acquisitions peuvent être interprétées au laboratoire, à l'aide d'un logiciel spécifique (Pronto).

3 - Définition des matériels

3.1 - Les porte-sources

Ces matériels ont pour vocation principale la protection biologique. Ils répondent aussi à la nécessité de limiter dans l'espace le faisceau de rayonnement émis par les sources radioactives, afin qu'une source éclairant un détecteur n'aille pas influencer le détecteur voisin, correspondant à un autre volume de mesure.

Les porte-sources sont constitués d'un coeur de tungstène recevant la source (20 mCi de césium 137), (photos 1 et 2). Les rayonnements nécessaires à la mesure sortent de la protection par un canal de collimation qui peut être occulté par un volet mobile, en tungstène lui aussi et actionné par un électro-aimant. Les mesures n'étant nécessaires que pendant les crues, un capteur déclenche l'ouverture des volets à l'arrivée de l'eau dans le Parshall. En fin de crue, le capteur de présence d'eau coupe l'alimentation électrique des électro-aimants et les volets reviennent en position de protection à la fois par gravité et sous l'action d'un ressort de rappel.

Les trois porte-sources sont placés sur un montage métallique (photos 3, 4, 5 et 6) logé dans le béton du canal Parshall et isolé du courant liquide par une plaque d'acier. Ils sont ainsi à l'abri de l'humidité et des chocs mécaniques.

Les principales caractéristiques du radionucléide utilisé sont les suivantes :

Période : $30,15 \pm 0,06$ ans

Principaux rayonnements émis :

Nature	Energie (keV)	Intensité (%)
Electrons	624,2	7,6
	655,7	1,4
	660,3	0,3
Bêta	max : 511,5	5,4
	moy : 174,0	
Photons X	31,8	1,9
	32,2'	3,6
	36,3	1,0
Photons gamma	661,66	85,2

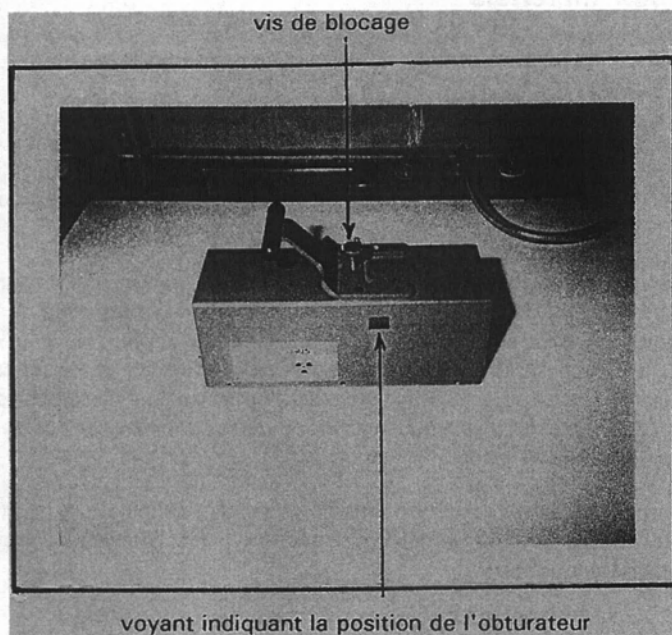


Photo 1 - Porte-source avec capotage

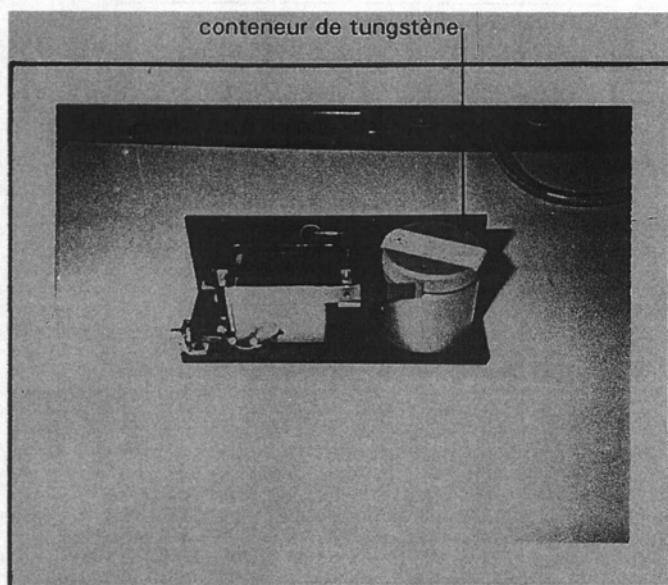
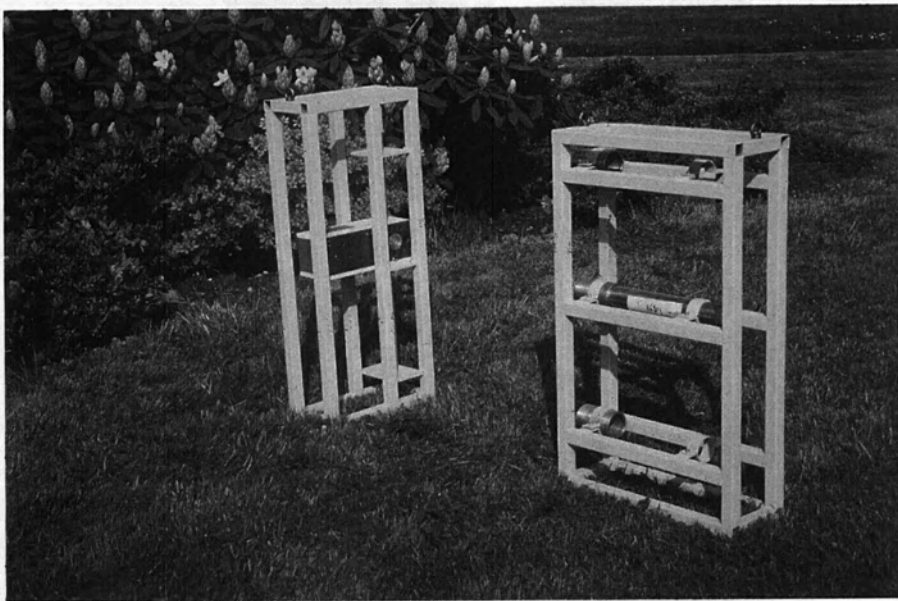
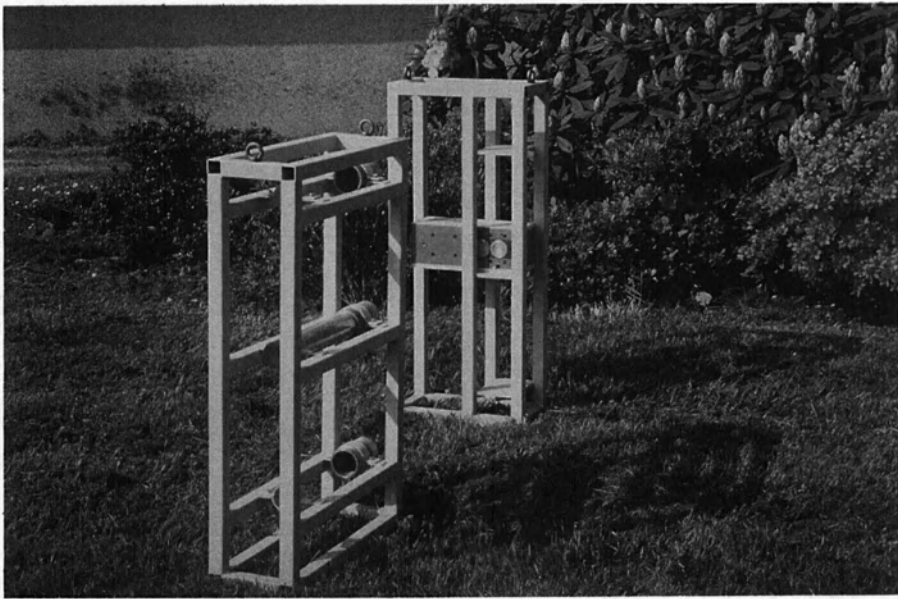


Photo 2 - Porte-source sans capotage



Photos 3 et 4 : Porte-source et porte-détecteur en position

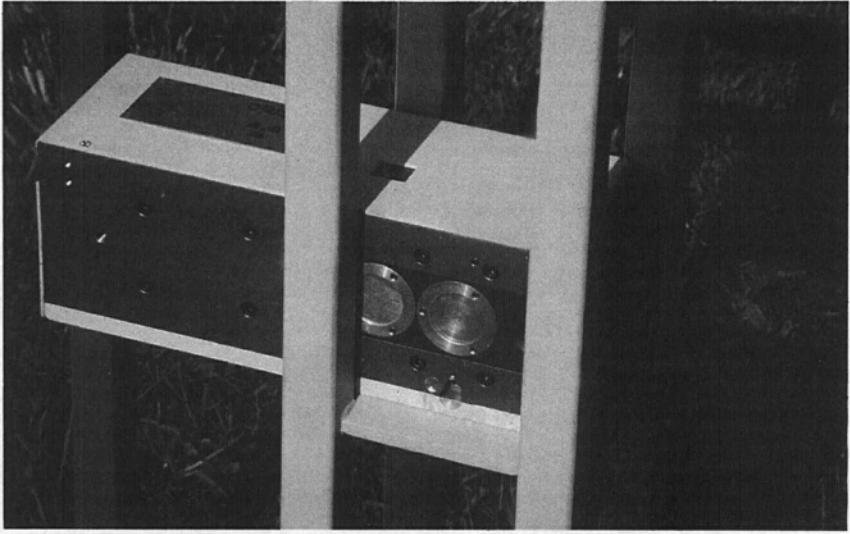


Photo5 : Porte-source en position sur son support



Photo 6 : Porte-décteur en position sur son support

3.2 - Les détecteurs

Placés face aux porte-sources, ils reçoivent les photons non absorbés ou diffusés et le nombre de photons reçu peut être relié à la concentration en sédiment par une loi physique exponentielle dont les paramètres sont déterminés par un étalonnage préalable au laboratoire. (Voir § 6 : Etalonnage de la sonde). Ces détecteurs sont des sondes à scintillations SGRS5410, contenant un cristal d'iodure de sodium activé au thalium et un photomultiplicateur. La partie sensible du détecteur est collimatée par un cylindre de plomb qui vient compléter la collimation de la source, en réduisant le volume de mesure et partant, l'influence des sources voisines.

Les trois détecteurs sont placés eux aussi dans un montage métallique robuste et logé dans la paroi du canal Parshall opposée à celle contenant les sources. (Voir les photos 3, 4, 5 et 6).

3.3 - La chaîne d'acquisition

A été choisi un système connu dans le Service d'Applications des Radio-éléments et qui permet de gérer les acquisitions avec souplesse. Celles-ci ne commencent que lorsqu'un seuil de comptage prédéterminé est atteint, par exemple lorsque les porte-sources sont ouverts et que le taux de comptage devient significativement différent du bruit de fond. Les acquisitions se poursuivent sur une période pouvant atteindre plusieurs semaines. La fréquence des mesures est réglable de quelques secondes à plusieurs heures et la consommation électrique est compatible avec les puissances disponibles sur le site de Draix.

Avec cette centrale d'acquisition est fourni un logiciel de dépouillement (Pronto) et les données peuvent être récupérées sous formes de fichiers interprétables sous d'autres systèmes.

4 - Contrôles de radioprotection

L'installation de sources radioactives dans le milieu naturel est sévèrement réglementée en France et n'est délivrée qu'après examen très approfondi du dossier par la Commission Interministérielle de Radioprotection des Eléments Artificiels (CIREA).

Pour établir ce dossier, une étude de radioprotection est nécessaire. Celle-ci a été effectuée par le Département Sécurité, Contrôle et Environnement du CEA et les résultats sont présentés dans ce § 4.

4.1 - Méthode de mesure des expositions externes

L'équivalent de dose reçu par la peau est évalué à la profondeur de référence égale à 0,07 mm (7 mg.cm^{-2}). L'équivalent de dose reçu en profondeur par l'organisme entier et éventuellement par le cristallin est évalué à la profondeur de 3 mm (300 mg.cm^{-2}).

En fonction de la distance source-point de mesure, de manière à obtenir la meilleure adéquation entre la géométrie d'irradiation et le volume sensible du détecteur, deux types de dosimètres ont été utilisés :

- les dosimètres thermoluminescents au fluorure de lithium (Fli) type TLD 700 HARSHAW de dimensions $3,2 \times 3,2 \times 0,9 \text{ mm}^3$;
- la BABYLINE, chambre d'ionisation de volume utile 0,5 litre.

Aucune correction n'a été apportée aux indications fournies par les dosimètres, étalonnés avec le rayonnement du cobalt-60.

4.2 - Débits d'équivalent de dose "obturateur ouvert"

4.2.1 - Dans le faisceau utile

Des mesures ont été effectuées en position "obturateur ouvert" à l'aide de détecteurs FLi, placés dans un étui mince, d'épaisseur égale à environ 7 mg.cm^{-2} . Cet étui a été positionné au contact de la fenêtre de sortie du faisceau.

Les résultats obtenus donnent une valeur moyenne du débit d'équivalent de dose égale à 11 mSv.h^{-1} .

Une radiographie KODAK type X-OMAT-MA a été réalisée au contact de la fenêtre de sortie du faisceau pendant un temps d'exposition d'une heure afin de déterminer les dimensions du faisceau. On a obtenu une section rectangulaire de $26 \times 15 \text{ mm}^2$.

4.2.2 - Autour de l'appareil, au contact ou à distance

Des mesures de débits d'équivalent de dose ont été effectuées à l'aide de détecteurs FLi placés au contact du cylindre contenant la source et sur les parois du porte-source. Les résultats sont répertoriés dans le tableau 1 et les points de mesures localisés sur la figure 2.

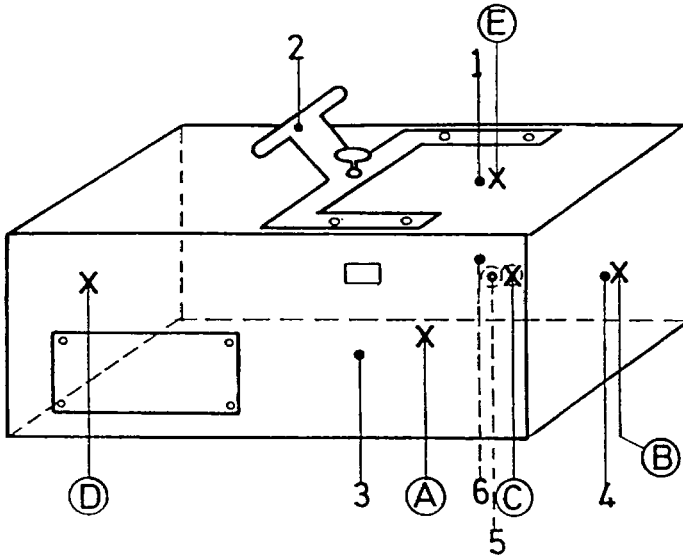
Point de mesure	Débit d'équivalent de dose sous 7 ou 300 mg.cm^{-2} en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$
1	621
2	10
3	364
4	303
5	221
6	306
7	461
8	297
9	1309
10	493

Tableau 1 : Débits d'équivalent de dose obtenus à l'aide de FLi placés sur le porte-source en position "obturateur ouvert"

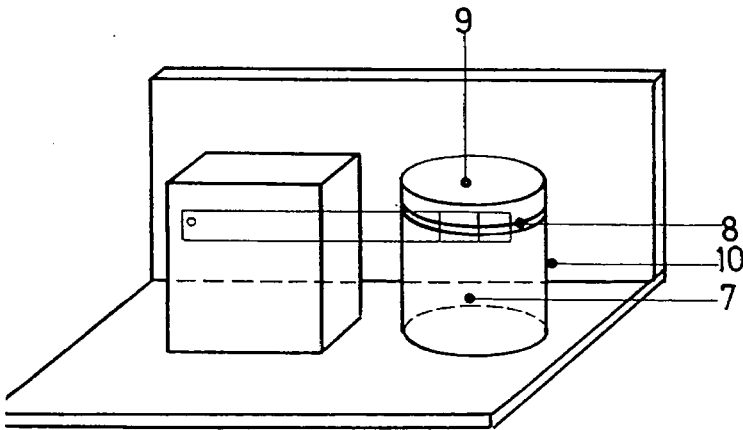
D'autre part, des mesures ont été faites autour de l'appareil à l'aide d'une BABYLINE afin de délimiter les isodoses $2,5$ - $7,5$ et $25 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. Le tableau 2 indique les distances auxquelles ces débits d'équivalent de dose sont obtenus. Les points de mesures sont repérés sur la figure 2.

Axe de mesure	Distances en cm pour avoir :		
	$25 \mu\text{Sv.h}^{-1}$	$7,5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$	$2,5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$
A	14,5	29	52
B	15	28,5	52
C	14,5	27,5	52
D	-	-	-
E	24	42	81

Tableau 2 : Distances aux parois (en cm) auxquelles se situent les isodoses 25 - $7,5$ - $2,5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$



Porte-source avec capotage



Porte-source sans capotage

Figure 2 : Localisation des points de mesure avec et sans capot

4.3 - Débits d'équivalent de dose "obturateur fermé"

Une radiographie ainsi que des détecteurs FLi ont été placés dans le plan de sortie du faisceau pendant 17 heures. Aucune fuite de rayonnements n'a pu être décelée sur la radiographie. Quant au débit d'équivalent de dose mesuré avec les FLi, il est égal à environ $36 \mu\text{Sv.h}^{-1}$

Des mesures de débits d'équivalent de dose ont été réalisées "obturateur fermé", à l'aide de dosimètres FLi placés au contact du conteneur de la source et sur les parois du capotage du porte-source. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 3 et les points de mesure localisés sur la figure 3.

Point de mesure	Débit d'équivalent de dose mesuré ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
1	510
2	10
3	300
4	247
5	153
6	288
7	401
8	269
9	1238
10	416

Tableau 3 : Débits d'équivalent de dose obtenus à l'aide de FLi placés sur le porte-source en position "obturateur fermé"

Les emplacements des isodoses 2,5 - 7,5 et $25 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ ont été localisés dans la position "obturateur fermé" à l'aide d'une BABYLINE. Les résultats obtenus sont identiques à ceux du tableau 2.

4.4 - Contrôle de non contamination

Un frottis réalisé sur les faces extérieures de l'appareil a été analysé par le Laboratoire d'Analyses Nucléaires du Département Sécurité, Contrôle et Environnement du Centre d'Etudes de Saclay. Aucune trace de contamination supérieure à la limite de détection (Activité $\beta < 7,2.10^{-2}$ Bq) n'a pu être décelée par comptage β global.

4.5 - Risques d'exposition externe

4.5.1 - Dans des conditions normales d'utilisation

Le tableau 2 permet de délimiter le périmètre d'exemption pour des travailleurs non exposés. Le débit d'équivalent de dose $2,5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ (limite pratique pour ces travailleurs non exposés) est atteint à environ 80 cm autour de l'appareil.

L'annexe jointe à cet article rappelle les limites d'exposition externe données dans le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants, ainsi que les règles et critères permettant la classification des travailleurs exposés.

4.5.2 - Dans des conditions anormales d'utilisation

En cas de passage dans le canal sans fermeture de l'obturateur l'équivalent de dose annuel admissible à l'organisme entier (50 mSv) serait atteint en sortie de faisceau après un temps d'exposition continu de 4 h 30 environ.

4.6 - Recommandations de radioprotection

4.6.1 - Information du personnel

Le personnel de l'entreprise utilisatrice doit être clairement informé de la présence de la source radioactive, des risques associés et de la signification des différentes signalisations.

4.6.2 - Indications apposées sur l'appareil

Toutes les indications sur la source ou la position de l'obturateur, apposées sur l'appareil ou autour, doivent être rédigées en langue française conformément à la loi du 31 décembre 1975 et à la circulaire d'application du 14 mars 1977 (loi relative à l'emploi de la langue française).

4.6.3 - Intervention sur le bloc émetteur, contrôles réglementaires

Toute intervention sur le bloc émetteur, en particulier le démontage du porte-source, doit se faire en position "obturateur fermé" par le fournisseur ou sous l'autorité de la personne compétente de l'entreprise utilisatrice (désignée conformément au décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986), par une personne informée des risques encourus et classée en catégorie A (directement affectée aux travaux sous rayonnements).

Les contrôles réglementaires, prévus par le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986, devront être effectués selon les modalités définies dans les arrêtés :

- du 2 octobre 1990, fixant la périodicité des contrôles des sources scellées et de leurs dispositifs de protection ;
- du 1^{er} juin 1990, indiquant les méthodes à suivre pour l'exécution de ces contrôles.

4.6.4 - Prévision des risques particuliers

La personne compétente devra établir des consignes de sécurité à appliquer en cas d'incident et d'incendie prévoyant les dispositions à prendre et les interventions à effectuer.

En particulier, en cas d'incendie susceptible d'affecter le confinement de la source scellée, le risque de contamination surfacique et atmosphérique serait à considérer. Les limites annuelles d'incorporation (L.A.I.) par ingestion et inhalation sont fixées respectivement à 4.10^6 et 6.10^6 Bq pour l'exposition professionnelle et à un dixième de ces valeurs pour le public en ce qui concerne le césium 137.

5 - Prescriptions de la Commission Interministérielle de Radioprotection des Éléments Artificiels (C.I.R.E.A.)

Les contrôles de radioprotection explicités au § 4 montrent que la présence des sources reste sans danger dans les conditions normales d'utilisation : aucun rayonnement lorsque les obturateurs sont fermés, rayonnement de débit d'équivalent de dose de 11 mSv.h^{-1} dans le canal, pratiquement nul ailleurs, lorsque l'obturateur est ouvert. Avec un tel débit, il faudrait rester exposé pendant 4 h 30 dans le canal pour recevoir l'équivalent de dose annuel admissible à l'organisme entier. Avec ces résultats, le C.I.R.E.A. a donné son accord à l'installation du dispositif, selon les prescriptions suivantes :

- En fonctionnement normal, les deux éléments, porte-source et détecteur, sont disposés de part et d'autre d'un canal en béton dans lequel s'écoulent les crues.
- Lorsque le niveau d'eau dans le canal atteint une hauteur suffisante, un contact électrique placé au-dessus de la source agit sur le système d'obturation. En cas de coupure de courant un ressort de rappel ramène l'obturateur en position fermée. La position de l'obturateur est matérialisée par un voyant situé sur l'une des faces latérales du porte-source (figure 1) :
 - couleur verte : obturateur fermé,
 - couleur rouge : obturateur ouvert.
- Un report de cette signalisation devra être installé dans l'abri contenant les centrales d'acquisition. Cet abri devra être fermé à clef.
- Une clôture sera mise en place autour du dispositif de mesure. Sur cette clôture, seront installés des panneaux signalant la présence d'une source radioactive sous forme scellée : trèfle rouge sur fond blanc. Cette même signalisation ainsi que les caractéristiques exactes du radionucléide utilisé (période, activité ...) devront être apposées sur le porte-source et sur l'abri.
- Enfin, le bon fonctionnement de l'ensemble (et notamment la fermeture des obturateurs) sera interrogé à distance par minitel, notamment après chaque crue.

6 - Etalonnage de la sonde Cemagref

6.1 - Méthodes et moyens utilisés pour étalonner la jauge

Le dispositif expérimental adopté est représenté par la figure 3. Cette configuration où la source et le détecteur sont en disposition verticale a l'avantage de pouvoir effectuer des mesures sans influence du gradient de concentration verticale contrairement à une disposition horizontale.

Ce dispositif permet également de mesurer aisément la concentration en argile par simple pesée, ce qui permet de s'affranchir de mesurer des échantillons non toujours représentatifs du mélange et par conséquent induisant de très grandes erreurs sur la concentration.

Pour une épaisseur constante (66 cm) du mélange eau-argile, on relève le taux de comptage et la concentration correspondante. Le taux de comptage est mesuré à l'aide d'une chaîne comprenant :

- un détecteur NaI (1" x 1,5")
- un ictomètre
- un micro-ordinateur PC Olivetti M 21 équipé d'une carte de comptage PRV
- une balance Salter de 200 kg de portée

Quant à la concentration en MES du mélange eau-argile, elle est calculée à partir de la densité du mélange par la relation :

$$C(g/\ell) = 10^3 \times \rho_{\text{argile}} (\rho_{\text{mélange}} - \rho_{\text{eau}}) / (\rho_{\text{argile}} - \rho_{\text{eau}})$$

La masse volumique du mélange étant déduite par la pesée de la totalité du contenu de la cuve :

$$\rho_{\text{eau}} = 1,00 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{argile}} = 2,65 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{d'où } C(g/\ell) = 1606 \times (\rho_{\text{mélange}} - 1)$$

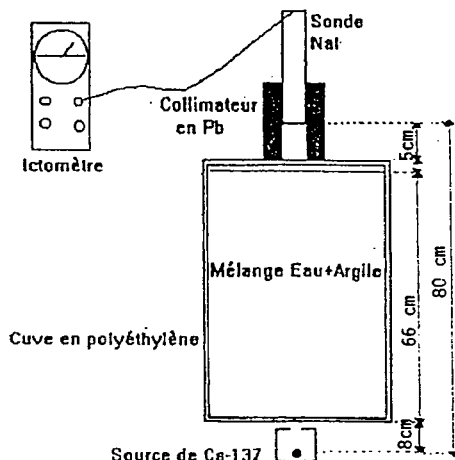


Figure 3

6.2 - Résultats

Le tableau 4 donne les concentrations et les taux de comptage correspondants. On augmente la concentration du mélange en rajoutant successivement une quantité d'argile saturée en eau. La plage des mesures (figure 4) varie de 100 à 700 g/l avec des taux de comptage variant entre 130 et 30 cps obtenus avec une source de 137 Cs de 20 mCi.

Concentration (g/l)	Taux de comptage (cps)	taux de comptage normalisé (N/N0)	Log N/N0 expérim.	Log N/N0 calculé
0	184	1	0	-0,056
112	133	0,72	-0,325	-0,331
232	91	0,49	-0,704	-0,627
334	74	0,4	-0,911	-0,878
421	64	0,35	-1,056	-1,093
522	46	0,25	-1,386	-1,342
632	38	0,21	-1,577	-1,613
683	33	0,18	-1,713	-1,738

Tableau 4

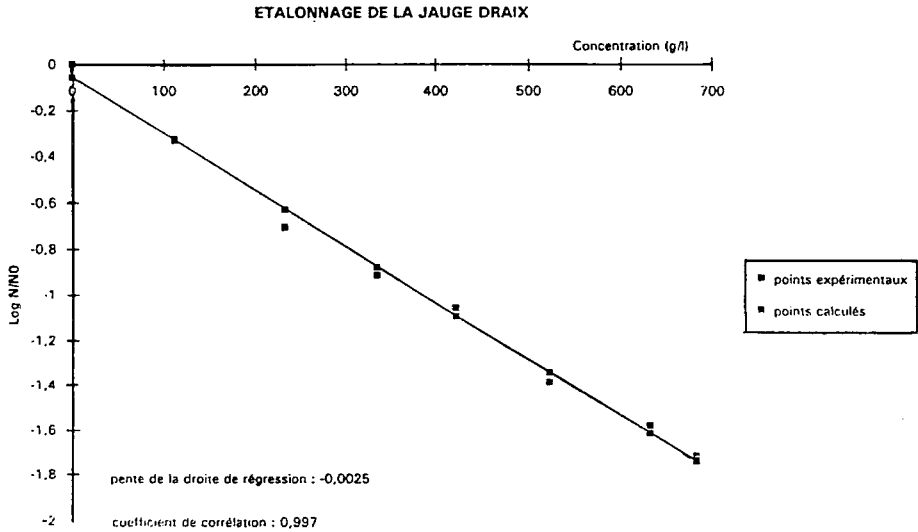


Figure 4

7 - Conclusion

La plage des concentrations mesurées en laboratoire par le prototype étant satisfaisante et les risques pour l'environnement ayant été jugés tout à fait maîtrisables par le C.I.R.E.A., la deuxième étape de l'opération, c'est-à-dire l'installation in situ, est donc envisagée.

8 - Bibliographie

CONAN (N.), 1992 - *Compte rendu des contrôles de radioprotection effectués sur une jauge type "Cemagref" élaborée par le DTA/DAMRI/SAR et équipée d'une source de coesium 137 d'activité 0,74 GBq (20 mCi)*. CEA-DCES-DSCE-SRI-D92-327, mars 1992, 10 p., 1 annexe, 3 fig.

MEYER G., 1993 - *Jauge Cemagref/Draix. Généralités*. DAMRI/SAR, Gif-sur-Yvette Cedex, 4 p. + photos

POGGI (A), 1992 - *Etalonnage d'une jauge à transmission*. DAMRI/SAR, Gif-sur-Yvette Cedex, 5 p.

Annexe

Principales limites pour l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants, dans les conditions normales de travail et dans le cas d'exposition externe, à l'exclusion de toute exposition interne

**Référence : décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 relatif à la protection des travailleurs
contre les dangers des rayonnements ionisants**

Types d'exposition et organes exposés	Limites d'exposition pour		"Limites catégorielles" 12 mois B*
	3 mois consécutifs	12 mois consécutifs A*	
Exposition globale (uniforme)			
Equivalent de dose reçu en profondeur par l'organisme entier	30 mSv** (3 rem)**	50 mSv (5 rem)	15 mSv (1,5 rem)
Expositions partielles (non uniformes)			
Equivalent de dose reçu par :			
- le cristallin de l'oeil	90 mSv (9 rem)	150 mSv (15 rem)	45 mSv (4,5 rem)
- la peau	300 mSv (30 rem)	500 mSv (50 rem)	150 mSv (15 rem)
- les mains, les avant-bras, les pieds, les chevilles	300 mSv (30 rem)	500 mSv (50 rem)	150 mSv (15 rem)

* - Si les conditions habituelles de travail sont telles qu'elles sont susceptibles d'entraîner le dépassement du 1/10 de l'une des limites annuelles de la colonne "A", mais qu'elles ne peuvent normalement pas entraîner le dépassement des 3/10 de l'une de ces limites, le travailleur est classé dans la catégorie B : de cette définition peuvent découler des pseudo-limites, ou "limites catégorielles" annuelles, pour cette catégorie, données dans la colonne "B".

- Si les conditions habituelles de travail sont susceptibles d'entraîner le dépassement des 3/10 de l'une des limites annuelles de la colonne "A", le travailleur est classé dans la catégorie A.

** 12,5 mSv (1,25 rem) pour les femmes en état de procréer.

Hydrologie

Modèles débit-durée-fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le bassin versant représentatif expérimental de Draix.....	97
Gilles GALEA ; Christel PRUDHOMME	
La forêt de montagne : un remède aux crues.....	113
François COMBES ; Antoine HURAND ; Maurice MEUNIER	

Modèles débit-durée-fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le bassin versant représentatif expérimental de Draix¹

Gilles GALEA

Cemagref groupement de Lyon,
division hydrologie-hydraulique,
3 bis quai Chauveau
69336 Lyon Cedex 09, France

Christel PRUDHOMME

Université de Montpellier II, Place
Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 05,
France ; Cemagref Lyon, division hydrologie-
hydraulique - GIS-AMHY, France

Résumé

Les modèles de régionalisation des crues, développés ces dernières années au Cemagref (groupement de Lyon) permettent de caractériser sous forme de courbes débit(Q)-durée-Fréquence le régime hydrologique en crue de bassins versants observés ou non. Ces modèles dits QdF, notamment ceux développés à partir de l'analyse de débits seuils caractéristiques du régime d'écoulement, permettent aussi de construire, pour un site donné, un Hydrogramme Synthétique Mono-Fréquence (HSMF) dont le volume est cohérent avec celui du régime des débits. En particulier, grâce à leur grande représentativité spatiale et à leur large intégration d'échelle (en superficie et en durée), ces modèles QdF en débits seuils peuvent être utilisés pour déterminer des HSMF sur des petits bassins versants de montagne à écoulement rapide. Il s'en suit donc une présentation des modèles et des résultats de validation sur les bassins versants du Laval (0,86 km²) et de la Roubine (1 330 m²) du BVRE de Draix.

Ces modèles QdF, qui permettent de caractériser le régime hydrologique en crue en tout point d'un cours d'eau et de traduire une certaine demande sociale, sont des outils opérationnels privilégiés de la modélisation hydraulique intégrée de bassin.

Mots clefs : Débits de crues - Hydrologie statistique - Modèles synthétiques (débit-durée-fréquence)- Hydrogramme de crue.

¹A paraître dans la revue Hydrologie Continentale.

Abstract

Flow-duration-frequency models and conceptualisation of a synthetic flood hydrograph : validation on the Draix ERB.

Regionalisation flood models, developed last years in Cemagref (Lyon department) allow us to characterise, with Flow(Q)-duration-Frequency curves, the flood hydrological regime of catchments gauged or not. These models, named QdF, and particularly those developed from the analysis of threshold discharges, characteristics of the flow regime, also allow us construction, for a given site, of a Mono-Frequency Synthetic Hydrograph (MFSH), the volume of which being consistent with the flow regime. Because of their spatial representativity and their scale integration (both in area and in duration), QdF models in threshold discharge can be used to establish MFSH on small mountainous basins with rapid runoff. So we present these models and the validation results obtained on the basins of Le Laval (0.86 km²) and La Roubine (1 330m²), ERB of Draix.

QdF models, characterising flood regime in every point of a river and expressing some social need, are favoured operational tools in integrated basin hydraulic modeling.

Key words : Flood - Statistical hydrology - Synthetical models (flow - duration - frequency) - Flood hydrograph.

1 - Introduction

Le sujet proposé se déduit logiquement d'une approche, développée depuis quelques années, sur la connaissance du régime d'écoulement en crue des bassins versants observés ou non, au sens synthétique des débits-durées-fréquences. Nous ferons donc quelques indispensables rappels, pour qu'il soit bien situé.

2 - Modèles QdF : rappels

2.1 - Variables hydrologiques de crue

L'analyse des crues d'un bassin versant concerne nécessairement les variables hydrologiques de crue (figure 1) les plus couramment utilisées en aménagement [OBERLIN, MANSOUR, ORTIZ, 1989a] et pour des durées d qui varient en général de 1 s à 30 jours ($1s \leq d \leq 30 j$) :

- Le débit moyen (Volume) Caractéristique sur une durée continue d , maXimal dans la saison, qui est noté **VCXd** par convention.
- Le débit seuil (**Q**) Caractéristique continûment dépassé sur la durée d , maXimal dans la saison, qui est noté **QCXd** par convention.
- Le débit classé (**D**) Caractéristique, dépassé sur une durée d non continue (cumul), maXimal dans la saison, qui est noté **DCXd** par convention. Cette variable représente une notion particulière de débit seuil, non liée à un événement hydrologique particulier, dont l'intérêt pratique est très réduit et est donc citée ici à titre de comparaison.

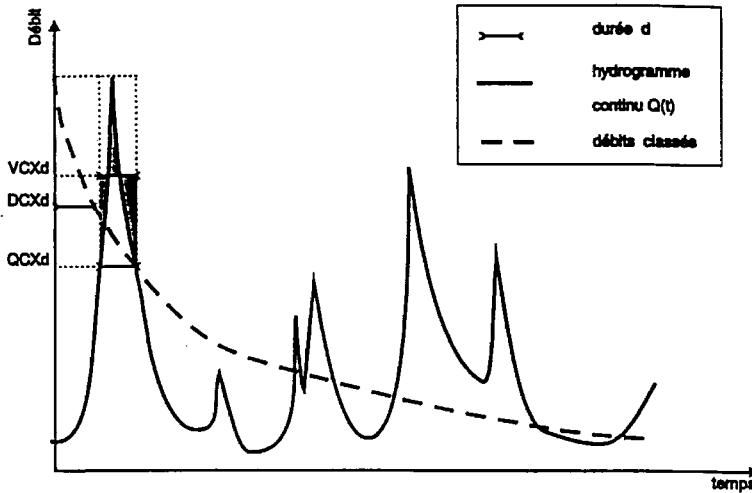


Figure 1 : Définition des VCXd, QCXd et DCXd

2.2 Modèles QdF en VCXd

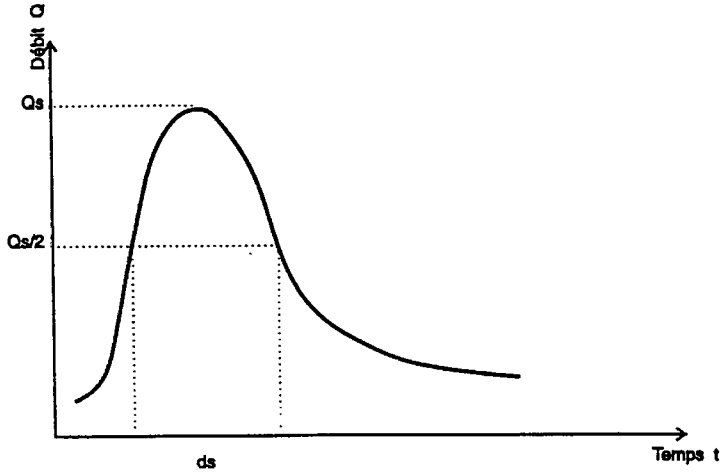
Le concept QdF (courbes débits (Q), durée (d), fréquence (F)) a été établi sur des bases objectives [GALEA et PRUDHOMME, 1993] et son extension à des bassins versants non jaugés, par un processus de normalisation des courbes QdF, est à l'origine d'un outil puissant de modélisation dit QdF. Ce modèle permet de traduire, sous une forme synthétique opérationnelle, la grande variabilité spatio-temporelle des débits de crue (VCXd) d'un bassin versant observé ou non.

En France, trois modèles QdF de référence (Vandenesse, Soyans et Florac), dont les seules entrées sont les caractéristiques locales D et QIXA10 des bassins versants, permettent une bonne restitution des courbes débit-durée-fréquence des principaux régimes de crue observés. Nous rappelons que D est une durée caractéristique de crue du bassin versant. Au sens de la méthode de SOCOSE [CTGREF et al., 1980-1982], elle est définie comme étant la valeur de la médiane conditionnelle des d_s^2 pour la valeur du débit (Q) Instantané maXimal Annuel décennal (QIXA10). La figure 2 montre l'estimation de la durée caractéristique de crue (D) du bassin versant de la Roubine ($S = 1330 \text{ m}^2$) du BVRE de Draix, à partir d'hydrogrammes observés par le Cemagref (groupements d'Aix-en-Provence et Grenoble).

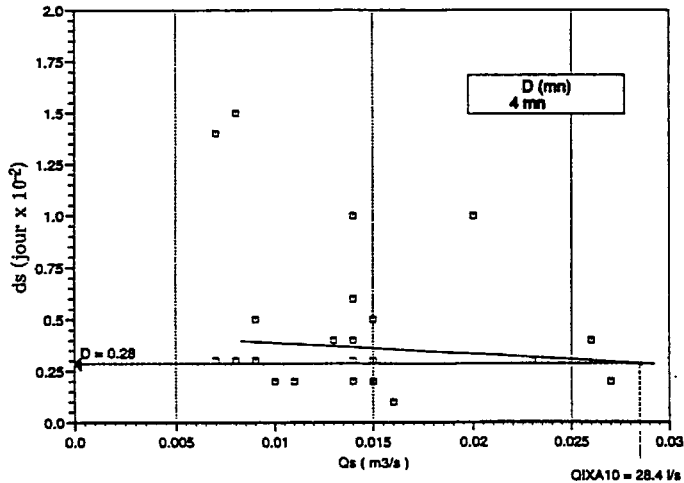
Pour un bassin versant non observé, la validité du transfert effectué dépend du modèle QdF choisi, pour représenter le régime des crues, mais aussi de la précision de l'estimation des caractéristiques locales D et QIXA10, marqueurs du régime du site [GALEA, 1989].

En l'absence d'information hydrométrique, diverses méthodes statistiques [CTGREF et al, 1980-1982 ; Cemagref-Lyon, 1989], ou plus conceptuelles [Cemagref-Lyon, 1994a] permettent d'estimer ces caractéristiques locales, notamment celles de petits bassins ($0,1 \leq S \text{ (ha)} \leq 1\,500$) dont la réaction rapide (quelques mn à 2 ou 3 h) à une précipitation est accompagnée d'un fort écoulement superficiel direct (ruissellement + hypodermique).

² Pour une crue donnée, d_s est le temps pendant lequel la moitié du débit de pointe Q_s est dépassé.



a - Crue - définition des caractéristiques d_s et Q_s



b - Obtention de D

Figure 2 : BVRE de Draix, La Roubine ($S = 1\,330\text{ m}^2$) - Durée caractéristique de crue D du bassin

2.3 - Choix d'un modèle QdF, représentativité pour le site étudié

Le choix du modèle QdF, représentatif de l'écoulement d'un site, nécessite de considérer à la fois le gradex des pluies maximales (G_p) qui renseigne sur le régime pluviométrique (simple influence de type océanique, continentale ou méditerranéenne, ou influence complexe) et les caractéristiques locales D et QIXA10, marqueurs des processus de genèse des crues. La validation des trois modèles précités, sur une soixantaine de bassins versants, a permis de donner une représentation des couples

$(d/D, G_p(d/D)/QIXA10)$. La répartition de ces couples (figure 3) montre que le domaine d'adéquation de Florac est intermédiaire entre celui de Vandenesse et celui de Soyans. Etant donné sa situation, une certaine dispersion expérimentale le caractérise. Pour y inclure le plus grand nombre de couples expérimentaux le concernant, nous avons opté pour un choix de limites (L_1 et L_2) dont les équations sont définies ci-après [PRUDHOMME, 1993] :

- limite entre les modèles de Vandenesse et de Florac

$$\frac{G_p(d/D)}{QIXA10} = \frac{1}{(0,768 \cdot d/D + 2,332)} \quad (L_1)$$

- limite entre les modèles de Florac et de Soyans

$$\frac{G_p(d/D)}{QIXA10} = \frac{1}{(0,419 \cdot d/D + 1,580)} \quad (L_2)$$

Autrement dit, selon que la valeur de $\left(\frac{G_p(d)}{QIXA10}\right)_{\text{site}}$ est inférieure à L_1 , comprise entre L_1 et L_2 , ou supérieure à L_2 , le choix du modèle portera respectivement sur Vandenesse, Florac ou Soyans.

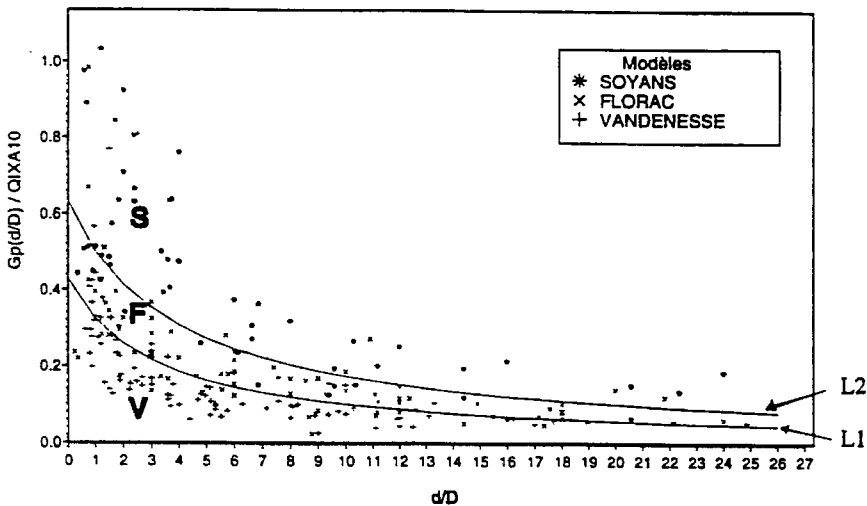


Figure 3 : Critère de choix des modèles QdF

Pour tenir compte de la dispersion expérimentale relative à la situation particulière du domaine de Florac, ce critère de choix doit être calculé pour plusieurs pas de temps. Le maximum de réalisations dans un domaine donné permettra alors de préciser le choix du modèle.

Si on considère par exemple le bassin versant de la Roubine ($D = 4$ mn, $QIXA10 = 28,4$ ℓ/s), on notera (tableau 1) les valeurs de gradex $G_p(d)$ des pluies maximales ; ensuite, pour différentes durées, on calcule L_1 , L_2 et le rapport $L_0 = \frac{G_p(d)}{QIXA10}$. Le tableau 2 donne les valeurs des limites L_1 ,

L_2 et du rapport L_0 .

L_0 étant compris entre L_1 et L_2 , le choix portera donc sur le modèle QdF de Florac pour représenter l'écoulement en crue du bassin versant de la Roubine.

Gradex des pluies	d (h)				
	0,168	0,336	0,504	0,672	0,840
G _p (d) (mm)	4,50	5,47	6,20	7,00	7,50
G _p (d) (ℓ/s)	9,90	6,01	4,54	3,85	3,30

Tableau 1 : Gradex des pluies maximales représentatives du bassin versant

	d (h)				
	0,168	0,336	0,504	0,672	0,840
L ₂	0,380	0,272	0,211	0,173	0,146
L ₀	0,349	0,211	0,160	0,136	0,116
L ₁	0,235	0,162	0,123	0,100	0,084

Tableau 2 : Critères de détermination du modèle de référence, représentatif de l'écoulement en crue du bassin versant

3 - Modèles QdF en QCXd

Ces modèles, développés à partir de l'analyse des débits seuils (QCXd), répondent directement aux besoins hydrologiques d'une modélisation hydraulique intégrée de bassin. En effet, pour répondre à la demande sociale, notamment en matière de lutte contre les inondations, il est nécessaire de considérer les notions classiques de fréquence³, mais aussi de durée de submersion⁴ ou de hauteur maximum⁵. Toutes ces notions doivent être comparées entre elles pour que l'on puisse définir des objectifs de protections clairs et concevoir des aménagements capables de prendre en compte l'ensemble de ces demandes [GILARD, OBERLIN, CHASTAN et GIVONE, 1993]. Les courbes QdF en QCXd rendent possible une telle comparaison, puisqu'elles permettent de transformer toutes ces demandes en une variable comparable, correspondant à la période de retour d'une crue de durée nulle, autrement dit la période de retour (T) du débit de pointe correspondant à l'Objectif de Protection (TOP). Par ailleurs, les entrées des modèles hydrauliques transitoires nécessitent des hydrogrammes de crue. Par cohérence avec le traitement des objectifs de protection, il est nécessaire d'établir, pour la modélisation hydraulique des aléas, des hydrogrammes monofréquence. Les Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquences (HSMF) répondent à cette attente. Il est certain que cette cohérence n'implique pas pour autant qu'ils constituent des phénomènes réels, mais ils sont certainement plus réalistes que des hydrogrammes triangulaires déterminés à partir du seul débit de pointe, en ce sens qu'ils représentent la réunion des débits seuils maximaux dépassés, de même fréquence et pour différentes durées, qui sont des caractéristiques du régime d'écoulement du bassin versant. Par ailleurs, les volumes qu'ils définissent sont cohérents avec ceux pouvant être déduits des observations (cf. § 4).

³ Un aménagement visera à se protéger d'une crue de fréquence centennale.

⁴ Un champ pourra supporter d'être inondé pendant toute une semaine au maximum.

⁵ Un verger ne supportera pas d'eau au-dessus d'un mètre.

3.1 Définition synthétique

L'élaboration des modèles QdF pour les débits seuils QCXd suit la même démarche que celle mise en oeuvre pour les débits moyens VCXd [GALEA et PRUDHOMME, 1993]. Par exemple, nous nous intéressons ici au modèle de Soyans.

Pour les fréquences observables ($T \leq 20$ ans), on vérifie que la distribution de fréquence des QCXd est de type exponentielle (figure 4) ; loi ajustée par la méthode du maximum de vraisemblance ;

Pour les fréquences rares ($T > 20$ ans), l'extrapolation des débits seuils par le gradex des pluies maximales est impossible, seuls les débits moyens sont extrapolables par la méthode du gradex [MICHEL, 1982]. Nous pouvons cependant remarquer, en comparant les distributions relatives aux QCXd et VCXd établies pour $0,5 \leq T$ (an) ≤ 20 , que pour toute distribution de fréquence des débits seuils QCXd peut être trouvée une distribution de fréquence des débits moyens (tableau 3, figures 4 et 5) telle que $QCX(T,d) = VCX(T,d')$ [GALEA et PRUDHOMME, 1994]. En supposant que cela reste vrai au-delà des fréquences observables, on peut utiliser cette "analogie statistique" pour définir des quantiles de débit seuil de fréquences rares.

Quantile de débit	T (an)					
	0,5	1	2	5	10	20
QCX (T, d = 6 h)	15,5	25,1	34,7	47,3	56,9	66,4
VCXT (T, d' = 15 h)	17,4	26,3	35,2	46,9	55,7	64,6
QCX (T, d = 12 h)	11,2	17,2	23,2	31,1	37,1	43,2
VCX (T, d' = 42 h)	11,7	17,4	23,1	30,7	36,5	42,2
QCX (T, d = 18 h)	9,35	14,2	19,1	25,5	30,3	35,2
VCX (T, d' = 65 h)	9,49	14,3	19,1	25,5	30,3	35,1
QCX (T, d = 24 h)	8,49	12,6	16,9	22,5	26,7	30,9
VCX (T, d' = 83 h)	7,96	12,4	16,8	22,7	27,1	31,6
QCX (T, d = 3 j)	5,61	7,23	8,85	11,0	12,6	14,2
VCX (T, d' = 14 j)	5,11	6,90	8,70	11,1	12,9	14,7
QCX (T, d = 6 j)	4,58	5,76	6,95	8,51	9,70	10,9
VCX (T, d' = 25 j)	4,13	5,37	6,61	8,25	9,49	10,7
QCX (T, d = 10 j)	3,53	4,21	4,89	5,79	6,47	7,15
VCX (T, d' = 60 j)	2,70	3,60	4,50	5,69	6,59	7,49

Tableau 3 : Analogie établie entre les quantiles de débit seuil et les quantiles de débit moyen

Nous rappelons que pour les VCXd (et pour $d \geq D/2$), nous avons utilisé une des variantes de l'extrapolation par le gradex [MICHEL et OBERLIN, 1987]: la forme ci-après (1), dite d'extrapolation esthétique [MICHEL, 1982]

$$VCX(T, d) = VCX(T=10, d) + G_p(d) \cdot \ln \left(1 + \frac{G_q(d)}{G_p(d)} \cdot \frac{T-10}{10} \right) \quad (1)$$

où - VCX(T=10,d) = seuil d'extrapolation déduit de la loi exponentielle (figure 5) ;

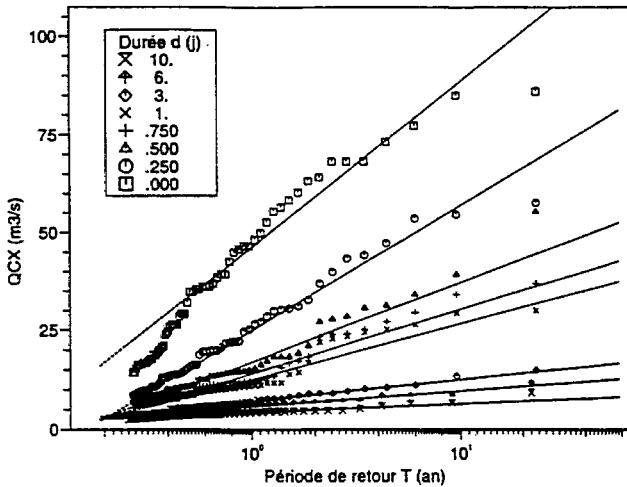
- $G_q(d)$ = gradex des débits pour la durée d ;

- $G_p(d)$ = gradex des pluies maximales sur la durée continue d (exprimé dans la même unité que les débits). Comme pour les débits, on vérifie pour les pluies maximales le même type de loi exponentielle ;

De la même manière que pour l'extrapolation des VCXd aux fréquences rares, nous utilisons pour les QCXd la forme (1) mais cette fois-ci avec un gradex des pluies maximales de durée d' (cf. tableau 3) :

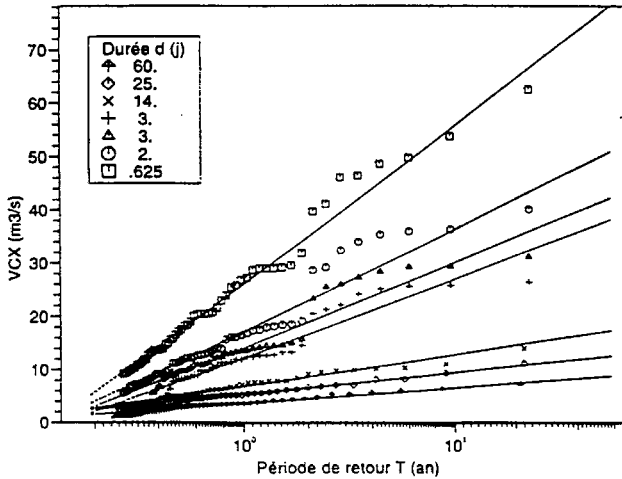
$$QCX(T, d) = QCX(T=10, d) + G_p(d') \cdot \ln \left(1 + \frac{G_q(d)}{G_p(d')} \cdot \frac{T-10}{10} \right) \quad (2)$$

Ainsi, peuvent être définies des courbes QdF de débits seuils maximaux pour des périodes de retour fréquentes (T = 0,5 an) à rares (T = 1 000 ans).



Loi exponentielle		
$QCX(T, d) = G_q(d) \cdot \ln(T) + QCX_0(d)$		
Durée d (jour)	$G_q(d)$ (m³/s)	$QCX_0(d)$ (m³/s)
0,000	18,3	46,3
0,250	13,8	25,1
0,500	8,70	17,1
0,750	7,00	14,2
1,000	6,08	12,6
3,000	2,34	7,23
6,000	1,71	5,76
10,000	0,982	4,21

Figure 4 : Le Roubion à Soyans (S = 186 km²) - Loi exponentielle $QCX(T, d) = G_q(d) \cdot \ln T + QCX_0(d)$



Loi exponentielle		
$VCX(T,d) = G_q(d) \cdot \ln(T) + VCX_0(d)$		
Durée (d) (jour)	G_q (d) (m ³ /s)	VCX_0 (d) (m ³ /s)
0,625	12,8	26,3
1,750	8,30	17,4
2,710	6,95	14,2
3,460	6,40	12,4
14,000	2,59	6,90
25,000	1,79	5,37
60,000	1,30	3,61

Figure 5 : Le Roubion à Soyans (S = 186 km²) - Loi exponentielle $VCX(T,d) = G_q(d) \cdot \ln T + VCX_0(d)$

3.2 - Présentation formelle

La présentation formelle des modèles QdF en QCXd est analogue à celle des modèles QdF en VCXd [GALEA et PRUDHOMME, 1993]. Nous présentons ci-après les équations générales des modèles QdF avec les paramètres x_i auxquels ils sont associés pour décrire les quantiles de crue $Q(T,d)$ relatifs aux débits moyens (VCXd) ou aux débits seuils (QCXd).

L'utilisation générale des modèles QdF peut être faite dans les limites suivantes, validées sur des BVRE et plus d'une centaine de bassins versants observés en France et en Europe [PRUDHOMME, 1993] :

$$0,0003 \leq d \text{ (h)} \leq 720$$

(instantanée) (30 jours)

$$0,5 \leq T \text{ (an)} \leq 1000$$

$$0,001 \leq S \text{ (km}^2\text{)} \leq 4000$$

Pour $0,5 \leq T \text{ (an)} \leq 20$: généralisation d'une loi exponentielle adaptée aux valeurs supérieures à un seuil, avec d/D et $QIXA10$:

$$Q(T,d) = (A \cdot \ln(T) + B) \cdot QIXA10 \quad (3)$$

avec $A = \frac{1}{x_1 \cdot d/D + x_2} + x_3$ et $B = \frac{1}{x_4 \cdot d/D + x_5} + x_6$

Pour $20 < T \text{ (an)} \leq 1000$: généralisation de la forme d'extrapolation esthétique (1) des débits par le gradex des pluies maximales [MICHEL, 1982] avec d/D et QIXA10 :

$$Q(T, d) = Q(10, d) + \left(C \cdot \ln \left(1 + \frac{A}{C} \cdot \frac{T-10}{10} \right) \right) \cdot QIXA10 \quad (4)$$

où $Q(10, d)$ est obtenu par la formule (3),

avec
$$C = \frac{1}{x_7 \cdot d/D + x_8} + x_9$$

Le tableau 4 récapitule les paramètres x_i relatifs à chacun des trois modèles QdF (en VCXd ou QCXd).

Remarques :

Les nombreuses validations des modèles QdF de référence sur des sites observés [PRUDHOMME, 1993] ont permis de vérifier les hypothèses initiales de transfert, à savoir que :

$$\left(\frac{Q(T, d/D)}{QIXA10} \right)_{\text{bassin de référence}} = \left(\frac{Q(T, d/D)}{QIXA10} \right)_{\text{bassin non observé}}$$

avec
$$\left(\frac{d}{D} \right)_{\text{bassin de référence}} = \left(\frac{d}{D} \right)_{\text{bassin non observé}}$$

De même, pour les fréquences rares ($T > 20$ ans) le terme C de la relation (4) représente un gradex des pluies maximales implicite tel que :

$$\left(\frac{G_p(d/D)}{QIXA10} \right)_{\text{bassin de référence}} = \left(\frac{G_p(d/D)}{QIXA10} \right)_{\text{bassin non observé}}$$

Modèles QdF	Paramètres (X_i)								
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
Vandenesse									
VCXd	2,635	6,19	0,016	1,045	2,385	0,172	1,083	1,750	0,000
QCXd	3,970	6,48	0,010	1,910	1,910	0,097	3,674	1,774	0,013
Florac									
VCXd	1,12	3,56	0,00	0,95	3,18	0,039	1,56	1,91	0,085
QCXd	3,05	3,53	0,00	2,13	2,96	0,010	2,78	1,77	0,040
Soyans									
VCXd	0,87	4,60	0,00	1,07	2,50	0,099	0,569	0,690	0,046
QCXd	2,57	4,86	0,00	2,10	2,10	0,05	1,490	0,660	0,017

Tableau 4 : Paramètres des modèles QdF

3.3 - Propriété des courbes QdF en QCXd (ex : modèle de Soyans)

Pour analyser les propriétés des courbes QdF, nous avons considéré le modèle de Soyans.

Les caractéristiques locales du bassin versant du Roubion à Soyans (186 km²) sont D = 6 h et QIXA10 = 88,5 m³/s. A partir des équations du modèle de Soyans (équations (3) et (4) associées aux paramètres du tableau 4) et de ses caractéristiques, on peut calculer les quantiles de crue en débits seuil pour toute fréquence et toute durée comprises dans les limites fixées au § 3.2. On peut reporter dans un système d'axes orthonormés ces courbes QdF (monofréquence) de débits seuils, puis calculer pour chacune d'elles les volumes correspondant à différentes durées. On remarque que l'on obtient des volumes égaux aux débits moyens maximaux calculés sur les mêmes durées à partir des observations, ou tout simplement à partir du modèle QdF en VCXd. Cette propriété vérifiée sur les observations reste vraie pour les extrapolations aux fréquences rares (tableau 5). Ces derniers résultats satisfaisants permettent de valider la démarche d'extrapolation présentée antérieurement (§ 3.1).

d (h)	T (an)								
	0,5	1	2	5	10	20	50	100	1000
0,0003	33,70	46,40	59,10	75,90	88,50	101,00	159,00	214,00	446,00
0,0003	33,90	46,60	59,20	75,90	88,50	101,00	147,00	196,00	449,00
6,0	24,10	35,50	46,90	62,10	73,50	84,90	121,00	156,00	310,00
6,0	23,60	33,70	43,90	57,30	67,40	77,50	110,00	142,00	286,00
12,0	18,70	28,40	38,10	50,90	60,60	70,30	98,20	124,00	228,00
12,0	19,00	27,60	36,20	47,60	56,20	64,90	90,80	115,00	222,00
18,0	15,70	24,40	33,10	44,50	53,20	61,80	85,40	106,00	189,00
18,0	16,40	23,90	31,50	41,50	49,10	56,60	78,60	99,00	186,00
24,0	13,80	21,70	29,60	40,00	47,90	55,90	76,50	94,40	165,00
24,0	14,60	21,40	28,20	37,20	43,90	50,70	70,00	87,60	162,00
48,0	11,80	16,80	21,80	28,40	33,40	38,40	51,70	63,30	109,00
48,0	11,10	16,00	21,00	27,50	32,40	37,40	50,70	62,70	112,00
72,0	10,20	14,30	18,40	23,90	28,00	32,10	42,80	52,00	88,20
72,0	9,47	13,40	17,40	22,70	26,60	30,60	41,20	50,50	88,60
144,0	9,03	11,40	13,80	16,90	19,30	21,60	28,10	34,00	57,40
144,0	7,48	10,10	12,70	16,10	18,70	21,30	28,20	34,20	58,50
240,0	5,91	8,02	10,10	12,90	15,00	17,10	22,50	27,00	44,70
240,0	6,49	8,34	10,20	12,60	14,50	16,30	21,20	25,60	43,00
720,0	3,62	4,87	6,12	7,77	9,02	10,30	13,20	15,60	24,60
720,0	5,29	6,11	6,94	8,03	8,86	9,69	12,00	14,10	23,00

Pour chaque durée d et période de retour T : 1ère ligne : VCX(T,d) (ex : 33,7)
2ème ligne : VCX'(T,d) (ex : 33,0)

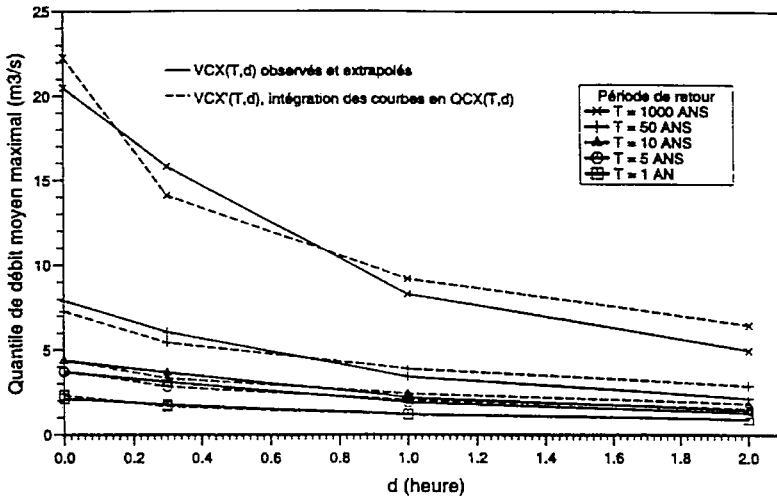
Tableau 5 : Quantiles de débit moyen déterminés à partir des observations (VCX(T,d) et calculés (VCX'(T,d) par intégration des courbes QdF en QCX(T,d)

Il va de soi que cette propriété des courbes QdF en QCXd revêt un intérêt majeur pour la conceptualisation des hydrogrammes de crue nécessaires à la modélisation hydraulique transitoire (cf. § 4). Cela est particulièrement vérifié pour le modèle INONDABILITE [GILARD, OBERLIN,

CHASTAN, GIVONE, 1993] où les propriétés des courbes QdF en QCXd énoncées antérieurement, et plus précisément de conservation des volumes, permettent de croiser vulnérabilité et aléa hydrologique pour une cartographie réaliste du risque d'inondation.

3.4 - Exemples de validation des modèles QdF en QCXd - BVRE de Draix

Nous avons vérifié les propriétés des modèles QdF en QCXd sur deux petits bassins versants du BVRE de Draix (Alpes-de-Haute-Provence). Le bassin versant du Laval ($S = 0,86 \text{ km}^2$, $D = 0,33 \text{ h}$, et $QIXA10 = 4,39 \text{ m}^3/\text{s}$) est représenté par le modèle QdF de Soyans (figure 6). Le bassin versant de la Roubine ($S = 1330 \text{ m}^2$, $D = 0,067 \text{ h}$, et $QIXA10 = 28,4 \text{ l/s}$) est modélisé par le modèle QdF de Florac (figure 7). Pour ces deux bassins versants, nous vérifions bien la propriété de conservation des volumes des courbes QdF en QCXd, relatives à chaque modèle.



d (h)	T (an)					
	0,5	1	2	5	10	20
0,0003	1,43	2,12	2,80	3,71	4,39	5,08
0,0003	1,68	2,31	2,93	3,76	4,39	5,01
0,5000	0,86	1,14	1,42	1,79	2,07	2,35
0,5000	0,71	1,06	1,40	1,87	2,22	2,56
1,0000	0,60	0,78	0,95	1,18	1,36	1,53
1,0000	0,50	0,74	0,98	1,30	1,55	1,79
1,5000	0,51	0,69	0,87	1,10	1,28	1,46
1,5000	0,41	0,60	0,78	1,03	1,21	1,40
2,0000	0,46	0,63	0,80	1,03	1,20	1,37
2,0000	0,37	0,52	0,67	0,87	1,02	1,17
2,5000	0,39	0,52	0,65	0,82	0,95	1,09
2,5000	0,34	0,47	0,59	0,76	0,88	1,01

$\forall d \begin{cases} \text{1ère ligne : QCX}(T, d) \text{ observé} \\ \text{2ème ligne : QCX}'(T, d) \text{ modélisé} \end{cases}$

Figure 6 : BVRE de Draix, Le Laval ($S = 0,86 \text{ km}^2$) - Validation du modèle QdF de Soyans en QCXd

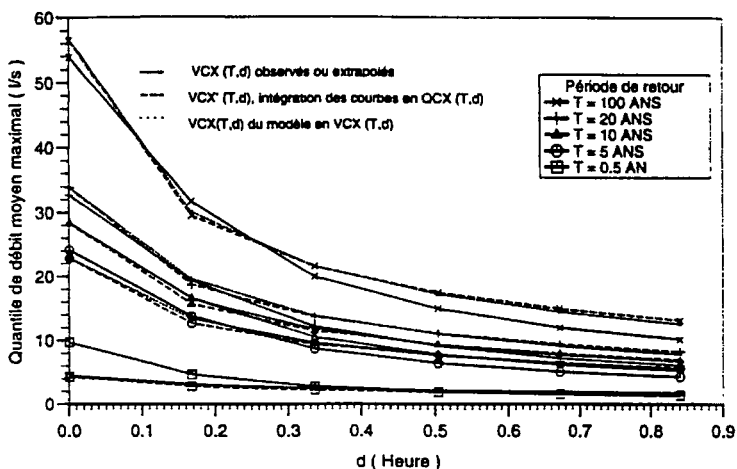


Figure 7 : BVRE de Draix, La Roubine ($S = 1\,330\text{ m}^2$) - Validation du modèle QdF de Florac en QCXd

4 - Hydrogramme synthétique monofréquence (HSMF)

Les modèles QdF, établis pour une "signature" des débits seuils dépassés QCXd pendant un durée continue d , permettent de concevoir la représentation synthétique d'un hydrogramme monofréquence (non naturel, mais représentatif du régime des crues), appelé HSMF. Cet hydrogramme monofréquence (ex. figure 8 : HSMF centennal du bassin versant de la Roubine) est défini par son débit de pointe, une courbe de montée (droite) dont le temps (t_m) est égal à la durée caractéristique de crue (D) du bassin versant et d'une courbe de décrue correspondant ici à la courbe QdF centennale ($T = 100$ ans) en $QCX(T,d)$ pour $0,0003 \leq d \text{ (h)} \leq 0,840$. Celle-ci est obtenue à partir des équations (3) et (4) du modèle QdF de Florac (paramètres du tableau 4), connaissant $D = 0,067$ h et $QIXA10 = 28,4$ ℓ/s .

L'intégration de cet hydrogramme (HSMF), en valeur de volume centrée sur le débit de pointe (ex. : $d = 10'$ de la figure 8), permet d'obtenir un quantile de débit moyen maximal $VCX'(T,d)$ proche (tableau 6) de la réalité observée (cf. figure 7) ou modélisée ($VCX(T,d)$).

Ainsi par construction, l'HSMF vérifie la propriété énoncée antérieurement (respect des volumes), quel que soit le temps de montée.

Par ailleurs, diverses études [GALEA et al., 1991 ; Cemagref-Lyon et al., 1994b ; etc...] ont permis de montrer que le temps de montée (t_m) est voisin de la durée caractéristique de crue du bassin versant ($t_m \cong D$). Si pour une raison ou pour une autre, le temps de montée choisi est différent de D ($t_m \neq D$), il doit cependant satisfaire à la condition générale $t_m \leq D$.

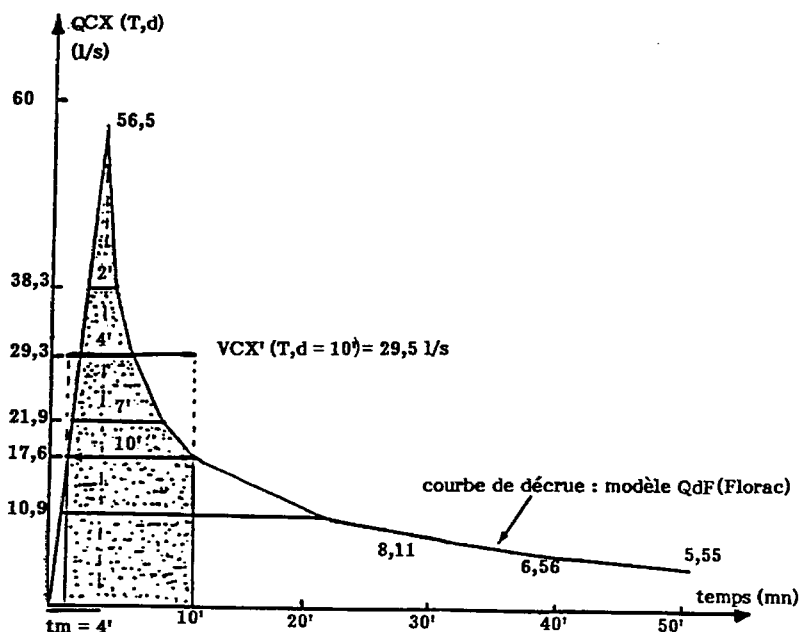


Figure 8 : HSMF (T = 100 ans) du bassin de la Roubine (S = 1 330 m²)

d(h)	0,0003	0,168	0,336	0,504	0,672	0,840
VCX (100,d) ℓ/s	53,9	31,7	20,0	15,0	12,0	10,2
VCX' (100,d) ℓ/s	56,5	29,5	21,6	17,5	15,0	13,2

Tableau 6 : Vérification de la cohérence du volume de l'HSMF

5 - Conclusion

Les résultats satisfaisants obtenus sur les bassins versants du Laval et de la Roubine permettent d'étendre la validité de la méthodologie QdF à des bassins de faible superficie, notamment rapides. De manière générale, ces modèles QdF permettent de caractériser le régime hydrologique en crue en tout point d'un cours d'eau. Selon que l'on se déplacera de l'aval vers l'amont, on fera de l'upstreaming, ou vice-versa, du downstreaming. Cette propriété d'intégration d'échelle, liée à la superficie en particulier, permet de concevoir à partir des modèles QdF à large représentativité spatiale une approche réaliste de la régionalisation des régimes d'écoulement en crue des bassins versants observés ou non [PRUDHOMME, 1993].

Par ailleurs, les modèles QdF en QCXd (courbes débit-durée-fréquence et HSMF en particulier) sont des outils qui répondent bien à une conception rationnelle des projets d'aménagements intégrés de bassin où la diversité des objectifs considérés ne permet plus de se contenter d'une unique crue de projet et où l'économie ne permet pas non plus d'opérer des simulations continues Q(P) de longue durée. Ceci est particulièrement vrai en inondation [OBERLIN, GALEA et GIVONE, 1989b], où les besoins réels de protection sont liés à l'occupation des sols et toujours exprimables (traduction de la demande sociale) in fine en durée-fréquence, profondeur et vitesse d'une inondation acceptable ou

devant être tolérée. Les HSMF, de par leurs propriétés (respect du quantile de débit moyen maximal sur d, et représentativité du régime des crues) et leur simplicité de définition (cf. ci-dessus), sont d'usage courant en aménagement de cours d'eau [Cemagref, 1992] et constituent plus particulièrement les entrées hydrologiques des modèles hydrauliques transitoires utilisés en prévention contre les inondations.

Bibliographie

CTGREF, SRAE, DIAME, SH, 1980-1982 - *Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 2 : la méthode "SOCOSE", Information Technique, n° 38-2 (juin 1980) ; fascicule 3 : la méthode "CRUPEDIX".*

Cemagref-Lyon, 1989 - *Analyse des crues des petits bassins versants du sud-est de la France. Estimation sommaire des débits décennaux et biennaux par des méthodes de type CRUPEDIX et SOCOSE régionalisées. Document de synthèse, IX^{ème} contrat de Plan Etat-Région. Collaboration des laboratoires suivants : LAMA (CNRS, URA 344), SRAE Rhône-Alpes et Provence Côte-d'Azur. Producteurs de données : SRAE, SN, EDF, Cemagref.*

Cemagref-Lyon, 1992 - *Etude de l'inondabilité du bassin du Rival. Cemagref-Lyon, division hydrologie-hydraulique.*

Cemagref-Lyon, 1994a - *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau (actualisation). Guide à l'usage des aménageurs.*

Cemagref-Lyon, SOGREAH, SIEE, 1994b - *Etude hydrologique du bassin versant de l'Ouvèze.*

GALEA (G.), 1989 - *Prédétermination de quantiles de crue, formulations sommaires (SOCOSE, CRUPEDIX) et formulation QdF. Note interne 14.06.89 - Cemagref-Lyon, division hydrologie-hydraulique.*

GALEA (G.), RAMEZ (P.), J.RIBOT (B.), 1991 - *Erosion en vignoble, actualisation des outils de maîtrise et incidence sur les aménagements réalisés, site expérimental de Mercurey (Saône et Loire, région Bourgogne). Cemagref-Lyon, division hydrologie-hydraulique, HHLY 10.12.91.*

GALEA (G.) et PRUDHOMME (C.), 1993 - *Characterization of large scale variations in river flow behaviour with reference to hydrological macro-regionalization. Technische Universität Braunschweig - FRIEND Conference, 11-15 october 1993.*

GALEA (G.) et PRUDHOMME (C.), 1994 - *The Mono-Frequency synthetic hydrograph (MFSH) concept : definition, interest and construction from regional QdF models built with threshold discharges, for little mountainous basins with rapid runoff. International Conference 12-16 sept. 1994 - Stara Lesna (Slovakia).*

GILARD (O.), OBERLIN (G.), CHASTAN (B.), GIVONE (P.), 1993 - *Inondabilité : une méthode pour gérer rationnellement l'occupation des sols en lit majeur. Réunion de la V^o section du CGGREF., 17 nov 1993.*

MICHEL (C.), 1982 - *Extrapolation par la méthode du GRADEX. Note interne n° KG 03.05.82, Cemagref-Antony, division hydrologie.*

MICHEL (C.), OBERLIN (G.), 1987 - *Seuil d'application de la méthode du GRADEX*. Cemagref-Antony, division hydrologie-hydraulique / La Houille Blanche n° 3-1987.

OBERLIN (G.), BEN MANSOUR (H.), ORTIZ (R.), 1989a - *Generalization and standardization for 3 types of flow-duration-frequency curves in flood regime description and transfert*. FRIENDS in Hydrology, Bolkesjö, AISH, n° 187.

OBERLIN (G.), GALEA (G.), GIVONE (P.), 1989b - *Inondabilité, comment progresser ?*. Journées d'études organisées à Tonnerre (Bourgogne) par l'AFBSN sur l'aménagement et l'entretien des rivières ; Cemagref-Lyon, division hydrologie-hydraulique.

PRUDHOMME (C.), 1993 - *Analyse et régionalisation des régimes hydrologiques méditerranéens*. Thèse de Doctorat en Hydrologie (en cours). Cemagref-Lyon division hydrologie-hydraulique, LHM USTL (Montpellier).

Remerciements :

Nous remercions les services producteurs et gestionnaires (DIREN) de l'information hydrométrique sur la banque nationale HYDRO, en particulier Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon et Bourgogne.

Nous remercions également l'équipe gestionnaire du BVRE de Draix (Cemagref, groupements de Grenoble et d'Aix-en-Provence, ONF-RTM de Digne) pour la fourniture et la critique des données des bassins du Laval et de la Roubine.

La forêt de montagne : un remède aux crues¹

François COMBES

ONF-RTM Savoie,
Immeuble "Le France"
64, quai Charles Roissard,
BP 657, 73006 Chambéry
Cedex, France

Antoine HURAND

ONF-RTM Pyrénées
23, bis boulevard Bonrepos
31000 Toulouse, France

Maurice MEUNIER

Cemagref Grenoble, division
protection contre les érosions,
2, rue de la Papeterie, BP 76
38402 St-Martin-d'Hères Cedex,
France

Résumé

Les importants reboisements réalisés depuis un siècle ont permis de mettre en évidence la réduction très importante des dégâts causés par les torrents de montagne.

Des études sur les bassins versants expérimentaux confirment ce rôle de la forêt qui réduit les pointes de crue (80 % dans le cas étudié), réduit le volume écoulé et augmente la capacité de rétention du sol.

La forêt est une médecine naturelle efficace dans la lutte contre les crues et agréable dans le paysage.

1 - Introduction

Au milieu du 19^{ème} siècle un vaste mouvement d'opinion appuyé par l'ouvrage de SURELL (1870) [1]² affirmait que les crues et les inondations avaient pour cause le déboisement de montagnes. Cette opinion bien ancrée et quelques grandes inondations du Rhône en particulier, aboutirent à la loi du 28 juillet 1860 sur le "reboisement de montagnes".

Notons bien que tout ceci n'avait aucune base scientifique, seulement une observation sérieuse, beaucoup de bon sens et une généralisation un peu osée. C'est sur ces bases bien fragiles que fut cependant bâtie toute l'oeuvre de restauration des terrains en montagne -300 000 ha reboisés parmi les plus ingrats qui se puissent trouver et 1 100 torrents traités-. Pendant ce temps, la forêt profitait du reflux de l'agriculture pour occuper les terres abandonnées. En 150 ans le paysage a ainsi changé de façon très importante dans certaines régions et on peut en tirer quelques bilans.

¹Cet article a été présenté aux 23^{èmes} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France : "Crues et inondations", Nîmes, septembre 1994.

²Le numéro entre crochets renvoie à la bibliographie en fin d'article.

2 - Rôle de la forêt

Pour clarifier l'exposé nous en séparerons les différents aspects.

2.1 - Régularisation du régime des eaux

Dans ce domaine il faut distinguer l'effet sur les crues, c'est-à-dire le court terme et le bilan hydrique global à l'échelle d'une saison ou plus.

- Court terme

Tout promeneur sait -par expérience- qu'en forêt il pleut après la pluie car le feuillage intercepte une partie de la pluie.

Sur le sol l'eau trouve une litière en général abondante, un humus bien formé et un sol très perméable (tout au moins dans une forêt non pâturée et établie depuis assez longtemps). Des mesures de perméabilité effectuées dans une forêt RTM dans le bassin du Gourron (Haute-Garonne) ont donné :

- perméabilité de surface (0 à 30 cm) 10^{-4} à 10^{-5} m/s
- perméabilité des couches inférieures 10^{-6} à 10^{-7} m/s.

Ces 30 cm de sol perméable ont été créés par la forêt artificielle. Un tel sol se comporte comme une éponge et absorbe sans nuisseler la valeur d'un bon orage (à condition toutefois qu'il n'y ait pas eu le même la veille ...). Cela explique l'effet de seuil qu'on observe régulièrement. Cette eau infiltrée est restituée lentement, ce qui donne des crues plus longues mais beaucoup plus faibles et le lit nécessaire pour évacuer ces crues n'est pas le même.

On peut citer le cas des deux bassins de surface semblable situés sur les marnes noires des Alpes du sud au nord de Digne et dont il est question plus loin. Le bassin dénudé (80 ha) a un lit de 10 à 12 m de large remanié à chaque orage. Le bassin boisé en totalité (100 ha) se contente d'un lit d'à peine 1 m de large. Et encore il faut le préciser, ce bassin a été boisé en 1890 donc tout récemment tout au moins à l'échelle forestière et pédologique. Quant aux petits bassins, quelques hectares, dans cette même zone ils n'ont plus d'exutoire, le torrent a tout simplement disparu.

- Long terme

Le rôle de la forêt est beaucoup plus complexe. La forêt joue un rôle évident sur la neige en modifiant la nature du dépôt et la nature de la neige elle-même, les skieurs le savent bien. Au printemps cette neige fond plus lentement en forêt, un retard de 15 jours environ. Cela réduit d'autant les crues à l'aval.

Sur l'eau, le rôle de la forêt est plus délicat à mettre en évidence. L'eau s'infiltré en profondeur et les arbres en évaporent une partie ; il semble donc que l'écoulement total soit plus faible. Il semble aussi que cette infiltration en profondeur favorise les sources à l'aval. C'est en tous cas ce qu'explique fort bien Jean GIONO dans sa nouvelle "L'homme qui plantait des arbres".

2.2 - Erosion et transports solides

Le programme de reboisement du siècle dernier avait pour but, entre autres, de maîtriser l'érosion. Les résultats sont remarquables et faciles à observer dans certains peuplements de Pin Noir des Alpes du sud.

Quelques exemples sont célèbres, tel le torrent du Labouret qui, au siècle dernier, menaçait la route reliant Digne à Barcelonnette. Aujourd'hui dans une forêt de pins, il y a un ruisseau paisible, une eau claire qui cascade dans la verdure.

Remarquons que les ouvrages RTM de correction, en fixant le lit des torrents, ont contribué aussi à réduire les transports solides et à assagir les torrents. Ce phénomène est important dans les Alpes du nord et les Pyrénées centrales où les reboisements ont été moins étendus qu'en région méditerranéenne.

3 - Résultats

Nous séparerons les résultats globaux - qualitatifs qui sont maintenant bien établis et les résultats chiffrés qui font l'objet de recherches en cours.

3.1 - Résultats qualitatifs

Il est difficile de séparer le rôle de la forêt dans les travaux RTM car ces travaux associent toujours génie civil dans le lit du torrent et boisement dans les versants. Cependant les trois torrents ci-après peuvent en donner une idée (d'après les archives RTM et les études MOUGIN (1914) [2]) en prenant un critère simple : coupure de la route nationale par une crue.

Le Rieu Sec : torrent de Maurienne (Savoie) qui coupe assez régulièrement la RN 6, bassin de 67 ha, dérochoir très raide, exposé au sud où aucun boisement n'est possible, seul le chenal d'écoulement a été aménagé tant bien que mal.

Ce torrent a coupé la RN 6 : 33 fois de 1801 à 1900 ; 10 fois de 1901 à 1993.

Le St-Julien : torrent de Maurienne, coupait régulièrement la RN 6. Bassin de 2 150 ha, assez étroit et étiré nord-sud ; travaux de génie civil ; un peu de boisement (et abandon du pâturage qui favorise l'embroussaillage).

A coupé la RN 6 : 21 fois de 1801 à 1900 ; 2 fois de 1901 à 1993.

Au siècle dernier, certaines coupures ont été sévères. Citons celle du 18 juillet 1824. Ce jour là le roi Charles-Félix visitait ses états de Savoie ... Il dut attendre le 22 juillet pour pouvoir continuer sa route ...

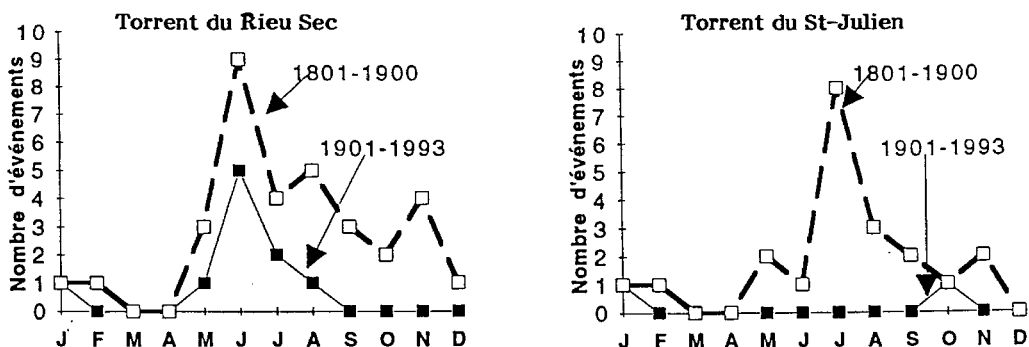


Figure 1 : Crues ayant coupé la RN 6

Le Riou Bourdoux : torrent de l'Ubaye (Alpes de Haute-Provence). Bassin de 2 200 ha. Vaste éventail ouvert au sud. Ce bassin comportait 67 ha de forêts vers 1860. Il en compte actuellement 1 100.

La RN 100 était en lacune au 19^{ème} siècle sur plus d'1 km comme l'explique DEMONTZEY [3] (état des lieux vers 1860).

"La surface actuelle de ce cône de déjections atteint 240 ha, dont 70 sont en partie cultivés. Les 170 autres présentent l'aspect le plus désolé et ne renferment aucune trace de végétation ; à chaque orage, la lave la parcourt lentement, s'épanouit tantôt sur une face, tantôt sur une autre et entretient ainsi sur cette immense étendue son action destructive, en interdisant toute espèce de culture ou de mise en valeur. La route nationale qui traverse le cône vers sa base n'est qu'un chemin à peine tracé dans les décombres, sans cesse coupé ou recouvert par les matériaux de transport et qui absorbe des sommes importantes pour être maintenu à grand peine dans le plus triste état de viabilité ; les courants des eaux s'y passent à gué".

Actuellement le CD 900 (qui a pris la suite de la RN 100) traverse les bras du torrent sur 5 petits ponts qui, à notre connaissance, n'ont jamais été submergés.

Ces quelques exemples permettent de juger de l'amélioration de la situation par rapport au siècle dernier tout en mettant en évidence les limites d'une action sur la seule partie basse du torrent (cas du Rieu Sec).

Une preuve, a contrario, de l'efficacité de la forêt est fournie par les incendies de forêt : on observe souvent une reprise d'érosion brutale au premier orage après le passage du feu. On peut citer l'incendie qui détruisit en juillet 1982 quelque 1 000 ha de forêt de protection en Haute-Provence (communes de St-André-les-Alpes, Angles et Vergons). Une dizaine de jours après, un orage amena 60 à 80 cm de boue dans le village d'Angles alors que le ruisseau n'avait plus fait parler de lui depuis 80 ans. Le reboisement datait de la fin du 19^{ème} siècle. Il fallut construire d'urgence des ouvrages de correction pour protéger le village en attendant que la végétation reprenne sa place et son rôle.

3.2 - Résultats quantitatifs

Nous présentons ici les résultats obtenus sur deux bassins versants choisis suffisamment petits et homogènes pour que la végétation puisse être un facteur explicatif important des mécanismes hydrologiques.

Nom du bassin	Superficie (km ²)	Taux de dénudation (%)
Laval	0,86	78
Brusquet	1,08	13

Tableau 1

Ces bassins sont gérés en commun par le Cemagref (Grenoble et Aix-en-Provence) et par le service RTM des Alpes-de-Haute-Provence.

Situés sur les communes de Draix-Le Brusquet, ils sont constitués de marnes noires et marno-calcaires à fort taux d'érosion, ce qui a justifié le reboisement de l'un d'eux (le Brusquet) à la fin du siècle dernier.

Les méthodes d'étude utilisées découlent du dispositif de mesures : dédiés à l'étude des transports solides en montagne, les bassins versants expérimentaux de Draix sont équipés [4] pour la mesure des pluies, des débits liquides et des débits solides, à faible intervalle de temps (de la minute à la dizaine de minutes selon la taille des bassins). Les phénomènes visés sont les crues, ce qui signifie que les faibles débits sont très mal mesurés

Les mécanismes de formation des crues, les processus d'érosion et de transport solide étant des phénomènes "à seuil", la réponse d'un bassin versant à un épisode pluvieux est donc fortement non linéaire. Mais cette non linéarité complique tellement la façon dont on peut rendre compte quantitativement de la formation des crues que nous allons l'analyser dans un premier temps en faisant comme si elle était linéaire, puis nous l'étudierons d'une manière plus fine, à travers un modèle global, actualisant ainsi une démarche déjà adoptée antérieurement [5].

Première étape : adoption de l'hypothèse de linéarité. Non réaliste, cette hypothèse est la seule qui puisse être facilement comprise par des non initiés. Aussi, malgré les risques de mauvaise interprétation qu'elle autorise, nous l'adoptons dans cette première étape. Elle permet de traiter les débits comme s'ils étaient proportionnels aux pluies tombées et considère les écarts de réponse du bassin à une même pluie comme une incertitude, évidemment non explicable physiquement dans le cadre de l'hypothèse. Si l'on veut donc comparer les débits de pointe des crues des deux bassins versants considérés, on peut le faire soit directement si les pluies tombées sur les deux bassins sont les mêmes (en quantité et en structure,), soit par le biais du coefficient d'écoulement si elles sont différentes.

La figure 2 présente le résultat de la première comparaison. Il montre que la majorité des débits du bassin boisé sont inférieurs au 1/5^{ème} des débits correspondants (débit de pointe de crue du même épisode) du bassin déboisé. L'épisode du 8-9/4/87 s'en distingue nettement : il donne des débits au Brusquet supérieurs à ce seuil, ce qui s'explique justement par la non linéarité (avec en plus quelques inquiétudes sur la qualité des données) : les pluies sont importantes, et le maximum se produit en fin d'épisode, lors d'une deuxième pointe de crue, la première pointe (29 mm de pluie) ayant peut-être suffisamment saturé le sol. A l'inverse, lorsque le débit au Brusquet est très faible (épisode du 20/8/88), c'est parce que la pluie, courte et intense, est juste suffisante pour que le ruissellement démarre sur le Brusquet, alors que la réponse est instantanée sur le Laval. Indiquons d'ailleurs qu'on n'a pas indiqué sur ce graphique tous les épisodes où il y a eu ruissellement sur le Laval et pas sur le Brusquet ; l'effet de seuil de début de ruissellement (effet non linéaire s'il en est) est flagrant.

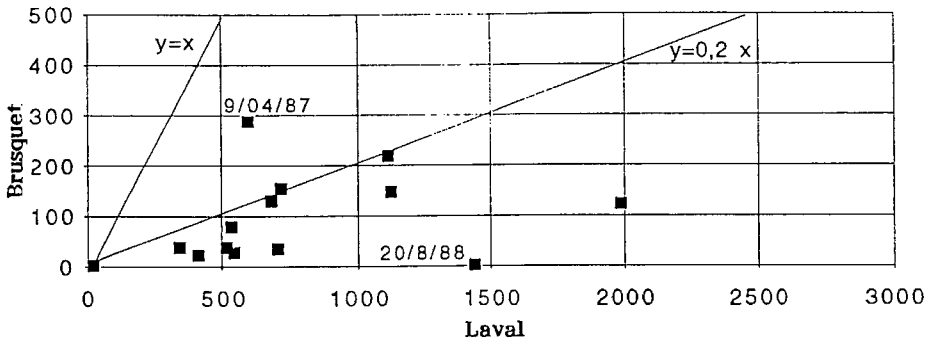


Figure 2 : Débits des crues ayant même pluviométrie (l/s)

La deuxième comparaison porte également sur les épisodes où il y a eu ruissellement sur le bassin boisé, mais concerne les coefficients d'écoulement. Ce paramètre est beaucoup plus critiquable à utiliser que le débit de pointe, car la définition du volume de crue est ambiguë et dans le cas de ces bassins, on a dit que les faibles débits sont très mal mesurés. Compte tenu de cette réserve, on peut tracer la figure 3.

Elle montre que les coefficients d'écoulement de crue du bassin boisé sont en moyenne de l'ordre de 30 % de ceux du bassin dégradé. On pourrait d'ailleurs aussi prétendre que le coefficient d'écoulement de crue du bassin boisé est plafonné à une valeur d'environ 0,4 mais cette idée dangereuse n'est guère justifiable physiquement et rien ne semble empêcher une crue prochaine, plus importante et/ou bénéficiant d'une humidification préalable du sol suffisante, de donner un coefficient d'écoulement supérieur.

Les comparaisons faites dans le cadre de cette hypothèse de linéarité des phénomènes de ruissellement permettent donc de quantifier l'effet de la forêt relativement à un bassin dénudé : elle limiterait les débits de pointe de crue d'au moins 80 % et les volumes de crue d'au moins 50 %.

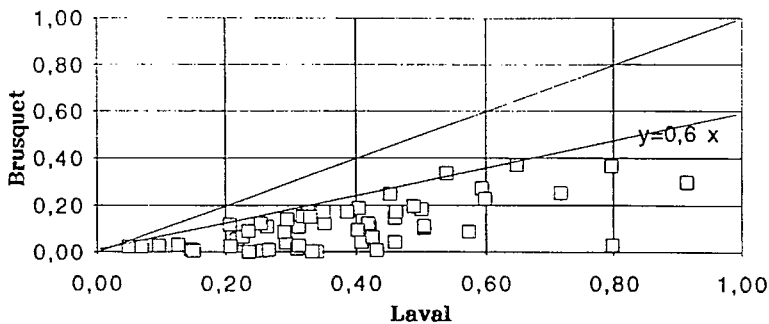


Figure 3 : Comparaison des coefficients d'écoulement en crue

Deuxième étape : mise au point d'un modèle conceptuel. On se place maintenant dans une optique plus physique, en se donnant des hypothèses sur le comportement hydrologique des bassins, qu'il s'agit de vérifier, et qui seront utilisées ensuite pour comparer les deux bassins. Ce comportement est ainsi élaboré à partir de trois hypothèses [6].

- Le ruissellement ne commence qu'après l'infiltration d'une certaine quantité de pluie. Celle-ci est assimilée à la pluie limite qui sépare les pluies avec et sans ruissellement. On peut donc la déterminer à partir de la courbe de cette pluie limite (figure 4).
- La formation de l'écoulement superficiel de pluie est traduite par la fonction de production du modèle du Soil Conservation Service (SCS) ; les paramètres sont par contre déterminés un peu différemment : on a adopté comme rétention initiale (S_0), la valeur de la pluie limite obtenue à l'étape précédente. Reste la capacité maximale d'infiltration (S) correspondant à la crue. De nombreux essais sur de nombreux épisodes ont indiqué que les pluies antérieures ont aussi une influence sur la valeur de S . On a adopté la même proportionnalité entre S et S_0 , qu'entre leurs valeurs maximales $S_{0\max}$ et S_{\max} .
- La fonction de transfert de l'écoulement est traduite par un hydrogramme unitaire dissymétrique, les deux paramètres (temps de montée : T_c et de décrue : $K * T_c$) étant également calés.

Les graphiques traduisant la détermination de la pluie limite en fonction de la durée de l'épisode sec précédant l'épisode pluvieux sont représentés sur la figure 4.

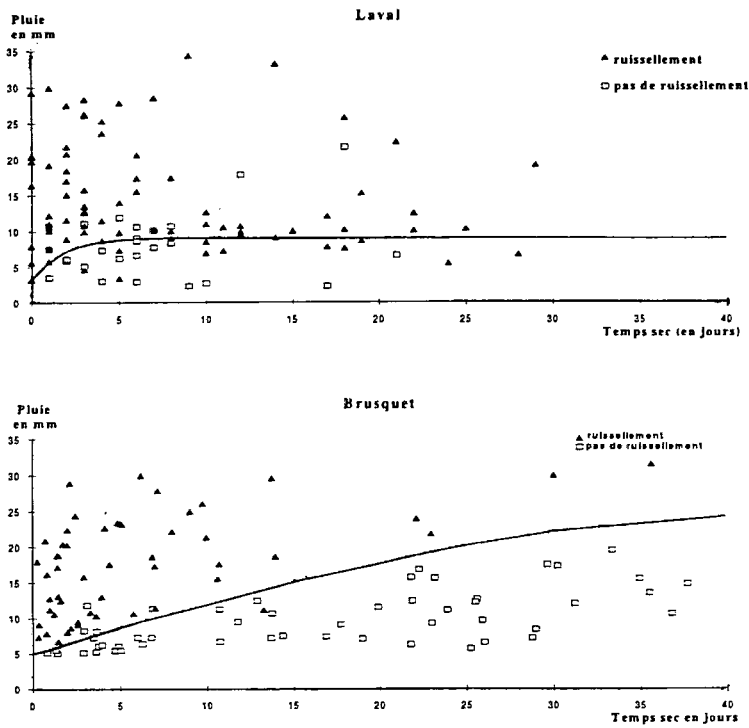


Figure 4 : Graphiques de la pluie limite au Laval et au Brusquet

Ils montrent d'une part que les pluies antérieures cessent très vite d'avoir de l'influence sur le bassin dénudé (moins de 5 jours contre 20 ou 25 pour le Brusquet), et d'autre part que la pluie maximale (So max) infiltrée avant le début de ruissellement est beaucoup plus forte que le Brusquet (25 mm contre 9 mm pour le Laval). Ces deux facteurs traduisent quantitativement l'effet d'éponge des sols forestiers, dans le cas particulier d'une géologie de marnes noires et d'une forêt artificielle récente. En ce qui concerne les paramètres de la fonction de production et de la fonction de transfert, ils ont été d'une part calés et d'autre part utilisés pour validation. Le travail a été réalisé pour les deux bassins et les résultats figurent au tableau 2.

Nom du bassin	So max (mm)	S max (mm)	Tc (mm)	k
Brusquet	25	375	60	3
Laval	9	76,5	20	2

Tableau 2 : Valeurs des paramètres du modèle pour les deux bassins [7]

Ces paramètres ont été obtenus par optimisation (hormis So et So max).

- On voit que la capacité maximale d'infiltration est beaucoup plus forte en forêt que sur sol dégradé. Cette valeur est d'une part cohérente avec les résultats des mesures pédologiques effectuées sur le

bassin du Brusquet et rejoint d'autre part des valeurs obtenues de manière similaire sur d'autres bassins boisés [8]. Cela montre la capacité d'absorption des sols forestiers lors des crues, mais indique également leurs limites lors des épisodes pluvieux de grande ampleur, liées au fonctionnement supposé par le modèle, caractérisé par l'existence de deux seuils : le premier traduit le début de ruissellement, et le deuxième la fin de la fonction de protection de la forêt, lorsque le sol est saturé.

- On voit que la forêt a également un rôle retardateur, puisque le temps de montée est triplé sur le Brusquet, et que le temps de décrue est également notablement augmenté.

Résultats : la comparaison de ces deux bassins permet de quantifier le rôle écrêteur de la forêt. Celle-ci réduit d'au moins 80 % la pointe de crue, d'au moins 50 % le volume ruisselé. Elle triple la rétention initiale avant le début d'un écoulement. Elle multiplie enfin par 5 la capacité maximale d'infiltration pendant une crue.

4 - Conclusion

La forêt peut donc jouer un rôle important en réduisant et étalant les crues. Ce rôle est d'autant plus efficace qu'on peut boiser une partie importante du bassin versant.

Cependant la forêt n'est pas une assurance absolue car il y a une limite à sa capacité de rétention ; mais quel système de protection peut offrir une garantie totale ! Enfin, il ne faut pas oublier que la forêt peut parfois être détruite par le feu, ce qui anéantit provisoirement son efficacité.

Malgré ces limites, la forêt représente dans la lutte contre les crues une médecine douce qui a fait ses preuves et dont l'impact visuel est positif dans le paysage. Dernier avantage, cet équipement qui doit être géré a bien souvent le bon goût d'assurer lui-même le financement de cette gestion par la vente des bois et de fournir ainsi une matière première utile à l'industrie.

5 - Bibliographie

[1] SURELL (A.), 1870 - *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes*, 2^{ème} édition, Dunod, Paris, 1870.

[2] MOUGIN (P.), 1914 - *Les torrents de la Savoie*, Grenoble, 1914.

[3] DEMONTZEY (P.), 1894 - *L'extinction des torrents en France par le reboisement*, 2 vol., Paris, Imprimerie Nationale, 1894.

[4] CAMBON (J.P.), MATHYS (N.), MEUNIER (M.), OLIVIER (J.O.), 1990 - *Mesures des débits solides et liquides sur des bassins versants de montagne*, Symposium : Hydrology in Mountainous Regions, Lausanne AIHS Publ. n° 194, 231-238.

[5] MEUNIER (M.), 1988 - *Bassins versants expérimentaux de Draix. Effet des travaux RTM sur les crues torrentielles. Exemple du bassin du Brusquet*, Note d'information technique Cemagref-ONF-RTM, février 1988.

[6] BROCHOT (S.), 1993 - *Erosion de badlands dans le système Durance-Etang de Berre*, Cemagref-Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 269 p.

[7] VERITE (F.), 1993 - *Hydrologie de crue des bassins versants de montagne méditerranéens*, mémoire de fin d'études ENGEES-Cemagref, 119 p.

[8] COSANDEY (C.), 1993 - *Forêt et écoulements : rôle de la forêt sur la formation des crues et le bilan d'écoulement annuel - Impact d'une coupe forestière*, Laboratoire de Géographie physique CNRS Meudon, 81 p.

E r o s i o n

Panorama synthétique des mesures d'érosion effectuées sur trois bassins du site expérimental de Draix.....	125
Maurice MEUNIER ; Nicolle MATHYS ; Jean-Pierre CAMBON	
Erosion de badlands dans les Alpes du sud. Synthèse	141
Sylvie BROCHOT ; Maurice MEUNIER	
Erosion and sediment transport under simulated rainfall on steep marly hillslopes, Draix, Hte-Provence, France	175
Dirk J. OOSTWOUD WIJDENES ; Peter ERGENZINGER	
Contribution à l'étude des mécanismes et bilans de l'érosion chimique des "Terres Noires" du bassin de la Durance. Exemple des BVRE de Draix	189
Jean-Pierre SIMONNET ; Pascale RICHY ; Claude PARRON	

Panorama synthétique des mesures d'érosion effectuées sur trois bassins du site expérimental de Draix¹

Maurice MEUNIER - Nicole MATHYS

Cemagref, division protection contre les érosions, 2, rue de la Papeterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

Jean-Pierre CAMBON

Cemagref, division ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation, Le Tholonet, BP 31, 13612 Aix-en-Provence Cedex 1

1 - Introduction

Les bassins versants expérimentaux de Draix, situés sur les "terres noires" des Alpes du sud sont extrêmement sensibles à l'érosion. Ces "terres noires" qui couvrent environ 200 000 hectares sont le siège d'importants phénomènes d'érosion. Pour les maîtriser, les services de restauration des terrains en montagne (R.T.M.) ont entrepris d'importants travaux depuis plus d'un siècle au premier rang desquels figure le reboisement.

Les mesures effectuées depuis 1984 sur les bassins versants permettent d'estimer la production d'érosion sur des bassins de taille ou de couverture végétale différentes. La présente note a pour objectif principal de comparer les résultats concernant la production annuelle d'érosion. Cette comparaison sera précédée d'une courte présentation des principaux résultats hydrologiques.

Cette synthèse exploite les mesures réalisées sur le site et les analyses qui en ont été faites au sein de l'équipe responsable de la gestion de ces bassins. Elle utilise également les travaux de Ana-Luisa BORGES (1993) sur les mesures d'érosion effectuées sur le Laval et la Roubine et d'autre part, l'analyse des mesures d'érosion sur le Brusquet, effectuée par Gabriele BUTTAFUOCO (1993).

2 - Présentation du site de Draix et des dispositifs de mesure

Les bassins versants expérimentaux de Draix sont situés à une quinzaine de kilomètres au nord-est de Digne dans le département des Alpes-de-Haute-Provence (plan de situation : figure 1). Ils sont gérés conjointement par le Cemagref de Grenoble, le Cemagref d'Aix-en-Provence et le service RTM de Digne. Cinq bassins versants, de superficie comprise entre 1/8 d'hectare et une centaine d'hectares ont été progressivement équipés depuis 1984 de pluviographes, limnigraphes, pièges à sédiments et préleveurs d'échantillon. La composition d'un site de mesures est représentée sur la figure 2.

¹Cet article est l'actualisation d'une communication présentée aux 10^{èmes} journées du Réseau Erosion qui se sont tenues du 15 au 18 septembre 1993 à Montpellier.

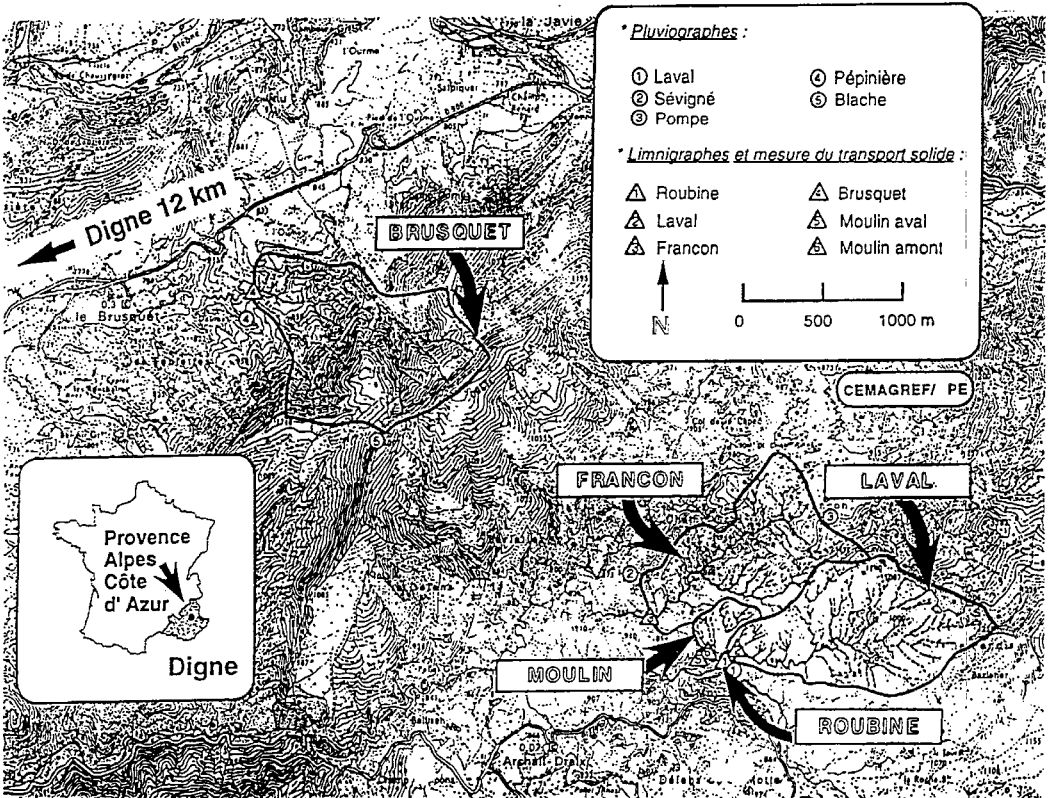


Figure 1 : Situation des bassins versants expérimentaux de Draix

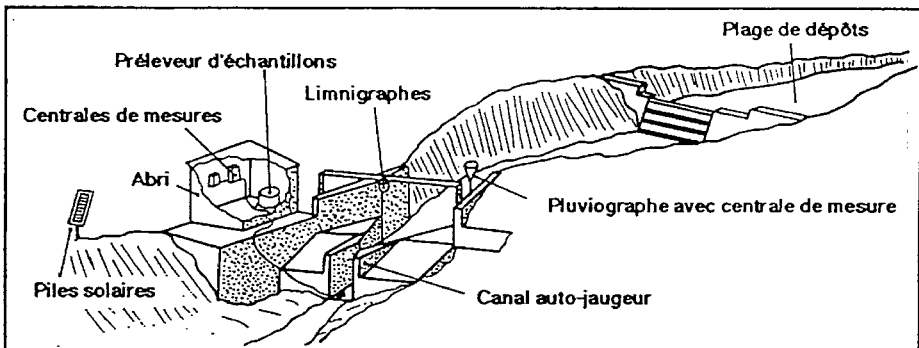


Figure 2 : Composition d'un site de mesures

Le piège à sédiments ou plage de dépôts permet de protéger la station d'un transport solide très important et de mesurer par des méthodes topographiques le volume déposé après une crue. Un préleveur d'échantillons dont le déclenchement est asservi au niveau d'eau de la station de jaugeage permet d'estimer la quantité de matières en suspension qui transitent par la station de mesure, à l'aval de la plage de dépôt. La somme du volume de matières en suspension et du volume déposé dans le piège à sédiments fournit la quantité totale d'érosion produite par le bassin.

3 - Présentation des principaux résultats hydrologiques

3.1 - Etude des pluies

3.1.1 - Pluies annuelles et mensuelles

Les cinq pluviographes principaux permettent d'obtenir une bonne estimation de la pluviométrie du bassin : la moyenne interannuelle se situe aux alentours de 850 mm, varie peu d'un poste à l'autre (écart-type d'environ 40 mm soit 5 %), mais assez fortement d'une année à l'autre (écart-type d'environ 150 mm soit 18 %). Sur la période 1984-1993, soit 10 ans de mesures, l'année 1993 est la plus sèche, avec 593 mm, et l'année 1992 la plus humide avec 1 154 mm, soit un écart de près de 1 à 2.

Année	Laval	Sévigné	Pompe	Pépinière	Blache		
1984	936	887	-	-	-		
1985	762	738	-	-	-		
1986	806	735	796	-	-		
1987	943	903	1011	933	-		
1988	774	716	867	754	-	Moyenne et écart-type entre stations	
1989	593	588	739	606	-		
1990	878	772	892	782	-		
1991	877	753	897	745	767		
1992	1154	1064	1098	1044	1059		
1993	956	828	935	887	857		
Moyenne	868	799	904	822	894		855
Ecart-type	149	130	114	144	150		46

Tableau 1 : Pluies annuelles sur la décennie 1984-1993

Au niveau des pluies mensuelles, le faible écart entre stations se confirme ainsi que l'énorme variabilité d'une année à l'autre. Ainsi, au poste du Laval, si le mois de juillet 1984 a été complètement sec, on a enregistré plus de 140 mm en 1987 et 1992. Les totaux mensuels du mois d'août sont en général dus à très peu d'averses : 1 à 3 orages de 30 à 60 mm, assez isolés dans le mois. On observe dans l'année deux périodes plus fortement pluvieuses, avril-mai et septembre-octobre, avec des totaux mensuels voisins de 100 mm. Le mois le plus pluvieux en moyenne est le mois d'octobre, mais en 1991 et 1993, la deuxième quinzaine de septembre a également été très humide : ces périodes, à l'inverse de juillet et août, sont caractérisées par des épisodes pluvieux longs ou intenses et rapprochés qui ont un effet très important sur la genèse des crues.

Année	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total année
1984	67.0	40.6	78.9	33.4	196.7	117.5	0.0	59.8	71.5	123.5	62.3	84.6	935.8
1985	102.5	41.0	99.4	29.2	162.0	46.9	15.6	86.8	35.2	12.3	96.3	34.6	761.8
1986	108.2	60.9	23.2	182.9	45.8	37.6	86.8	71.5	96.0	21.6	52.6	18.5	805.6
1987	31.3	59.9	54.2	128.6	49.2	80.4	142.7	82.3	38.9	178.2	30.2	66.8	942.7
1988	60.8	34.2	56.1	68.9	152.3	95.5	26.6	22.6	21.1	178.1	29.2	28.9	774.3
1989	8.8	89.5	25.4	169.7	74.5	24.8	16.0	23.3	44.2	19.4	49.0	48.3	592.9
1990	24.9	64.9	27.7	109.6	105.8	33.0	37.1	107.5	27.4	226.2	60.3	53.6	878.0
1991	16.9	51.9	102.1	27.5	48.5	48.4	19.9	50.4	240.4	116.4	146.8	7.7	876.9
1992	36.8	17.5	84.9	48.0	114.6	216.0	153.9	92.3	100.0	159.1	62.8	67.6	1153.5
1993	2.5	2.1	18.2	186.3	118.9	71.3	38.5	69.4	185.8	153.4	23.7	85.9	956.0
Moy.	46.0	46.3	57.0	98.4	106.8	77.1	53.7	66.6	86.1	118.8	61.3	49.7	867.8

Tableau 2 : Pluies mensuelles au poste du Laval

3.1.2 - Pluies journalières

Les valeurs maximales des pluies journalières (0 h à 24 h), enregistrées sur le bassin sont d'environ 100 mm. Les pluies de Laval, Sévigné et Pompe sont assez bien corrélées entre elles. Les pluies de Pépinière et Blache un peu moins bien corrélées au groupe précédent. On observe en particulier en juillet-août des orages qui ne touchent qu'un seul groupe de ces pluviographes. Les régressions calculées sur les pluies supérieures à 0.5 mm des périodes communes aux stations sont les suivantes :

Sévigné	=	0.87 x Laval + 3.4	$R^2 = 0.95$	N = 924
Pompe	=	0.98 x Laval + 5.2	$R^2 = 0.94$	N = 742
Sévigné	=	0.86 x Pompe + 1.3	$R^2 = 0.94$	N = 765
Pépinière	=	0.80 x Laval + 13.8	$R^2 = 0.78$	N = 635
Pépinière	=	0.96 x Blache + 5.0	$R^2 = 0.87$	N = 371

Tableau 3 : Formules de régression entre postes pluviométriques

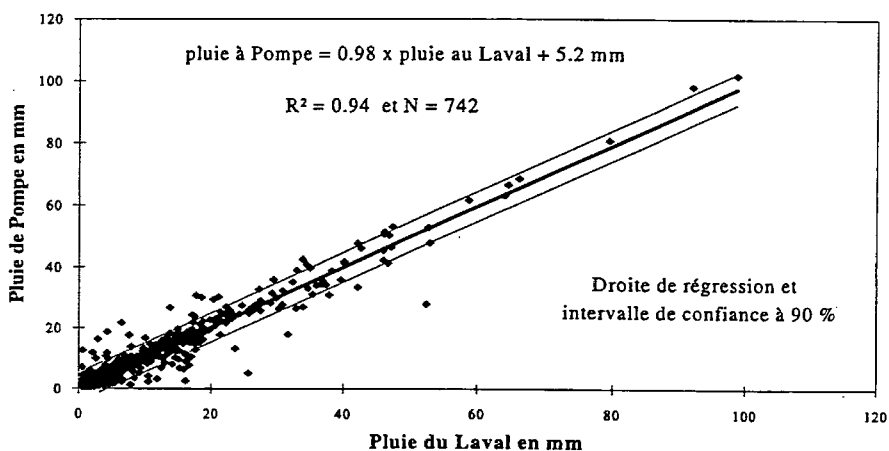


Figure 3 : Corrélation entre les pluies journalières de Pompe et Laval

Les pluies journalières supérieures à 50 mm sont assez rares, en moyenne une par an, celles supérieures à 30 mm surviennent en moyenne 5 fois par an. Mais ceci est très variable d'une année à l'autre et, par exemple, il n'y a eu aucune averse supérieure à 50 mm en 1986, 1989 et 1990 au Laval.

L'ajustement d'une loi exponentielle aux 10 plus fortes valeurs enregistrées, permet d'évaluer les quantiles journaliers suivants :

Poste	Période	T = 5 ans (mm)	T = 10 ans (mm)	T = 20 ans (mm)
Laval	1984-1993	72.6	82.7	92.3
Séviigné	1984-1993	63.6	72.2	80.2
Pompe	1986-1993	73.7	84.1	93.9
Pépinrière	1987-1993	57.4	63.9	-
Blache	1991-1993	68.3	(77.1)	-

Tableau 4 : Quantile des pluies journalières

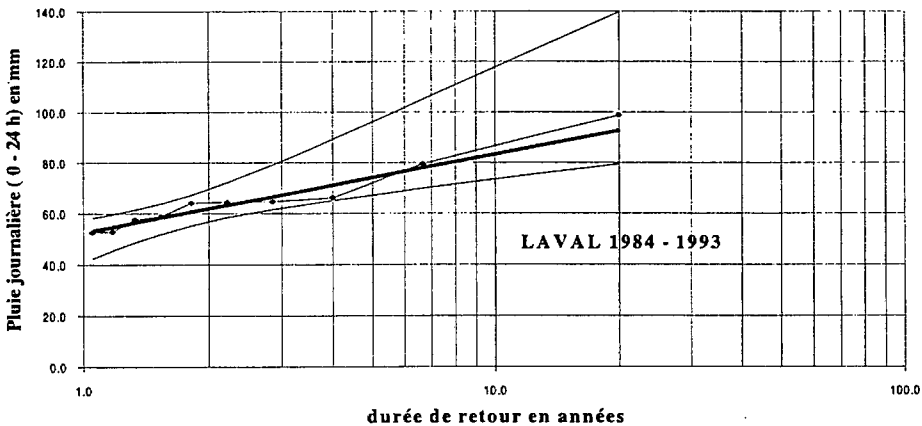


Figure 4 : Ajustement d'une loi exponentielle aux pluies journalières du Laval

3.1.3 - Pluies centrées de durée inférieure ou égale à la journée

Les pics de crue les plus élevés, qu'ils appartiennent à une crue simple ou à une crue à plusieurs pointes, sont générés par les intensités de pluie élevées, qui se produisent en général pendant une durée assez courte correspondant aux temps caractéristiques des bassins ; cette durée est de l'ordre de quelques minutes pour la Roubine, quelques dizaines de minutes pour le Laval. On a donc déposé pour chaque averse de la période d'observation la pluie maximale sur une fenêtre glissante de durée variable. Puis, on a réalisé une analyse statistique de ces variables. Ainsi, la figure 5 représente l'échantillon des maxima annuels des hauteurs de pluie pour des durées comprises entre 5 et 1 440 minutes (soit 1 jour) et l'ajustement de lois de Gumbel à ces échantillons.

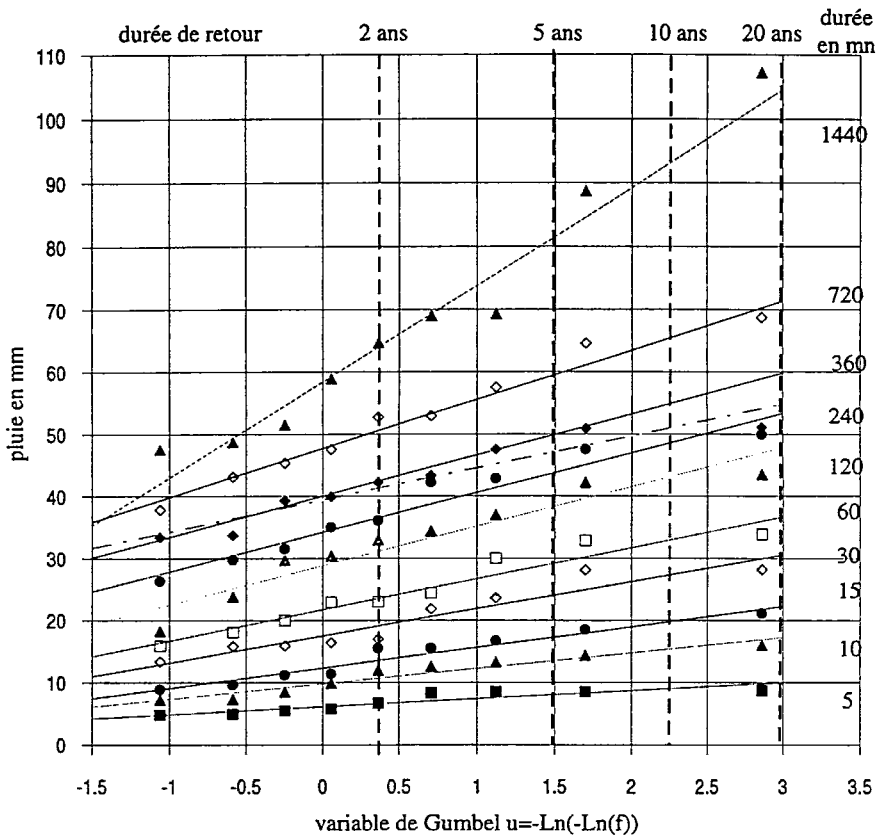


Figure 5 : Ajustement d'une loi de Gumbel aux pluies du Laval

Les ajustements statistiques ont été obtenus en appliquant la méthode des moments à chaque échantillon indépendamment les uns des autres ; la non prise en compte de la dépendance entre échantillons se traduit par un certain décalage de l'échantillon de 360 mn dont la loi a été par conséquent rectifiée visuellement pour retrouver une cohérence avec les autres distributions.

Les quantiles de pluie ainsi obtenus (figure 6) ne sont pas ajustables à des courbes pluies-durée uniques entre 5 et 1 440 mn. On propose de les séparer en deux domaines, de part et d'autre de la durée de 30 minutes. Les coefficients des formules $P_{(mn)} = \alpha \cdot d_{mn}^\beta$ sont donnés dans le tableau ci-dessous.

T (années)	Entre 5 et 30 mn	Entre 30 et 1 440 mn
2	$\alpha = 2.6 \quad \beta = 0.59$	$\alpha = 6.8 \quad \beta = 0.31$
5	$\alpha = 3.2 \quad \beta = 0.61$	$\alpha = 8.5 \quad \beta = 0.30$
10	$\alpha = 3.5 \quad \beta = 0.62$	$\alpha = 9.7 \quad \beta = 0.30$
20	$\alpha = 3.9 \quad \beta = 0.62$	$\alpha = 10.9 \quad \beta = 0.30$

Tableau 5 : Formules des courbes IDF au Laval

Compte tenu des difficultés rencontrées pour les obtenir, ces formules ne sont pas extrapolables au-delà de leur domaine de calage. Une analyse statistique plus complète devra être entreprise accompagnée d'une analyse des types d'événements pluvieux (orages, perturbations de longue durée) qui conduira peut-être à délimiter sur des bases physiques les domaines de validité des courbes intensité-durée-fréquence.

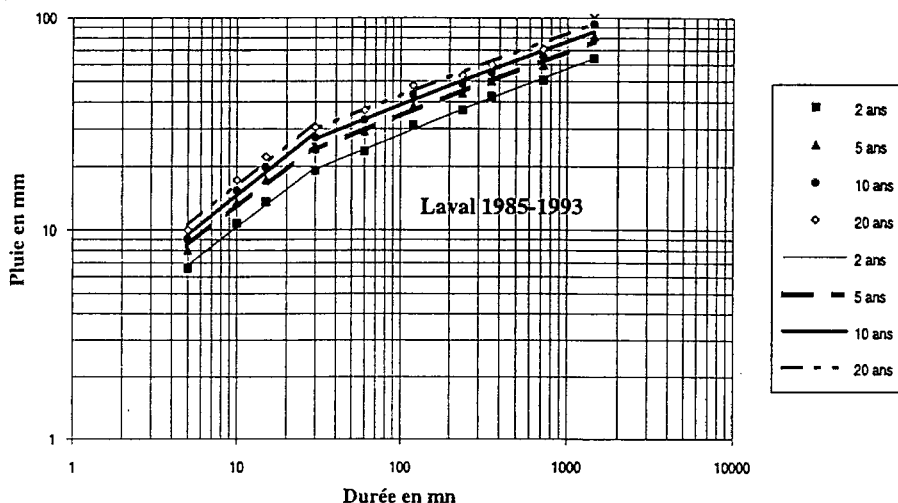


Figure 6 : Courbes IDF du Laval

3.2 - Débits

3.2.1 - Préambule

L'objectif des bassins de Draix étant lié à la connaissance des crues, crues soudaines et courtes, les stations de mesure des débits, ou plutôt des hauteurs, ont été conçues pour permettre à la fois une bonne connaissance de la relation hauteur-débit et un auto-curage satisfaisant en période de crue. C'est pourquoi les seuils auto-jaugeurs de type Parshall ont été retenus pour la plupart des stations. Ces seuils offrent une bonne connaissance des débits pour une cote supérieure à 5 ou 6 cm. Or, sur ces torrents, ces hauteurs ne sont dépassées qu'en crue ; les débits inférieurs aux valeurs correspondantes (15 à 20 ℓ/s) se produisent donc pendant plusieurs jours consécutifs, voire plusieurs semaines. Sur le Laval par exemple, le débit de pointe journalier ne dépasse 50 ℓ/s que pour 5 % des journées de la période d'observation. Il est donc impossible de déterminer avec suffisamment de précision les débits en dehors des crues. C'est pourquoi, il est difficile d'établir des bilans mensuels ou annuels d'écoulement et seuls les résultats concernant les débits de pointe seront présentés ci-après.

Par ailleurs, les débits sont connus avec une assez grande précision jusqu'à la hauteur du Parshall, soit 1.2 m et 1.9 m^3/s pour un Parshall de 2 pieds (Laval, Brusquet). Au-delà cette hauteur de 1.2 m, pour la station du Laval, un seuil rectangulaire situé à l'aval du Parshall a permis d'établir la courbe de tarage de la section de débordement (cf. figure 2) mais la précision obtenue sur les débits supérieurs à 1 900 ℓ/s est moins bonne.

3.2.2 - Débits de crue

Les crues maximales enregistrées depuis le début des observations jusqu'à fin 1993 sont les suivantes :

Roubine : 27 ℓ/s le 29/08/1992

Laval 6100 ℓ/s le 29/08/92 mais une crue certainement plus importante n'a pu être mesurée en 1987

Brusquet 510 ℓ/s le 24/09/1993

Pour estimer les quantiles de crue, on a ajusté une loi exponentielle aux N plus fortes valeurs du débit instantané, N étant le nombre d'années d'observation.

	Roubine	Laval	Brusquet
Surface (ha)	0.133	86	108
Période	1984-1993	1985-1993	1987-1993
T = 5 ans (ℓ/s)	22	5 450	450
T = 10 ans (ℓ/s)	25	6 250	550
T = 20 ans (ℓ/s)	28	7 050	-

Tableau 6 : Quantiles des débits de crue au Brusquet, au Laval et à la Roubine

Lorsqu'on reporte sur un graphique (figure 7) les ajustements du Laval et du Brusquet, on constate que les débits de crue du Brusquet sont environ 10 fois plus faibles que ceux du Laval, alors que les superficies des bassins sont comparables. Les deux bassins ont des réponses très différentes aux pluies, car l'un deux est complètement boisé et l'autre dénudé. La forêt réduit donc les pointes de crue d'un ordre de grandeur voisin de 10. On retrouve un résultat similaire à celui obtenu dans l'article présenté par COMBES, HURAND et MEUNIER dans le présent compte rendu de recherche.

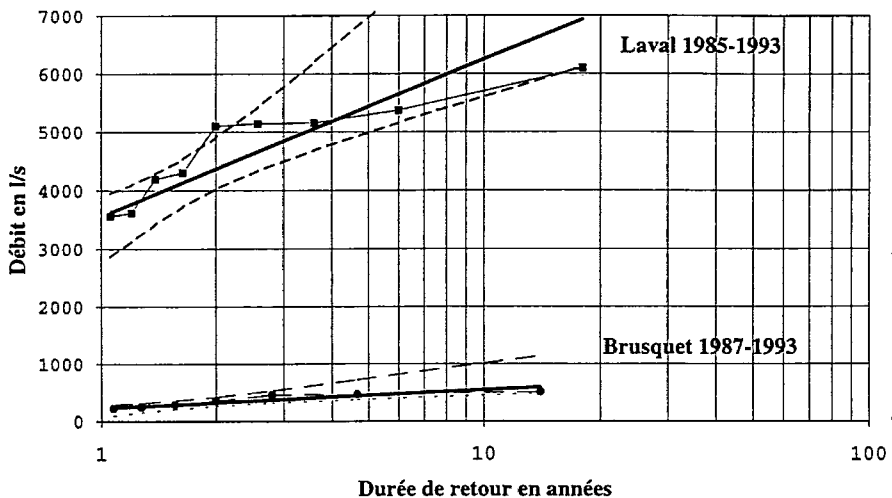


Figure 7 : Ajustement de lois exponentielles sur les plus forts débits du Laval et du Brusquet

4 - Etude de l'érosion

Comme il a été dit, les mesures d'érosion sont difficiles à obtenir et de nombreuses données manquent ; pour obtenir les valeurs annuelles d'érosion, il faut "compléter" les données, c'est-à-dire remplacer les données manquantes par des estimations. Les modèles statistiques qui fournissent ces estimations sont brièvement indiqués au § 4.2. Mais une vision complète de l'ensemble des modèles statistiques et déterministes obtenus sur les bassins de Draix est donné dans un autre article contenu dans ce compte rendu ; il est intitulé : Erosion de badlands dans les Alpes du sud. Synthèse.

4.1 - Méthodes utilisées

L'étude a été conduite sur trois bassins : la Roubine, le Laval, le Brusquet.

Compte tenu des contraintes propres à chaque type d'analyse, et des séries de données disponibles, les périodes d'analyse ne sont pas les mêmes : 1988 à 1991 (4 ans) pour le Brusquet, 1985-1988 (4 ans) pour la Roubine et le Laval ; pour ces deux derniers bassins, les deux années 1989 et 1990 ont été réservées pour valider les modèles établis sur la période 1985-1988. Cette rigueur méthodologique (distinguer les périodes de calage et de validation des modèles) n'a pu être adoptée sur le Brusquet par suite d'un nombre trop faible de données. Enfin, les méthodes mises au point pour la période 1985-1990 ont été mises en oeuvre pour compléter les données manquantes et calculer ainsi les érosions annuelles de 1991 à 1993.

Les trois bassins sont très différents deux à deux, soit par la taille, soit par le taux de couverture végétale, comme le montre le tableau 7 ci-dessous.

Bassin versant	Surface (ha)	Végétalisé compact		Végétalisé clairsemé	Terrain nu
		Bois	Herbe		
Brusquet	108.00	87.00	-	-	13.00
Laval	86.00	21.00	7.80	2.70	67.80
Roubine	0.13	-	21.00	-	79.00

Tableau 7 : Répartition de la surface (en pourcentage) des bassins versants de Draix par type de couverture végétale

Il faut donc, soit comparer le Laval et la Roubine qui ont des tailles différentes et un taux de couverture végétale semblable, soit comparer le Laval et le Brusquet qui ont la même taille mais des taux de couverture végétale très différents.

La conception des systèmes de mesures étant la même pour les trois bassins, on obtient pour chacun d'eux deux types de données :

- les volumes déposés dans les plages de dépôts (notés V_{DEP}) ;
- les volumes transités en suspension à travers les barrages filtrants et mesurés par des préleveurs d'échantillon (notés V_{MES}).

Le poids total d'érosion est obtenu (au niveau de l'événement ou à une autre échelle de temps) en cumulant les poids respectifs des volumes déposés et des volumes transités. Des mesures ponctuelles de la masse volumique des dépôts ont conduit à adopter $1\,700\text{ kg/m}^3$ pour ceux-ci, de manière uniforme, alors qu'elle varie entre $1\,500$ et $1\,850\text{ kg/m}^3$. La masse volumique adoptée pour les volumes transités est $2\,650\text{ kg/m}^3$, c'est-à-dire celle de la marne, qui est peu variable.

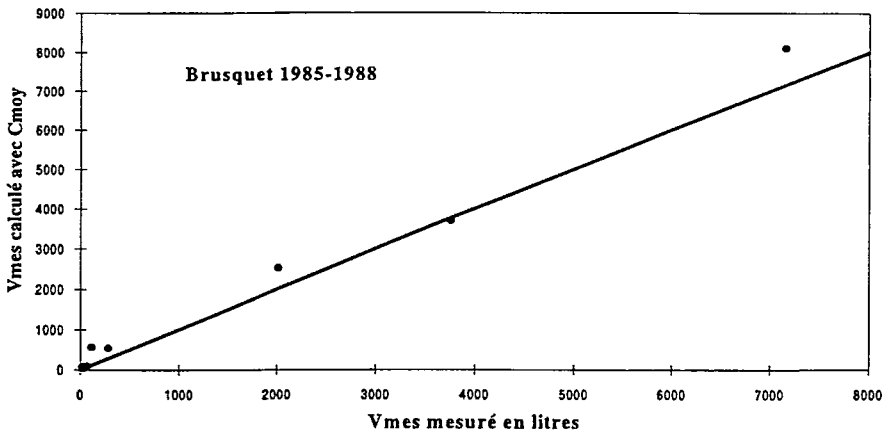
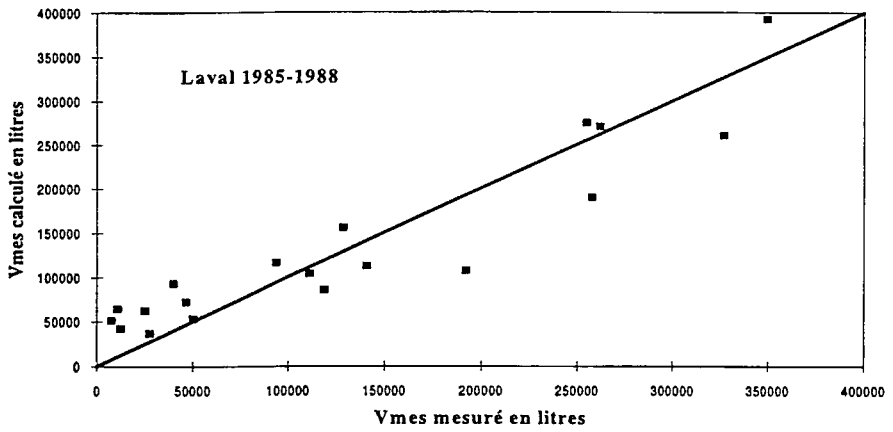
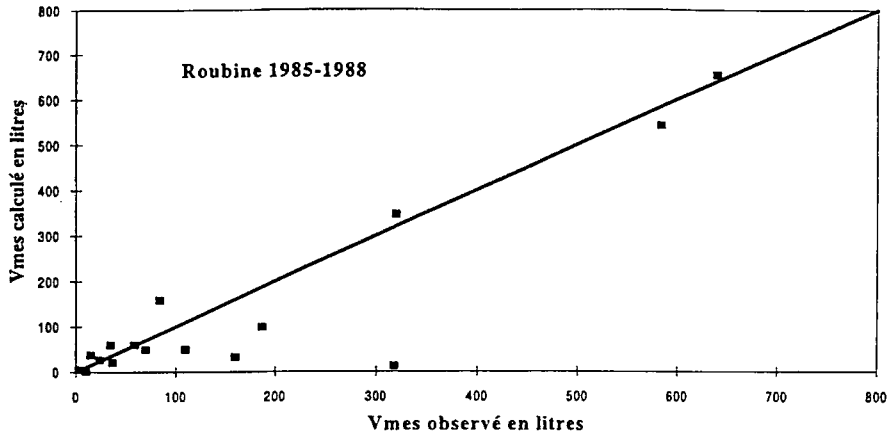


Figure 8 : Résultats fournis par les modèles statistiques pour les volumes transités

Le gros problème pour les trois sites est celui du faible nombre de mesures des volumes V_{MES} lié à la difficulté de faire fonctionner correctement les préleveurs au cours des crues. En découle l'impossibilité d'obtenir les poids annuels d'érosion seulement à partir des mesures. Pour les trois bassins, il faut donc "complémenter" les mesures des volumes transités pour combler les données manquantes ; pour cela, des modèles statistiques ont été établis entre les volumes transités et diverses variables hydro-pluviométriques explicatives.

Les volumes déposés sont en général déterminés plus facilement. Cependant lorsque des crues surviennent de manière très rapprochée, il n'est pas toujours possible d'avoir un relevé topographique pour chacune d'elles et on n'obtient dans ce cas que le cumul des dépôts pour les crues successives. Par ailleurs, les volumes déposés par chaque crue du Brusquet sont trop faibles pour être mesurables et la périodicité des relevés de volume déposé ne permet de connaître que le cumul sur une longue période. Ceci rendra donc l'analyse des volumes totaux d'érosion au Brusquet impossible au niveau événementiel.

4.2 - Modèles statistiques des volumes transités au niveau événementiel

L'analyse des corrélations partielles existant entre les diverses variables explicatives possibles et les variables à expliquer, a conduit à retenir le volume transité V_{MES} comme variable pertinente pour décrire les quantités de sédiments transités sur le Laval et la Roubine, alors que c'est la concentration moyenne C_{MOY} qui est retenue sur le Brusquet. Les raisons de cette différenciation ne sont pas claires.

Comme variable explicative, l'analyse ne retient que le débit maximum Q_{MAX} pour le Laval et la Roubine, et pour le Brusquet, le débit maximum et l'intensité des pluies, ces dernières étant la principale variable explicative.

Le rôle respectif du débit et de l'intensité des pluies dans la fourniture d'érosion mérite donc d'être éclairci. Pour le moment, le faible nombre de crues échantillonnées sur le Brusquet ne permet pas d'affiner cette analyse. Il semble cependant que l'intensité de la pluie soit importante pour l'apparition d'une crue au Brusquet. L'exportation des matériaux est directement liée à la présence d'un écoulement capable de les transporter.

Les résultats obtenus sont les suivants (N = taille de l'échantillon, R^2 = coefficient de détermination, régression curviligne).

Brusquet :	$C_{MOY} (g/l) = 1.8 \cdot 10^{-6}$	$\cdot \frac{1.334}{Q_{MAX} (l/s)} \cdot \frac{2.289}{i_{1.5} (mm/h)}$	$N = 8$	$R^2 = 0.98$
Laval :	$V_{MES} (l) = 2592$	$\cdot \frac{0.577}{Q_{MAX} (l/s)}$	$N = 21$	$R^2 = 0.85$
Roubine :	$V_{MES} (l) = 8.99$	$\cdot \frac{1.38}{Q_{MAX} (l/s)}$	$N = 16$	$R^2 = 0.94$

La figure 8 permet de juger de la qualité des régressions. Pour le Laval et la Roubine, les volumes transités peuvent être calculés directement. Pour le Brusquet, la formule a été utilisée pour calculer la concentration moyenne dont on a déduit le volume transité calculé, qui peut alors être comparé au volume transité mesuré.

On voit que l'excellente régression obtenue pour le Brusquet est très fragile car elle n'est obtenue qu'à partir de huit points et la valeur maximum de l'échantillon, très supérieure aux autres, conditionne beaucoup la régression et sa qualité. Il n'est donc pas impossible que de nouvelles mesures amènent à modifier ce modèle statistique. Pour le Laval et la Roubine, les modèles doivent être plus robustes. Leur validation sur les années 1989-1990 a d'ailleurs donné de bons résultats. Ces modèles permettront donc une bonne estimation des volumes transités lors des crues qui n'ont pas été échantillonnées.

4.3 - Modèles statistiques de l'érosion totale au niveau événementiel

Ces modèles ne sont pas été utilisés dans le calcul de l'érosion annuelle. Nous en donnons toutefois un bref aperçu car ils pourraient permettre d'estimer l'érosion annuelle si la totalité des mesures au niveau événementiel étaient manquantes. Rappelons que cette analyse ne peut être réalisée sur le Brusquet.

Pour le Laval et la Roubine, ces modèles ont été calés soit sur les crues pour lesquelles le volume des dépôts était parfaitement connu, soit pour les séries de crues pour lesquelles on connaissait le cumul des dépôts. Dans ce cas, une méthode itérative utilisant les résultats des régressions sur les événements isolés a permis de répartir le cumul des dépôts entre les différents épisodes de la période de mesure (BORGES A.L., 1993).

Les principaux résultats se résument aux modèles statistiques suivants :

Roubine	poinds total = 0.686 Htot ^{0.848}	I01 ^{1.179}	N = 64	R ² = 0.97
Laval	poinds total = 4515 Htot ^{0.868}	I01 ^{0.508}	N = 65	R ² = 0.76
Roubine	poinds total = 0.643 Htot ^{0.905}	I01 ^{1.142} qmax ^{0.124}	N = 60	R ² = 0.99
Laval	poinds total = 5303 Htot ^{0.477}	I01 ^{0.208} qmax ^{0.339}	N = 65	R ² = 0.97

On constate que les variables caractérisant la pluie expliquent parfaitement l'érosion de la Roubine mais insuffisamment celle du Laval (R² = 0.76). L'ajout du débit de pointe, que l'on peut relier à la capacité de transport de l'écoulement, améliore grandement l'explication de l'érosion du Laval (R² = 0.97). On en déduit que la Roubine est bien une unité élémentaire d'érosion où les phénomènes d'arrachement sont prépondérants et que dans le bassin du Laval, au phénomène d'arrachement dans les ravines s'ajoute le phénomène de transport à l'exutoire par l'écoulement. Ce phénomène doit être renforcé au Brusquet où l'occurrence de débits suffisants pour transporter des matériaux solides est plus rare et où les obstacles au transport vers l'aval dans les biefs sont plus nombreux.

4.4 - Obtention des poids annuels d'érosion

Comme on l'a dit, le manque des données de volume transité V_{MES} pour de nombreux événements, interdit l'obtention directe des poids annuels d'érosion. Seul, le poids d'érosion déposé à partir du volume déposé V_{DEP} est accessible. Pour obtenir le poids annuel d'érosion, deux méthodes sont possibles.

4.4.1 - Complémentation des données manquantes de V_{MES} par événements

En utilisant les modèles statistiques indiqués ci-dessus, on peut sans problème reconstituer les données de V_{MES} , manquantes et les cumuler annuellement, sauf bien sûr si les mesures limnigraphiques sont elles aussi manquantes. Ceci étant justement le cas pour l'année 1985 pour le Laval, le poids total d'érosion de l'année 1985 n'a pu être obtenue par cette méthode. Les résultats sont donc les suivants (tableau 8) où on les donne en tonnes par an et par hectare de terrain nu.

	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	Moyenne	
Brusquet	-	-	-	2*	2*	2*	3	8	7	4	* moy. sur 3 ans
Laval		144	160	146	102	270	129	354	207	189	
Roubine	109	249	169	175	84	164	123	371	173	180	

Tableau 8 : Valeurs de l'ablation spécifique annuelle ramenée à l'hectare de terrain dénudé (t/ha.an).
Complémentation par événements

Ce tableau montre que l'ablation unitaire, même si on la ramène à l'hectare de terrain dénudé, est de l'ordre de 80 fois plus petite sur le bassin boisé du Brusquet que sur les bassins dénudés. Cet écart serait évidemment bien supérieur si on ramenait le poids total d'érosion à la surface totale du bassin versant.

Ce tableau montre aussi que, si les moyennes interannuelles d'ablation sur le Laval et la Roubine sont très voisines, l'écart est assez conséquent certaines années (1986, 1990).

4.4.2 - Complémentation globale des données manquantes de V_{MES}

Il existe des épisodes où on dispose simultanément des mesures des volumes déposés (V_{DEP}) et des volumes transités (V_{MES}). De plus, les données des volumes déposés ayant permis la mise au point de modèles statistiques de même nature que ceux qui ont été décrits précédemment pour V_{MES} , on a aussi pu reconstituer les données V_{DEP} manquantes là où on avait pu mesurer V_{MES} .

On a ainsi pu obtenir 22 épisodes à la Roubine et 19 au Laval, pour lesquels on possède simultanément une mesure de V_{MES} et une donnée (mesurée ou reconstituée) de V_{DEP} . On déduit de ces données les valeurs du rapport (en poids) : érosion transitée/érosion totale. Ce rapport est de 15 % pour la Roubine et de 60 % pour le Laval, avec toutefois une forte variabilité d'une crue à l'autre (écarts-types respectifs de 12 % et 19 %). Ce rapport, calculé sur les périodes de relevés des pièges à sédiments, serait égal à 80 % pour le Brusquet.

Connaissant les volumes annuels de dépôt, on peut donc leur appliquer des rapports multiplicateurs permettant de prendre en compte globalement les données des volumes transités. L'application de ces rapports (2.5 pour le Laval, 1.17 pour la Roubine, 4.30 pour le Brusquet), permet de dresser le tableau 9 ci-dessous.

	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	Moyenne
Brusquet	-	-	-	2	2	2	3	8	7	4
Laval	91	159	166	103	64	181	135	311	176	154
Roubine	118	262	163	174	89	138	132	350	163	177

Tableau 9 : Valeurs de l'ablation spécifique annuelle ramenée à l'hectare de terrain dénudé (t/ha.an).
Complémentation globale

Cette méthode donne des résultats moyens légèrement inférieurs à ceux qui sont obtenus avec la première méthode.

4.5 - Comparaison entre les deux méthodes

Les valeurs annuelles calculées sont présentées sur la figure 9 pour chaque bassin. On voit que les deux méthodes sont très concordantes pour la Roubine mais assez nettement moins pour le Laval. Se pose donc le problème de la "meilleure" méthode à utiliser pour le Laval. Pour le savoir, on peut penser qu'il existe une corrélation entre les résultats annuels entre les deux bassins et estimer que la méthode qui donnera la meilleure corrélation devra être choisie pour compléter les données du Laval. La figure 10 visualise cette confrontation et montre que la dispersion est grande pour les deux méthodes ; on ne peut savoir s'il faut l'attribuer à la variabilité spatiale naturelle de l'érosion sur le Laval, ou aux méthodes de complémentation. On utilisera donc également les résultats de ces deux méthodes et on utilisera leurs écarts comme des fourchettes d'incertitude.

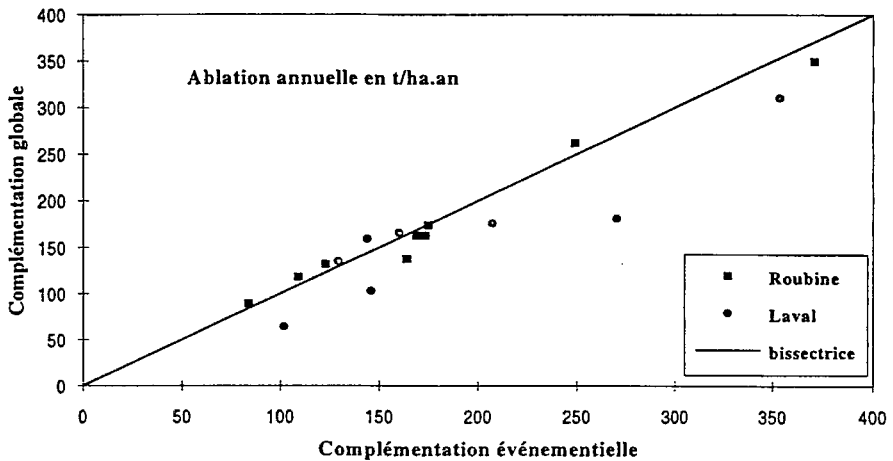


Figure 9 : Comparaison des valeurs annuelles d'érosion calculées par deux méthodes différentes

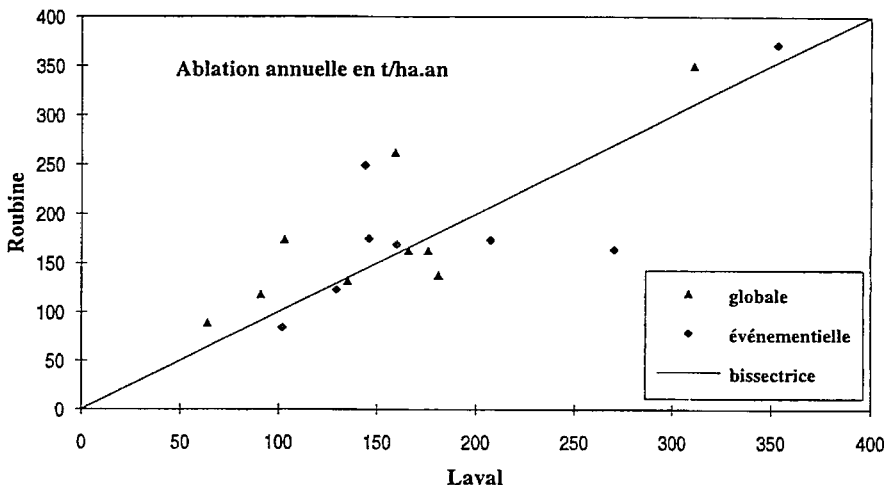


Figure 10 : Comparaison des résultats obtenus pour les deux bassins par les méthodes de complémentation événementielle et globale

5 - Etude statistique des érosions annuelles

On cherche à trouver une loi statistique adaptée aux résultats obtenus pour l'érosion annuelle (figure 11). On voit que les échantillons obtenus par la complémentation événementielle sont très proches pour les deux bassins et un peu moins pour la complémentation globale.

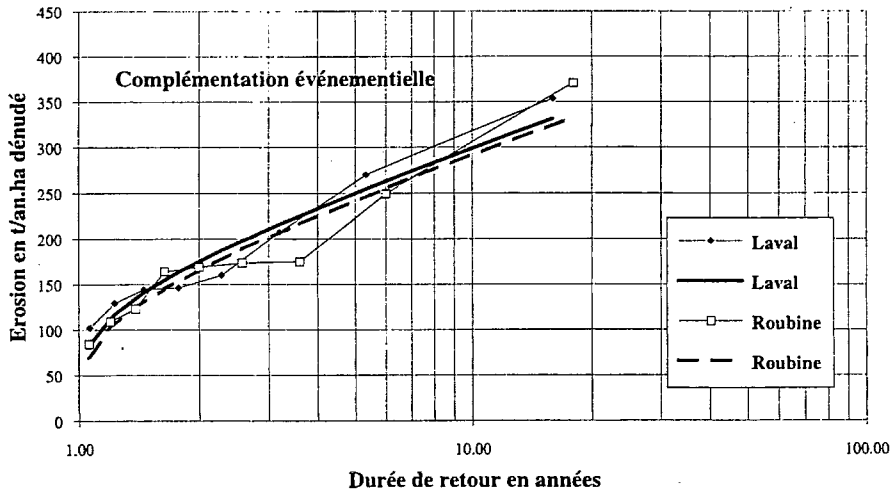
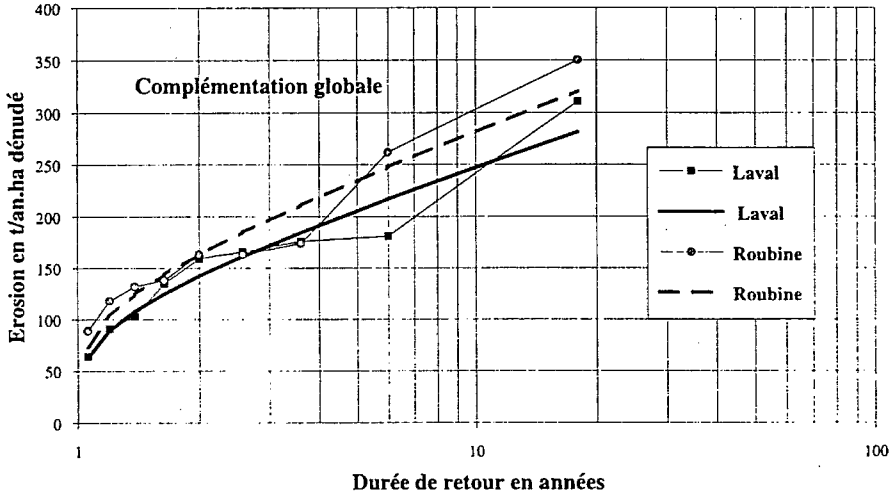


Figure 11 : Lois statistiques des ablations annuelles sur le Laval et la Roubine

Le tableau des valeurs annuelles caractéristiques obtenues par un ajustement à une loi de Gumbel, est présenté ci-après. Ces valeurs doivent cependant être considérées avec circonspection, compte-tenu de la faible durée d'observation. La poursuite des mesures permettra d'affiner ces valeurs.

On peut considérer que les ablations sont voisines pour les deux bassins et comprises dans les fourchettes suivantes :

	Unité	Valeur moyenne	Durée de retour		
			2 ans	5 ans	10 ans
A l'hectare de surface dénudée	t/ha.an	150 - 190	140 - 180	210 - 250	250 - 300
Ablation de la roche mère $\phi = 2.65$	mm	5.7 - 7.2	5.3 - 6.8	7.9 - 9.4	9.4 - 11.3
Ablation de la surface du sol	mm	11.5 - 14.6	10.8 - 13.8	16.2 - 19.2	19.2 - 23.1

Tableau 10 : Valeur moyenne et quantiles des érosions annuelles

6 - Conclusion et synthèse

Les mesures de transport solide effectuées sur deux bassins dénudés de marnes noires des Alpes du sud confirment l'importance de l'érosion superficielle sur ce type de faciès puisque les valeurs moyennes annuelles sont comprises entre 15 000 et 19 000 t/km².an, taux d'érosion qui approchent les records trouvés dans la littérature (WALLING D.E., 1988). Ces mesures indiquent également une ablation (ramenée à l'unité de surface de terrain dégradé) indépendante de la superficie du bassin dégradé ; la situation est totalement différente lorsque le bassin est très végétalisé puisque l'ablation y est alors divisée par un facteur 80.

La granulométrie des transports solides a permis de mettre en évidence que la proportion de matières en suspension dans le volume total d'érosion est plus importante pour le Laval (bassin dégradé de 86 ha) que pour la Roubine (ravine élémentaire dénudée de 1 330 m²) : la dégradation des marnes au cours du charriage dans le bief du Laval augmente la quantité de matériaux fins, dégradation qui n'a pas le temps de se produire à l'intérieur de la ravine élémentaire qu'est la Roubine. Sur le Brusquet (bassin boisé de 108 ha), le taux de matières en suspension est encore plus important que sur le Laval : les matériaux non dégradés sont en effet retenus dans les biefs par la végétation bien avant leur arrivée dans la plage de dépôt. Cependant, la faible quantité de mesures disponibles pour le Brusquet limite les possibilités de l'analyse qui devra être reprise lorsque des mesures complémentaires auront pu être réalisées.

Il est intéressant enfin de remarquer que les valeurs d'érosion annuelles suivent une loi de Gumbel.

7 - Bibliographie

BORGES (A.L.), 1993 - *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du sud*. Cemagref, division protection contre les érosions. Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble. 205 pages + biblio. + figures + annexes.

BUTTAFUOCO (G.), 1993 - *Bilan de la production d'érosion des marnes noires dans le bassin versant du Brusquet*. Rapport de stage. Cemagref, division protection contre les érosions. 18 pages + biblio.

WALLING (D.E.), 1988 - *Measuring sediment yield from river basins*. Soil Erosion Research Methods. R. LAL. Edition, Soil and water conservation society. Iowa, USA, 39-73.

Erosion de badlands dans les Alpes du sud

Synthèse¹

Sylvie BROCHOT - Maurice MEUNIER

Cemagref, division protection contre les érosions,
2, rue de la Papeterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

Résumé

La lutte contre l'érosion est une préoccupation importante tant en France que dans de nombreuses régions du monde. Cependant, les connaissances quantitatives relatives aux différents processus s'exerçant au sein des bassins versants et à l'efficacité des mesures de correction sont très insuffisantes.

Sur les bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes-de-Haute-Provence) sont effectuées des mesures de pluie, de débit, et d'érosion, dont l'utilisation permet de faire progresser les connaissances sur ce thème.

Dans ce travail, l'analyse des données disponibles et la modélisation qu'elles ont permise, effectuée sur des bassins de taille et de taux de végétation différents, ont mis en évidence les effets d'échelle d'espace et de temps et ceux de la végétation, principalement :

- l'importance prise par les processus érosifs se déroulant dans les lits lorsque la taille du bassin s'accroît (dépôts et reprises, abrasion des sédiments), à l'échelle de temps événementielle ;
- à l'échelle de temps moyenne interannuelle, les effets de la taille s'estompent : 11 à 12 mm/an semble la valeur de l'ablation équivalente de matériau altéré à retenir sur marnes noires érodées (badlands) sous climat méditerranéen à tendance montagnarde ;
- le boisement réduit de 70 fois environ la production d'érosion issue de cette ablation (à surface érodée égale).

Abstract

Erosion control is an important concern both in France and in many regions all around the world. However, quantitative knowledges about the various processes operating within the catchments and the efficiency of the conservation measures are not great enough.

On the experimental catchments of Draix (Alpes de Haute-Provence) are carried out rain, discharge and erosion measurements. They can be used to enhance understanding on this subject.

¹Ce rapport est le résultat d'une étude financée par le ministère de la Recherche et de l'Espace (décision d'aide en date du 5/10/1992).

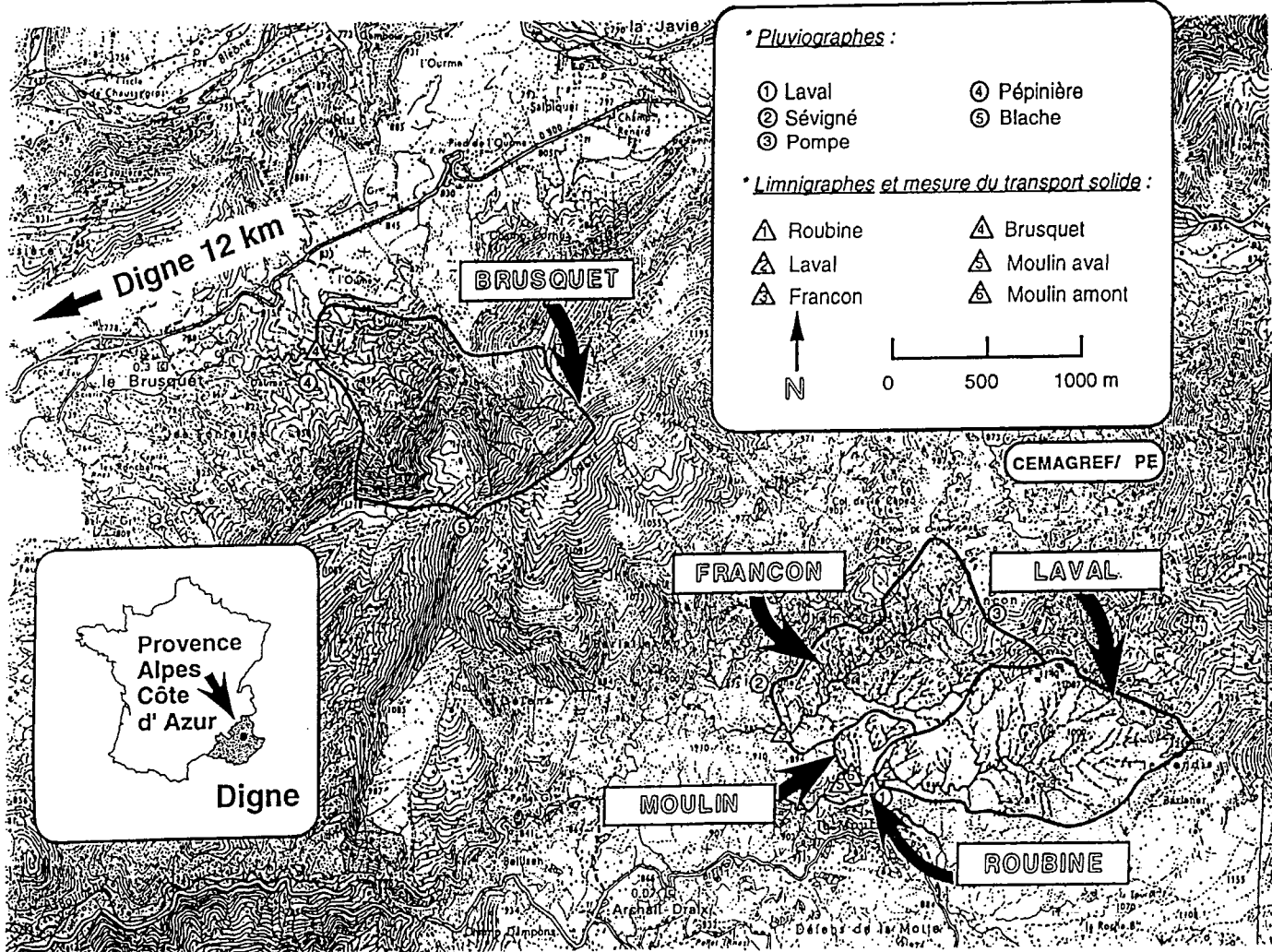


Figure 1 : Situation des bassins versants expérimentaux de Draix

In this study, the available data on catchments of various sizes and vegetation cover ratios were analyzed and a modelisation was elaborated. Time and space scale effects and vegetation cover ratio impact were put in evidence, chiefly :

- the importance of erosion processes operating in the channels when the size of the catchment increases, at event scale (deposition and scouring, sediment fining) ;
- at a mean annual scale, size effects decrease : a value of 11 to 12 mm/an from altered material seems to be reliable for equivalent ablation on eroded black marls (badlands) under mediterranean climate with mountain trends ;
- forest reduces about 70 times the sediment yield provided by this ablation (eroded being equals).

Introduction

La lutte contre l'érosion est une préoccupation importante tant en France que dans de nombreuses régions du monde. Dans notre pays, une illustration en est donnée par les apports moyens annuels de sédiments de la Durance à l'étang de Berre, à hauteur de 730 000 t (estimation EDF avant mise en service du bassin de décantation de Cadarache), aux conséquences hydrologiques et écologiques négatives. D'autres exemples pourraient être aisément cités dans le domaine des crues torrentielles ou de la dégradation des sols.

Cependant, les connaissances quantitatives relatives aux différents processus s'exerçant au sein des bassins versants et à l'efficacité des mesures de correction sont très insuffisantes.

Les bassins versants expérimentaux de Draix (Cemagref Grenoble et al., 1988) mis en place par la division protection contre les érosions du Cemagref de Grenoble à partir de 1983, conjointement avec le Cemagref d'Aix-en-Provence et le Service de Restauration des Terrains en Montagne des Alpes de Haute-Provence, sont destinés à faire progresser les connaissances sur ce thème. Ils sont situés dans les Alpes du sud, à 15 km au nord-est de Digne (figure 1).

Ils s'étagent entre 800 et 1300 m d'altitude.

Ils sont soumis à un climat méditerranéen, avec des tendances montagnardes. La pluviométrie annuelle est de l'ordre de 850 mm. Les pluies ont une distribution irrégulière, avec une sécheresse estivale marquée. Les orages d'été et d'automne comportent de fortes intensités de pluie (dépassant couramment 60 mm/h). Les hivers sont peu enneigés. Le gel sévit de décembre à mars (90 jours de gel par an en moyenne à Digne), avec un dégel journalier superficiel pour les versants exposés au sud.

Les bassins sont implantés en quasi-totalité sur l'unité lithologique des Terres Noires du Jurassique : marnes, marno-calcaires, bancs calcaires, calcaires marneux.

Le développement de la végétation est handicapée par les conditions climatiques et géomorphologiques. Le bassin versant du Brusquet a été reboisé au siècle dernier dans le cadre de la politique de Restauration des terrains en montagne.

Du point de vue géomorphologique, les bassins versants de Draix présentent, lorsqu'ils sont dénudés, un faciès de ravinement intense et généralisé (badland ou roubine selon la terminologie locale). Les pentes des talwegs principaux sont en général assez faibles (4 - 5 %), alors que celles des versants sont fortes (supérieures à 70 %). L'altération des marnes noires forme de nombreuses plaquettes qui s'accumulent dans le fond des ravines et sont entraînées par les orages jusqu'au cours d'eau.

Lors des crues, cela donne des écoulements à très fort débit solide, pouvant aller jusqu'à des laves torrentielles.

Cinq bassins de différentes tailles sont instrumentés. Ils ne présentent pas tous un faciès de badlands, car certains sont plus ou moins végétalisés ou boisés. Le tableau 1 résume leurs caractéristiques.

Nom du bassin	Surface (ha)	Taux de dénudation (%)	Lithologie
Roubine	0,13	79	"Terres noires" datées du Bajocien à l'Oxfordien (marnes surtout)
Moulin	8	54	
Laval	86	68	
Francon	72,8	44	
Brusquet	108	13	Marnes noires Toarcien-Aalénien et marno-calcaires Aalénien

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des bassins de Draix

L'instrumentation de chaque bassin est décrite sur la figure 2.

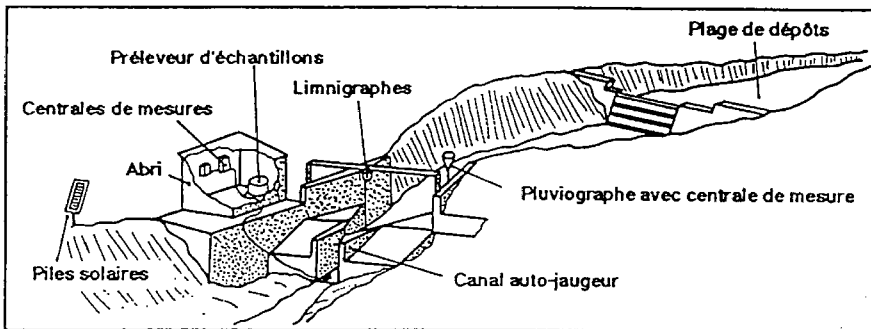


Figure 2 : Description d'un site de mesure

Chaque site comporte en particulier :

- un piège à sédiments fermé par un barrage perméable qui retient une partie des sédiments à l'amont de la station limnigraphique ;
- une station limnigraphique dans laquelle sont implantés un limnigraphe et un préleveur d'échantillons destiné à estimer les concentrations de sédiments transitant au droit de la station.

Le détail du fonctionnement des appareils est décrit par CAMBON J.P. et al. (1990) ; le traitement des données recueillies est exposé par MATHYS N. et MEUNIER M. (1989) ou BORGES A.L. (1993).

Trois bassins ont été utilisés dans le travail présenté : la Roubine, le Laval, le Brusquet. Comme l'indique le tableau 1, ces trois bassins sont très différents deux à deux, soit par la taille, soit par le taux de couverture végétale ; leur comparaison deux à deux a donc permis d'isoler les effets d'échelle de taille ou de la végétation.

Les données disponibles ont été analysées, puis des modèles pluie - débit et pluie - érosion ont été élaborés. Événementiels, ils ont permis d'accéder à des résultats annuels.

1 - Modèles événementiels pluie - débit

La modélisation hydrologique pluie - débit est un préalable indispensable à la modélisation de l'érosion car dans les bassins versants torrentiels, le débit liquide intervient dans les processus érosifs.

Cependant, on n'a pas désiré créer une nouvelle modélisation mais sélectionner, parmi celles déjà connues, celle qui convenait le mieux à notre problème :

- conceptuelle, globale ;
- dont les paramètres peuvent être reliés à des caractéristiques physiques des bassins pour une utilisation en prédétermination ;
- robuste, c'est-à-dire dans notre cas gardant une précision acceptable lorsque la taille ou le taux de végétation des bassins varie fortement.

Pour y parvenir, on a analysé les phénomènes physiques impliqués à partir des bassins de Draix. On a calé les modèles sélectionnés par optimisation. On a comparé les performances lors d'une phase de validation. Le choix du modèle s'est effectué au vu de ces performances et de la perspective de calibrage des paramètres à partir des caractéristiques physiques des bassins.

Le travail a été mené sur le Laval et le Brusquet dont les tailles sont assez semblables, et les taux de végétation très différents.

1.1 - La formation du débit liquide à Draix

1.1.1 - Spécificités des données

Moyennant des précautions particulières (protection contre le gel), les mesures de pluies ne posent pas trop de problèmes. En cas de lacunes sur un poste, une complémentation peut être effectuée, sous certaines conditions, à partir d'un autre poste.

On a utilisé :

- pour le Laval, les postes Laval et Pompe ;
- pour le Brusquet, le poste Pépinière.

1.1.2 - Notion de pluie limite

Cette méthode consiste à étudier la hauteur de pluie d'une averse donnant un écoulement en fonction de la durée de l'épisode sec l'ayant précédé (un épisode sec débute à la fin d'une pluie ayant entraîné un ruissellement).

Les figures 3 et 4 représentent les courbes obtenues respectivement pour le Laval et le Brusquet.

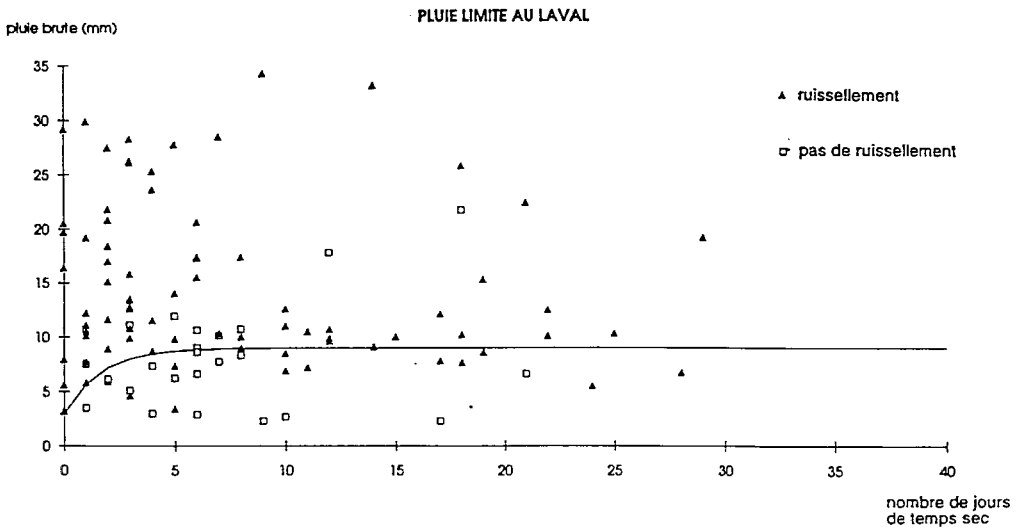


Figure 3 : Pluie limite au Laval (VERITE F., 1993)

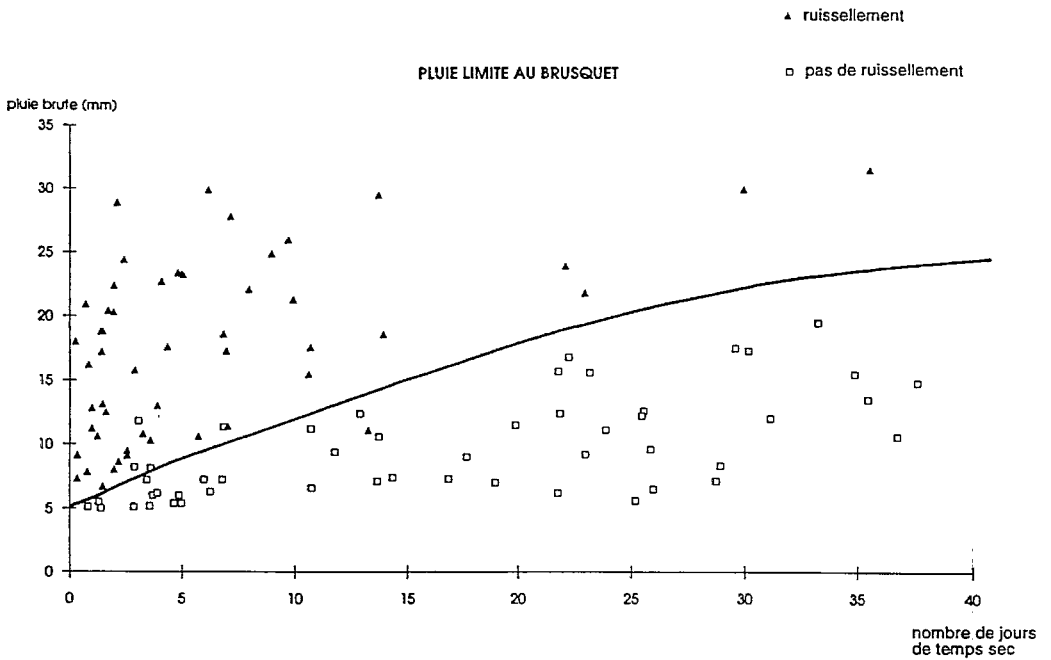


Figure 4 : Pluie limite au Brusquet (VERITE F., 1993)

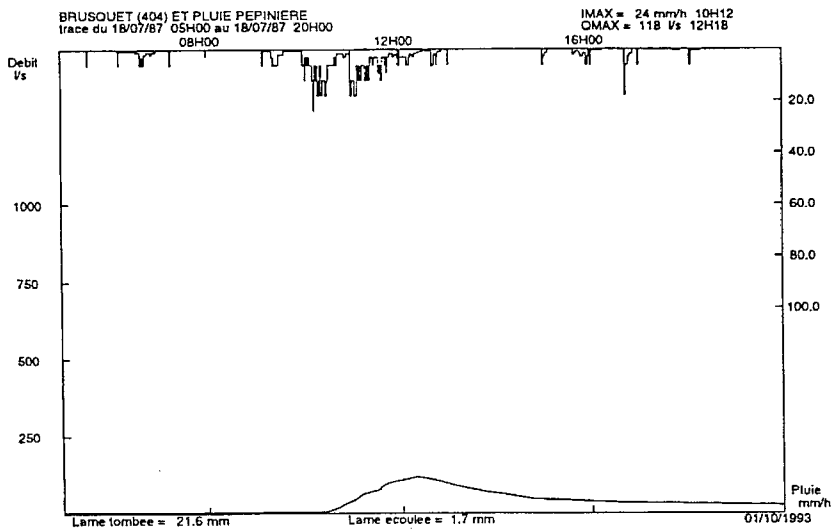
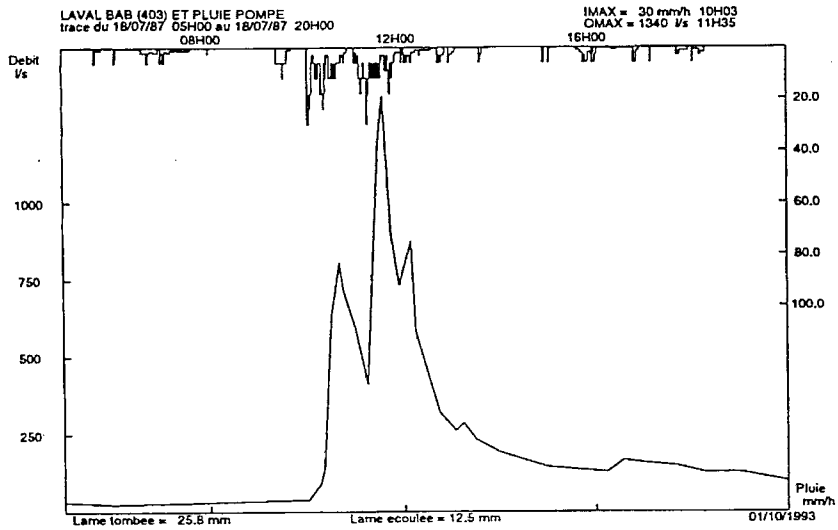


Figure 5 : Forme des crues au Laval et au Brusquet

On constate que pour une même période sèche, le Brusquet commence à ruisseler plus tard que le Laval. Les pertes maximales (pour des périodes de temps sec très longues) sont de 25 mm au Brusquet et de 9 mm au Laval. Cette valeur est beaucoup plus rapidement atteinte (7-8 jours) au Laval qu'au Brusquet (40 jours).

1.1.3 - Coefficient d'écoulement

Il s'agit d'un coefficient d'écoulement moyen interévénementiel :

- Laval 1985 - 1990 : 0,21

- Brusquet 1988 - 1991 : 0,12

Les pertes sont donc supérieures au Brusquet (en valeur relative).

1.1.4 - Formes des crues

Les crues du Laval sont brutales et courtes. Au Brusquet, les débits de pointe sont plus faibles, retardés par rapport au Laval, et le tarissement est plus lent (figure 5).

1.1.5 - Spécificités des sols du Brusquet (LAROCHE H., 1991)

Nous avons recherché les caractéristiques des sols de ce bassin versant qui interviennent dans son comportement hydrologique.

1.1.5.1 - Les grands types de stations et de sols

D'emblée, on distingue trois grandes zones :

- la partie inférieure du bassin versant où l'érosion contribue fortement à l'hétérogénéité des sols rencontrés ;
- la partie moyenne où la forte pente provoque un colluvionnement à pierrosité grossière ;
- la partie supérieure, zone beaucoup plus homogène de pente moyenne, où la roche-mère marno-calcaire plus stable donne naissance à des sols colluviaux à pierrosité faible.

● Zone aval du bassin versant

Le substrat est constitué de matériaux du Toarcien inférieur très facilement altérable. La Bléone a déposé des nappes alluviales (quaternaire) dont il ne subsiste que des lambeaux dans le bassin expérimental du Brusquet, suite à l'érosion des périodes interglaciaires. Cette érosion a également créé des ravines dans la marne. Sur les pentes de ces ravines, il y a pu y avoir soit remaniement de la couverture alluviale, soit colluvionnement des plaquettes de marne. Les types de sols observés découlent de cette interprétation géomorphologique.

Type 1

- Sols d'apport à matrice limono-argileuse (origine allochtone) marron clair. Ces sols reposent soit sur de la marne toarcienne légèrement altérée (a), soit sur un horizon compact (b).
- L'épaisseur des sols de ce type varie en fonction de l'érosion à laquelle ils ont été soumis.

Type 2

- Sols colluviaux initiaux de marne noire. Situés en bas de pente des ravins, ils sont constitués de plaquettes de marnes très altérées formant une matrice noire.
- Le cas des sols d'altération in situ de la marne a été cartographié conjointement avec le type précédent. Ce sont des sols très rares, d'épaisseur très faible (maximum 10 cm), sur pentes moyennes.

La cartographie précise de ces types de sols n'a pu être établie en raison du relief irrégulier : seuls les grands ensembles ont été représentés, à l'exclusion des localisations ponctuelles liées à un accident topographique.

● Zone moyenne du bassin versant

Type 3

- La roche-mère (marno-calcaires aaléniens) est moins sensible à l'érosion. La pente relativement forte engendre des colluviums de pente à matrice noire fine avec une pierrosité importante, anguleuse de 5 à 10 cm. Ces colluviums reposent soit sur la roche mère très légèrement altérée, soit sur un horizon compact.

● Zone amont du bassin versant

Type 4

- Sols constitués d'épais colluviums à matrice autochtone à pierrosité peu importante et de faible taille (1 à 5 cm). Ils reposent sur un horizon d'altération de la marne in situ, à savoir de l'Aalénien inférieur en bas de zone et de l'Aalénien supérieur plus calcaire en partie haute.

Type 5

- Quelques restes de nappes alluviales sont présents sur les replats. Ces sols à matrice brune orangée et pierrosité anguleuse de 0,5 à 1 cm reposent sur de la marne in situ faiblement altérée.

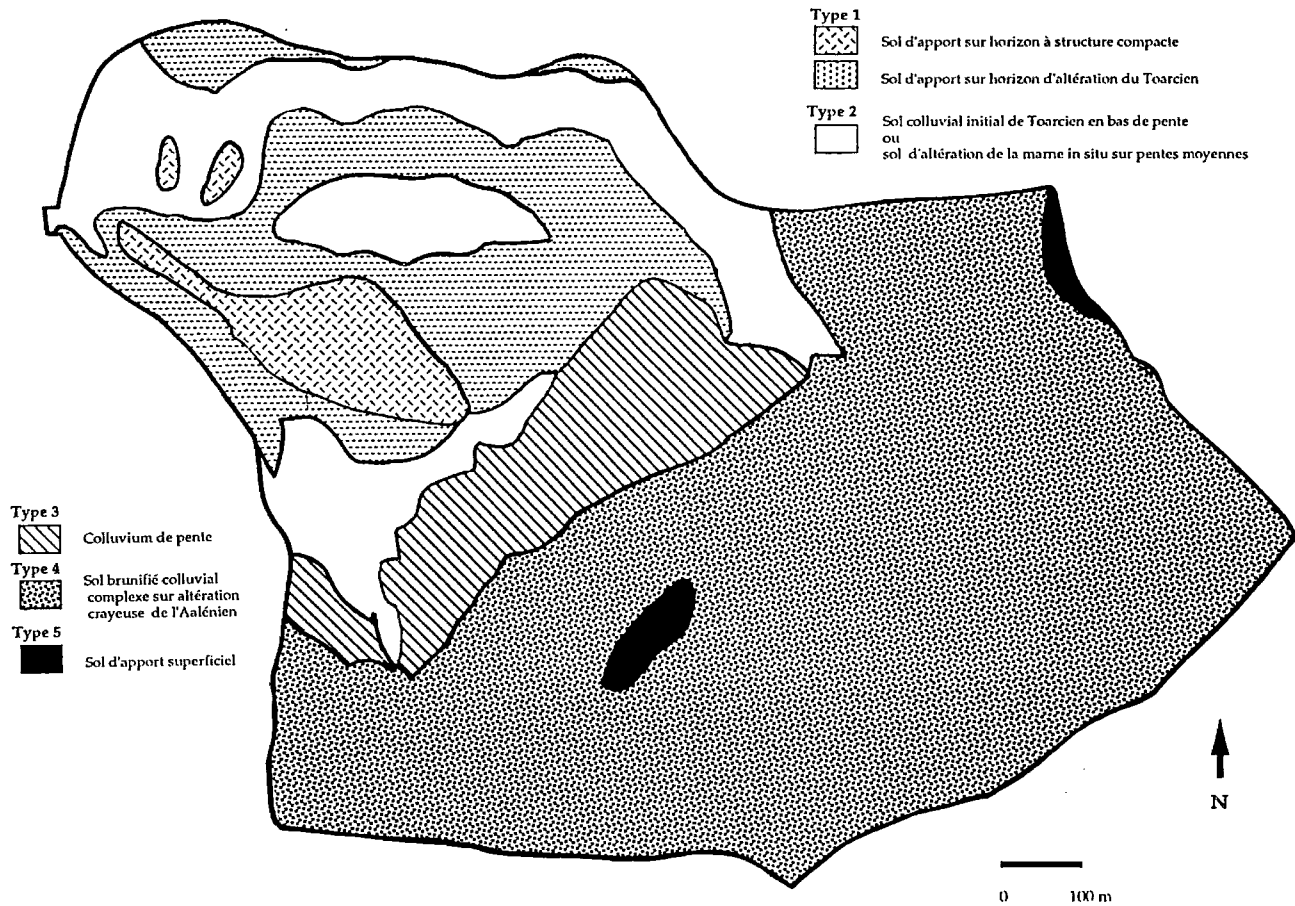
La figure 6 présente la carte de ces grands types de sols.

Le tableau 2, établi à partir de la description des profils, résume quelques caractéristiques pouvant avoir une incidence sur le comportement hydrologique de ces sols.

	Type 1 (a)	Type 1 (b)	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Texture	Limoneuse	Limoneuse à limono-argileuse	Limono-argileuse	Limoneuse	Limoneuse	Limoneuse
Épaisseur (cm)	25-32	29 + 100 d'horizon B compact	24	20-30 + 150 d'horizon B compact ou 10 de B/C	24-77 + 40-70 B/C	30

Tableau 2 : Texture et épaisseur des profils de sols réalisés au Brusquet

Figure 6 : Carte des grands types de sols du Brusquet



1.1.5.2 - Mesures de laboratoire

Sur les 11 stations étudiées en détail dans l'étude pédologique, on a procédé à des mesures permettant de caractériser l'eau dans les sols :

- densité apparente ;
- capacité au champ ;
- macroporosité et microporosité (en %) ;
- coefficient de perméabilité.

Seule la porosité nous paraît immédiatement et quantitativement utilisable dans notre approche hydrologique actuelle ; en voici les valeurs moyennes en pourcentage par type de sol et horizon selon LAROCHE H. et l'équivalent en volume pour le profil considéré (tableau 3).

		Type 1 (a) et (b)	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Horizons A	M	35 - 47	33 - 40	55	31 - 49	41
	m	19 - 23	19	20	22 - 29	19
Epaisseur (cm)		25 - 52	24	20 - 30	24 - 77	30
Horizons B	M	26		32		
	m	27		26		
Epaisseur (cm)		100 (b)*		150*		
Horizons B/C	M	35		37	25 - 36	
	m	32		26	24 - 37	
Epaisseur (cm)		5 - 10 (a)*		10*	40 - 70	
Total profil en mm						
Valeurs extrêmes	M	(a)* 110 - 279	79 - 96	B 590 - 645*	174 - 629	123
	m	64 - 152	46	430 - 450	149 - 482	57
	M	(b)* 350 - 500		ou B/C 147 - 202		
	m	317 - 390		66 - 86		
Valeurs moyennes	M	310	127	396	402	123
	m	230	46	344	316	57

* l'un exclut l'autre

M = macroporosité ;

m = microporosité

Tableau 3 : Valeurs extrêmes et moyennes en mm, de la porosité

Les valeurs extrêmes sont rarement atteintes car elles sont obtenues en conjuguant les extrêmes de toutes les grandeurs utilisées. C'est pourquoi on a calculé des valeurs moyennes. Ces valeurs sont une limite supérieure de la capacité maximale d'absorption du sol au cours d'une averse : il n'est pas évident que la microporosité se remplit rapidement, ni les horizons profonds moins perméables.

Les courbes de ressuyage expérimentales ayant servi au calcul de la capacité au champ permettent des commentaires qualitatifs :

- la pierrosité favoriserait le ressuyage rapide des premières heures ;
- la matière organique peu décomposée favoriserait un ressuyage très rapide.

1.1.5.3 - Interprétation

Les sols situés en partie haute du bassin (types 3 et 4) ont à la fois un ressuyage rapide et une capacité d'absorption élevée. Ils envoient probablement de l'eau vers la partie inférieure. Les sols de cette partie plutôt moins poreux pourraient être saturés assez rapidement.

1.2 - Le modèle sélectionné : fonction de production SCS + transfert par hydrogramme unitaire triangulaire dissymétrique

Une étude préalable a permis de sélectionner la fonction de production SCS (Soil Conservation Service, USA) associée à un transfert par hydrogramme unitaire triangulaire dissymétrique (VERITE F., 1993).

La fonction de production SCS repose sur les hypothèses suivantes (LABORDE J.P., 1987) :

- la capacité d'infiltration instantanée $j(t)$ en mm/h décroît quand le temps tend vers l'infini ;
- le ruissellement n'apparaît qu'après qu'il soit tombé une quantité S_0 (mm) de pluie (rétention initiale) ;
- le rapport entre la lame ruisselée cumulée $R(t)$ et la pluie cumulée $P(t)$ diminuée de S_0 est égale au rapport de ce qui s'est déjà infiltré à l'infiltration potentielle S : le coefficient d'écoulement décroît au cours de la crue ; S est la capacité d'infiltration cumulée qui serait atteinte pour un temps infini.

D'où à un instant t :

$$R(t) = \frac{[P(t) - S_0]^2}{P(t) - S_0 + S} \quad \text{si } P(t) > S_0$$

$$R(t) = 0 \quad \text{si } P(t) \leq S_0$$

La fonction de transfert par hydrogramme unitaire triangulaire dissymétrique associée à une pluie unitaire un hydrogramme triangulaire de base égale à t_c où t_c est le temps caractéristique en mn et k un coefficient sans dimension (on vérifiera que la durée de la pluie unitaire est inférieure à $t_c/10$). k donne la position du pic de crue : par exemple, pour $k=3$, ce dernier est situé au $1/3$ du temps caractéristique.

On constate que l'on doit donc calibrer 4 paramètres : S_0 , S , t_c et k (pour S et S_0 il s'agit plutôt de déterminer les conditions initiales).

Lors de l'étude préalable à la sélection du modèle hydrologique, ce calibrage s'est effectué ainsi :

- S_0 a été déterminé à partir de la courbe de pluie limite du bassin (cf § 1.1.2) en fonction de la durée de l'épisode sec ayant précédé la crue ; S_0 max. correspond à la rétention maximale pour un long épisode sec ;

$$- S = \frac{S_0}{S_0 \text{ max.}} S \text{ max.}, \quad S \text{ max. étant calibré par optimisation ;}$$

- t_c et k ont été calibrés par optimisation ; une relation entre t_c et l'intensité de la pluie semble exister, elle serait à confirmer ;

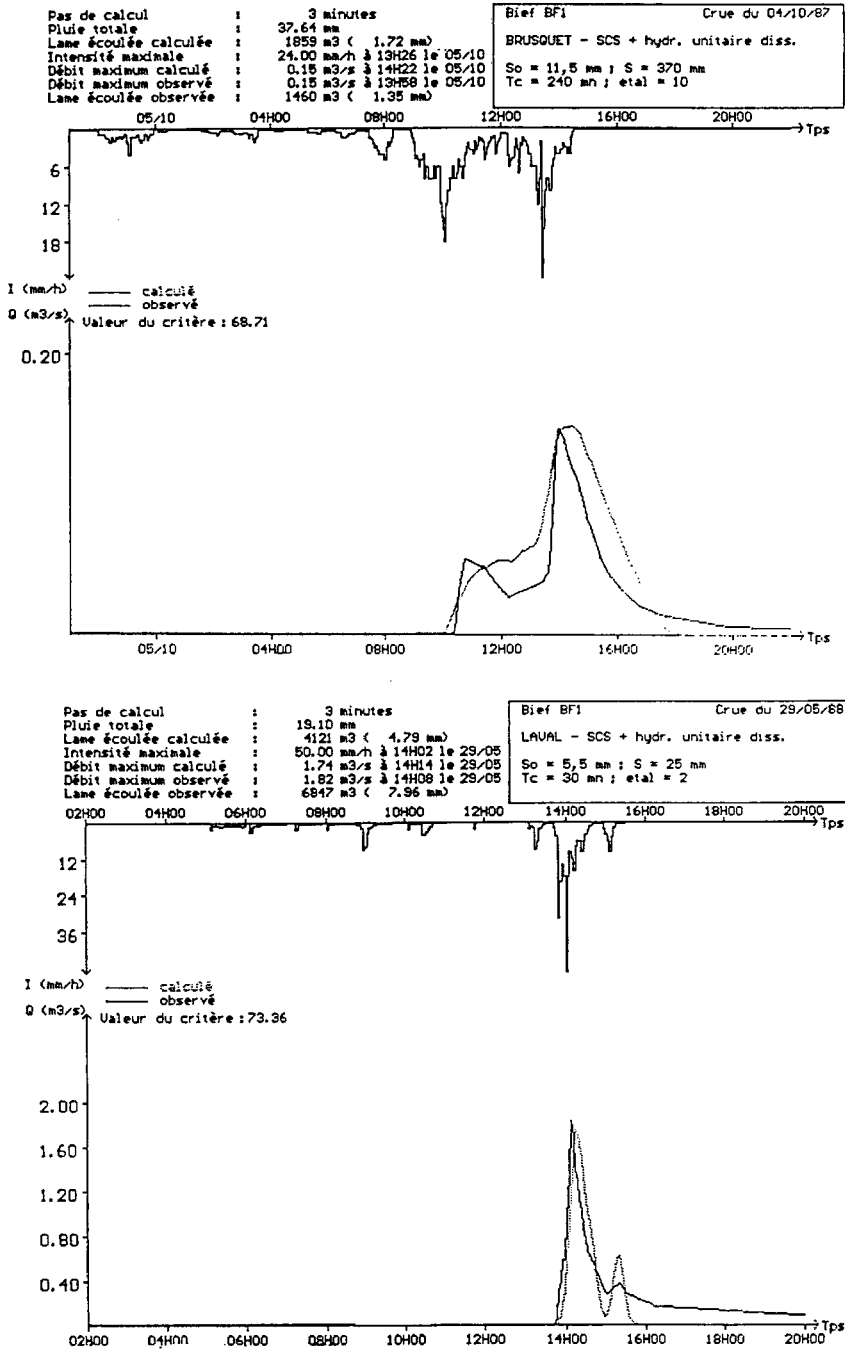


Figure 7 : Reconstitution d'hydrogrammes par le modèle hydrologique sélectionné

Les performances du modèle ainsi utilisé ont été (tableau 5) :

	Brusquet		Laval	
	Calibration	Validation	Calibration	Validation
Nombre d'épisodes	12	12	12	12
Erreur moyenne sur le débit de pointe (%)	12	43	7	28
Erreur moyenne sur la lame ruisselée	33	49	23	41

Tableau 5 : Performances du modèle hydrologique sélectionné

Naturellement, les épisodes ayant servi à la calibration n'ont pas été utilisés pour la validation.

La figure 7 donne un exemple de reconstitution d'hydrogrammes au Laval et au Brusquet.

1.3 - Utilisation

Nous proposons d'utiliser sur les bassins versants torrentiels sur marnes noires de l'ordre du km² du bassin de la Durance la modélisation hydrologique constituée par l'association de la fonction de production SCS avec une fonction de transfert à hydrogramme unitaire triangulaire dissymétrique.

Ce modèle a été sélectionné pour ses performances en validation interne à Draix et la possibilité de prédétermination des paramètres en fonction des caractéristiques des bassins versants. En effet, le tableau 6, bien que très élémentaire, ouvre des perspectives de relations, compte tenu de la cohérence qu'il présente.

	Surface (km ²)	Taux de dénudation (%)	Pente moyenne des versants (%)	So max (mm)	S max. (mm)	Tc (mm)	K
Brusquet	1,08	13	30	20-25	600	100 à 350	10
Laval	0,86	78	70	9	28	25 à 45	2

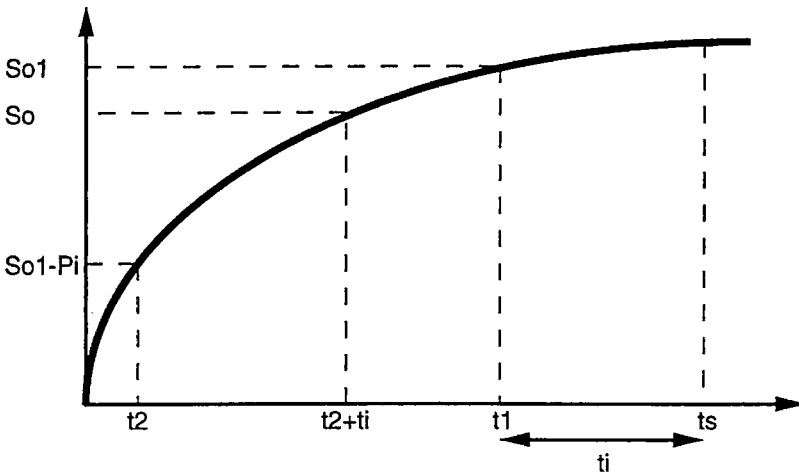
Tableau 6 : Valeur des relations paramètres - caractéristiques physiques des bassins

De plus, la valeur de S max. du Brusquet est compatible avec les valeurs de porosité tirées de l'étude pédologique de LAROCHE H. (1991) présentée en 1.1.5.

A ce stade, une utilisation en prédétermination reste limitée à des bassins assez semblables au Laval et au Brusquet. On extrapolera les courbes de pluie limite respectives.

Toutefois, dans les cas où, tout en restant dans le domaine de la prédétermination, il est possible d'établir une courbe de pluie limite, on améliorera les résultats. En effet, l'établissement d'une telle courbe ne requiert la connaissance que de pluies journalières et d'un catalogue de crues mentionnant l'existence ou non d'un écoulement. Elle situera la valeur de So max.

Signalons aussi que l'utilisation de cette courbe pour l'initialisation de S_0 sera améliorée, dans les cas où des pluies sans écoulement se sont produites pendant l'épisode de temps sec, par une lecture nuancée (figure 8).



On cherche S_0 pour t_s jours de temps sec. S_0 ne peut se lire directement sur la courbe car une pluie intermédiaire P_i a eu lieu t_i jours auparavant, elle n'a pas provoqué de ruissellement. A la fin de la pluie, la rétention initiale était $S_{01}-P_i$, correspondant à t_2 . S_0 se lit à t_2+t_i .

Figure 8 : Lecture de la courbe de pluie limite

Pour des bassins de taille supérieure au km^2 , la fonction de production SCS reste valable. Mais la connaissance des paramètres T_c et k de la fonction de transfert occasionnera des difficultés en l'état actuel de la recherche. Si on les surmonte, alors, ETC, du fait de sa possibilité de spatialiser un bassin versant, permet une utilisation en prédétermination sur des bassins hétérogènes composés d'une juxtaposition d'unités ressemblant au Laval ou au Brusquet. Le routage des débits liquides est effectué de façon très simplifiée par translation des hydrogrammes sans déformation.

Une utilisation avec calibrage par optimisation et validation pourra être envisagée sur d'autres bassins instrumentés, la méthode d'initialisation de S_0 et de S étant conservée.

On pourra ainsi procéder à la validation externe du modèle hydrologique. De surcroît, la valeur des paramètres calibrés pourra enrichir le tableau 6 et autoriser ainsi la prédétermination pour des bassins versants de plus en plus différents de ceux du Laval et du Brusquet.

2 - Modèles événementiels pluie - érosion

Dans cette partie, on établit des modèles statistiques entre la pluie et l'érosion, à différentes échelles et taux de végétation, de façon à mieux comprendre le fonctionnement des mécanismes. De surcroît, ces modèles, lorsqu'ils sont validés, permettent une estimation de l'érosion sur les versants.

Le travail s'effectue sur la Roubine, le Laval, le Brusquet.

2.1 - Processus érosifs à Draix (Cemagref Grenoble, et al., 1987)




















Avant d'entrer dans la recherche des fonctions expliquant la quantité de sédiments produite par les bassins sous l'action de la pluie, on doit avoir une certaine connaissance des mécanismes, processus et formes d'érosion qui prédominent à Draix. Les observations qualitatives de l'érosion présentées ci-après en sont extraites des travaux de COULMEAU P. (dans Cemagref Grenoble et al., 1987).

Le gel et les alternances d'humidification/assèchement de la roche-mère sont les agents responsables de la désagrégation des roches marneuses et marno-calcaires qui s'achève par la formation d'une couche d'altération, origine des sédiments capables d'être entraînés par la pluie et le ruissellement vers l'exutoire des bassins versants. Cette désagrégation est favorisée par la présence de diaclases, de joints et de plans de schistosité et elle varie en fonction du taux de calcaire, du taux d'argile et de la porosité des sols. Le taux de calcaire et la porosité à l'eau des deux principales formations géologiques trouvées dans les bassins du Laval et de la Roubine sont indiqués dans le tableau 7.

	Porosité à l'eau (%)	Taux de calcaire (%)
Marnes supérieures (Terres Noires)	6,8	38,4
Calcaire	1,6	72,3

Tableau 7 : Porosité et taux de calcaire des principales formations rocheuses à Draix

D'après OLIVRY et HOORELBECK (1988), "la particularité des marnes est de se débiter en frites, plaquettes puis palettes et éléments fins pour passer aux suspensions et argiles d'autant plus vite que les teneurs en carbonate de calcium sont faibles". Les différentes étapes de l'altération des marnes à Draix sont résumées par la figure 9. Les trois derniers modèles sont ceux qui traduisent l'altération des roches observée au Laval et à la Roubine.

	Dimension des éléments (plus grande longueur)					
	+ de 20 cm	de 20 à 10 cm	de 10 à 5 cm	de 5 à 2 cm	de 2 à 1 cm	moins de 1 cm
Calcaire marmeux Série striée Taux de calcaire : 58 %	1a : plaques allongées 	1b : plaquettes allongées 	1c : aiguilles frites 	1d : aiguilles frites 	1e : aiguilles frites 	1f : frites graviers 
Marne Série inférieure Taux de calcaire : 42 %			2a : galet 	2b : frites 	2c : plaquettes 	2d : plaquettes 
Marne Série supérieure Taux de calcaire : 38 %		3a : galets 	3a : galets 	3b : galets 	3c : plaquettes 	3d : plaquettes 
Marne Série supérieure Taux de calcaire : 37 %			4a : plaquettes 	4b : plaquettes 	4c : plaquettes 	4d : plaquettes 

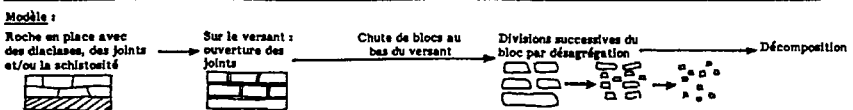


Figure 9 : Altération des roches du bassin versant du Laval d'après COULMEAU P. dans Cemagref Grenoble et al., 1987

Différentes observations de terrain (Cemagref, Grenoble et al., 1987) ont montré que le ruissellement en nappe ne débute jamais dès le commencement de la pluie : sur le sol sec, il débute lorsque les pores et les fissures de dessiccation du sol sont remplis d'eau ou refermés ; sur le sol humide, il débute plus tôt. Ce type d'écoulement opère à la surface des marnes altérées un glaçage dû à l'obstruction des pores du sol par les limons.

Le ruissellement diffus en micro-chenaux inorganisés opère un décapage du sol de ses matières les plus fines : argiles, limons et sables. Lorsque l'intensité de la pluie est suffisante (orages d'été), les chenaux peuvent se réunir et donner naissance à des rigoles où l'écoulement concentré commence à pouvoir transporter les sédiments grossiers.

Le ruissellement concentré donne origine aux rigoles et aux ravines. Les rigoles sont des talwegs saisonniers, de l'ordre décimétrique, en forme de gorge à parois verticales. Elles atteignent leur creusement maximum à la pointe de l'averse ; lorsque la pluie diminue d'intensité, elles ne se creusent plus mais élargissent leur fond, créant à leur ouverture des surplombs qui s'éboulent dans le chenal. Les ravines sont des talwegs permanents de l'ordre métrique, en forme de V symétrique, où les processus d'érosion sont dûs au ruissellement concentré et aussi aux éboulements, à la solifluxion pelliculaire, au ruissellement diffus et aux mouvements de masse.

On ne décrira pas les différentes formes et formations d'érosion du bassin versant du Laval (pour cela voir COULMEAU P., Cemagref Grenoble et al., 1987) mais on présentera une synthèse de son analyse des effets saisonniers de l'érosion dû au cycle des rigoles, car c'est ce cycle qui crée un stock de sédiments sur les versants, disponibles au détachement et à l'entraînement par les pluies.

Au printemps, après les derniers gels, la pluie commence à creuser les rigoles sur les versants. Le ruissellement dégage les chenaux et évacue les éléments accumulés par le gel pendant l'hiver.

En été, sous l'action des orages violents, les rigoles développent des réseaux plus complets sur les versants à forte pente. Le creusement des chenaux causé par ces orages, forme des incisions profondes à la surface des versants tandis que les pluies de plus faible intensité comblent les rigoles avec des matériaux érodés par les pluies précédentes de moyenne intensité. A mesure que les orages sont de plus en plus intenses, les rigoles s'approfondissent et, dans certains cas, les pluies torrentielles peuvent réduire le nombre de rigoles en détruisant leurs interfluves. C'est dans cette période qu'on observe les plus grands apports solides à la plage de dépôts ; les versants sont donc "nettoyés".

Les versants exposés au nord montrent en premier les effets du gel. Le gel rompt et ameublir la croûte de surface qui s'est formée par le lavage des limons qui ont colmaté les interstices et pores du sol pendant les pluies d'automne. La solifluxion laminaire domine et les rigoles se dégradent par auto-comblement par la suite de l'éboulement de leurs berges. Sur les versants exposés au sud, lors d'une journée ensoleillée, la surface du sol est saturée en eau provenant de la fonte de la glace en surface, il se produit alors la gélifluxion pelliculaire. Les gonflements des aiguilles de sol dégradent la surface et quand elles fondent, la surface du sol glisse et des plaquettes de sédiment s'écroulent. Ceci peut expliquer en partie les grosses quantités de matériau transitant dans les ravines au printemps.

En résumé, deux types de processus sont actifs dans le cycle érosif des rigoles à Draix : l'érosion par ruissellement concentré dominant en été et au printemps ; et la solifluxion laminaire due à l'action de cycles gel-dégel en hiver.

Une autre description des processus érosifs sur les marnes est proposée par OLIVRY et HOORELBECK (1988). Selon ces auteurs, à partir d'observations sur les marnes de la région du Buëch : *"en début d'averse, l'effet de battance mobilise les particules libres de la surface des marnes sèche et par ruissellement, apporte la première pointe de concentration. Puis, l'imbibition des marnes provoque rapidement un gonflement des argiles, la fermeture des fissures et une plus*

grande cohésion des marnes. Avec la diminution de l'infiltration, le ruissellement s'intensifie et l'érosion qui avait diminué va se développer suivant les filets du ruissellement et les rigoles observés sur les versants, en suivant en intensité le hyétogramme de l'averse. Lorsque l'imbibition a gagné en profondeur, des mottes de marne altérée peuvent se détacher du versant ou atteindre leur limite de liquidité et rejoindre le lit du ruisseau. A ce niveau, d'ailleurs, l'importance de l'écoulement augmentant son pouvoir érosif va exporter les dépôts précédemment stockés et faciliter l'érosion des bas des versants".

Naturellement, la végétation et la lithologie modulent l'intensité de tous les processus qui viennent d'être décrits.

Enfin, nous aimerions insister ici sur la capacité des marnes à fournir des matériaux d'altération devenant progressivement mais rapidement très fins.

2.2 - Spécificités des données et constitution des échantillons

La mesure de l'érosion à Draix recouvre deux termes :

- une mesure globale des matériaux les plus grossiers piégés dans la plage de dépôts ; selon les contraintes de gestion afférentes à chaque période, les volumes cumulés fournis sont le résultat d'une ou plusieurs crues ;
- une mesure discontinue des matériaux les plus fins ayant transité à l'aval du piège à matériaux, obtenue par échantillonnage de la crue par un préleveur automatique. Les problèmes posés par le passage de mesures discrètes au volume dit "transité" de sédiments d'un épisode sont détaillés par BORGES A.L. (1993).

Précisons à cette occasion que la concentration des échantillons peut dépasser 400 g/l, ce qui situe les écoulements dans le domaine des écoulements hyperconcentrés.

Lors de la constitution des échantillons, les épisodes hivernaux ont été éliminés car ils fonctionnent de façon encore plus complexe et les mesures sont moins fiables.

D'autres problèmes se sont posés :

- sur certains épisodes, on a des lacunes dans les prélèvements ; on a complété les données à partir des relations statistiques établies ;
- pour les volumes déposés, on doit répartir les volumes cumulés entre les crues lorsqu'elles sont multiples ; on a procédé en deux phases : dans un premier temps, une relation statistique a été établie sur les volumes de dépôt résultant d'une crue unique, puis on a étendu l'échantillon en recherchant par itération une explication satisfaisante des volumes déposés (cf. § 2.3.2.2)

L'instrumentation des bassins de Draix débute en 1983 ; les données commencent à être disponibles en 1985. Au Laval et à la Roubine on a scindé l'échantillon en deux : la période 1985-1988 a été utilisée pour le calage et celle de 1989-1990 pour la validation des modèles statistiques. Au Brusquet, le nombre de données est beaucoup trop faible pour adopter cette rigueur méthodologique : on a traité la période 1987-1991 dans son intégralité.

La saison hivernale engendre des dysfonctionnements des dispositifs de mesures du fait principalement de la formation de glace dans le lit ; aussi, les événements de cette saison sont-ils écartés des échantillons.

Les tableaux 8 et 9 récapitulent les caractéristiques des échantillons pour chacun des bassins.

	Roubine	Laval	Brusquet (1987-1991)
Nombre de crues enregistrées	86	99	35
Nombre de crues enregistrées hors saison hivernale	70	78	31
Mesure des volumes déposés :			
- pour une crue unique	16	5	0
- pour plusieurs crues (cumul)	17	19	9 (1988-1992)

Tableau 8 : Récapitulation des épisodes mesurés : période de calage (1985-1988)

	Roubine	Laval	Brusquet
Nombre de crues enregistrées	45	56	
Nombre de crues enregistrées hors saison hivernale	35	47	
Mesure des volumes transités	7	14	
Mesure des volumes déposés :			
- pour une crue unique	7	4	
- pour plusieurs crues (cumul)	8	12	
			Sans objet

Tableau 9 : Récapitulation des épisodes mesurés : période de validation (1989-1990)

On constate que le nombre d'événements complètement mesurés est relativement restreint.

L'érosion totale Poidtot (kg) (production de sédiments à l'exutoire) est la somme des volumes déposés V_{dep} (m^3) et transités V_{mes} (m^3) pondérés par leur masse volumique :

$$Poidtot = 2\,650 V_{mes} + 1\,700 V_{dep} \quad [1]$$

La comparaison des résultats des trois bassins du Laval, de la Roubine, et du Brusquet deux à deux a pour objectif de mettre en évidence les effets d'échelle et ceux du couvert végétal. En effet :

- le Laval et la Roubine sont semblables par leur taux d'érosion, mais leurs tailles sont différentes. On peut supposer que les processus érosifs et hydrauliques y sont également différents : du fait de sa taille et de la pente très forte de son talweg, la Roubine peut être considérée comme une unité élémentaire, sans aucune possibilité de stockage intermédiaire des sédiments. La mesure des processus érosifs y est indépendante de l'influence de l'hydraulique du transport solide. Le Laval est constitué de nombreuses unités élémentaires semblables à la Roubine, et desservies par des lits torrentiels où les dépôts et reprises de matériaux peuvent atteindre 300 à 500 m^3 au cours d'une crue importante (soit autant que le volume piégé dans la plage de dépôts) ;
- le Laval et le Brusquet sont semblables par leur taille, alors que leurs taux de végétation sont très différents. L'effet de la couverture végétale sur le bassin versant pourra être apprécié globalement par rapport à l'ensemble des mécanismes s'exerçant ; on ne peut espérer l'individualiser au niveau respectif des versants ou des lits.

2.3 - Comparaison entre le Laval et la Roubine (analyse et modélisation statistique)

2.3.1 - Comparaison analytique à l'échelle événementielle

Cette comparaison est possible sur 47 événements mesurés correctement simultanément au Laval et à la Roubine.

Deux pluviographes différents sont utilisés : "Pompe" pour le Laval et "Laval" pour la Roubine. La figure 10a montre que la pluviométrie de chaque événement est semblable d'un poste à l'autre. Aussi la comparaison des mesures d'érosion est-elle licite.

La figure 10b montre que les volumes transités au Laval et à la Roubine sont corrélés à l'échelle événementielle, alors que la figure 10c montre que les volumes déposés ne le sont pas. Cela provient de l'existence des phénomènes de dépôt et reprise dans le lit du Laval, contrairement à la Roubine. Ces phénomènes semblent jouer beaucoup plus sur les sédiments déposés (c'est-à-dire en moyenne les plus grossiers). On voit ici apparaître un premier effet d'échelle. L'érosion totale (figure 10d) est mieux corrélée entre les deux bassins que les volumes déposés. Ce graphique où l'érosion totale est rapportée à la surface érodée laisse apparaître un deuxième effet d'échelle : les pluies intenses engendrant une érosion sévère ne pouvant concerner une grande surface, l'érosion spécifique du Laval est moins importante que celle de la Roubine.

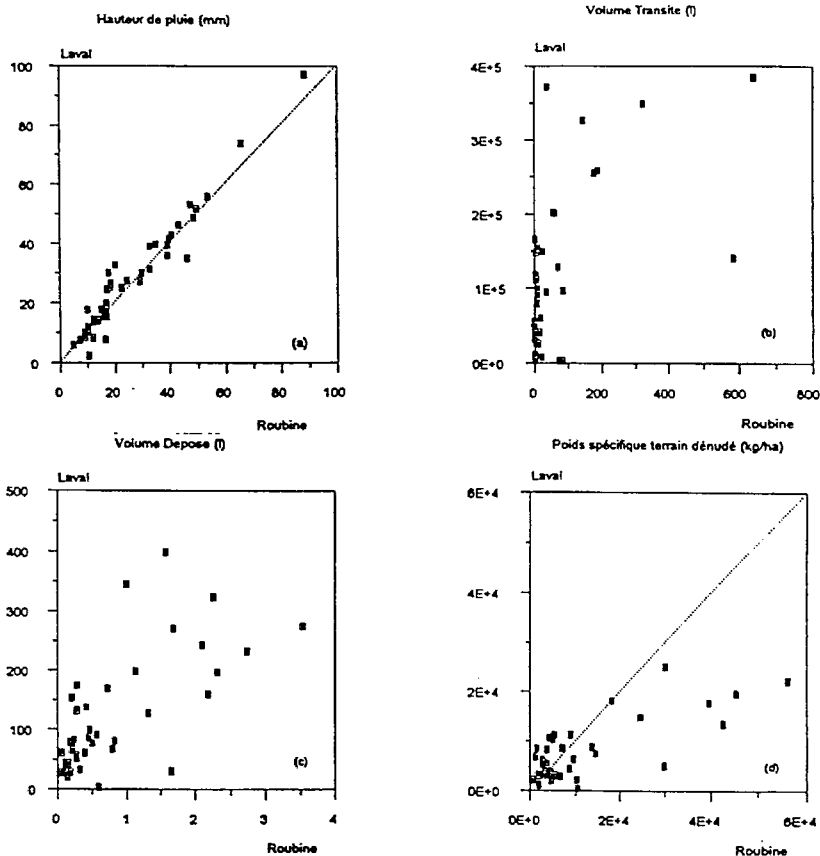


Figure 10 : Comparaison des mesures disponibles en même temps au Laval et à la Roubine ($E + i = 10^1$)

Dans le tableau 10 qui indique les proportions relatives des volumes déposés et transités moyennes interévénementielles, se trouve renforcée l'existence du premier effet d'échelle attribué aux phénomènes hydrauliques dans les biefs : ce tableau montre que la taille des matériaux transportés diminue très rapidement vers l'aval. Cette propriété des sédiments transportés par les torrents sur marnes noires est bien connue (OLIVRY et HOORELBECK, 1989). Elle rend plus complexe la modélisation du transport solide.

	Volumes déposés (%)	Volumes transités (%)	Transités/déposés
Roubine	85	15	0,18
Laval	40	60	1,50

Tableau 10 : Rapport entre volumes transités et déposés au Laval et à la Roubine

2.3.2 - Modélisation statistique événementielle

Cette démarche a consisté à expliquer les différentes composantes de l'érosion (volumes déposés, transités, ou poids total d'érosion), par des modèles statistiques. Des variables pertinentes ont été testées, liées à la pluie ou à l'écoulement :

- pluviométrie totale de chaque événement (htot en mm) ;
- idem au-delà de seuils variant de 5 mm/h à 15 mm/h ;
- intensité maximale de la pluie sur des durées variant de 1 à 60 mn (I_{01} à I_{60} en mm/h) ;
- énergie cinétique totale calculée selon WISCHMEIER (1959) ;
- idem au-delà de seuils variant de 5 mm/h à 15 mm/h ;
- débit maximal (Q_{max} en ℓ/s) ;
- lame ruisselée.

2.3.2.1 - Modélisation statistique du volume transité

Le volume transité V_{mes} (m^3) n'est corrélé ni avec les caractéristiques de la pluie, ni avec le ruissellement total ; mais avec le débit maximal (figures 11a et 11b), on obtient les expressions suivantes :

• Roubine : $V_{mes} = 8,99 Q_{max}^{1.38}$ $R^2 = 0,95$ $N = 14$ [2]

• Laval : $V_{mes} = 2\,592 Q_{max}^{0.577}$ $R^2 = 0,85$ $N = 19$ [3]

N est la taille de l'échantillon

R^2 est le coefficient de détermination

Les graphiques montrent qu'il y a peu d'événements importants dans l'échantillon utilisé pour le calage ; cela signifie que les exposants des variables sélectionnés dans les modèles ne devraient pas être considérés comme définitifs ; ils pourraient évoluer en fonction de l'intégration progressive des mesures réalisées sur les futures crues.

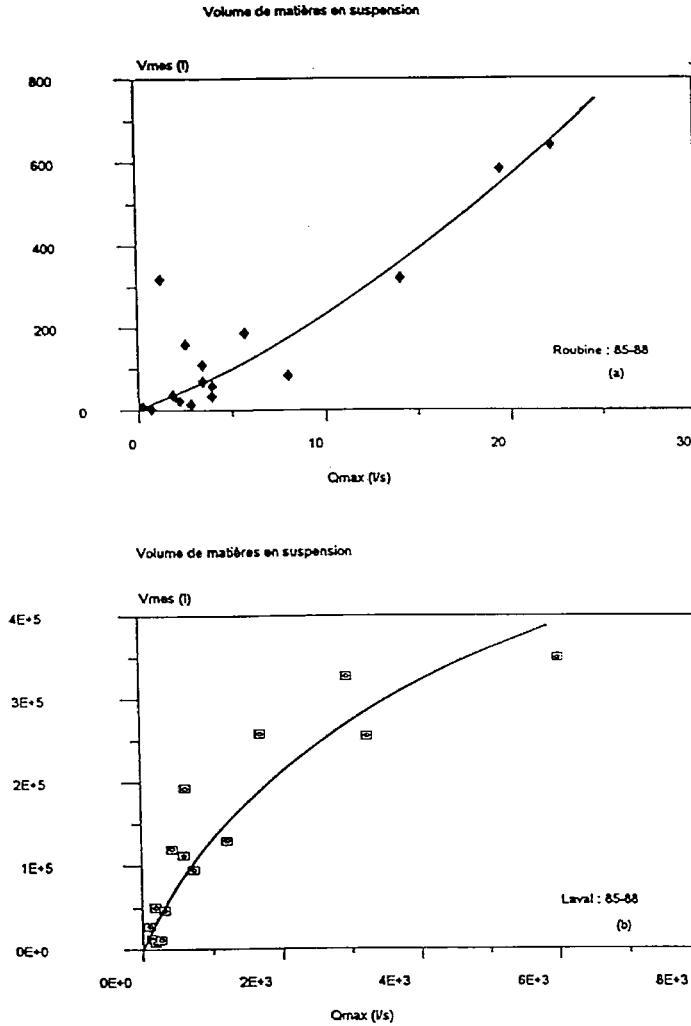


Figure 11 : Volumes transités 1985-1988 ($E + i = 10^1$)

On peut être surpris de ne voir retenu dans l'explication du volume transité aucun paramètre pluviométrique, s'agissant de petits bassins. Les boucles d'hystérésis entre la concentration (C_{mes} en g/l) et le débit sont d'une allure très variable d'une crue à l'autre (Cemagref, 1987). Mais la représentation, tous événements confondus, des données de concentration en fonction des débits liquides met en évidence l'existence d'une concentration maximale limite pour les hauts débits (100 à 400 g/l), (figure 12). Cette limite est connue dans certains écoulements très chargés de Chine (FEI et al., 1983), mais la question d'un taux de suspension maximale reste ouverte.

La figure 12 montre également qu'en-dessous d'un seuil de débit (4 l/s à la Roubine, 1,2 m^3/s au Laval), la concentration est très variable. Cela pourrait provenir de l'intervention de processus érosifs distincts : pour les faibles débits, les volumes transités proviendraient généralement des sédiments déjà disponibles, dont la quantité varie d'un épisode à l'autre.

Au-dessus de la limite déjà évoquée et évidente sur la figure 12, les fortes intensités de pluie génèreraient au travers du splash le détachement de matériaux supplémentaires maintenant la concentration vers des valeurs élevées.

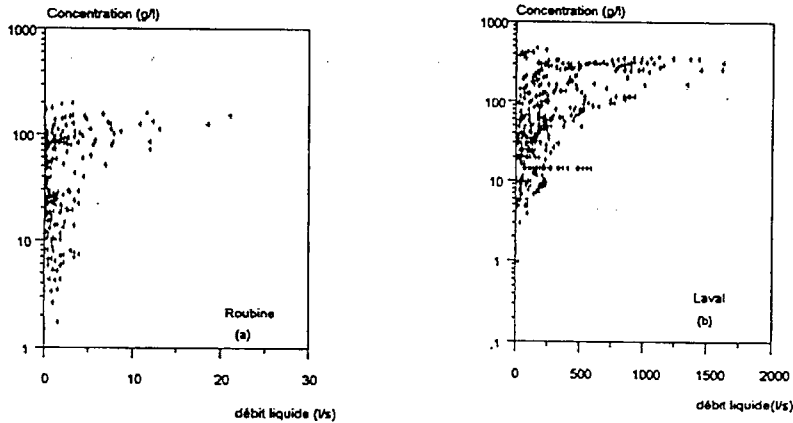


Figure 12 : Représentation de la concentration en fonction du débit (tous événements confondus)

2.3.2.2 - Modélisation statistique du volume déposé

Avant d'exposer les résultats, il est nécessaire de s'attarder sur le mode de complémentation des données : ainsi qu'on l'a déjà expliqué, les volumes déposés mesurés sont parfois le résultat de plusieurs crues (cf. tableaux 8 et 9) ; il était indispensable de tirer parti de ces données de façon correcte. La méthode adoptée a été la suivante :

- à partir des résultats concernant les dépôts résultant d'une crue unique, nous avons obtenu une première relation statistique ;
- nous l'avons utilisée pour répartir les dépôts cumulés résultant chacun de plusieurs crues ;
- nous avons ainsi étendu l'échantillon primitif et calé une nouvelle relation statistique ;
- nous avons réitéré l'opération de répartition des dépôts cumulés résultant chacun de plusieurs crues suivie du calage d'une nouvelle relation statistique jusqu'à convergence du coefficient de détermination de la relation statistique (cette convergence a été obtenue après sept itérations).

Les meilleurs modèles statistiques sont les suivants :

- **Roubine** : - avec l'échantillon des dépôts attribués à une crue unique :

$$V_{\text{dep}} = 0,039 \quad H_{\text{tot}}^{0,92} \quad I_{01}^{1,64} \quad N = 16 \quad R^2 = 0,96 \quad [4]$$

- avec l'échantillon étendu :

$$V_{\text{dep}} = 0,239 \quad H_{\text{tot}}^{0,92} \quad I_{01}^{1,24} \quad N = 59 \quad R^2 = 0,88 \quad [5]$$

- **Laval** : - avec l'échantillon des dépôts attribués à une crue unique :

$$V_{\text{dep}} = 0,137 \quad H_{\text{tot}}^{1,4} \quad I_{01}^{0,44} \quad N = 15 \quad R^2 = 0,63 \quad [6]$$

$$V_{\text{dep}} = 0,450 \quad H_{\text{tot}}^{1,136} \quad I_{01}^{0,455} \quad N = 52 \quad R^2 = 0,71 \quad [7]$$

L'introduction d'une variable liée à l'écoulement, comme le débit de pointe ou le volume ruisselé, n'améliore pratiquement pas la qualité du modèle. Les deux paramètres pluviométriques suffisent.

La figure 13 présente les relations précédentes. Leur qualité est surestimée par la méthode de complémentation des données. Elle est moins bonne sur le Laval que sur la Roubine.

On constate que l'intensité de la pluie interviendrait moins au Laval qu'à la Roubine : ceci peut être considéré comme un effet d'échelle spatiale.

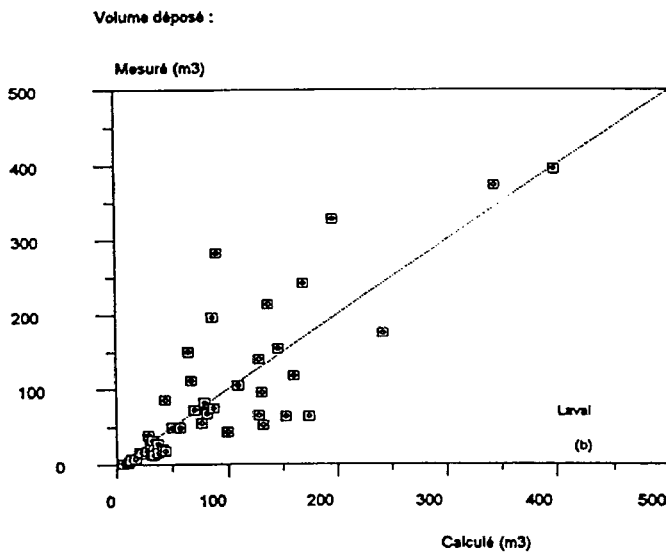
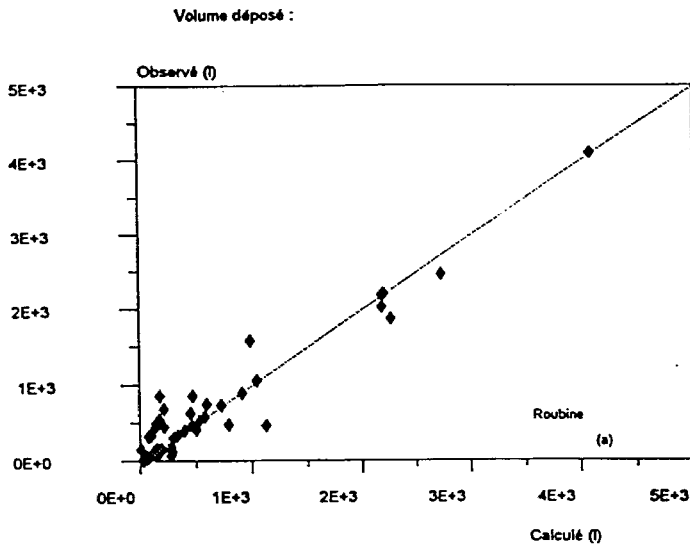


Figure 13 : Volumes déposés : modèles à deux variables (1985-1988) ($E + j = 10^j$)

2.3.2.3 - Modélisation statistique de l'érosion totale

Les meilleurs modèles à deux variables sont les suivants :

- **Roubine** : $Poidtot = 0,686 H_{tot}^{0,848} I_{01}^{1,179}$ $N = 64$ $R^2 = 0,97$ [8]

- **Laval** : $Poidtot = 4 515 H_{tot}^{0,868} I_{01}^{0,508}$ $N = 65$ $R^2 = 0,76$ [9]

On constate que les variables sélectionnées sont les mêmes que précédemment (figure 14).

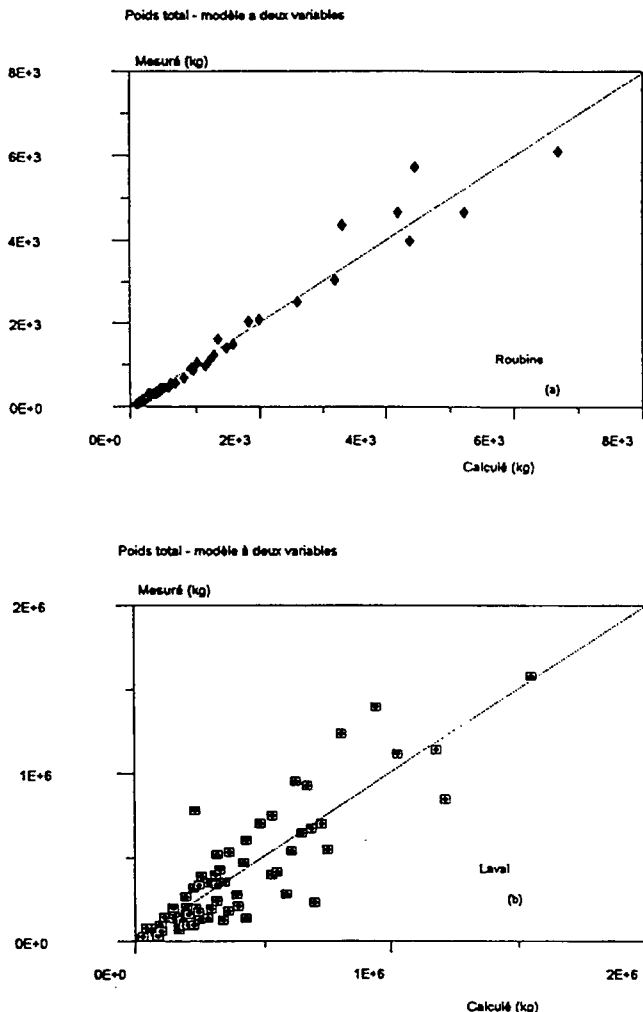


Figure 14 : Erosion totale : modèle à deux variables (1985-1988) ($E + i = 10^4$)

L'introduction d'une variable liée à l'écoulement permet de sélectionner le débit de pointe dans les modèles à trois variables :

- **Roubine** : $\text{Poidtot} = 0,643 H_{\text{tot}}^{0,905} I_{01}^{1,142} Q_{\text{max}}^{0,124}$ $N = 60$ $R^2 = 0,99$ [10]

- **Laval** : $\text{Poidtot} = 5\,303 H_{\text{tot}}^{0,477} I_{01}^{0,208} Q_{\text{max}}^{0,339}$ $N = 65$ $R^2 = 0,97$ [11]

Mais à la Roubine, ce paramètre n'est pas nécessaire pour améliorer la corrélation. Cependant, la comparaison des figures 14 et 15 montre que les épisodes avec une forte érosion seraient les plus concernés par l'amélioration de la relation par le débit de pointe.

Les très fortes valeurs des coefficients de détermination proviennent toujours de la méthode de complémentation des données.

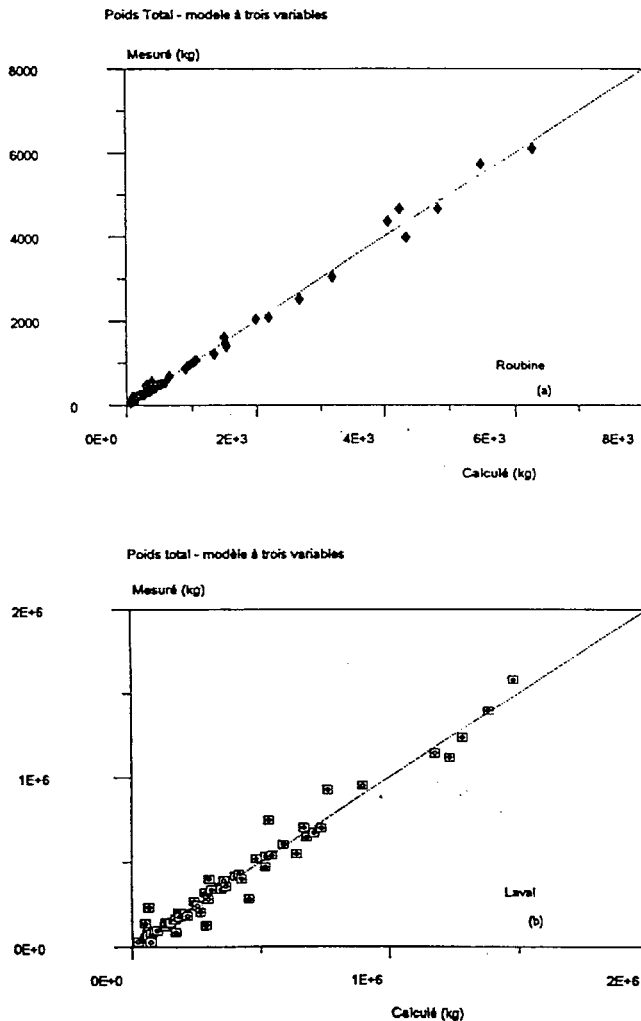


Figure 15 : Erosion totale : modèle à trois variables : Roubine et Laval (1985-1988) ($E + i = 10^4$)

Au Laval, le débit de pointe améliore considérablement la qualité de la corrélation. Cela confirme l'effet d'échelle d'espace déjà décrit : pour modéliser l'érosion de bassins versants de l'ordre du km² à l'échelle événementielle, il est nécessaire d'utiliser un modèle pluie-débit, dans le cas où des mesures de débit ne sont pas disponibles. Les variables pluviométriques ne suffisent pas.

2.3.2.4 - Validation des modèles de production d'érosion

La validation a été effectuée sur les années 1989 et 1990.

Les résultats sont présentés dans le tableau 11.

	Roubine		Laval	
	R ²	N	R ²	N
Volume transité	0,99	7	0,96	14
Volume déposé	0,75	15	0,18	16
Erosion totale :				
- modèle à deux variables	0,72	15	0,78	16
- modèle à trois variables	0,78	15	0,91	16

Tableau 11 : Résultat de la validation des différents modèles statistiques

Toutes les données utilisables de la période ont servi, y compris les volumes des dépôts résultant de plusieurs crues : dans ce dernier cas, on a cumulé les volumes transités pour obtenir le poids total d'érosion de la suite de crues.

Le tableau 12 compare les coefficients de détermination obtenus lors du calage des modèles avec ceux de la période de validation. Les résultats sont bons pour les volumes transités sur les deux bassins. Ils ne le sont pas pour les volumes déposés. Pour l'érosion totale, les résultats sont bons au Laval, mais pas à la Roubine : ceci proviendrait de la présence dans ce bassins d'épisodes très particuliers avec des pluies très intenses et une faible production. Les processus érosifs seraient beaucoup plus dépendants de l'histoire des crues à l'échelle de l'unité élémentaire qu'à l'échelle du bassin d'1 km². Des données plus nombreuses sont encore nécessaires pour améliorer le modèle à la Roubine, alors qu'au Laval il est déjà acceptable en prédiction (figures 16 et 17).

	Roubine		Laval	
	Calage	Validation	Calage	Validation
	1985-88	1989-90	1985-88	1989-90
Volume transité	0,95	0,99	0,85	0,96
Volume déposé	0,88	0,75	0,71	0,18
Erosion totale :				
- modèle à deux variables	0,97	0,72	0,75	0,78
- modèle à trois variables	0,99	0,78	0,97	0,91

Tableau 12 : Comparaison des coefficients de détermination obtenus respectivement pour le calage et la validation des modèles

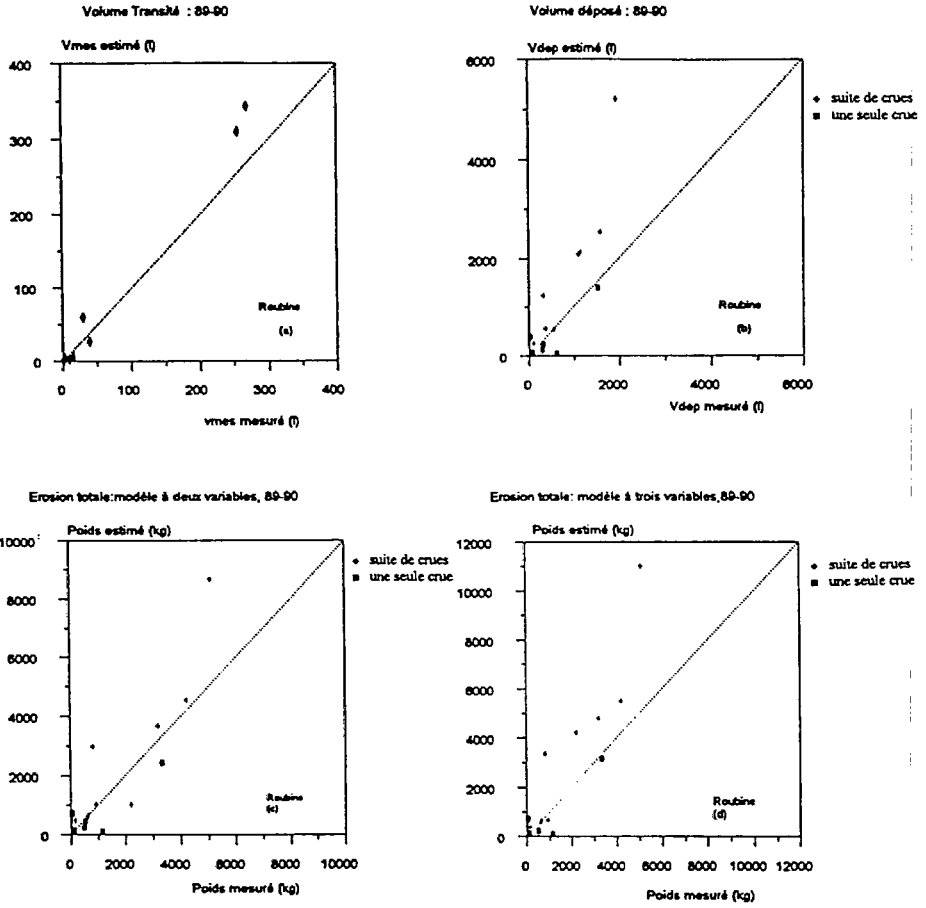


Figure 16 : Validation des modèles à la Roubine (1989-1990)

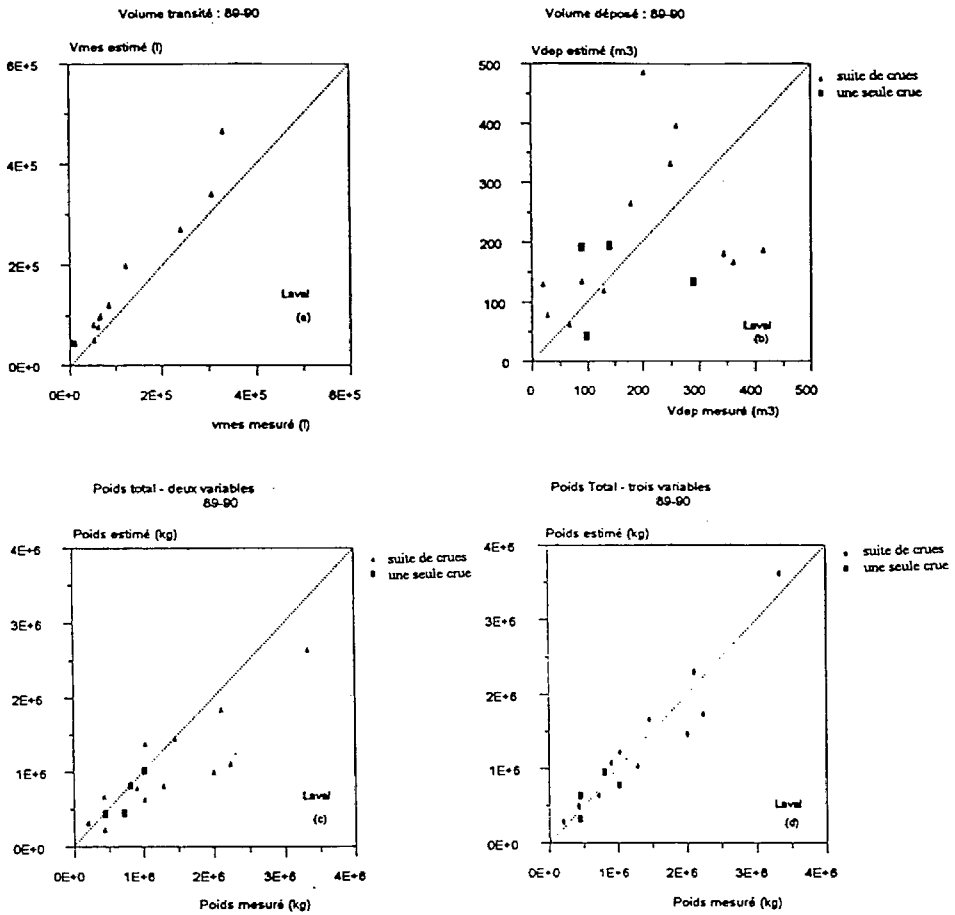


Figure 17 : Validation des modèles au Laval (1989-1990) ($E + i = 10^j$)

2.4 - Comparaison entre le Laval et le Brusquet (analyse et modélisation statistique)

La comparaison des mesures d'érosion au Laval et au Brusquet a pour objectif de mettre en évidence l'effet de la végétation. Les aspects analytiques seront moins développés du fait que la pluviométrie peut être assez différente et que les données d'érosion disponibles sont beaucoup moins nombreuses au Brusquet.

2.4.1 - Comparaison analytique

Dans le tableau 13 qui indique les proportions relatives des volumes déposés et transités moyennes interévénementielles, l'effet de la végétation se traduit par une diminution de la taille des matériaux transportés. Ce fait peut avoir trois origines :

- la proportion de matériaux fins produite par les versants dénudés du Brusquet est plus importante ;
- la dégradation de la taille des sédiments (abrasion, attrition) dans les biefs y est plus intense ;
- un tri sélectif retient les matériaux les plus grossiers sur les versants ou les biefs en raison des écoulements plus limités et des obstacles mécaniques constitués par les végétaux.

On peut supposer que du fait de la nature plus calcaire des matériaux au Brusquet qu'au Laval, les deux premières propositions sont inacceptables. La troisième est plausible : la végétation pourrait avoir un rôle filtrant tant sur les biefs que sur les versants.

	Volumes déposés (%)	Volumes transités (%)	Transités / déposés
Brusquet	23	77	3,30
Laval	40	60	1,50

Tableau 13 : Rapport entre volumes transités et déposés au Laval et au Brusquet

2.4.2 - Modélisation statistique événementielle

La régression non linéaire multiple obtenue sur les volumes transités du Brusquet est la suivante :

$$V_{mes} = 0,011 Q_{max}^{1,98} I_{15}^{0,74} \quad R^2 = 0,84 \quad N = 8 \quad [12]$$

La régression obtenue au Brusquet est fragile car elle ne repose que sur huit points et une valeur est très supérieure aux autres. De nouvelles données conduiraient vraisemblablement à modifier la relation 12 (figure 18).

L'introduction de I_{15} au Brusquet fait passer le coefficient de détermination de 60 à 84 %, alors qu'au Laval il n'améliorerait pas l'explication. Ce rôle de l'intensité des pluies dans le bassin végétalisé mériterait d'être éclairci.

On constate en tous cas qu'à débit liquide égal, l'écoulement du Brusquet est beaucoup moins chargé que celui du Laval.

L'étude des volumes déposés ne peut s'effectuer à l'échelle événementielle. Les relevés du volume de la plage de dépôt ont été trop rares, car trop faibles, pour permettre l'application de la méthode utilisée au Laval et à la Roubine.

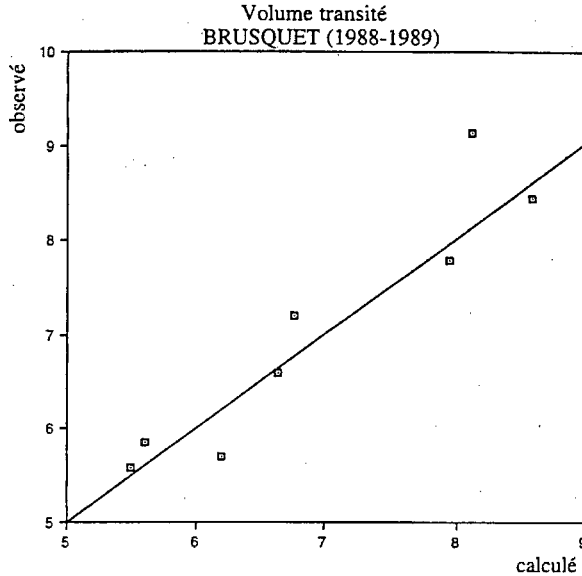


Figure 18 : Graphique de corrélation des volumes transités au Brusquet

3 - Erosion annuelle

La seule donnée immédiatement disponible à cette échelle est le volume total déposé dans la plage, obtenu en cumulant sur l'année les volumes partiels mesurés. Par contre, de nombreux volumes transités événementiels manquent. On doit pallier ces lacunes pour évaluer les volumes annuels. Deux méthodes ont été utilisées et comparées :

- 1^{ère} méthode : le poids total annuel d'érosion est obtenu en appliquant le ratio moyen interévénementiel entre volumes transités et volumes déposés (tableaux 10 et 13) ;
- 2^{ème} méthode : pour chaque événement, on utilise les modèles 2, 3 et 12 pour reconstituer les volumes transités.

Elles donnent des résultats relativement concordants à la Roubine mais moins au Laval (figure 19). Au Brusquet, du fait de la rareté des relevés de plage de dépôt, seule peut être estimée l'érosion moyenne interannuelle.

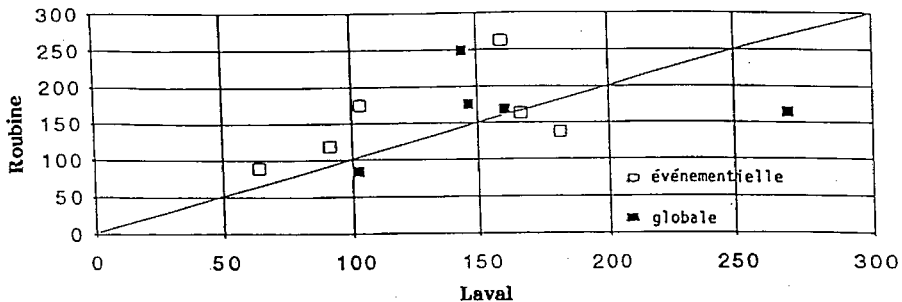


Figure 19 : Comparaison des valeurs annuelles de l'érosion calculées par les deux méthodes au Laval et à la Roubine

Un essai de corrélation, au niveau annuel, entre production de sédiments ainsi reconstituée et paramètres caractéristiques des pluies ou des écoulements, n'a pas donné de bons résultats (BORGES A.L., 1993).

Par contre, les deux méthodes permettent d'avancer des valeurs moyennes interannuelles de la production de sédiments ; on peut les ramener à l'hectare de terrain dénudé pour obtenir l'équivalent d'une ablation (tableau 14).

Valeurs moyennes interannuelles	Roubine 1985-1990	Laval 1986-1990	Brusquet 1988-1991
Production de sédiments (t/an)	17	8848	29,8
Production spécifique de sédiments (t/ha.an)	131	103	0,28
Idem par ha de terrain dénudé (t/ha.an)	157	146	2,1
Ablation équivalente (mm) :			
- de roche-mère (masse volumique 2,650 t/m ³)	5,9	5,5	0,08
- du matériau altéré en place (masse volumique 1,3 t/m ³)	12,1	11,0	0,16

Tableau 14 : Production de sédiments et ablation équivalente (valeurs moyennes interannuelles)

L'effet de la végétation au Brusquet est donc triple :

- elle réduit évidemment les surfaces érodées proportionnellement au taux de végétation et donc la production de matériaux au départ des versants ;
- la réduction de la production de sédiments à l'exutoire par rapport au Laval est bien supérieure à celle qui résulte d'une simple augmentation du taux de végétation puisque, ramenée à l'hectare dénudé, la production du Brusquet est environ 70 fois inférieure à celle du Laval. Ceci confirme l'effet filtrant de la végétation déjà évoqué plus haut ;
- elle agit sur la composition granulométrique des sédiments en retenant les matériaux les plus grossiers.

Bien entendu, tout ceci intègre la réduction des volumes et débits liquides résultant également de l'effet de la végétation.

Conclusion

L'utilisation des mesures de pluie, de débit et d'érosion effectuées sur trois des bassins versants expérimentaux de Draix a permis de faire progresser les connaissances quantitatives sur les processus hydrologiques et érosifs au sein des bassins versants torrentiels. La comparaison, deux à deux, de ces bassins très différents par la taille ou par le taux de couverture végétale, a permis d'isoler les effets d'échelle de taille ou de la végétation. La longue période couverte par les données a aussi permis de s'intéresser aux effets d'échelle de temps.

Les principaux résultats sont les suivants :

- la **modélisation hydrologique** événementielle constituée par l'association de la fonction de production SCS (Soil Conservation Service des Etats-Unis) avec une fonction de transfert à hydrogramme unitaire triangulaire convient aux bassins versants torrentiels sur marnes noires de l'ordre du km² ; les performances en validation interne ont été bonnes ; des perspectives de prédétermination des paramètres en fonction des caractéristiques physiques des bassins versants (sols notamment) existent. Une méthode d'initialisation basée sur la période de temps sec précédant l'épisode pluvieux à modéliser (courbe de pluie limite) a donné satisfaction ;
- des **modèles statistiques événementiels d'érosion** ont pu être calés et validés sur les bassins. Les variables explicatives sont les hauteurs et intensités de l'épisode pluvieux et éventuellement le débit liquide de pointe ;
- les **effets d'échelle d'espace** sont essentiellement liés au rôle tenu par les processus hydrauliques dès lors qu'un véritable lit existe : il est alors le siège d'alternances de dépôts et reprises des sédiments, et d'une tendance à la diminution de la taille des matériaux transportés en allant vers l'aval (attribuée principalement dans ce cas des marnes noires à l'abrasion) ; ils sont confirmés par la nécessité d'utiliser le débit liquide de pointe, au Laval, dans la modélisation statistique, alors que cela n'est pas nécessaire à la Roubine ; à un degré moindre, l'érosion spécifique (par unité de surface dénudée) légèrement inférieure au Laval par rapport à la Roubine évoque un autre effet d'échelle : les pluies les plus érosives ne peuvent concerner une grande surface ;
- à l'**échelle de temps moyenne interannuelle**, ces effets d'échelle d'espace s'estompent ; l'érosion moyenne interannuelle ramenée à l'hectare de terrain dénudé est de 127 à 165 t/ha.an au Laval, très proche de celle de la Roubine (144 à 158 t/ha.an) ; ce sont donc environ 11 à 12 mm de matériaux altérés qui sont émis par les zones érodées des marnes noires (badlands) sous climat méditerranéen à tendance montagnarde ; cependant, la production de sédiments à l'exutoire est composée d'éléments de plus en plus fins au fur et à mesure que la taille du bassin versant augmente ;
- la **couverture végétale** (boisement dans ce cas) réduit de 70 fois environ cette ablation équivalente moyenne interannuelle (à surface érodée égale) ; la production de sédiments à l'exutoire est composée d'éléments plus fins que celle des bassins dénudés ; il semble que la végétation retienne les matériaux les plus grossiers sur les versants ou dans les biefs, bien avant leur arrivée à la plage de dépôt.

Ces résultats sont à la base de la conception d'un modèle hydrosédimentologique événementiel, en cours de validation (BORGES A.L. et al., 1994).

Bibliographie

BORGES DE OLIVEIRA (A.L.), 1993 - *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du sud*. Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I - Spécialité mécanique, soutenue le 19 février 1993.

BORGES DE OLIVEIRA (A.L.), BROCHOT (S.), MEUNIER (M.), 1994 - *Modèle hydrosédimentologique des écoulements hyperconcentrés d'un petit torrent des Alpes du sud*. La Houille Blanche, 3-1994.

BUTTAFUOCO (G.), 1993 - *Bilan de la production d'érosion des marnes noires dans le bassin versant du Brusquet*. Cemagref Grenoble, division protection contre les érosions. Institut d'écologie et hydrologie forestière de Castiglione Scalo (Italie).

CAMBON (J.P.), MATHYS (N.), MEUNIER (M.), OLIVIER (J.E.), 1990 - *Mesure des débits solides et liquides sur des bassins versants expérimentaux de montagne*. Congrès AIHS, Hydrology in mountainous regions, Lausanne, publ. n° 193, p. 231-238.

Cemagref Grenoble, 1987 - *Bassins Versants Expérimentaux de Draix - Compte rendu de recherche n° 1 en érosion et hydraulique torrentielle*. Grenoble, division protection contre les érosions.

Cemagref Grenoble, 1988 - *Les bassins versants expérimentaux de Draix, étude et mesure de l'érosion*.

FEI (X.), 1983 - *Grain composition and flow properties of heavily concentrated suspensions*. Proc. 2nd. inter. symp. on river sedimentation. Nanjing, Chine, v. 1. apud MEUNIER M., 1992. *Éléments d'hydraulique torrentielle*. Cemagref Grenoble, série Montagne, n° 1, 278 p.

LABORDE (J.P.), 1987 - *Éléments d'hydrologie de surface*. Tome 3. ENITRTS Strasbourg.

LAROCHE (H.), 1991 - *Les sols sur matériaux d'altération et d'érosion dérivés des marnes noires d'un bassin reboisé des Alpes du sud*. Cemagref Grenoble, division protection contre les érosions. DEA de l'Université Grenoble I. Spécialité écologie et aménagement des montagnes.

MATHYS (N.), MEUNIER (M.), 1989 - *Mesure et interprétation du processus d'érosion dans les marnes des Alpes du sud à l'échelle de la petite ravine*. Colloque transport solide. Novembre 1988. SHF Paris. La Houille Blanche. N° 3/4, 1989, 188-192.

OLIVRY (J.C.), HOORELBECK (J.), 1989 - *Erosion des terres noires de la vallée du Buëch (Alpes du sud)*. Cahier ORSTOME Pédologie. Vol XXV, n° 1-2, 1989-90, 95-110.

VERITE (F.), 1993 - *Hydrologie de crue des bassins versants de montagne méditerranéens (calage de modèles déterministes pluie-débit à partir des caractéristiques des bassins versants)*. Mémoire de fin d'études ENGEEES Strasbourg/Cemagref Grenoble.

WISCHMEIER (H.W.), 1959 - *A rainfall erosion index for an universal soil-loss equation*. Proc. Soil. Sci. Soc. Am., 23:246-249.

Erosion and sediment transport under simulated rainfall on steep marly hillslopes, Draix, Alpes-de-Haute-Provence, France

Dirk J. OOSTWOUD WIJDENES and Peter ERGENZINGER

Berlin Environmental Research Group, Freie Universität Berlin,
Grünwaldstrasse 35, D-12165 Berlin

Abstract

Despite a thin regolith layer, measured sediment yields indicate denudation rates of more than 10 to 20 mm.year⁻¹ on strongly denuded slopes in black marl (Terres Noires), near Draix, Alpes-de-Haute-Provence. Overland flow and rainfall simulation experiments were conducted on three slopes in the Draix ERB. The experiments have shown that during a single storm, sediment transport includes water-solid mixtures of a wide range of concentrations, ranging from suspended and bed load (up to 400 g.ℓ⁻¹) to hyper-concentrated flow (up to 600 g.ℓ⁻¹) and to debris flows (up to 1 400 g.ℓ⁻¹). Miniature debris flows (MDFs), strongly controlled the sediment transport as long as the sediment store was not depleted.

The slope surfaces were completely reworked by freezing-thawing processes in the winter by which a new regolith layer was formed.

Résumé

Malgré une mince couche de régolite, les valeurs mesurées de la production d'érosion sur des pentes très dénudées de marnes noires (Terres Noires), près de Draix, Alpes-de-Haute-Provence, fournissent des taux de dénudation supérieurs à 10 à 20 mm/an. Des expériences de simulation de pluie et de ruissellement superficiel ont été conduites sur trois versants des bassins versants expérimentaux de Draix. Elles ont montré que, pendant un orage, le transport solide se produit avec de grandes variations de la concentration du mélange eau-solide, allant de la suspension et du charriage (jusqu'à 400 g/ℓ) aux écoulements hyperconcentrés (jusqu'à 600 g/ℓ) et aux laves torrentielles (jusqu'à 1 400 g/ℓ). Des laves torrentielles miniatures (miniature debris flows [MDF]), contrôlent le transport de sédiment aussi longtemps que la fourniture de sédiments est possible.

Les surfaces des versants ont été complètement remaniées par les processus de gel-dégel pendant l'hiver, ce qui a permis à une nouvelle couche de régolite de se former.

Introduction

The Draix Erosional Research Basin (Draix ERB) is situated in a large outcrop of Jurassic Black Marls. These so called "terres noires" are presently undergoing intense erosion, causing major problems with sedimentation in regional reservoirs and river systems. The area shows many characteristics of a badland topography, i.e., short, steep, and highly dissected slopes which are mostly devoid of vegetation. Overgrazing and logging in the last century is thought to have accelerated the severe degradation in the area. However, BRIEM (1988) suggests on the basis of mass balance calculations that the origin of badland development is much older and associated with the disturbance of the vegetation by Roman settlers.

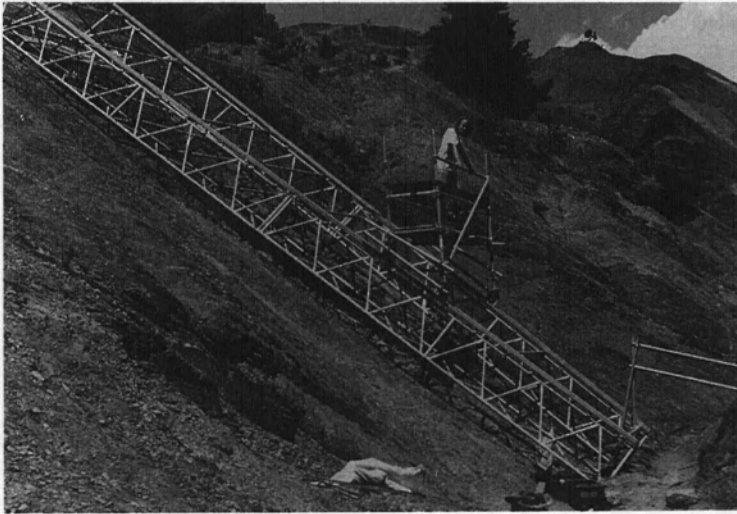
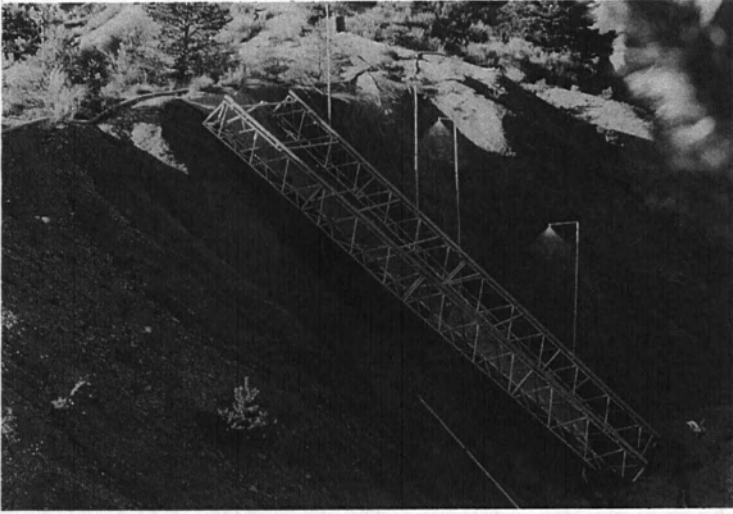
Ongoing research by the Cemagref-Grenoble (Cemagref, 1988) has shown the dramatic hydro-sedimentologic response of the basin to rainfall. Measured sediment yields are as high as 130 to 160 t.ha⁻¹.year⁻¹. (BORGES, 1993), which translates in an overall denudation rate of 10 - 20 mm.year⁻¹. Equally high rates are suggested by OLIVRY and HOORELBECK (1990) for other terres noires catchments in the region. With regard to the flash-flood type of discharge, such volumes of sediment move through the drainage system as hyper-concentrated flows. Considering the substantial part that may be (temporary) stored within the catchments, erosion on the slopes can be significantly higher than 10 - 20 mm.year⁻¹. This is surprising since the slopes are covered by only a thin weathering layer of only 20 cm or less. Little is known about the sources of these sediments and the processes by which they are generated and transported through the watersheds, which is vital knowledge for erosion prediction and erosion control. A long term monitoring scheme within the framework of the European Union funded EROSLOPE project has been established to address these problems. The objective of this paper is to determine the nature and intensity of the processes which control sediment generation and transport on the slopes.

Study area

The Draix ERB are located 12 km north-east of the town of Digne, Alpes-de-Haute-Provence. The catchments are developed into highly unstable Jurassic marine black marls (Oxfordien). The marl formations are capped by fairly resistant limestones which characteristically dictate the topography in the area by forming elongated monoclinical ridges of up to 2 000 m high. The marls can reach a thickness of 1500 m and are characterized by a dense layering. The slopes are covered with a loose weathering layer consisting of coarse disintegrated marl fragments within a silty matrix. The carbonate content of the marls is about 43 % and the plasticity index ranges from 12 to 15 %. The weathering products exhibit a very low aggregate stability, which is due to rapid slaking and less by chemical dispersion. The clay minerals consist of illites and smectites, however, swelling of the clay is moderate.

The original vegetation consisting of oak-pine mixture is only present on the more stable interfluves and the higher limestone slopes, where beech starts to dominate. Many of the slopes in marl are completely devoid of vegetation.

Situated between the Alpine and Mediterranean weather systems, the local climate shows aspects of both. The summers are warm and rainfall is typically associated with short intense thunderstorms. Winters are generally mild but temperatures can go easily below the freezing point, especially at night. Snow is not unusual but does not form a (semi)-permanent cover. The average annual rainfall amounts to 900 mm.



Photos 1 : Overview of rainfall simulator

Research methods

Rainfall simulations were carried out on complete slope sections of up to 12 m in length (photos 1). The slope section was covered with a special construction which enabled measurements during the experiments all over the plot. A mobile working platform was mounted on the construction which could be moved up and down over the entire slope. Water was pumped from the nearby Bouinenc

river to a reservoir up slope, where a constant hydraulic head was maintained to provide the necessary pressure. The water was then conveyed to four risers attached to the metal frame, which were equipped with sprinklers at 3 m above the surface. The sprinklers produced drops with a diameter of 0,5 to 6 mm, which agrees well with those occurring in natural rainstorms.

Three slopes were selected for experiments, close to the mouth of a ravine which discharged into the Bouinenc river. Slope A, a dip slope of 38 degrees, slope B, the opposite face slope of 39 degrees and slope C, also a face slope of 44 degrees. The experiments started in the summer of 1993 and had initially an exploratory character. Therefore, water application was simplified by introducing it at the top of the plot as overland flow (or runoff). Two perforated hoses were stretched over the width of the experimental section (2,45 m), and produced a continuous inflow that was equivalent to a rainfall intensity of 60 mm.h⁻¹. Rainfall simulations were carried out on slope B, which was 5 m long and included two plots of 2,5 m in width. Only two sprinklers were sufficient to cover these plots with an rainfall intensity of about 60 mm.h⁻¹. Such high rainfall intensities are not unusual to occur for short periods during summer storms and are highly destructive (M. GOUEFFON, personal communication). In 1994, only rainfall simulations were carried out with the large rainfall-simulation system on slope B and slope C. Slope C was chosen instead of slope B because of its longer slope length (12 m), however, the slope angle was a little higher (44°). A V-notch Thompson weir was installed to determine runoff rates. The runoff and sediment was guided through a series of four sedimentation basins before it reached the weir in order to assure proper flow and to measure the total volume of coarse sediments leaving the plot. Suspended sediments samples were taken at the exit point of the weir and wash load (suspended and bed load) was sampled at the entrance of the sedimentation basins. Flow velocity was determined with the use of a dye tracer (Potassium permanganate). Flow depth was measured with a hand-held ruler, however, this technique is prone to inaccuracies of 20 to 30 %.

Changes in the surface topography were measured at cross-sections at one meter intervals before and after each experiment. A micro-profiling device was used with a horizontal resolution of 2 cm and a vertical accuracy of ± 2 mm. All experiments were recorded on video tapes.

Results of 1993 experiments

Overland flow

A total of eight overland flow experiments were carried out on slope A in 1993 (experiments 1-8). The runoff was quickly concentrated in the preexisting rills where it reached velocities of 0.2 to 0.4 m.s⁻¹. With a flow depth of 5 mm ± 2, rill flow was always turbulent and on average super critical (average Froude number : 1.22).

The runoff coefficients (ratio of water that leaves the plot as runoff and amount of water that is applied) cluster around the 30 %, which indicates the relatively high infiltration rate of the marls. Apart from the water uptake into the porous weathering layer, water infiltrated also into cracks and other structural fractures in the marls. Part of this water was also returned to the surface down slope, as it was observed that water exfiltrated at some spots along the slope as pipe flow indicating significant subsurface flow.

Sediment generation

During the experiments sediment was transported down slope as mass movements, density flows and as wash load (movement of sediment down slope as a direct consequence of rain driven flow). One

rock slide occurred (exp. 3) leaving a scar of $1.0 \times 0.7 \times 0.3$ m on the middle part of the slope. Experiment 3 took place when the slope was still wet after a 12 mm rainstorm fell the previous night. The additional water was apparently enough to trigger the slide. The event produced much easily erodible sediment and the scar functioned as a source area for density flows which started after the scar was only partly filled up with sediments. The density flows consisted of a mixture of coarse marl fragments in a matrix of fine regolith material.

Miniature debris flows

Samples taken from these density flows the following year revealed that the volumetric sediment concentration (C_v) ranges from 550 to $1\,400 \text{ g.l}^{-1}$. According to the classification system of torrential flow proposed by MEUNIER (1993), such a solid concentration is typical for debris flows. The value also agrees with measurements of density flows by MEUNIER and RICHARD in the Draix basin (personal communication). However, because of their relatively small size, the maximum amount of transported material did not exceed 10 kg, they are referred to as miniature debris flows (MDFs). These type of flows occurred several times during each experiment, however, their frequency declined towards the end of the series. The MDFs travelled mostly over short distances of several metres. This was due to (1) partial deposition in depressions or areas with a lower slope, which reduced the critical mass of the flow, (2) dilution by overland flow which converted the density flow into wash load, and (3) dispersion of the sediment mass as a result of topographic divergence. The sites where the flows stopped were often the source areas of subsequent MDFs as instability was reached by ongoing accumulation of sediment.

Bed load and suspended sediments

Although bed load transport is usually associated with rivers and not with thin overland flow, it was clearly visible that part of the wash load included coarse particle, sometimes with a diameter larger than the water depth. This coarse material was supplied to the flow either by the MDFs or by erosion of rill banks.

The suspended sediment concentration in the flow at the V-notch weir showed major fluctuations. This is related to the occurrence of MDFs. It could be observed that the runoff was darkly coloured for some time after the event of a debris flow. In between the MDFs its colour could be quite clear. This indicates that the MDFs strongly influence the sediment concentration of the wash load.

Figure 1 shows the sediment concentration of the bed load and suspended load in time for two experiments. The peaked shape of the curves demonstrate clearly the effect of MDFs on the sediment yield.

Noteworthy is that the total volume of transported coarse sediments is larger than that of suspended sediments. This pattern is usually the other way around in rivers and overland flow and it shows the efficiency of the MDFs in transporting coarse sediments.

Slope morphology and flow paths

The initial topography strongly controlled the runoff routing. Two wide and shallow rills conveyed most of the runoff. However, the flow paths of the MDFs was more complex. The rills were frequently blocked with debris, which resulted sometimes in overtopping of the dams by new MDFs. The new flow path could then develop into a new rill. This indicates that the MDFs not only transport material but are also eroding agents. The rills quickly reached the unweathered marls, upon which they widened and transformed into wide, irregular flow paths (OOSTWOUD WIJDENES and ERGENZINGER in press).

Figure 2 shows the changes in surface topography after three experiments. The cross-section is located at the bottom of the slope where alternating erosion and deposition, especially from miniature debris flows, give rise to a rapidly changing surface topography. The considerable changes in height are due to alternating erosion and sedimentation of debris flow deposits.

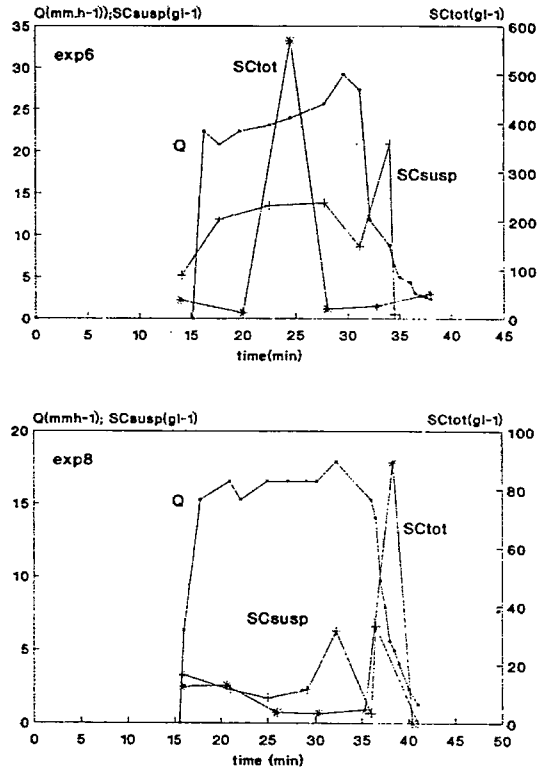


Figure 1 : Diagrams of discharge (Q), suspended sediment concentration (SCsusp) and total wash load concentration (Sctot) in time for experiments 6 and 8 on slope A

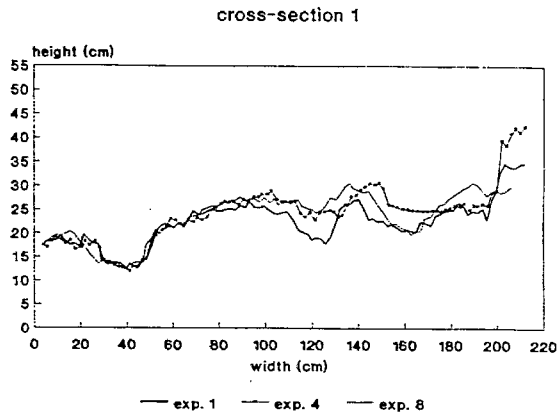


Figure 2 : Graph showing three cross-profiles of surface topography after experiments 1, 4 and 8

Rainfall simulations 1993

Rainfall simulations were carried out on the opposite valley slope (slope B). The erosion under simulated rainfall was also dominated by MDFs, however, they differed in two aspects from the earlier described MDFs. First, they were quite narrow, (about 5 to 10 cm wide) and second they contained less coarse grain sizes. The MDFs usually were initiated approximately midslope. From there they extended up and down slope extension and developed a dendritic rill network (photos 2). At sites where two rills approached each other the interrill area became instable and was subject to mass failure. In this way could slope sections be entirely stripped of their weathered material.

Several factors could attribute to the different response of the two opposite slopes to wetting, e.g., the method of water application, the direction of the geological dip of the marl layers and the texture of the regolith. Raindrop impact can influence the sediment load of the overland flow. However, it seems unlikely that it has an effect on properties of the MDFs. The effect of the dip of layers is evident. Whenever the dip is almost parallel to the slope (slope A) of the surface, the resistance provided by the bedding planes to down slope movements is much less than when the layers are perpendicularly orientated towards the slope surface (slope B). The depth of the weathering layer on slope A is therefore more restricted than that of slope B, resulting in a greater portion of coarse fragments on slope A. The increased cohesion provided by the fine material may be the reason that the rills do not widen so quickly.

From these experiments it became clear that the MDFs are perhaps the most important process by which sediment is remobilized and transported to the drainage network. Detailed monitoring of these flows is therefore necessary in order to gain a better understanding of their mechanics and controlling variables such as water/solids ratio, grain size distribution and the effect of slope angle. However, sampling of the MDFs proved very difficult because of their highly unpredictable occurrence in space and time. It was therefore decided to repeat the experiments the next year and focus the attention particularly on the MDFs. With the help of additional assistance, MDFs were to be sampled just after their initiation. In order to have similarity in methodology and come as close to natural conditions as possible only rainfall simulations were carried out.

Slope processes in winter

A visit in March 1994 to the experimental basin revealed that the surfaces of site A and B had been reworked by diffusion processes during the winter months and that the rills had mostly disappeared. This phenomenon has also been observed and described by Cemagref (1987) and is known from the literature to occur elsewhere (SCHUMM, 1956). Here it is probably related to the disintegrating effect that freezing/thawing cycles have on the marls and to the associated movements in the regolith layer, which culminates in active creep processes. An implication of this is that the sediment store on the slopes is replenished before the spring and summer storms arrive.

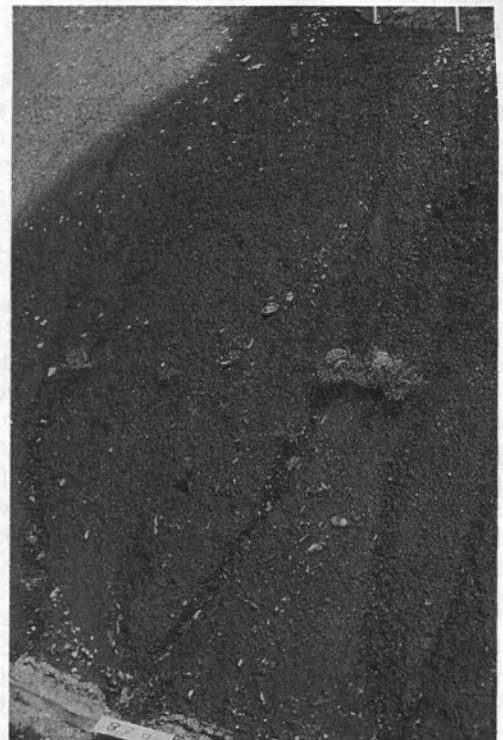
Experiments in 1994

After a very dry spring two rainstorms, June 20th (20 mm) and June 26th (42 mm) respectively, had caused substantial erosion on the slopes in the Draix area. Rill systems had developed at much the same places as the year before. Hence, the experiments of July 1994 were carried out on more intensely eroded slopes than those of the previous year.

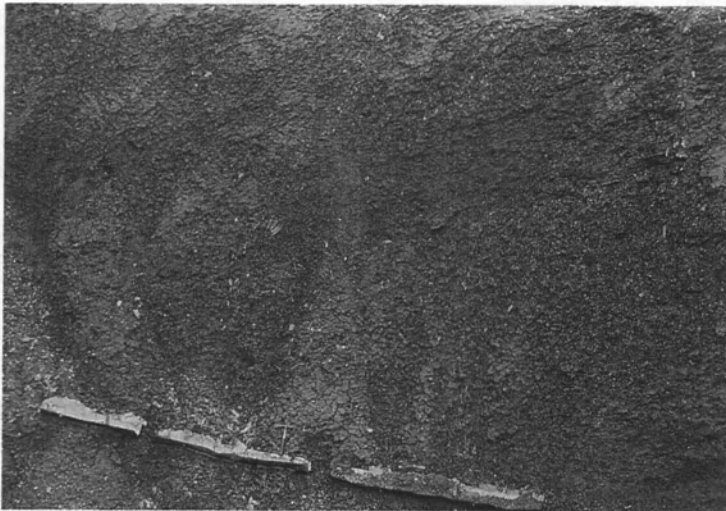
A total of four experiments were carried out, two on slope a (exp. 9 and 10) and two on slope C (exp. 10 and 11). The results of the experiments are shown in figure 3. Although the rainfall intensity ranged from 90 to 100 mm.h⁻¹, fewer MDFs occurred. This is attributed to the intense erosion in June, which has resulted in a significant reduction of available material.



▲ Large rills on slope A



▲ Rills on slope B



▲ Varished rills on slope B

Photos 2 : Rill network developed by miniature debris flows under simulated rainfall

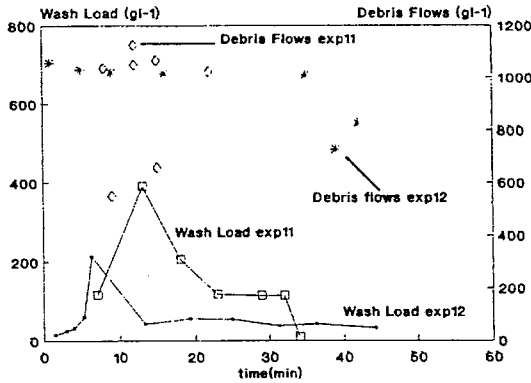
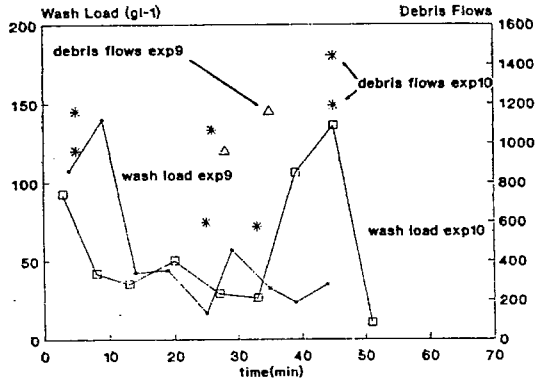


Figure 3 : Diagrams showing the different solid concentration of the transported sediment flows for experiments 9 and 10 on slope A, and experiments 11 and 12 on slope C

Runoff

Runoff coefficients under the simulated rainfall on slope A were about 30 % - 40 % and comparable with those from the year before under simulated overland flow. Flow velocities were on average slightly lower than the previous year on slope A, which is due to the flow retarding effect of falling raindrops.

Sediment

The proportional contribution of debris flows, bed load and suspended sediment for the 1993 overland flow experiments and the 1994 rainfall simulations is displayed in figure 4. The large contribution of debris flows during experiment 3 is due to a debris slide which generated much sediment. A large part of the generated sediments on the slope was preferentially transported by overland flow (bed load) during the next experiment (4). Also note the higher percentages of suspended load for the 1994 experiments, on both slope A and B. This is due to the effect to raindrop impact on the weathering layer, which result in a significant portion fines.

It should be mentioned that the proportional contribution of MDFs is a conservative estimate, because, due to the sampling technique a minor part of the solid discharge of the MDFs is contained within the bedload sample. The presented data show that for 5 out of 7 experiments in 1993 (exp. 2, 3, 5, 7 & 8) the sediment contribution of the MDFs is about equal or exceeds that of the wash load, while the wash load contribution exceeds that of the MDFs in all the 1994 experiments (exp. 9, 10, 11 & 12). In addition, the proportional contribution of suspended sediment load increased for the 1994 experiments. The latter is clearly related to the effect of rain splash, which results in disintegration of surface aggregates. Rain splash erosion was also observed during the rainfall simulation runs on slope B in 1993 and is believed to have contributed to the high sediment concentration of the runoff. Whether the increased suspended load has also influenced the debris flow is difficult to determine. A more important factor was probably the decreased sediment source on the slopes in 1994 due to heavy rain and erosion in the month of June. However, several authors have shown that fine particles can have a significant effect on the debris flow mechanics (RICKENMANN 1990, WANG et al. 1994).

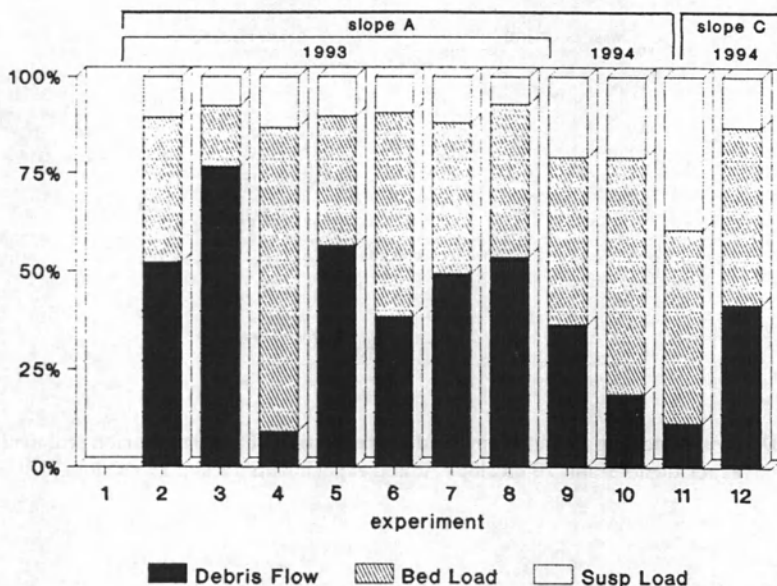


Figure 4 : Normalized sediment contribution of debris flows, bed load and suspended load

Debris flow characteristics

Despite the lower MDF frequency 23 samples could be taken of MDFs. Preliminary results of the analyses show that the volumetric moisture content, C_v , ranges from 550 to 1 400 $g.l^{-1}$ (table 1). Because of sampling difficulties some samples were collected a little after the initiation of a MDF. This often resulted in a slight "contamination" of the sample with runoff, which produced the very high figures for water content. Nevertheless, these samples are included in the analyses and the data therefore represents a minimum value for debris flow initiation. Figure 3 also shows the difference in sediment concentration ($g.l^{-1}$) for the wash load and the MDFs. The diagram clearly displays two populations, which correspond to two types of sediments : Miniature Debris Flows, ranging from 600 to 1 200 $g.l^{-1}$ but clustering between 1 000 and 1 200 $g.l^{-1}$ and wash load, generally below

400 g. ℓ^{-1} . This differentiation agrees well with the classification of MEUNIER (1994). The maximum sediment concentration of the wash load concentration peaked close to 600 g. ℓ^{-1} , which is in the zone of hyper concentrated flows. Although this may be an artefact of the technique used to sample wash load, it also indicates that the erosion processes on the steep marly slopes in Draix include a whole range of sediment transport densities, from debris flows on the upper end to hyper-concentrated flows, bed load and suspended load on the lower end of the concentration scale.

Slope surface morphology

The two rainfall simulation experiments on slope A left significant scars on the surface. Wide, irregular rills had eroded into the fresh marls, very similar in appearance as the previous year, however, more profound. On the opposite slope C, debris flows were again of the same narrow type as they were on neighbouring slope B in 1993. Hence, numerous small rills formed but they did not develop into a dendritic network as was the case on slope B. This is probably related to the thinner weathering layer on slope C as a result of the slightly steeper slope angle and the erosive June rainstorm. However, the nature of the MDFs was different from those on slope A. The cause for this difference is therefore related to the orientation of the dip slopes and not the water-application technique, while rainfall was simulated on both slopes. It should be stressed however, that despite these differences in the nature of the MDFs the erosion rates of slope A and C are comparable (52.4 and 96 kg for experiments 9 and 10 ; 65.5 and 73.7 kg for experiments 11 and 12).

	Time (min.)	Location (m)	Vol. conc. of solid discharge (g/ ℓ)
Experiment 9 12/07/94	28	R. 2,5	961,11
	35	M. 4	1112,72
Experiment 10 13/07/94	5	R. 2	1112,64
	5	R. 2	961,73
	25	R. 4	597,86
	26	R. 4,5	1067,57
	33	M. 3	575,00
	45	R. 7	1191,08
Experiment 11 16/07/94	45	M. 7	1442,32
	8	R. 2	1035,31
	9	M. 2,5	549,17
	12	R. 1	1124,50
	12	R. 2	1049,00
	15	M. 5	1066,14
	15	L. 2,5	657,33
22	M. 4,5	1023,93	
Experiment 12 17/07/94	1	R. 1	1057,06
	9	R. 4	1019,40
	42	M. 3	825,04
	16	M. 1	1015,50
	35	R. 2,5	1010,25
	5	M. 3	1030,63
	39	L. 2	727,39

Table 1 : Volumetric concentration of solid discharge of miniature debris flows. The location on the plot is indicated by right (R), middle (M) or left (L) and the distance in meter from the bottom of the slope

Conclusions

Overland flow and rainfall simulation experiments were conducted on three slopes in the Draix ERB. The experiments have shown that during a single storm, sediment transport includes water-solid mixtures of a wide range of concentrations, ranging from suspended and bed load to hyper-concentrated and debris flows. The contribution of the conspicuous miniature debris flows (MDFs), diminishes as the sediment sources on the slopes decline due to erosion. There is evidence to suggest that this follows an annual pattern, with net erosion along concentrated flow lines in the spring and summer months, and net accumulation of weathered marls associated with spatial dispersion in the winter months. The growth of the weathering layer in the winter months is due to the disintegrating effect of the frequently occurring freezing and thawing cycles. This implies that the very high erosion rates can be sustained as long as the sediment source on the slopes is replenished. A decrease in freezing-thawing cycles, associated with a global rise in average temperature, could therefore significantly influence the erosional system of the Draix ERB. Whether such a change in environmental conditions would also be favourable to allow natural succession of the vegetation to stabilize the slopes, remains an issue of further research. The present extreme erosion appears, at least for a large part, to be related to climatic conditions.

Finally, the results indicate that modelling of the erosion processes on the slopes requires further detailed information on two aspects. Firstly, rheologic and hydro-sedimentologic characteristics of the MDFs, since these density flows play such a vital part in the erosion processes. Preparations for laboratory experiments to extract this kind of data are in progress. Secondly, the rate of regolith development on the slopes, which appears to exert a significant control over the entire erosion process. An interesting approach was taken by MOORE and CLARKE (1983), who developed a mathematical model which predicts an exponential declining rate of sediment accumulation in time. Concurrently, the model estimates the increase of available slope material for erosion with increasing time between rainstorm events. Parameterization of such a model for the Draix ERB particularly requires data on the frequency of freezing-thawing cycles, the depth of frost penetration and the marl disintegration process.

References

- BORGES (A.L.), 1993 - *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du sud*. Cemagref. Thèse de l'Université Joseph Fourier. Grenoble, 205 p.
- BRIEM (E.), 1988 - *Geoökologische Faktoren der Landschaftszerstörung durch erosive Hangentwicklung in der Region Gap-Sisteron (Südalpen)*. Karlsruher Geographische Hefte, Heft 16, Geographischen Institut Universität Karlsruhe, pp 64.
- Cemagref, 1988 - *Les Bassins Versants expérimentaux de Draix - Compte rendu de recherche n° 1 en érosion et hydraulique torrentielle*. Cemagref Grenoble, Aix-en-Provence and Service RTM, Digne, pp 128.
- Cemagref, 1988 - *Les bassins versants expérimentaux de Draix - Etude et mesure de l'érosion*. Synthesis report May 1988, Cemagref Grenoble, Aix-en-Provence and Service RTM, Digne, pp 8.
- MEUNIER (M.), 1993 - *Classification of torrential flows*. Atelier International Pierre BEGHIN sur les mouvements gravitaires rapides, Grenoble, 6-10/12/93. Actes de l'atelier. Cemagref, pp 231-236.
- MOORE (R.J.) and CLARKE (R.T.), 1983 - *A distribution function approach to modelling basin sediment yield*. Journal of Hydrology, 65, pp 239-257.

OLIVRY (J.C.) and HOORELBECK (J.), 1990 - *Erodabilité des terres noires de la vallée du Buëch (France, Alpes du Sud)*. Cahier ORSTORM, sér Pédol., Vol. XXV, n° 1-2, pp 95-110.

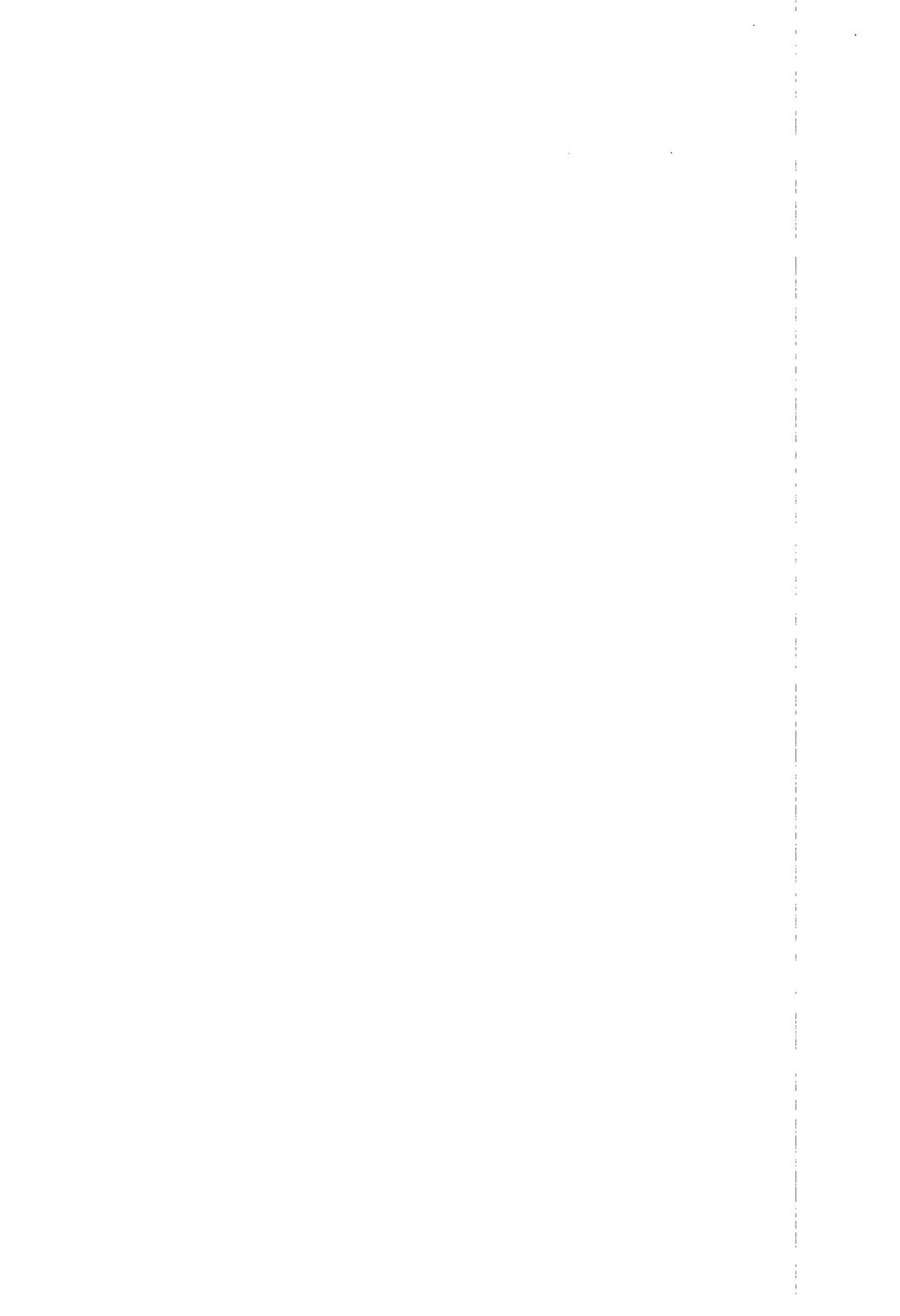
RICKENMANN (D.), 1990 - *Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes*. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich. pp 249.

SCHUMM (S.A.), 1956 - *Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Pert Amboy, New Jersey*. Bulletin of the Geological Society of America, 67, pp 597-646.

WANG (Z.), XIANG (W.) and LARSEN (P.), 1994 - *Rheological properties of sediment suspensions and their implications*. Journal of Hydraulic Research, 32, 4, pp 495-516.

Acknowledgements

The research was supported by the Commission of the European Communities and their support is gratefully acknowledged. The author is also indebted to Dr. M. MEUNIER of Cemagref-Grenoble, who kindly agreed to the conduct the experiments in the Draix ERB and offered invaluable help with housing and equipment. Dr. M. GOUEFFON of the Service RTM, Digne is also thanked for granting his permission to the project and for his logistic support.



Contribution à l'étude des mécanismes et bilans de l'érosion chimique des "Terres Noires" du bassin de la Durance - Exemple des bassins versants représentatifs expérimentaux de Draix (nord-est de Digne)

Jean-Pierre SIMONNET - Pascale RICHY

DESMID URA CNRS 1974
1, rue Parmentier, 13200 Arles, France
& Laboratoire de Géologie appliquée,
Place Leclerc, 25000 Besançon, France

Claude PARRON

CEREGE URA CNRS 132,
BP 80
13545 Les Milles Cedex, France

1 - Cadre de l'étude

Ce travail a été réalisé dans le cadre des bassins versants représentatifs expérimentaux de Draix, équipés par le Cemagref. Cet ensemble se trouve dans le sud de la France, à 15 km environ au nord-est de Digne, au sud du village de La Javie.

1.1 - Le climat

Le climat est de type méditerranéen. Les altitudes s'étagent entre 800 et 1200 m. La température moyenne annuelle ne dépasse pas 11°C. Les étés sont secs et les hivers froids et peu enneigés (90 jours de gel de décembre à mars). La pluviométrie annuelle est de l'ordre de 800 mm. Les précipitations ont lieu surtout à l'automne et au printemps avec, en moyenne, 100 jours par an de pluies supérieures à 0,1 mm dont 50 sont supérieures à 5 mm (Cemagref, 1988). L'été est marqué par un ensoleillement important et des orages violents dont l'intensité peut atteindre 60 mm/heure.

1.2 - Les bassins étudiés

Les bassins sont au nombre de cinq (tableau 1), et sont séparés en deux ensembles par la crête de la Blache (1260 m) :

- le bassin du Brusquet (108 ha) affluent de la Bléone, à l'ouest ;
- le bassin du Francon (72,8 ha), le bassin du Moulin (8 ha), le bassin du Laval (86 ha), et le petit bassin de la Roubine (0,133 ha) adjacent à celui du Laval ; ces quatre bassins dits orientaux car situés à l'est de la crête de la Blache, sont des sous-bassins du Bouinenc.

Les cinq bassins de Draix sont creusés dans des terrains appartenant à la série Jurassique du Bassin Rhodanien (tableau 1). Le terme "Terres Noires" regroupe les formations marno-calcaires allant du Bathonien à l'Oxfordien. Les bassins du Francon, du Moulin et du Laval sont tous les trois installés dans ces formations et sont donc lithologiquement homogènes. Le bassin du Brusquet est, quant à lui, creusé dans des alternances marnes noires / calcaires du Toarcien, dont les caractéristiques minéralogiques et d'érodibilité sont proches de celles des Terres Noires (Cemagref, 1988).

Bassin	Superficie (ha)	Terrain nu (%)	Herbe (%)	Bois (%)	Lithologie
Brusquet	108	13	0	87	Toarcien-aalénien
Francon	72,8	43,7	13,4	42,9	Bathonien
Moulin	8	54,2	35,6	10,2	Bathonien
Laval	86	67,8	10,5	21,7	Callovo-oxfordien
Roubine	0,13	79	21	0	Callovo-oxfordien

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des cinq bassins de Draix (d'après Cemagref, 1989)

2 - Echantillonnage

La première partie de ce travail est consacrée à l'étude minéralogique et chimique d'échantillons de Terres Noires et de leurs produits d'altération. La seconde partie tente une caractérisation et une quantification des processus d'altération chimique en utilisant des données hydrochimiques et hydrologiques acquises en différents points du réseau hydrographique étudié. Des matériaux solides et des eaux ont été échantillonnés au cours de plusieurs campagnes de prélèvement.

2.1 - Les matériaux solides

Deux séries d'échantillons ont été prélevées en deux sites différents : dans le bassin de la Roubine et dans le bassin du Brusquet.

2.1.1 - Bassin de la Roubine

Les échantillons ont été prélevés sur un versant du talweg principal, dans les marnes callovo-oxfordiennes, lors de deux campagnes :

- 1^{ère} campagne : six échantillons ont été prélevés sur un profil vertical, de la roche mère (PR1, à 35 cm de profondeur) à la surface (PR6) ;
- 2^{ème} campagne : deux échantillons ont été prélevés ; l'un correspond à une croûte d'altération située à la surface d'une diaclase (PRSURF), l'autre est une croûte de type évaporitique (PREVAP) décrite ponctuellement à la surface des marnes.

2.1.2 - Bassin du Brusquet

Cinq échantillons ont été prélevés selon un profil vertical, dans la partie superficielle d'un affleurement de marnes moires toarciennes, sous couvert végétal (BR5 = surface ; BR1 = roche mère).

2.2 - Les eaux

Trois types d'eaux ont été prélevés lors de trois campagnes (une en période d'étiage le 16 septembre 1991, les deux autres lors de petites crues les 01 et 17 avril 1992).

2.2.1 - Eaux des cours d'eau intermittents

Les eaux des cours d'eau intermittents ont été prélevées aux exutoires de chaque bassin (Laval, Francon, Moulin et Brusquet) au niveau des seuils Parshall. Environ deux litres d'eau ont été échantillonnés en chaque point.

2.2.2 - Eaux des cours d'eau pérennes

Les eaux du Bouinenc ont été prélevées selon les mêmes modalités que les eaux des cours d'eau intermittents.

De 1971 à 1988, les eaux de la Bléone ont été échantillonnées et analysées par la société du Canal de Provence. Leurs caractéristiques chimiques ont été utilisées dans ce travail.

2.2.3 - Eaux de pluie

Les eaux de pluie ont été échantillonnées dans les bassins du Laval et de Sévigné lors de la troisième campagne.

Stations	Campagne du 16/09/91	Campagne du 01/04/92	Campagne du 17/04/92
Laval (amont seuil)	LS 1	LS 2	LS 3
Laval (seuil)	L 1	L 2	L 3
Francon (seuil)	FR 1	FR 2	FR 3
Moulin (seuil)	MO 1	MO 2	MO 3
Brusquet (seuil)	-	BR 2	BR 3
Bouinenc	BO 1		BO 3
Pluies	-	-	Laval = PL Sévigné = PS

Tableau 2 : Nomenclature des échantillons d'eau

3 - Résultats

3.1 - Caractérisation minéralogique des roches et de leur altération

3.1.1 - Minéraux non argileux

Les échantillons de roches des bassins de la Roubine et du Brusquet contiennent (en quantités variant peu entre chaque échantillon provenant d'un même bassin) du quartz et de la calcite très abondants associés à un feldspath.

Les échantillons de croûtes évaporitiques contiennent du gypse, de la kiésérite ($MgSO_4H_2O$), de l'hexahydrate ($MgSO_4(H_2O)_6$) et de la fibroferrite ($Fe(OH)SO_4,5H_2O$).

L'observation au microscope électronique à balayage des échantillons du bassin de la Roubine a fourni quelques informations supplémentaires. La calcite se présente surtout en petits cristaux globuleux et isolés, de 2 à 3 μm de diamètre. Par ailleurs, les cristaux de quartz et de feldspaths sont aussi globuleux, et présentent un diamètre d'environ 5 μm . En revanche, les minéraux des croûtes d'altération sont souvent automorphes.

3.1.2 - Minéraux argileux

Cinq types d'argiles ont été identifiés par la diffraction des rayons X. L'illite est dominante, et est associée à de la kaolinite, de la chlorite ferrifère (HOLTZAPFEL, 1985), de la smectite et un interstratifié illite-smectite. Les proportions de ces minéraux argileux varient peu entre les échantillons provenant d'un même bassin.

3.1.3 - Commentaires

- Les échantillons de roches provenant du bassin du Brusquet, comme ceux provenant du bassin de la Roubine, ne montrent pas d'évolution minéralogique perceptible le long des profils d'échantillonnage.

Echantillons	Minéraux non argileux				Minéraux argileux				
	Quartz	Calcite	Feldspath	Gypse	Illite	Smectite	Chlorite	Kaolinite	Ill/Sm
Moy PR	40	55	< 5	-	40 à 50	20 à 30	10 à 15	< 10	< 10
Moy BR	37,5	59,5	< 5	-	60 à 75	< 10	-	25 à 30	-
Moy SURF	60	35	< 2	< 5	40 à 50	20 à 30	10 à 15	< 10	< 10

Tableau 3 : Composition minéralogique des échantillons (en %)

- Moy PR : moyenne des compositions pour toutes les roches provenant du bassin de la Roubine,
- Moy BR : moyenne des compositions pour toutes les roches provenant du bassin du Brusquet,
- Moy SURF : moyenne des compositions des deux échantillons de croûtes d'altération.

- Les échantillons du bassin du Brusquet présentent un rapport moyen calcite/quartz légèrement plus élevé que ceux du bassin de la Roubine.
- Les compositions argileuses varient nettement d'un site à l'autre. Alors que les échantillons provenant du Brusquet ne contiennent que de l'illite, de la smectite et de la chlorite, les échantillons provenant de la Roubine contiennent, en plus, de la kaolinite et un interstratifié illite-smectite.
- Les croûtes d'altération sont nettement appauvries en calcite par rapport à la roche mère. En revanche, leur composition en minéraux argileux ne diffère pas de celle de la roche mère.
- Les minéraux évaporitiques présents dans les croûtes d'altération et d'évaporation sont absents de la roche mère. Leur origine secondaire est donc évidente.
- Les trois minéraux les plus présents dans les échantillons de roche (calcite, quartz et illite) forment la MES (matière en suspension).

- Les compositions minéralogiques de la fraction argileuse des échantillons provenant du bassin de la Roubine sont en accord avec les données bibliographiques (AWONGO, 1984). En revanche, nous n'avons pas observé la présence de pyrite alors que celle-ci a été décrite par AWONGO (1984) et BUFALO (1989).
- Ainsi, la dissolution de la calcite et l'apparition de minéraux évaporitiques dans la partie la plus supérieure du profil d'échantillonnage du bassin de la Roubine semblent être les seuls effets minéralogiques de l'altération chimique qui soient perceptibles.

3.2 - Caractérisation chimique des roches et de leur altération

3.2.1 - Composition chimique des roches

Les roches échantillonnées dans les bassins du Brusquet et de la Roubine montrent des compositions en éléments majeurs et en traces très proches, quelle que soit la fraction minérale considérée. Seuls quelques éléments en traces présentent des différences.

- Les roches provenant du bassin de la Roubine sont nettement plus riches en rubidium et moins riches en cuivre que celles provenant du bassin du Brusquet.
- La fraction argileuse des roches échantillonnées dans le bassin de la Roubine est plus pauvre en baryum et en strontium, et plus riche en nickel que celle provenant du bassin du Brusquet.

La composition minéralogique des fractions argileuses peut être à l'origine de ces différences.

Echantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Moy PR	38,2	15,1	5,3	0,09	1,4	17,6	0,42	2,4	0,6	0,16
Arg PR	45,8	26,9	7	0,03	2,1	0,97	0,65	4,1	0,86	0,14
Moy PR-arg	13	0	1,4	0,07	0,2	17,3	0,05	0,09	0,1	0,08
Moy BR	43,4	13,6	4,5		1,8	14,8	0,45	2	0,67	0,2
Arg BR	47,7	28,4	5	0,01	1,8	0,47	0,75	4,5	1,01	0,13
Moy BR-arg	19	0	2		0,9	14	0,08	0	0	0,15
PR SURF	47,8	19,3	6,9	0,18	1,7	6,7	0,85	3,1	0,84	0,2
PR SURF-arg	15,3	0	1,9	0,16	0,2	6	0,38	0,25	0,23	0,1

Tableau 4 : Composition chimique moyenne en % d'éléments majeurs des roches provenant des bassins de la Roubine et du Brusquet (Moy PR et Moy BR), de leur fraction argileuse respective (Arg PR et Arg BR) et de leur fraction non argileuse respective (Moy PR-arg et Moy BR-arg)

Echantillon	Ba	Co	Cr	Cu	Nb	Ni	Sr	V	Zn	Zr	Y	Rb
Moy PR	203	15	87	7,6	7,3	44	418	123	65	103	22	181
Arg PR	327	17	157	37	18	74	220	230	127	141	22	250
Moy PR-arg	20	5	0	0	0	2	294	0	0	23	9	41
Moy BR	246	16	65	24	8	27	560	108	64	118	26	84
Arg BR	529	156	130	38	14	26	333	205	130	143	22	220
Moy BR-arg	0	8,5	0	5	0	14	393	0	0	47	15	0
PR SURF	264	37	111	34	19	82	328	171	148	151	26	170
PR SURF-arg	20	25	0	7,7	6	30	172	7	57	51	10	0

Tableau 5 : Composition chimique en éléments traces (en PPM) des échantillons de roches, de leur fraction argileuse et non argileuse respectives

3.2.2 - Calcul de la composition minéralogique à partir de la composition chimique

Afin de mettre en évidence la présence ou non de minéraux qui n'auraient pas été détectés lors de l'analyse minéralogique par la diffraction des rayons X (par exemple : la dolomite et la pyrite citées par AWONGO (1984) et BUFALO (1989)), la composition minéralogique a été calculée à partir de la composition chimique en éléments majeurs.

Pour cela, seules les compositions chimiques moyennes des différents types de roche ont été retenues puisque aucune variation verticale significative des teneurs en éléments majeurs n'est visible. De plus, nous avons considéré que la phase argileuse contenait la majorité voire tout l'aluminium et le titane de la roche. Pour chaque élément X, son abondance dans la fraction non argileuse (X_{r-a}) est obtenue en retranchant sa teneur dans la fraction argileuse (X_a) de sa teneur totale (X_r), c'est-à-dire :

$$X_{r-a} = X_r - X_a = X_r - (X_r \cdot Al_r / Al_a)$$

où Al_r est la teneur en aluminium de la roche totale et Al_a la teneur en aluminium de la fraction argileuse. Le même calcul peut être réalisé en remplaçant l'aluminium par le titane. Ce calcul permet d'obtenir la composition chimique de la phase non argileuse pour chaque type d'échantillon (respectivement : moyPR-arg, BR-arg et PRSURF-arg).

La teneur en calcite dans la roche est obtenue en multipliant par deux la teneur en CaO puisque la calcite $CaCO_3$ est deux fois plus lourde que CaO. La présence de quartz est directement donnée par la teneur de SiO_2 restant. Les autres phases minérales étant très peu abondantes, la présence d'argiles se trouve par différence. Pour les roches non altérées, la teneur en FeO de la fraction non argileuse est reliée à la présence de pyrite.

Cet essai de quantification est en accord avec les proportions minérales calculées à partir de la diffraction des rayons X. Il confirme le phénomène de dissolution de la calcite lors de l'altération des roches. Cette dissolution provoque l'apparition de pores d'un diamètre allant de 10 à 20 μm (observation au MEB).

3.2.3 - Bilan chimique de l'altération

3.2.3.1 - Eléments majeurs et en traces

Le bilan chimique de l'altération présenté ci-après ne porte que sur le bassin de la Roubine car les échantillons qui y ont été prélevés depuis la roche mère jusqu'à la croûte d'altération, contrairement aux échantillons du Brusquet où la croûte d'altération n'a pu être isolée.

Le calcul du rapport de la concentration d'un élément donné dans la roche mère sur la concentration du même élément dans la roche altérée permet de séparer les éléments chimiques majeurs et en traces analysés (tableaux 4 et 5) en trois groupes.

- Le groupe A rassemble le Ca et le Sr (rapports de 0,6 à 0,8). Le phénomène principal de l'altération des Terres Noires est la dissolution de la calcite. Les éléments constitutifs de ce minéral montrent donc des rapports inférieurs à 1 caractéristiques d'un lessivage intense.
- Le groupe B comprend l'Al, le Si, le Fe, le Mg, le Na, le K, le Ti, le P, le Ba, le Cr, le V, le Zr et l'Y dont les rapports vont de 1,3 à 1,5. La dissolution de la calcite entraîne une perte de 20 % de la matière (CaO et Sr) de la roche mère. En supposant les autres éléments immobiles, ce phénomène augmente relativement leur teneur dans la roche d'un facteur 1,3. Ces éléments, caractéristiques des phases argileuses et quartzieuses, se concentrent donc lors de la dissolution de la calcite.

- Le groupe C regroupe le Co, le Cu, le Nb, le Ni, le Zn et le Mn (rapports d'environ 2,5). Ces éléments sont donc concentrés par un autre phénomène que la dissolution de la calcite. Ils peuvent avoir deux origines possibles :

1° ces éléments sont liés à la phase argileuse et ont été mobilisés lors d'un lessivage modéré des argiles ;

2° ces éléments appartiennent à une phase minérale particulière. La forte teneur en Mn montre que cette phase pourrait être la matière organique ; le Co, le Cu et le Ni sont des éléments traces typiques de la pyrite et, libérés lors de son altération, pourraient donc avoir été piégés par d'autres phases minérales comme les minéraux argileux.

3.2.3.2 - Les terres rares

Les terres rares n'ont été dosées que dans les échantillons provenant du bassin de la Roubine. La roche altérée s'enrichit en terres rares par rapport à la roche mère (figure 1). Ce phénomène semble être directement lié à l'augmentation de la teneur en argiles dans la roche altérée. Or la fraction argileuse est particulièrement enrichie en terres rares légères et lourdes. Les terres rares moyennes pourraient donc être liées à la pyrite ou à la matière organique.

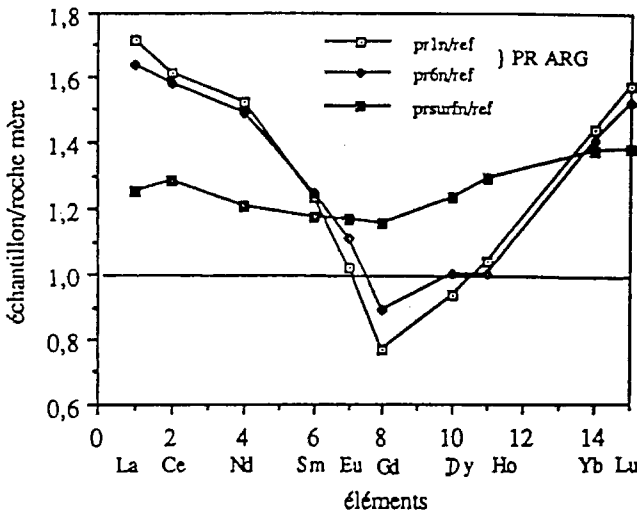


Figure 1

3.2.4 - Synthèse

L'altération des Terres Noires est caractérisée par :

- la dissolution de la calcite qui provoque la concentration relative des argiles et du quartz, ainsi que des éléments qui leur sont liés ;
- la destruction de la matière organique et de la pyrite qui, libérant des protons, acidifie les fluides altérants et entretient la dissolution des carbonates ;

- le lessivage modéré de la fraction argileuse ;

- le développement de phases secondaires, telles que les efflorescences évaporitiques, à partir de certains éléments libérés par l'altération des minéraux de la roche mère.

3.3 - Caractérisation chimique des eaux

3.3.1 - Physico-chimie des eaux

3.3.1.1 - Les eaux des quatre BVRE

Les eaux des quatre BVRE orientaux étudiés sont de type sulfaté-calcique et sulfaté-magnésien (figure 2). Elles ont toutes un pH compris entre 7 et 8 et une charge dissoute variant de 881 à 1 355 mg/l.

Les eaux du Brusquet sont moins chargées en substances dissoutes mais ont, en revanche, les plus fortes valeurs de pH, d'alcalinité et de conductivité. Ces eaux tendent vers le type bicarbonaté.

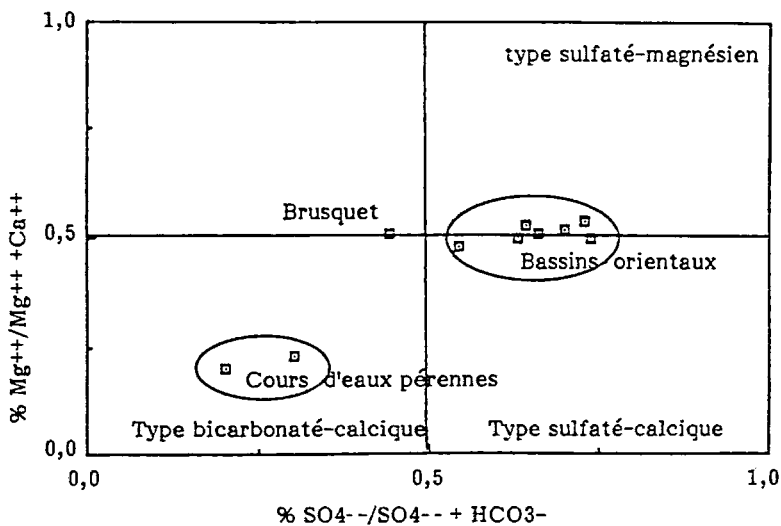


Figure 2

3.3.1.2 - Les eaux de la Bléone et du Bouinenc

Les eaux de la Bléone et du Bouinenc peuvent être considérées comme des eaux mixtes puisqu'elles récoltent les eaux provenant des BVRE étudiés. Elles sont de type bicarbonaté-calcique, et ont une charge dissoute plus faible que les eaux des BVRE.

3.3.1.3 - Les eaux de pluie

Les eaux de pluie sont caractérisées par l'absence des ions HCO_3^- et H_4SiO_4 . Ces eaux sont riches en Ca, contrairement aux eaux analysées par BUFALO (1989) dans la région du Buëch.

3.3.2 - Hydrochimie et processus d'altération

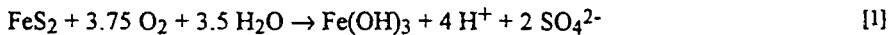
Les minéraux des échantillons de roches sont :

- des minéraux primaires : calcite, quartz, dolomite, pyrite et argiles (BUFALO, 1989) ;
- des minéraux secondaires : gypse et sulfates de magnésium hydratés.

L'utilisation du logiciel de simulation WATEQF a permis de distinguer les phases minérales susceptibles de se dissoudre ou de se former en fonction des données physico-chimiques caractérisant les eaux. Il apparaît que, d'après ce programme, les eaux ne sont jamais sursaturées vis-à-vis des phases évaporotiques, argileuses et quartzéuses. En revanche, pour certaines eaux prélevées le 01 avril 1992, on observe une légère sursaturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite. Mais l'abondance des sulfates inhibe la précipitation des carbonates et augmente la sursaturation des eaux (MUCCI et al., 1989). Les réactions de dissolution semblent donc gouverner seules la chimie des eaux au moment de leur prélèvement.

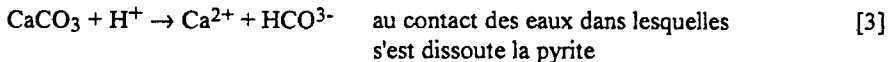
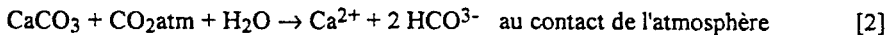
3.3.3 - Equations de dissolution des minéraux

3.3.3.1 - Dissolution de la pyrite

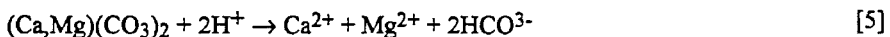
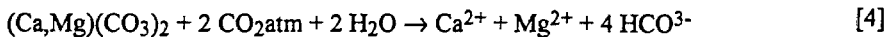


3.3.3.2 - Dissolution de la calcite

Cette dissolution est quantitativement importante et se fait selon les équations suivantes :



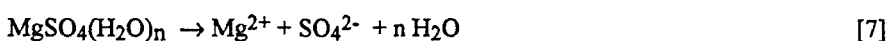
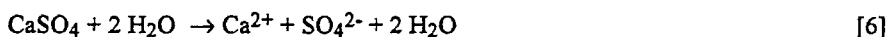
3.3.3.3 - Dissolution de la dolomite



3.3.3.4 - Dissolution des silicates

La présence de silice en solution prouve que les silicates se dissolvent en faible quantité. La complexité du cortège argileux ne permet pas d'établir d'équations de dissolution dans le cas des minéraux silicatés. Les fortes teneurs en Na et K des eaux pourraient être expliquées par la dissolution de certaines phases argileuses.

3.3.3.5 - Dissolution des sulfates secondaires (gypse et sulfates de Mg)



Seule la présence des ions carbonatés et silicatés dans les eaux semble être liée à la dissolution des eaux primaires. Les ions SO_4^{2-} et Mg^{2+} semblent caractériser les phénomènes de dissolution des minéraux évaporitiques secondaires, la pyrite et la matière organique, peu abondantes (3,5 % de la roche) n'apportant qu'une contribution très faible au niveau des sulfates.

3.3.4 - Végétation et conditions hydrologiques

La végétation a une importance non négligeable. Elle réduit le ruissellement des eaux, favorise leur infiltration dans les sols et augmente le temps de résidence des eaux dans les sols où la présence de ligands organiques accélère la vitesse d'altération (SCHNOOR, 1990). La présence de végétation semble réduire la cristallisation des minéraux évaporitiques secondaires.

D'une campagne à l'autre, les teneurs en ions Mg^{2+} et SO_4^{2-} varient alors que celles des ions carbonatés et silicatés semblent constantes. Les conditions hydrologiques étant différentes à chaque campagne de prélèvement, ces variations peuvent être imputables à une dissolution des minéraux évaporitiques secondaires, très solubles. Les éléments qui les forment sont ainsi remobilisés. Ce phénomène de stockage-déstockage semble être régi par le taux de végétalisation et par les conditions hydrologiques (une saison sèche correspond à un stockage évaporitique).

3.3.5 - Bilan d'exportation annuel

Pour chaque élément dissout, il est possible de calculer la quantité annuelle (Q , en moles) de cet élément qui quitte le système à partir de sa concentration à l'exutoire du bassin (C_e) et de sa concentration dans les eaux de pluie (C_p) :

$$Q = (3,1536 \cdot 10^7 \cdot q \cdot C_e) - (C_p \cdot p \cdot S \cdot 10^4)$$

où : q est le débit moyen annuel du bassin (en ℓ/s , calculé sur plusieurs années à partir des données fournies par le Cemagref) ; p est la pluviométrie (en mm/an) ; S est la surface du bassin en hectares.

Le calcul de la masse annuelle de roche altérée (M , en tonnes) est possible à partir de la formule suivante :

$$M = Q \cdot m / X \cdot 10^5$$

où : m est la masse molaire de l'élément sous forme d'oxydes (en g/mol) et X est le pourcentage en poids d'oxydes de l'élément considéré dans la roche.

La vitesse d'altération chimique (V , en $\text{mm}/1\ 000$ ans) est calculée selon :

$$V = M \cdot 10^2 / d \cdot S$$

où : d est la densité des Terres Noires ($d = 2$ selon BUFALO, 1989).

En utilisant l'ion calcium, le tonnage annuel de roche altérée varie de 8 à $35 \text{ t}/\text{km}^2 \cdot \text{an}$. Les concentrations utilisées ne sont corrigées ni des apports dus à la dissolution des phases secondaires ni des apports atmosphériques. Les résultats obtenus sont donc entachés d'une erreur. Nos valeurs sont légèrement inférieures à celles fournies par BUFALO (1989), mais sont néanmoins comparables. Les valeurs de vitesse d'altération chimique sont environ 5 000 fois inférieures aux valeurs de vitesse d'altération mécanique, qui est de l'ordre de 5 mm/an dans le bassin du Laval (MURA et al., 1988).

4 - Conclusions

Au terme de ce travail, il convient de faire plusieurs observations. L'étude minéralogique et chimique montre que deux phénomènes sont prépondérants lors de l'altération des marnes. Ce sont la dissolution de la calcite, de la pyrite et de la matière organique, et le stockage sous forme de minéraux secondaires évaporitiques de certains éléments libérés par cette dissolution. Le stockage-déstockage de ces éléments est étroitement contrôlé par les conditions hydrologiques.

Les sulfates constituent une caractéristique majeure de cette altération. Ces ions sont un marqueur des eaux issues du drainage des Terres Noires, qui sont de type sulfaté-magnésien et sulfaté-calcique. Par ailleurs, l'altération de la pyrite acidifie les eaux et faciliterait ainsi la dissolution des autres phases minérales primaires.

5 - Bibliographie

AWONGO (M.L.), 1984 - *Stratigraphie, sédimentologie et géochimie des terres noires du jurassique moyen et supérieur de la Provence (sud-est de la France)*. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, sédimentologie. Université de Marseille III, St-Jérôme, 144 p., pl. et fig.

BUFALO (M.), 1989 - *L'érosion des terres noires dans la région du Buëch (Hautes-Alpes, France)*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III, spécialité Géologie, 230 p. et annexes.

Cemagref, 1988 - *L'étude de l'érosion des marnes. Les bassins versants expérimentaux de Draix*. Note de présentation et de synthèse. 2^{ème} version, mai 1988, division Protection contre les érosions, Grenoble ; division Hydraulique Générale, Aix-en-Provence ; RTM Haute-Provence.

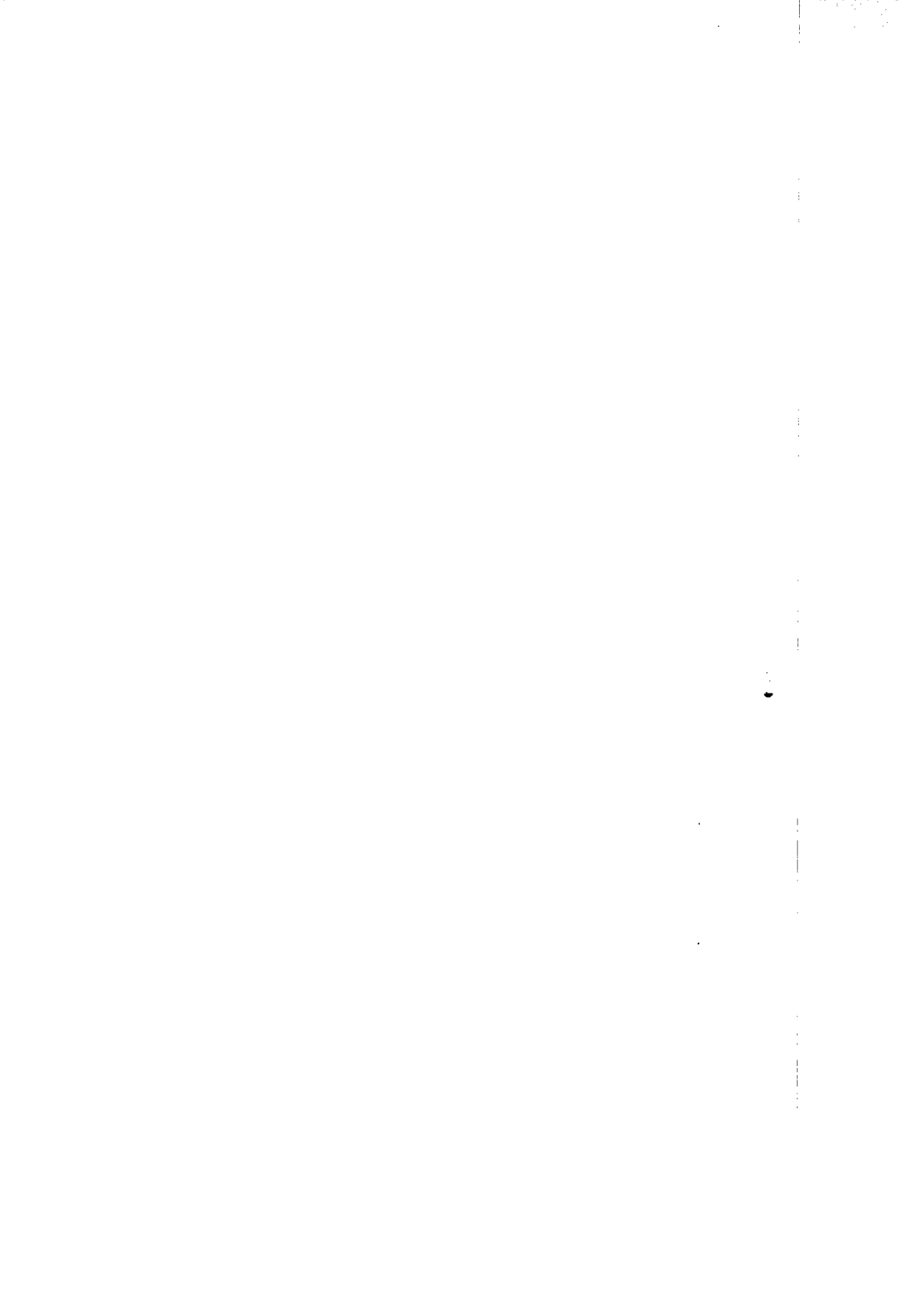
HOLTZAPFFEL (T.), 1985 - *Les minéraux argileux, préparation, analyse diffractométrique et détermination*. Société Géologique du Nord, publication n° 12, 136 p.

MEYBECK (M.), 1984 - *Les fleuves et le cycle géochimique des éléments*. Thèse d'état (n° 84-35), Paris 6, Université P. et M. Curie, Ecole Normale Supérieure.

MUCCI (A.), CANUEL (R) et SHAOSUN (Z.), 1989 - *The solubility of calcite and aragonite in sulfate free water and the seeded growth kinetics and composition of the precipitates*. Chemical Geology 74, pp. 309-320.

MURA (R.), CAMBON (J.P.), COMBES (F.), MEUNIER (M.) et OLIVIER (J.), 1988 - *La gestion du bassin versant expérimental de Draix pour la mesure de l'érosion*. Proceedings of the Porto Alegre Symposium, december 1988, IAHS, Publication n° 174, pp. 251-258.

SCHNOOR (J.L.), 1990 - *Kinetics of chemical weathering : a comparison of laboratory and field weathering rates*. In W. Stumm, ed. Aquatic chemical kinetics, Wiley - Intersciences Publication, N.Y., pp. 475-504.



Hydraulique torrentielle

Modèle hydrosédimentologique des écoulements hyperconcentrés d'un petit torrent des Alpes du sud	203
Ana-Luiza BORGES ; Sylvie BROCHOT ; Maurice MEUNIER	

Modèle hydrosédimentologique des écoulements hyperconcentrés d'un petit torrent des Alpes du sud¹

Ana-Luiza BORGES²

Sylvie BROCHOT

Maurice MEUNIER

Cemagref, division protection contre les érosions,
2, rue de la Papeterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

Résumé

Cet article présente les principes de base d'un modèle événementiel du type global spatialisé destiné à reproduire l'ensemble des comportements hydrologiques et érosifs des bassins versants torrentiels en crue. Pour la propagation des transports solides dans les biefs, le modèle utilise des lois de transport solide adaptées aux fortes pentes (4 à 8 %), une loi de dégradation du charriage en suspension, des seuils de mise en mouvement différenciés suivant la nature du lit (rocheux avec un éventuel dépôt disponible). On décrit enfin le torrent, les installations de mesure, puis on expose les résultats des calculs et de la confrontation aux observations.

Abstract

An hydrosedimentologic model for hyperconcentrated flows of a small torrent in the southern Alps

This paper expounds the principles of a global spatialized event model, fitted to torrent floods. It reproduces both water and sediment flows through the catchments. The sediment transport formulas are specific to steep gradients. Furthermore, a formula for the break up of the armour layer has been introduced and a formula describing the turn of the bed load transport into suspension too. At the end, the paper exposes briefly the basin characteristics and the measurement devices, and compares the results of the model with the observed data.

¹Cet article a été publié dans la Houille Blanche n° 3-1994.

²Actuellement à l'Istituto de Pesquisas Hidráulicas de Porto Alegre, UFRGS, Brésil.

Introduction

La détermination des transports solides revêt dans de nombreux bassins versants torrentiels une importance stratégique du fait de leurs conséquences : dépôts, affouillements, divagations, comblement de retenues ... Il est donc souhaitable de disposer d'un modèle adapté.

Dans le domaine de l'hydraulique fluviale, la connaissance, quoiqu'encore incomplète, est suffisamment maîtrisée pour que des modèles de transports solides aient été mis au point. Malheureusement, il n'est pas envisageable d'en extrapoler l'application au domaine torrentiel du fait de la complexité des phénomènes observés dans les bassins versants concernés. Parmi les facteurs de cette complexité, on peut citer les suivants :

- le débit solide est suffisamment important pour influencer la hauteur de l'écoulement ; on ne peut plus l'assimiler à la hauteur d'eau, comme l'ont montré les expériences de SMART et JAEGGI (1983), à partir d'une pente de 7 à 8 % ;
- les versants d'un bassin torrentiel fournissent souvent la majeure partie des matériaux transportés. On ne peut donc plus considérer que ces derniers ne proviennent que du lit du torrent ;
- suivant le type et l'importance du débit solide, la nature des écoulements varie, (lave torrentielle, charriage hyperconcentré, suspension hyperconcentrée, charriage fluvial, eau claire). Le premier problème est d'ailleurs souvent celui de déterminer la nature de l'écoulement auquel on a affaire ;
- les irrégularités morphologiques dans l'espace constituent un caractère dominant des torrents (pente, profil en travers, granulométrie). En outre, tout au long d'une phase de charriage torrentiel, le lit, lorsque l'on ne lui en supprime pas la possibilité, divague et ses caractéristiques morphologiques varient également très rapidement dans le temps.

La modélisation en hydraulique fluviale (par exemple RAHUEL et al., 1989, ou LABADIE et al., 1991), se base en général sur les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, reliées à des lois de transport. On traite à chaque instant les transferts entre une ou plusieurs couches d'échange et le flux solide. On représente les processus internes, à partir des notions classiques, comme les seuils de début de transport ou de déposition, en fonction des classes granulométriques. On introduit les lois des échanges entre les classes et entre les couches d'échange, etc ... De tels modèles s'appuient sur des expériences au laboratoire et sont souvent utilisés pour simuler l'effet de crues pour de grands cours d'eau. On peut aussi construire des modèles similaires s'intéressant à l'évolution à long terme de la morphologie, en effectuant la simulation à une autre échelle de temps, par exemple annuelle (DI SILVIO G., PEVIANI M., 1989., DI SILVIO G., 1991).

Compte tenu de toutes les difficultés existant déjà pour la modélisation des transports solides en hydraulique fluviale et des complications prévisibles pour les torrents, il est apparu souhaitable de tenter une autre approche, consistant à représenter globalement le fonctionnement d'un bassin versant torrentiel, aussi bien pour la dynamique des biefs que pour celle des versants : on y traite les écoulements en fonction des caractéristiques moyennes des bassins versants.

Sur le plan épistémologique, on étend simplement au transport solide et à la morphologie, les conceptions déjà en usage en hydrologie pour traduire la réponse d'un bassin à un épisode pluvieux et simuler le routage des crues dans les biefs. Le modèle présenté ici comprend d'ailleurs un module de transformation pluie-débit, semblable à beaucoup d'autres, qui fournit les entrées au module de routage des débits liquides et solides dans le lit.

Les mesures des transports solides sont toujours très difficiles, mais, pour les torrents, celles des débits liquides le sont aussi. Les possibilités de validation des modèles sont donc rares. Le site des bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France) a permis de disposer

des données adéquates pour la validation du modèle hydrosédimentologique élaboré ; on a utilisé celles disponibles sur le torrent du Laval (1 km²), qui relève à l'évidence du domaine de l'hydraulique torrentielle : on y a mesuré des concentrations de matières en suspension de 400 g/l après piégeage des éléments les plus grossiers dans une plage de dépôt ; le volume écoulé au cours d'une crue peut comporter couramment 10 % de volume solide.

Dans cet article sera exposée la conception détaillée du modèle ; on présentera ensuite le site expérimental puis les résultats obtenus.

1 - Un modèle hydrosédimentologique adapté aux torrents

Le modèle est événementiel, conçu pour fonctionner sur des crues torrentielles. Il est déterministe dans son architecture générale (figure 1).

Un logiciel, ETC (Erosion des torrents en crue), assure la continuité des écoulements au cours de leur traitement par les modèles élémentaires (représentés chacun par une flèche sur la figure 1). L'utilisateur doit sélectionner ces modèles élémentaires, parmi ceux offerts à son choix, en fonction des caractéristiques spécifiques du bassin versant torrentiel à traiter.

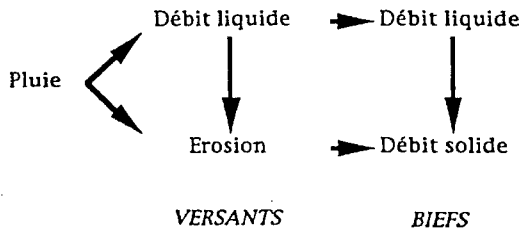


Figure 1 : Architecture générale du modèle

Pour tenir compte d'éventuelles hétérogénéités de la pluie et des caractéristiques physiques des bassins versants, ou pour mieux reproduire l'organisation du réseau hydrographique, le modèle peut être spatialisé : le bassin versant est alors représenté par une arborescence de versants ou sous-bassins et de biefs. ETC gère l'équation de continuité appliquée aux écoulements d'eau et de matériaux au travers de cette arborescence.

Comme l'hydraulique torrentielle est encore balbutiante, ETC a été conçu comme un système évolutif, capable d'accueillir les nouvelles méthodes susceptibles d'être mises au point pour reproduire les comportements érosifs et hydrauliques torrentiels. (On illustrera d'ailleurs ci-après cette possibilité à propos de la modélisation de la transformation du charriage en suspension)

La conception générale des modèles pluie-débit et pluie-érosion (sur les versants) ne sera pas explicitée ici ; les choix faits pour leur application au cas spécifique du bassin du Laval seront décrits dans le paragraphe 2 de cet article.

1.1 - Routage du débit liquide dans les biefs

On admet que les écoulements se font toujours en régime torrentiel, ce qui permet de s'affranchir de l'influence de l'aval et permet une résolution totalement différente des schémas classiques : la propagation de la crue est traitée en totalité pour chaque bief, et chaque bief est traité

successivement de l'amont vers l'aval. On considère la crue comme une succession de régimes permanents. De façon correspondante, les biefs sont des biefs uniformes, de pente constante.

La propagation de la crue liquide dans un bief est une simple translation sans déformation, ce qui est admissible pour les fortes pentes.

1.2 - Routage du transport solide dans les biefs

Le transport solide est traité grâce à l'équation de continuité aux noeuds. Pour les biefs, l'organisation du module de routage du transport solide (MEUNIER M., 1987, LEFRANC P., 1990) est représentée sur la figure 2. Ce module traduit le fonctionnement des torrents, tel qu'il est assez couramment admis par les praticiens. Le débit solide entrant est d'abord comparé à la capacité maximale de transport :

- s'il est supérieur, le supplément est considéré comme devant se déposer. Il alimente ainsi un volume de sédiments accessibles à tout moment à l'érosion ;
- s'il est inférieur, l'écoulement s'alimente dans le volume de sédiments disponibles pour satisfaire sa capacité maximale de transport. Si cette réserve n'est pas suffisante, il y a possibilité d'érosion du lit du torrent lui-même par le biais d'une formule de dépavage.

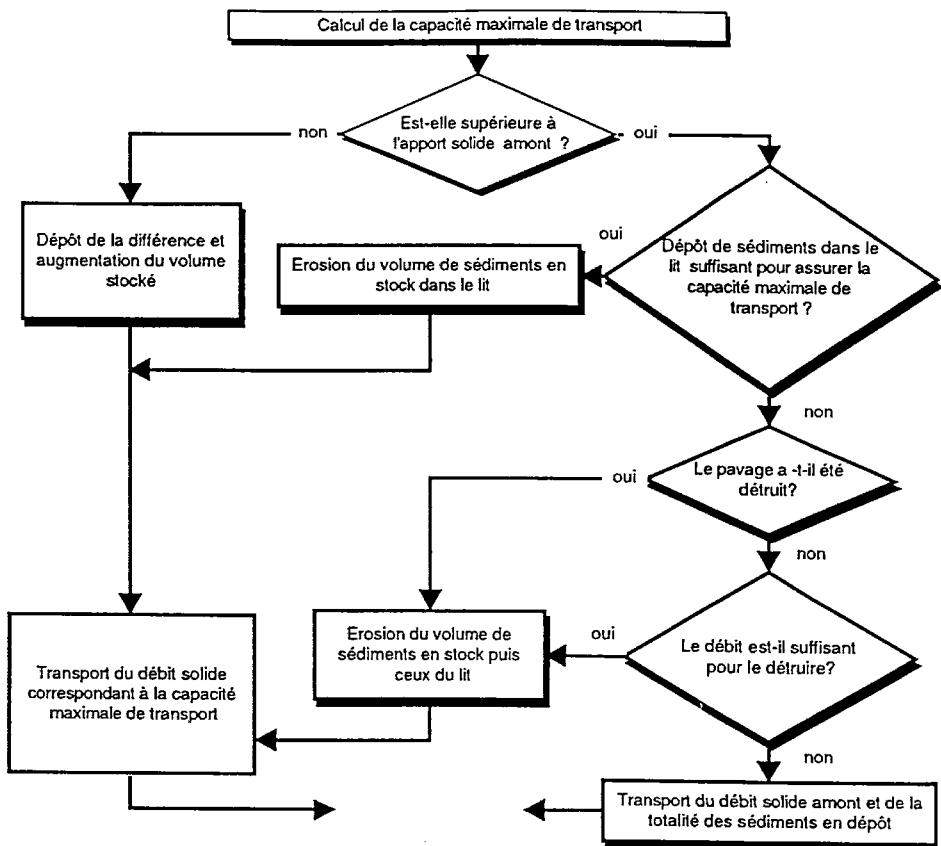


Figure 2 : Organisation du module de transport solide dans ETC

Ce modèle étant conçu pour représenter les comportements torrentiels, les formules de transport solide utilisées sont celles qui ont été obtenues à partir d'essais sur modèle réduit à forte pente :

- Formule de SMART et JAEGGI (SMART G.M., JAEGGI M.R., 1983)

$$\Phi_{B.Ch} = 4 / (s-1) (D_{90}/D_{30})^{0,2} I^{1,6} q (1 - \tau_c/\tau) \quad [1]$$

où $\Phi_{B.Ch}$ est le débit solide adimensionnel en charriage, s le rapport des masses volumiques entre ce débit solide et l'eau, D_{90} et D_{30} les quantiles de la courbe granulométrique du matériau transporté, I la pente, q le débit liquide par unité de largeur, τ la contrainte de cisaillement, et τ_c la contrainte de cisaillement adimensionnelle.

- Formule de RICKENMANN (RICKENMANN D., 1990)

$$q_{B.Ch}/q = 12,6 (D_{90}/D_{30})^{0,2} (\rho_m/(\rho_s-\rho_m))^{1,6} I^2 (1 - q_{cr}/q) \quad [2]$$

où ρ_m et ρ_s sont les masses volumiques respectives du mélange et du matériau solide, et $q_{B.Ch}$ est le débit solide de charriage par unité de largeur. Le début de mouvement est introduit ici à partir d'un débit critique q_{cr} et non à partir de la valeur critique de la contrainte de cisaillement. L'intérêt de cette formule provient des expériences sur lesquelles elle a été calée, qui consistaient à étudier l'effet sur le transport solide d'une augmentation de densité du fluide par adjonction de matériaux fins.

- Formule de LEFORT (LEFORT P., 1991)

$$Q_{B.Ch}/Q = 4,45 (D_{90}/D_{30})^{0,2} (\rho/(\rho_s-\rho)) I^{1,5} (1 - (Q_{cr}/Q)^{0,375}) \quad [3]$$

Cette formule, calée sur des essais sur modèle réduit en matériau granulaire, est valable pour une vaste gamme de pentes. Elle a été élaborée à partir des débits totaux Q et $Q_{B.Ch}$, et non du débit par unité de largeur q , ce qui élude le problème souvent difficile du choix de la largeur à utiliser dans ces formules, ainsi que celui de la formule de perte de charge à utiliser.

Comme on le voit, l'effet de la courbe granulométrique est traduit par la présence du facteur (D_{90}/D_{30}) ; ce modèle ne décompose donc pas la courbe granulométrique en classes et ne traite pas les phénomènes qui lui sont reliés (masquage, tri granulométrique, formation du pavage), comme le font les modèles plus complets qu'on utilise en hydraulique fluviale.

Chaque formule de transport solide a son propre seuil de début de transport. Une formule supplémentaire a été utilisée pour traduire le dépavage, celle de BATHURST (BATHURST J.C., 1987) :

$$q_{cp} = 0,15 I^{-1,12} g^{0,5} D_{50}^{1,5} \quad [4]$$

où q_{cp} est le débit unitaire de dépavage. On a donc la possibilité de séparer la loi d'érosion d'un lit pavé de celle des dépôts.

2 - Le site expérimental du Laval à Draix et l'adaptation du modèle

Il est en général très difficile de vérifier la validité d'un modèle de transport solide à partir de données réelles. Les flux notamment sont très mal connus, et, souvent, on ne peut confronter les résultats du calcul qu'à des mesures ou observations limitées comme l'état du lit (RAHUEL J.L., 1988, pour le Rhône, ou LIN H., 1993, sur un collecteur de réseau d'eaux usées).

Très différent est le cas du site des bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes de Haute-Provence, France), pour lequel des mesures adéquates sont faites sur un torrent de moins de 1 km²,

le Laval ; elles ont donc permis de tester le modèle hydrosédimentologique décrit ci-dessus. Mais ce torrent présentant de solides particularités, il a fallu compléter celui-ci.

2.1 - Description succincte des bassins versants expérimentaux de Draix et des données disponibles

Les bassins versants de Draix se trouvent dans les Alpes du sud (figure 3). Ils sont situés sur des terrains marneux et marno-calcaires très érodables : l'ablation moyenne interannuelle est de l'ordre de 130 à 160 t/ha.an, valeur couramment observée sur de tels terrains (COMBES F., 1981, BUFFALO M., 1989). Ceci donne des écoulements torrentiels à très fort débit solide, pouvant aller jusqu'à des laves torrentielles. Le débit solide mesuré comporte deux termes : le volume déposé dans un piège à sédiments mesuré globalement, et le volume transité au travers d'un barrage filtrant, obtenu en échantillonnant la crue avec un préleveur automatique fonctionnant de manière discontinue. Le mode et les difficultés de fonctionnement des appareillages ont été décrits par CAMBON J.P. et al., (1990), le type et les difficultés de traitement des données obtenues par MATHYS N. et MEUNIER M., (1988) ou BORGES A.L., (1993).

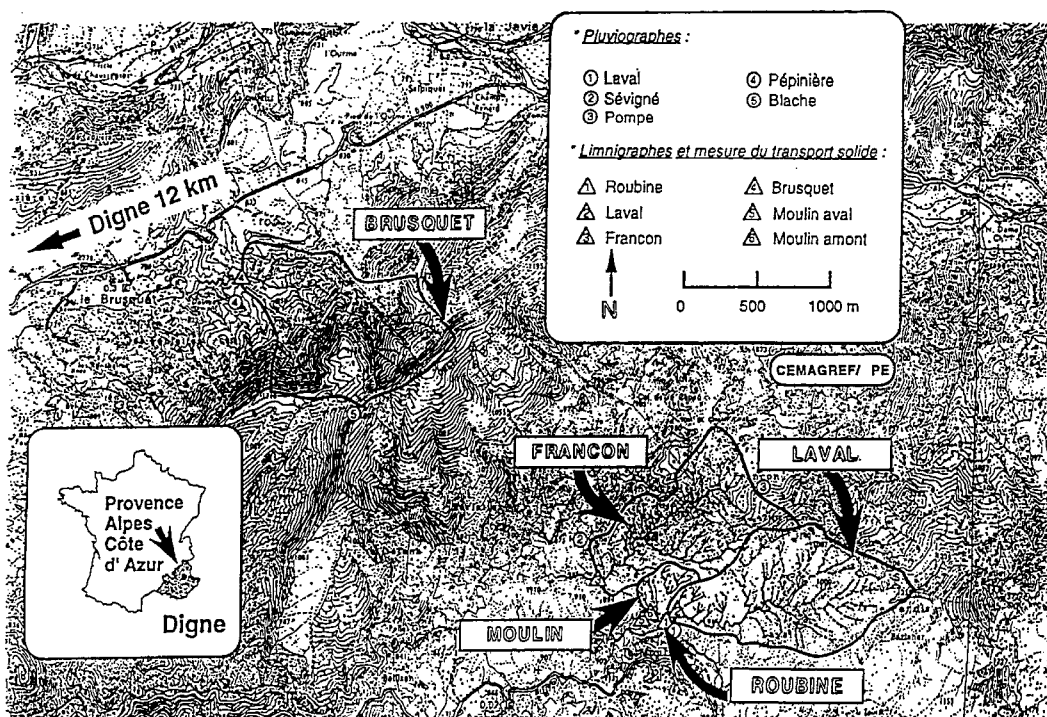


Figure 3 : Plan de situation des bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes de Haute-Provence, France)

Du point de vue hydrologique, les crues du Laval sont brèves (temps de réponse de l'ordre de 20 à 30 minutes). Les biefs (figure 4) servent de transit aux écoulements qui arrivent des versants fortement chargés de sédiments ; ils peuvent déposer une part non négligeable de leur charge dans les biefs ou, à l'inverse, éroder ces dépôts lors d'une autre crue. Par contre, le fond des biefs est rocheux (marne non altérée) et la capacité d'érosion est donc limitée aux stocks en place.

2.2 - Conception du modèle hydrosédimentologique du Laval

L'application du modèle hydrosédimentologique décrit ci-dessus aux écoulements torrentiels du Laval se heurte à deux problèmes, celui des conditions aux limites amont, problème général à toute modélisation, et celui de la nature des écoulements donc de la possibilité de les traduire par des formules de transport.

2.2.1 - Conditions aux limites amont

Le bassin versant est représenté sur la figure 4. Après analyse, le lit de la branche principale a été découpé en trois biefs, et les ravines ont été regroupées en six sous-bassins (figure 5), sur lesquels ont été calculées les entrées préalables au routage dans les biefs. En effet, celles-ci ne sont pas mesurées, et il faut donc commencer par les estimer.

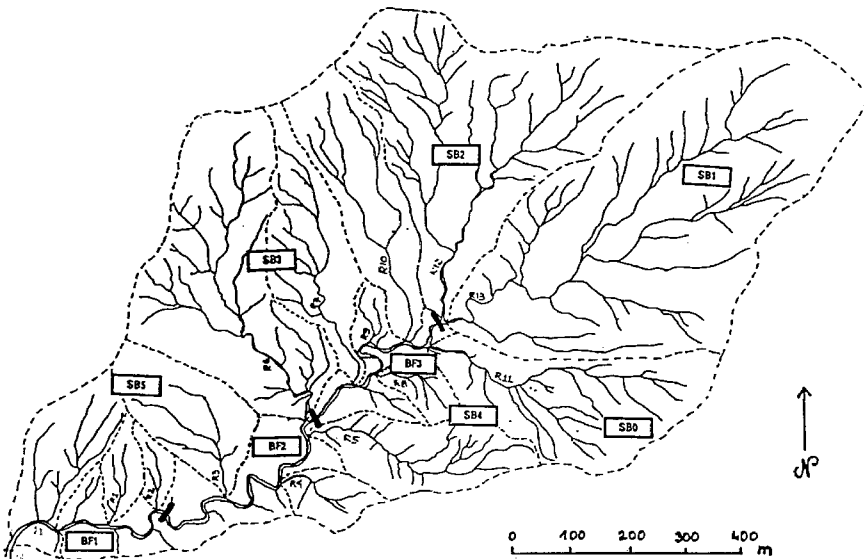


Figure 4 : Bassin versant du Laval

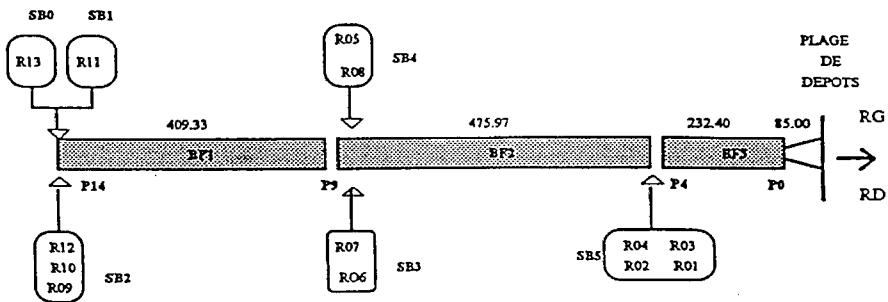


Figure 5 : Représentation simplifiée du bassin du Laval

Le modèle pluie-débit choisi pour représenter les crues est un modèle très simple ; il comporte pour la fonction de production, un seuil initial avant ruissellement ; sur la pluie nette ainsi calculée, on applique un coefficient de ruissellement constant. Ces deux paramètres variant d'un épisode à un autre, ce sont les paramètres optimaux qui ont été choisis lors de l'utilisation du modèle pour étudier les transports solides. Pour la fonction de transfert, un hydrogramme unitaire triangulaire de base égale à deux fois le temps de concentration (T_c) a été utilisé. Le temps de concentration est obtenu à partir d'une formule adaptée de celle d'ISCHBACH pour les torrents de montagne (MEUNIER M. et MATHYS N., 1989). La figure 6 donne un exemple de comparaison entre les débits liquides calculés mesurés.

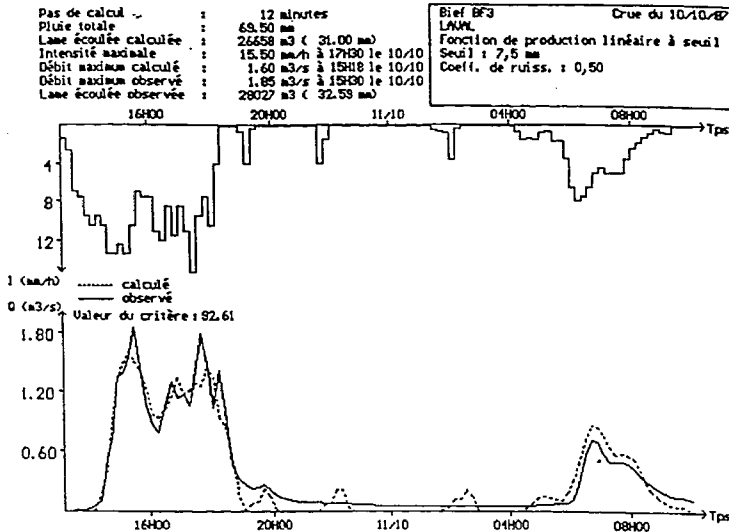


Figure 6 : Simulation de la crue du 10/10/87 au Laval

Le transport solide à l'entrée du modèle hydraulique a été obtenu de la manière suivante : la production totale de sédiments d'une petite ravine (1330 m²), appelée la Roubine, étant mesurée à chaque crue, on transfère ces mesures aux sous bassins du Laval, proportionnellement au produit (surface érodée * pente du talweg). Ce volume d'érosion est alors distribué dans le temps, proportionnellement au débit liquide à la sortie de chaque sous-bassin pour donner son sédimentogramme. De plus, comme la production de sédiments de la ravine mesurée est répartie en deux termes (volume déposé dans le piège à sédiments : 85 % ; volume transité à l'aval de la grille du piège : 15 %), on conserve cette répartition à la sortie des sous-bassins du Laval.

Comme on le voit, on ne maîtrise pas réellement les conditions amont du modèle et les écarts en sortie entre les mesures et les calculs peuvent très bien provenir de cette non connaissance. C'est un problème difficilement surmontable pour la plupart des torrents de montagne, pour lesquels des mesures constituent une denrée quasi introuvable.

2.2.2 - La nature des écoulements

Les écoulements observés sur le Laval sont évidemment des écoulements hyperconcentrés : le rapport (Q_B/Q) du débit solide au débit liquide varie entre quelques % et quelques dizaines de % ; après décantation dans la plage de dépôts, on a mesuré des concentrations allant jusqu'à près de 500 g/l de matériaux fins, c'est-à-dire des concentrations correspondant aux écoulements observés

sur les affluents du Fleuve Jaune (ZHANG J. et al., 1990). Ceci indique que les formules programmées dans ETC, établies à partir d'écoulements granulaires, ne sont pas forcément valables ici.

La répartition entre les matériaux transités et déposés est de plus très variable : de 15 % / 85 % sur la Roubine, elle passe à 60 % / 40 % à l'exutoire du Laval. Le matériau grossier se dégrade en effet très rapidement au cours du transport. Ceci a deux conséquences :

- Les formules utilisées dans ETC et indiquées ci-dessus ont été obtenues sur modèle réduit avec du matériau granulaire ; en principe donc, ces formules expérimentales ne devraient pas bien représenter les écoulements du Laval composés pour moitié d'éléments fins (figure 7) ; seule celle de RICKENMANN offre la possibilité de tenir compte de ces éléments fins. Elle possède donc un *a priori* favorable. Par ailleurs, on sait que ces formules expérimentales obtenues au laboratoire ont tendance à surestimer les transports réels, en général faute de sédiments disponibles pour l'érosion des lits.
- La dégradation rapide des matériaux grossiers en matériaux fins le long des biefs, ne peut être occultée. Elle a été prise en compte par le biais d'une loi de type exponentiel, obtenue en supposant que le taux de dégradation unitaire est proportionnel au taux d'éléments grossiers existant :

$$QB.G = \alpha \quad QB \quad d\alpha / dL = -k \alpha$$

où QB.G est le débit solide des éléments grossiers, et L est la longueur parcourue par les sédiments. Un calage sur les valeurs annuelles permet de donner à k la valeur 0,0011.

Pour modéliser les écoulements du Laval, on est donc conduit à assimiler :

- d'une part, le débit d'éléments grossiers au débit solide de charriage, donné par les formules expérimentales ;
- d'autre part, le débit d'éléments fins au débit en suspension.

Ces assimilations n'ont rien d'évident *a priori*, car avec des écoulements hyperconcentrés, la séparation usuelle entre charriage et suspension perd de sa pertinence : le transport solide se fait en bloc, sans tri granulométrique notable quand on est à la capacité maximale de transport ; cela est d'autant plus vrai que le transport solide est important, donc qu'on se rapproche des laves torrentielles, pour lesquelles on sait que le tri granulométrique est inexistant. Le problème est différent lorsqu'on est proche du seuil d'entraînement.

Pour confronter les résultats des calculs aux mesures, on sera obligé d'admettre que le matériau déposé dans le piège à sédiments représente le charriage (hyperconcentré) et que le sédiment transité représente le complément, qu'on appellera suspension. Or, on sait qu'une part importante de sédiments fins est également déposée dans le piège ; on peut le voir sur la figure 7, qui représente des courbes granulométriques des dépôts dans le piège à sédiments, celle du matériau transité, et celles des dépôts naturels dans certains biefs du Laval. Cette figure montre bien l'ampleur de l'hypothèse faite en assimilant le matériau piègé à du charriage.

Par ailleurs, pour être cohérent avec les formules de transport de charriage hyperconcentré introduites dans ETC, les courbes granulométriques des biefs seulement sont utilisées pour déterminer les quantiles (D_{90} , D_{50} , D_{30}) nécessaires au calcul.

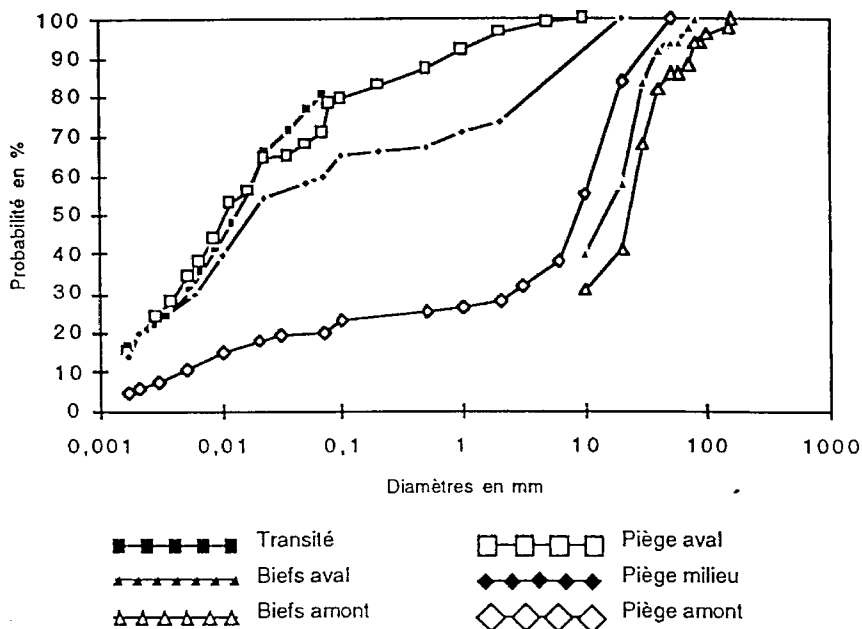


Figure 7 : Courbes granulométriques des dépôts et du matériau transité au Laval

3 - Résultats

3.1 - Données

Les caractéristiques des biefs et sous-bassins sont données dans le tableau ci-dessous (tableau 1) ; la comparaison à des mesures ne peut être faite que pour les crues où les données sont suffisamment validées ; or, notamment en raison du manque de fiabilité de la mesure des transports solides, on n'a trouvé que trois crues pour lesquelles tous les appareils ont fonctionné de manière satisfaisante, et même pour l'une d'entre elle (24/8/87), l'hydrogramme a été reconstitué ; les mesures de transport solide sont par contre très bonnes. Ces 3 crues ont donc été utilisées pour la confrontation entre la mesure et les calculs ; le tableau 2 en indique les caractéristiques, avec les chiffres estimés (résultat des reconstitutions) écrits en italique.

Comme on le constate, ces trois crues ont un débit maximal très élevé. La simple observation de ces données montre que le rapport du volume transité au volume déposé à l'exutoire (dont on a vu qu'il est égal à 1,5 en moyenne) n'est absolument pas constant d'une crue à l'autre : il possède ici les valeurs suivantes : 2 / 6,2 / et 2,5. Comme le calcul prévu dans notre modèle est basé sur le rapport moyen de 1,5, il ne faut pas s'attendre à des résultats excellents sur ce point. Ce tableau montre aussi que le matériau solide entrant (érosion totale au Laval transférée depuis les mesures de la Roubine) est du même ordre de grandeur que le flux sortant du bassin du Laval (érosion totale mesurée) ; il est inférieur à deux reprises, mais l'inverse est également vrai (crue du 24/8/87). Ces différences proviennent en principe essentiellement des phénomènes de dépôts et reprises dans les biefs du Laval ; c'est d'ailleurs aussi cela que le modèle est censé représenter.

Sous-bassins

Dénomination	Surface totale (ha)	Surface végétalisée (ha)	Surface dénudée (ha)	Pente (%)	Longueur (m)	Tc (mn)
SB0	7,3	1,7	5,6	38	490	7
SB1	22,3	8,0	14,33	34	889	14
SB2	20,48	6,39	14,09	40	674	10
SB3	15,4	3,67	11,73	33	659	9
SB4	5,9	0,54	5,36	34	464	7
SB5	13,52	1,35	12,14	42	300	6

Biefs

Dénomination	Longueur (m)	Largeur (m)	Pente (%)	D ₉₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	Coefficient de Strickler
BF1	410	3,8	6,0	64	19	10	13
BF2	476	4,5	4,0	40	17	9	14
BF3	233	4,3	4,5	31	15	6	15

Tableau 1 : Caractéristiques des biefs et des sous-bassins

Date	Pluie totale (mm)	Intensité en 1 mn (mm/h)	Lame écoulée (mm)	Débit maximal (m ³ /s)	Erosion transitée mesurée par prélèvement (m ³)	Erosion déposée densité 1,7 (m ³)	Erosion totale au Laval	
							mesurée au Laval (t)	transférée depuis les mesures de la Roubine (t)
24/08/87	46,2	90	6,0	2,708	279	210	1 096	1 423
20/08/88	25,2	78	4,8	1,63	258	65	794	723
19/10/88	73,7	66	35,9	2,88	645	395	2 381	1 367

Tableau 2 : Caractéristiques des crues servant au calage

3.2 - Simulation des crues liquides

La seule variable sur laquelle il est possible de comparer les résultats du modèle aux mesures sur toute la durée de la crue est le débit. Les résultats sont présentés sur la figure 8.

Cette figure montre que l'accord entre les débits liquides calculés et mesurés est suffisant pour qu'on puisse admettre que le calcul des transports solides donne le même résultat, qu'on le fasse à partir des débits liquides mesurés ou calculés.

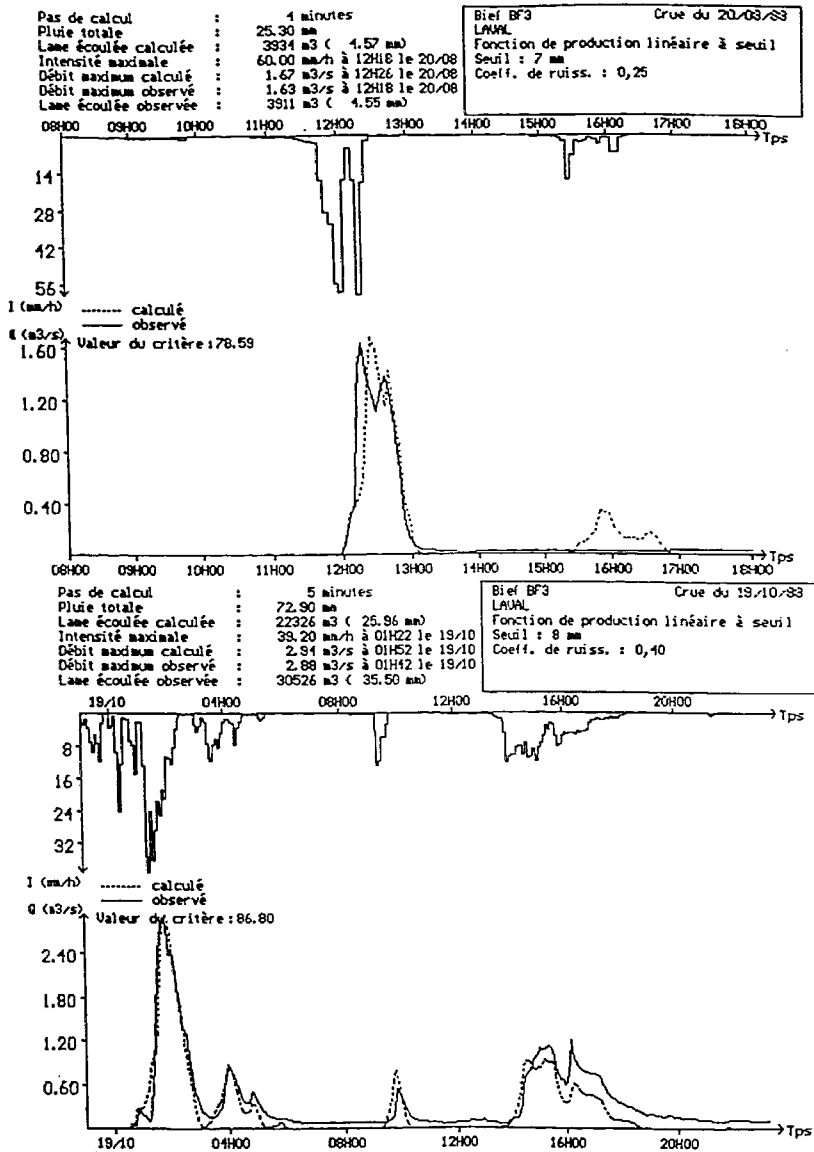


Figure 8 : Crues du 20/8/88 et du 19/10/88

3.3 - Confrontation aux mesures de transport solide

Pour les deux premières crues, les calculs ont montré que les dépôts dans les biefs étaient augmentés au passage de la crue ; l'initialisation des dépôts disponibles n'a donc pas d'influence sur les résultats. Mais il en est tout autrement pour la crue du 19/10/88, pour laquelle, dans l'ignorance où nous sommes de l'importance des stocks initiaux, deux calculs ont été effectués : le premier, en supposant

l'absence de stocks disponibles, le second (noté 19/10/88 bis) en supposant au contraire que ces stocks sont très importants et que l'érosion par la crue peut s'exercer sans limite.

La figure 9 confronte les valeurs des volumes charriés, calculés par le modèle, d'une part, et les volumes déposés dans le piège, mesurés, d'autre part. Compte tenu des incertitudes bien connues concernant la validité de l'utilisation des formules de transport solide en charriage, et leur application en particulier au bassin versant du Laval, on peut être surpris de leur excellente performance sur les trois crues utilisées dans cette confrontation aux mesures. On voit également que la formule de LEFORT a été limitée dans son calcul par la disponibilité en sédiments et que si on lui donne la possibilité d'en éroder plus (19/10/88 bis), elle en transporte une quantité impressionnante. Cela montre l'importance qu'il y aurait à connaître le stock qui était réellement disponible dans les biefs.

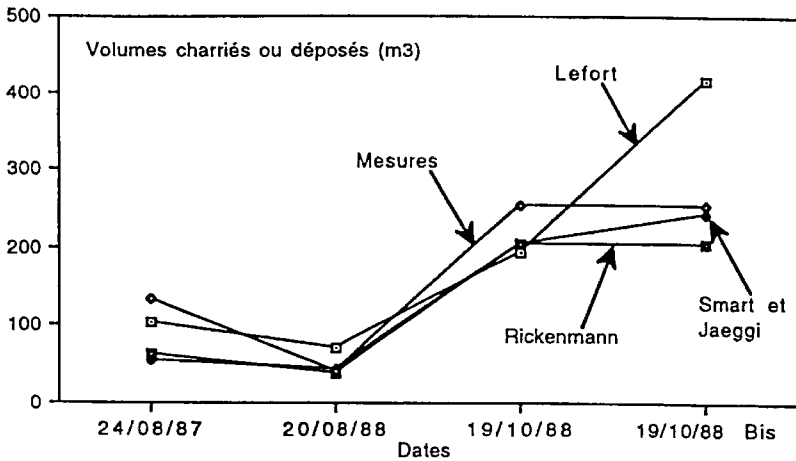


Figure 9 : Confrontation des volumes transportés par charriage calculés à la mesure des dépôts dans le piège

Pour les suspensions (figure 10), l'accord est moins parfait : le modèle sous-estime les volumes transités, ce qui est logique, puisque, pour ces trois crues, le rapport transité/déposé est supérieur à la valeur moyenne de 1,5. On remarque également que les volumes de suspension calculés reproduisent logiquement l'évolution des volumes de charriage calculés. Enfin, dans le cas où un stock de sédiments important est disponible dans les biefs, la formule de LEFORT donne alors un volume de suspension plus adapté, conséquence directe du fait qu'elle a surestimé le volume transporté par charriage.

Conséquence directe de la sous-estimation des volumes en suspension, le modèle (figure 11) surestime pour ces trois crues, les dépôts dans les biefs, sauf pour l'épisode noté 19/10/88 bis, pour lequel la formule de LEFORT en érode juste ce qui est nécessaire. Mais il faut rappeler que les dépôts ne sont ici qu'estimés et non réellement mesurés. On voit qu'un suivi de l'évolution de ces dépôts, avec leurs mesures, permettrait de valider de manière très fructueuse les résultats du modèle.

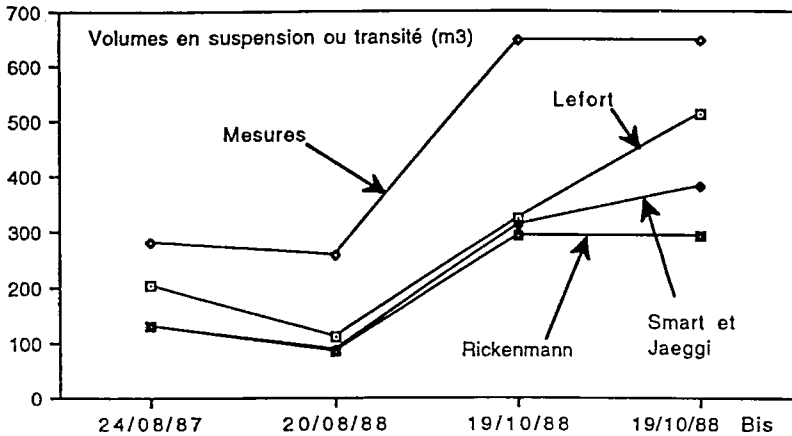


Figure 10 : Confrontation des volumes transportés en suspension calculés aux volumes transités mesurés

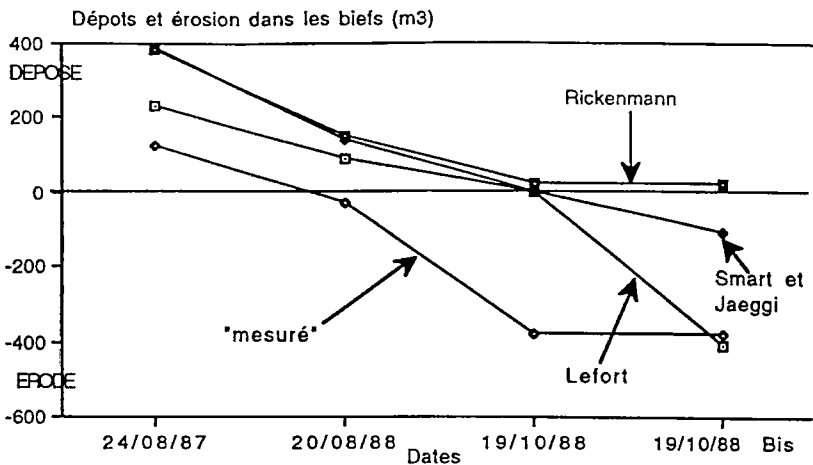


Figure 11 : Confrontation des volumes déposés ou érodés dans les biefs, calculés, aux volumes estimés

En conclusion, la comparaison pour ces trois fortes crues, entre le modèle et les calculs, montre que :

- les formules de calcul du charriage hyperconcentré sont curieusement excellentes ; elles sous-dimensionnent légèrement le volume recueilli dans la plage de dépôts ;
- cette comparaison est rendue hasardeuse par l'absence de mesure des débits solides entrant dans les biefs, et des dépôts existants. Les calculs faits pour la crue du 19/10/88 montrent bien la différence obtenue suivant qu'on a au départ un stock disponible important ou nul ;
- le modèle de dégradation du charriage en suspension sous-estime la suspension pour ces trois crues. Il faut plus de mesures pour qu'on puisse adopter définitivement la valeur 0,0011 du paramètre de ce modèle.

3.4 - Tentative de validation

Les confrontations aux mesures présentées au paragraphe ci-dessus, présentent l'inconvénient d'être ponctuelles, dégagées de l'histoire des dépôts et reprises avant chaque crue, lesquels n'étaient d'ailleurs pas particulièrement observés à cette époque. Par ailleurs, les trois crues utilisées pour le calage sont des crues fortes. Pour analyser la validité du modèle, une simulation a été effectuée sur une période continue (du 10/05/91 au 5/10/91) pendant laquelle l'évolution des dépôts dans les biefs était observée et ponctuellement mesurée de manière très sommaire (mesure au décimètre d'une longueur, une largeur et une épaisseur moyennes). Pendant cette période les mesures des dépôts dans le piège ont été très correctes, alors que celles des volumes transités ont été plutôt inexistantes. Pour avoir malgré tout une idée de la validité des calculs des matières en suspension, on les a comparés aux volumes transités estimés à partir d'une formule statistique obtenue sur les épisodes antérieurs bien mesurés (BORGES A.L., 1993). Les graphiques des volumes cumulés sur la période test sont représentés sur les figures 12 et 13.

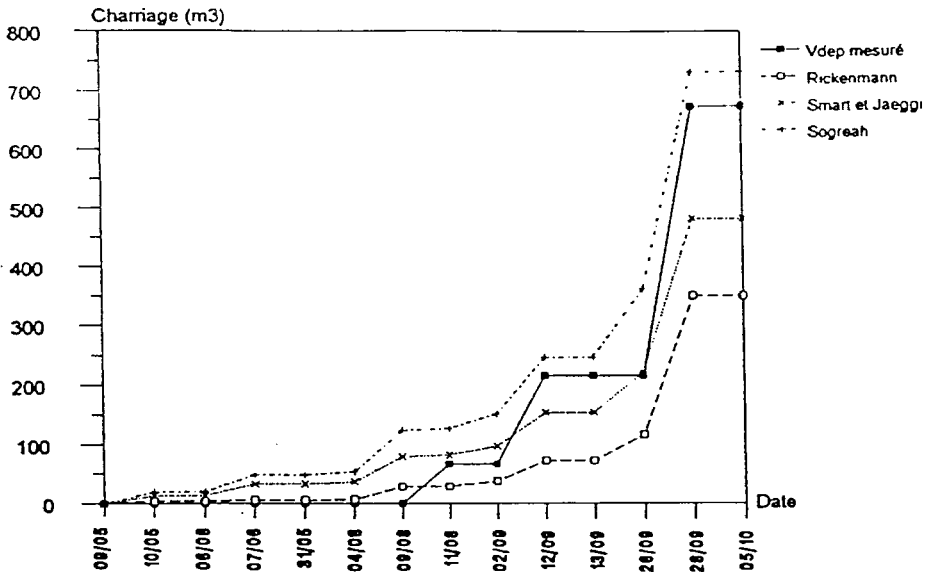


Figure 12 : Volumes charriés calculés cumulés et volumes déposés mesurés cumulés

On voit que les résultats sont assez satisfaisants. La figure 12 montre que la formule de RICKENMANN a tendance à sous-estimer, que les deux autres (mais surtout celle de LEFORT) ont peut-être un seuil de début de transport trop faible. Comme les formules de transport ont été utilisées sans aucun calage de paramètre, il semble tout à fait possible de les adapter pour les faire représenter encore mieux les flux sortants du bassin du Laval.

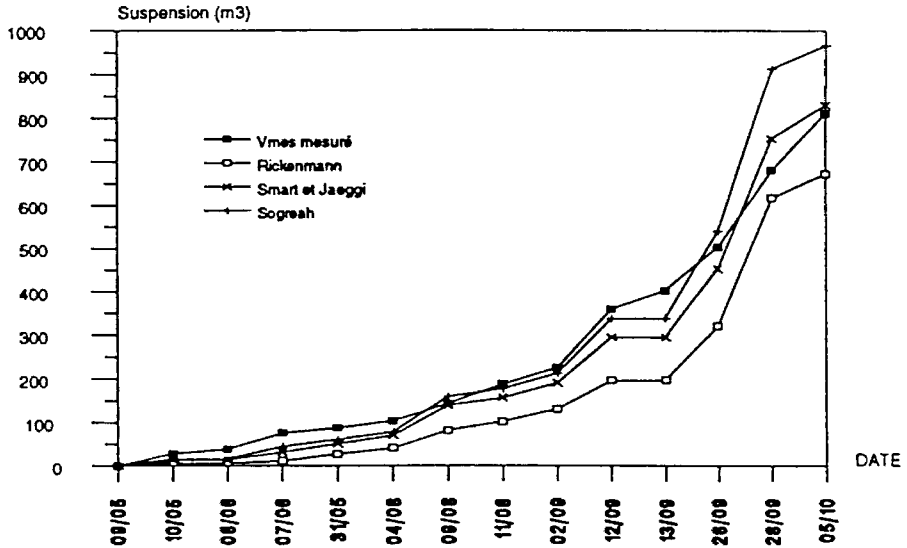


Figure 13 : Volumes transités estimés cumulés et volumes en suspension calculés cumulés

L'évolution du stock de sédiments dans les trois biefs, telle qu'elle résulte du calcul, est indiquée sur la figure 14. Malheureusement, il n'est pas possible de la confronter à des mesures, hormis pour l'origine et la fin de la période ; la forte crue du 28/9/91 (97 mm de pluie) a en effet tout nettoyé. L'accord aux limites est valable, mais on conçoit qu'une mesure régulière des dépôts de sédiments dans les biefs aiderait grandement à porter un jugement plus fin sur la qualité de ce modèle.

Conclusions

Les principales conclusions de ce travail sont les suivantes :

- Il y a un très bon accord entre les calculs des volumes transportés par charriage et les volumes déposés, et ceci est assez surprenant compte tenu de la nature des matériaux transportés à Draix ; le choix de la meilleure formule n'est pas un problème important : il serait d'ailleurs possible d'adapter une formule aux écoulements hyperconcentrés de Draix, en se donnant un seuil de début de transport plus élevé.
- La suspension étant très variable d'une crue à l'autre, cela reste un phénomène à mieux observer et mesurer.
- Néanmoins la dégradation du charriage en suspension, telle qu'elle est proposée dans ce travail, est une voie prometteuse. La valeur proposée du paramètre k de la loi de dégradation, sous-estime vraisemblablement les volumes transités. Elle a été en effet obtenue à partir de valeurs annuelles de transport solide, ce qui n'est pas une excellente méthode, étant donné qu'il s'agit d'un phénomène non linéaire.

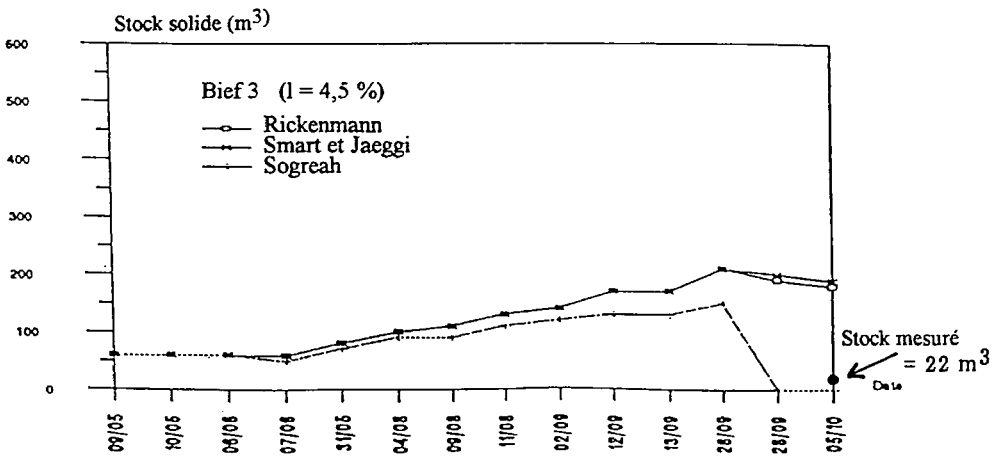
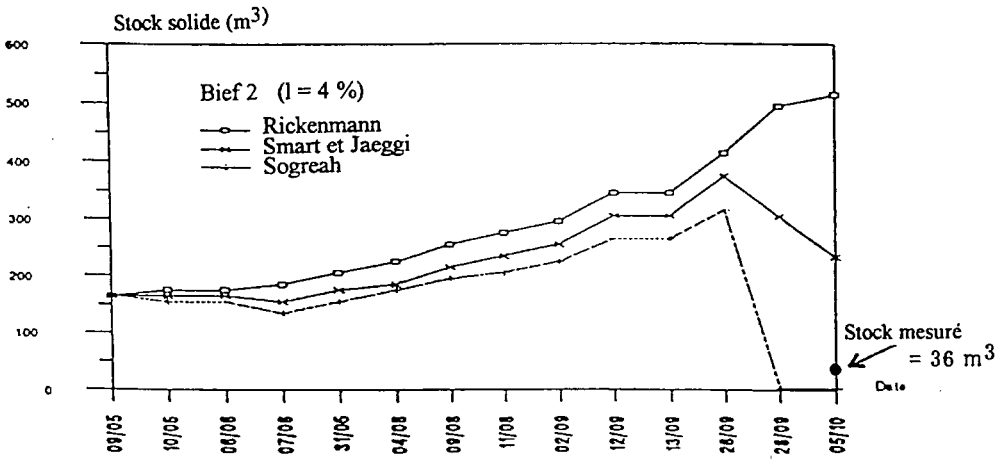
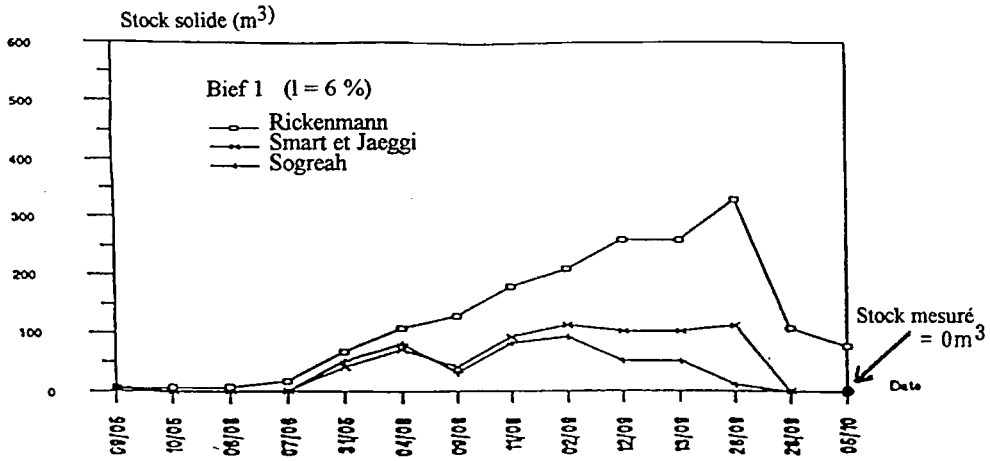


Figure 14 : Evolution du stock des dépôts dans les biefs du Laval

Le travail à effectuer en complément pour l'avenir, est donc le suivant :

- Il faut améliorer la mesure des matériaux transités, en installant des appareillages plus adaptés. Sont prévus des appareils basés sur la rétrodiffusion optique, et sur l'absorption par le matériau solide, des rayonnements γ obtenus par des sources radioactives.
- La mesure de l'évolution des dépôts dans les biefs est entreprise dans le cadre du projet européen EROSLOPE, en concertation avec ce qui est fait sur d'autres torrents (Bavière, Zurich, Italie du Nord). Elle permettra de les comparer aux volumes calculés ; on aura alors une bien meilleure sécurité dans l'estimation de la fiabilité du modèle. Mais, du point de vue du contrôle des variables, restera le problème de la connaissance des entrées dans le modèle hydrosédimentologique ; il restera mal résolu, comme c'est toujours le cas dans les problèmes de transport solide torrentiel.
- On peut enfin étudier la possibilité d'améliorer la finesse du modèle et tenir compte de l'évolution de la morphologie des biefs, en fonction des phénomènes de dépôts et de reprise. C'est un problème encore plus difficile que celui qui a été traité ici, et qui nécessiterait une observation de cette morphologie (largeur, pente) pendant la crue elle-même.

Bibliographie

BATHURST (J.C.), 1987 - *Critical conditions for bed material movement in steep, boulder-bed streams*. Corvallis Symposium : Erosion and sedimentation in the Pacific Rim. AIHS Publ. N° 165.

BUFFALO (M.), 1989 - *L'érosion des terres noires dans la région du Buëch*. Thèse de géologie. Université Aix-Marseille 3.

BORGES (A.L.), 1993 - *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud*. Cemagref. Thèse de l'Université Joseph Fourier. Grenoble.

CAMBON (J.P.), MATHYS (N.), MEUNIER (M.), OLIVIER (J.O.), 1990 - *Mesures des débits solides et liquides sur des bassins versants de montagne*. Congress Hydrology in Mountainous Regions. Lausanne. AIHS Publ. N° 194.

COMBES (F.), 1981. - *Le barrage du Saignon : un exemple de sédimentation*. La gestion régionale des sédiments. Séminaire national. Doc. BRGM. N° 30. 101-104.

DI SILVIO (G.), PEVIANI (M.), 1989 - *Modelling short- and long-term evolution of mountain rivers : an application to the torrent Mallerio*. Int. Workshop on Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, Trent, Italy.

DI SILVIO (G) 1991 - *Long-term equilibrium profile of mountain rivers*. AIRH Madrid. A503-A510.

LABADIE (G.), BEN SLAMA (E.), CHEE (P.), RAHUEL (J.L.), 1991 - *Modélisation monodimensionnelle du transport solide en granulométrie étendue*. Congrès AIRH. Madrid. A403-A411.

LEFORT (P.), 1992 - *Transport solide dans le lit des cours d'eau-Dynamique fluviale*. ENSHMG-INPG. 167 p.

LEFORT (P.), MEUNIER (M.), 1992 - *Crues et laves torrentielles. Analyse des phénomènes physiques*. Colloque : Crues et laves torrentielles. Nainville les Roches. DPC-DRM-SHF. 29 p.

LEFRANC (P.), 1990 - *Le Modèle ETC : un modèle d'érosion des torrents en crue*. Cemagref - ENITRTS. Mémoire de 3^{ème} année. 76 p.

LIN (H.), 1993 - *Le transport solide en collecteur d'assainissement et sa modélisation*. Thèse ENPC. 199 p.

MATHYS (N.), MEUNIER (M.), 1989 - *Mesure et interprétation du processus d'érosion dans les marnes des Alpes du Sud à l'échelle de la petite ravine*. Colloque transport solide. Nov 88. SHF Paris. La Houille Blanche N° 3/4. 1989. 188-192.

MEUNIER (M.), 1987 - *Note sur le cadre a priori permettant la mise au point d'un modèle déterministe de simulation de l'érosion et du transport solide sur les petits bassins de montagne*. Cemagref. Note interne.

MEUNIER (M.), MATHYS (N.), 1989 - *Etude comparative sommaire des débits de crue des zones urbanisées et des bassins versants naturels en montagne*. Cemagref. Note interne.

RAHUEL (J.L.), HOLLY (F.M.), CHOLLET (J.P.), BELLEUDY (P.), YANG (G.), 1989 - *Modelling of riverbed evolution for bedload sediment mixtures* J. of Hydr. Engrg., ASCE 115(11), 1521-1542.

RAHUEL (J.L.), 1988 - *Modélisation de l'évolution du lit des rivières alluvionnaires à granulométrie étendue*. Thèse INPG. Grenoble. 248 p.

RICKENMAN (D.), 1990 - *Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes*. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Mitteilungen 103.

SMART (G.M.), JAEGGI (M.), 1983 - *Sediment transport on steep slopes*. Zurich, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH. N° 64.

ZHANG (J.), HUANG (W.W.), SHI (M.C.), 1990 - *Huanghe (Yellow river) and its estuary : sediment origin, transport and deposition*. J. of Hydrology, 120 (1990) 203-223.

G é n i e b i o l o g i q u e

Le matériel végétal : un outil pour la protection des sols	225
Yves CROSAZ	
Expérimentation de végétalisation de marnes noires par hydrosemis à Draix.....	237
Michel GOUEFFON ; Henri MATHELIN	
Les régosols du bassin du Brusquet : sensibilité à l'érosion et facteurs de la pédogenèse. Synthèse des travaux réalisés	243
Daniel VALLAURI	

Le matériel végétal : un outil pour la protection des sols¹

Yves CROSAZ

Cemagref, division protection contre les érosions
2, rue de la Papeterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

1 - Contexte général et objectifs de l'étude

Le bassin méditerranéen regroupe un ensemble de **milieux écologiques sensibles aux perturbations**. Les multiples dégradations, qu'elles soient d'origine naturelle (vent, eau), ou anthropique (feu, terrassements, déforestation, etc ...), sont à l'origine de graves dégâts dus à **l'érosion, l'appauvrissement des sols, et l'extension de la désertification**. Les sols ne remplissent alors plus leur rôle dans l'équilibre écologique des milieux. Depuis très longtemps, de multiples moyens sont mis en oeuvre pour tenter de restaurer ces terrains dégradés, notamment par les Services RTM (Services de Restauration des Terrains en Montagne) dès leur création au siècle dernier. Néanmoins, on a pu constater depuis quelques années une diminution des interventions de ce secteur, et aujourd'hui, il faut repenser les opérations du génie biologique en fonction de nouvelles contraintes, notamment des contraintes économiques.

Sur le domaine méditerranéen le cas le plus couramment rencontré est celui particulièrement **sensible et difficile des marnes**. Compte tenu de l'ampleur des surfaces dégradées, la correction dite "de versant" paraît être coûteuse, mais elle s'avère néanmoins nécessaire lorsque les enjeux économiques sont trop importants (envasement des lacs et retenues des barrages). Nous voulons montrer que l'installation d'une végétation est **une solution envisageable** pour la correction de versant. Notre recherche s'articule ainsi autour de trois thèmes forts :

- **connaître les végétaux les plus efficaces** : ce travail consiste en une **sélection** des plantes les mieux adaptées à la colonisation rapide des marnes. Cette sélection est basée sur de multiples critères, en particulier les caractéristiques adaptatives des espèces aux conditions de milieu ;

¹Ce texte a fait l'objet d'une communication orale :

- lors de la 19^{ème} session du groupe de travail sur l'aménagement des bassins versants de montagne, organisée par la FAO à Jaca (Espagne) en juillet 1994 ;

- aux 11^{èmes} journées du Réseau Erosion organisées par l'ORSTOM à Paris en septembre 1994.

- **savoir planter ces végétaux sur les sols en érosion** : l'instabilité du substrat rencontré oblige à concevoir l'utilisation de matériaux provisoires favorisant l'accrochage des plantes et la fixation momentanée des premiers centimètres instables du substrat. Une recherche particulière est entreprise sur l'efficacité des différents matériaux permettant l'installation du matériel végétal ;
- **mesurer l'influence des végétaux sur l'érosion superficielle du sol** : nous savons aujourd'hui que **la végétation stabilise le sol** en le protégeant notamment de l'énergie cinétique des pluies. Elle exerce aussi une action sur la perméabilité du sol, sur l'écoulement des eaux de ruissellement... En modifiant ces différents paramètres, la végétation a un impact direct sur le fonctionnement général des bassins. Nous voulons quantifier cet impact qui se traduit par une modification des taux d'érosion.

Le site de **Draix**, près de Digne dans les Alpes du sud (figure 1), a été retenu en raison du fait qu'il est instrumenté et que des recherches et des mesures de l'érosion sont effectuées depuis une dizaine d'années sur plusieurs bassins versants expérimentaux (B.V.E.).

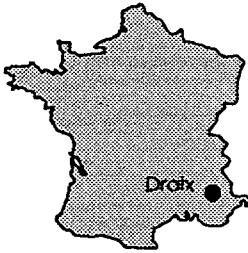


Figure 1 : Localisation géographique du site d'étude

2 - Le matériel végétal

La couverture végétale qui protège et stabilise le sol ne doit pas être considérée comme une couche inerte, mais bien au contraire comme un milieu vivant, dynamique, et en constante évolution sous l'influence de multiples paramètres tels que le climat, les conditions édaphiques, topographiques, les compétitions intra et extra-spécifiques ... Ainsi, l'implantation artificielle d'une végétation dans un milieu donné n'est pas sans conséquences sur son environnement. Bien que ponctuelle, une opération de végétalisation doit donc, dès le départ, prendre en compte l'évolution future des plantes mises en place. Pour des questions de gestion et d'entretien, nous avons écarté d'emblée de notre recherche les végétaux ligneux pour nous intéresser principalement aux végétaux de la strate herbacée.

2.1 - Définition des plantes à utiliser pour la végétalisation

Dans le but de pérenniser les interventions de végétalisation, nous avons centré nos efforts sur les végétaux présents naturellement sur le site, et la sélection est effectuée sur la base de documents cartographiques existants, d'observations consignées dans la bibliographie, et de relevés de terrain.

La végétation climacique de la zone de Draix est composée d'espèces appartenant à deux séries végétales : **la forêt de Chêne pubescent et Buis** (*Querceto-buxetum*) (OZENDA, 1966) et **la forêt de Pin sylvestre** (*Pinetum sylvestris submediterraneum*), (SCHMID E., 1936). Des groupements supplémentaires sont observés en relation avec les conditions spécifiques de milieu : **le groupement d'éboulis** (*calamagrostidetum*), **le groupement de roubines**.

Quelques ouvrages (BARROUILLET, 1982) répertorient les espèces végétales susceptibles d'être retenues ou déjà utilisées dans la lutte contre l'érosion des sols par les services RTM, et classées suivant des caractéristiques édaphiques et bioclimatiques.

Nous avons mené plusieurs campagnes d'observations in situ et défini un certain nombre de critères biologiques, anatomiques et écologiques pour déterminer précisément les espèces susceptibles d'être intéressantes pour notre problématique. Les principaux critères sur lesquels nous nous sommes appuyés ont conduit à sélectionner :

- des plantes vivaces, assurant une bonne couverture du sol ;
- des plantes héliophiles ;
- des plantes qui se développent bien sur des sols pauvres, à pH basique, constitués de matériaux grossiers et caillouteux ;
- des plantes résistantes à la sécheresse et au gel ;

Dans le règne végétal, il y a deux grandes familles qui regroupent des espèces possédant plusieurs des caractéristiques énoncées ci-dessus.

2.1.1 - Les Graminées

C'est un groupe très intéressant car les espèces sont toujours très résistantes aux conditions extrêmes dans lesquelles elles vivent. Le système racinaire dense et ramifié, développé dans les premiers décimètres, est très efficace quant à l'accrochage des plantes sur le sol, et constitue un réseau qui fixe fortement le sol. Les parties aériennes assurent une bonne couverture du sol et donc une bonne protection contre l'énergie cinétique de la pluie. La multiplication végétative par tallage développe rapidement sur le terrain des touffes efficaces contre le ruissellement. Il est facile de récolter les graines et la production grainière est en générale importante.

A Draix, dans les pelouses denses, on trouve en abondance le Brome érigé (*Bromus erectus*) et la Fétuque ovine (*Festuca ovina*) ; en bordure de ces pelouses, sur les zones plus ouvertes de transition avec les terrains dénudés, se développent la Koelerie du Valais (*Koeleria valesiaca*), la Fétuque ovine, et sur les sols plus riches en azote le Dactyle aggloméré (*Dactylis glomerata*).

D'autres plantes forment des touffes denses, monospécifiques plus ou moins éparées, mais pouvant aussi couvrir le sol de manière continue, c'est le cas de la Mélisse ciliée (*Melica ciliata*), de la Stipe pennée (*Stipa pennata*) et de la Calamagrostide argentée (*Achnatherum calamagrostis*).

2.1.2 - Les Légumineuses

Les espèces de cette famille ont une caractéristique commune importante : au niveau de leurs racines, en symbiose avec des bactéries contenues dans des nodosités, elles peuvent absorber l'azote atmosphérique du sol ; cette source supplémentaire d'azote, élément nutritif important, permet à de nombreuses Légumineuses de se développer sur les terrains pauvres, et certaines espèces sont particulièrement intéressantes :

Le Sainfoin des rochers (*Onobrychis saxatilis*), l'Astragale de Montpellier (*Astragalus monspessulanus*), la Coronille minime (*Coronilla minima*), l'Ononis ligneux, ou Bugrane (*Ononis fruticosa*), l'Ononis natrix, ou Coqsigrue (*Ononis natrix*), l'Anthyllide vulnéraire (*Anthyllis vulneraria*) et l'Anthyllide des montagnes (*Anthyllis montana*).

A partir de l'analyse bibliographique et grâce aux observations de terrain, nous avons établi une première sélection en ne retenant qu'une quinzaine d'espèces (tableau 1).

Graminées	Légumineuses	Autres familles
<i>Achnatherum calamagrostis</i>	<i>Anthyllis montana</i>	<i>Aphyllanthes monspeliensis</i>
<i>Bromus erectus</i>	<i>Anthyllis vulneraria</i>	<i>Hippophae rhamnoides</i>
<i>Dactylis glomerata</i>	<i>Astragalus monspessulanus</i>	<i>Laserpitium gallicum</i>
<i>Festuca ovina</i>	<i>Coronilla minima</i>	<i>Paronychia capitata</i>
<i>Koeleria valesiaca</i>	<i>Onobrychis saxatilis</i>	
<i>Melica ciliata</i>	<i>Ononis fruticosa</i>	
<i>Stipa pennata</i>	<i>Ononis natrix</i>	

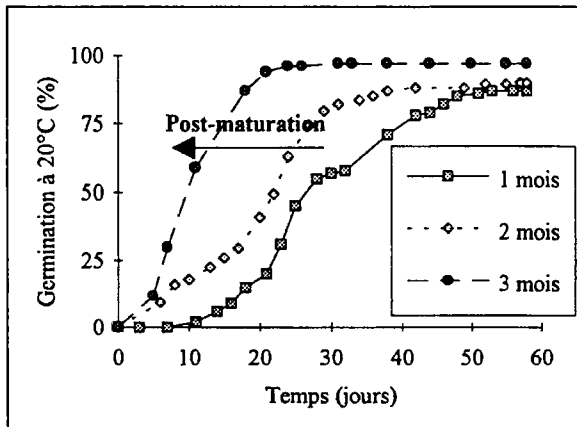
Tableau 1 : Liste des espèces sélectionnées

2.2 - La connaissance des espèces végétales

L'originalité de cette partie réside dans le fait que très peu d'observations ont été réalisées sur les plantes de ce milieu quant à leurs **caractéristiques adaptatives** (morphologiques, écologiques...) et nos recherches portent sur certaines de ces caractéristiques.

2.2.1 - La germination

Après récolte, nettoyage et tri des semences, des essais de germination sont effectués pour déterminer les capacités germinatives de chaque espèce. Les graines sont placées dans des boîtes de Pétri transparentes, à la surface d'un substrat de papier filtre composé de 100 % de fibres de cellulose blanchie et imbibé de six millilitres d'eau déminéralisée. Les boîtes sont hermétiquement fermées et placées dans un germinateur, enceinte spécialement adaptée pour contrôler certains paramètres importants de la germination, notamment la température et l'éclairement.

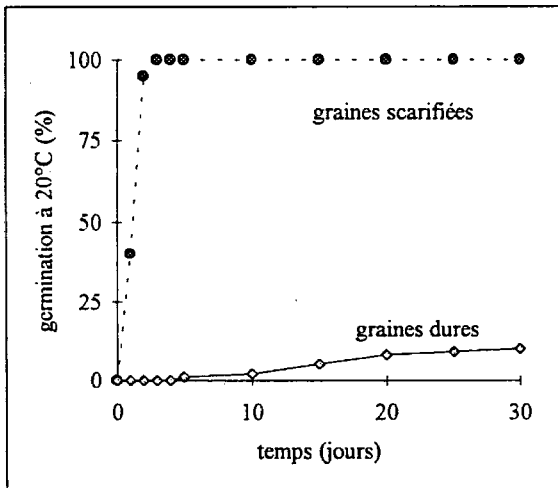


Graph 1 : Effet du stockage à 20°C sur la germination de *Bromus erectus*

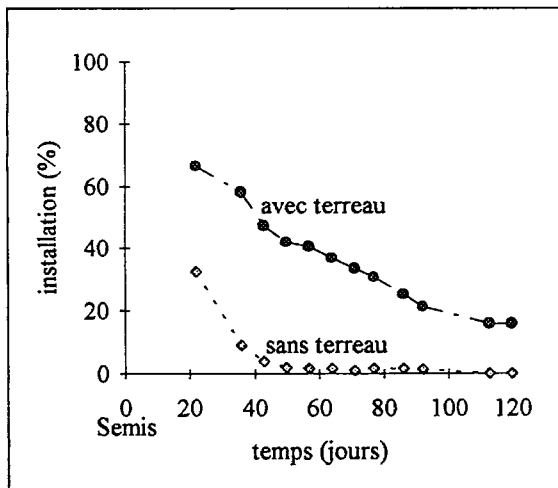
Les espèces de la famille des Graminées, notamment les céréales, ont fait l'objet de recherches approfondies et il est aujourd'hui admis qu'il existe pour ces espèces une inaptitude à germer à des températures élevées (20-25°C) lorsque les semences sont fraîchement récoltées. Cette **dormance** est éliminée si les semences sont conservées au sec à 20-25°C pendant quelques mois (COME et CORBINEAU, 1984).

Nos résultats provisoires concordent avec ce principe et montrent clairement que la **post-maturation** est un phénomène important pour la germination des Graminées que nous étudions (graphe 1).

Les semences des Légumineuses fonctionnent différemment, et sont dites "**graines dures**" : il y a une forte inhibition à la germination exercée par les téguments qui entourent l'embryon. Si l'on casse ces enveloppes protectrices (par scarification chimique ou mécanique), la germination a lieu (CROCKER et BARTON, 1953). Les différentes opérations de scarification que nous avons mené sur les semences des Légumineuses sélectionnées confirment ce mécanisme (graphe 2).



Grappe 2 : Effet de la scarification mécanique sur la germination d'*Onobrychis saxatilis*

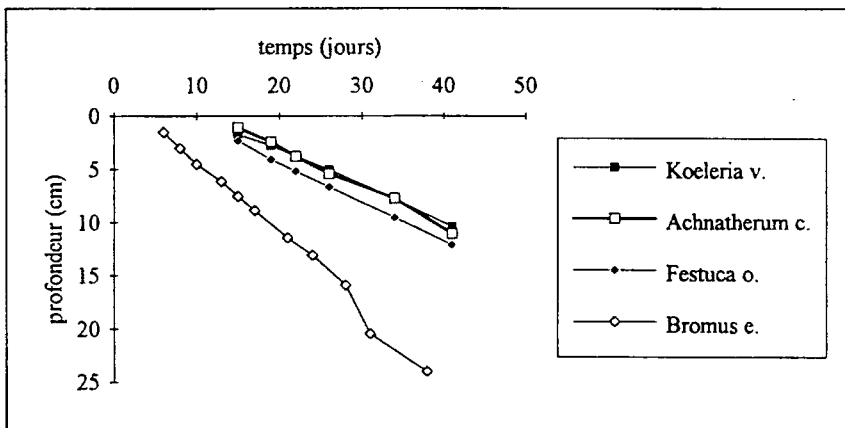


Grappe 3 : Effet d'une couche protectrice sur l'installation de jeunes plantules

Les premiers essais menés sur site afin de mieux comprendre l'influence des conditions du milieu sur la germination des espèces indiquent que l'apport d'une couche protectrice (terreau) favorise la germination des semences et augmente les chances de survie des jeunes plantules (graphe 3).

2.2.2 - Le système racinaire

La connaissance du développement du système racinaire, notamment sa vitesse et son amplitude est très importante. Elle permet de sélectionner efficacement les espèces rapidement capables de s'ancrer sur le substrat instable et de fixer sur place la couche d'altération sensible à l'érosion. C'est pourquoi nous avons entrepris une étude biométrique de la croissance racinaire, en chambre de culture, grâce à l'utilisation d'un dispositif simple et adapté : le **mini-rhizotron**. Les premiers résultats obtenus sont intéressants (graphe 4). Les croissances racinaires de la Koelérie de Valais, de la Calamagrostide argentée et de la Fétuque ovine sont du même ordre de grandeur (3,6 mm par jour), alors que celle du Brome érigé est nettement plus rapide (7,1 mm par jour).



Graphe 4 : Profondeur de sol explorée par les racines de 4 Graminées en fonction du temps

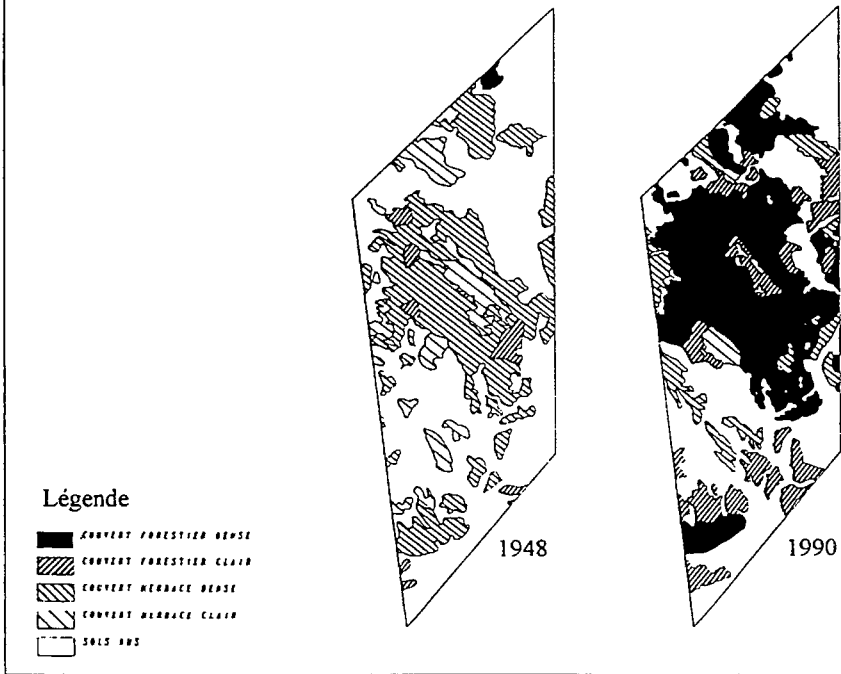
Des essais sont actuellement en cours afin de montrer quelle est l'influence de la granulométrie du substrat sur la vitesse de croissance des racines ainsi que sur la biomasse du système souterrain.

2.2.3 - La dynamique naturelle de la végétation

Ce travail a pour but d'étudier l'évolution de la couverture végétale des badlands. Nous avons réalisé cette étude grâce à une analyse diachronique basée sur deux photographies aériennes, l'une de 1948 (1/25 000), l'autre de 1990 (1/30 000). Nous avons défini cinq classes de discrimination : couvert forestier dense, couvert forestier clair, couvert herbacé dense, couvert herbacé clair et sols nus. Les quatre premières classes constituent la couverture végétale. Les cartes réalisées manuellement ont ensuite été informatisées par digitalisation des contours sur le logiciel ARC-INFO. Nous avons travaillé sur deux zones, la première d'une superficie d'environ 20 ha, l'autre d'environ 8 ha (figure 2).

L'analyse du tableau 2 indique que **la couverture végétale est en progression** : elle augmente de 10 % sur la zone 1 et de 20 % sur la zone 2 en un peu plus de quarante ans. Il semble donc qu'une partie importante des secteurs en érosion il y a quarante ans sont aujourd'hui couverts et protégés par la végétation. Ainsi **l'évolution des badlands s'effectue dans le sens de la conquête des terrains par la végétation.**

Figure 2 : Evolution de la couverture végétale entre 1948 et 1990 (zone 2)



L'augmentation globale du couvert végétal peut être détaillée en suivant l'évolution de points répartis uniformément sur les zones étudiées. Il s'avère que 60 % pour la zone 1 et 85 % pour la zone 2 de l'augmentation globale correspondent au couvert forestier, principalement représentés par le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Cette espèce s'est développée sur des zones initialement herbacées (35 % pour la zone 1 et 60 % pour la zone 2) et sur des terrains totalement dénudés (20 % pour la zone 1 et 30 % pour la zone 2). Sur les marnes du bathonien-oxfordien de Draix le Pin sylvestre s'est donc développé avec une grande rapidité, sur des sols nus ou partiellement colonisés et nos résultats vont dans le même sens que d'autres travaux qui ont montré le grand dynamisme de cette espèce dans le sud-est de la France (GABOUREAUT, 1984 ; BARBERO et col., 1990).

	Zone 1		Zone 2	
	1948	1990	1948	1990
Couverture végétale	36.9	46.6	40.6	60.0
Sols nus	63.1	53.4	59.4	40.0

Tableau 2 : Evolution du couvert végétal exprimée en pour cent de la surface totale

Il apparaît aussi tout à fait intéressant de souligner que l'augmentation de la couverture végétale n'est pas la résultante entre des secteurs où la végétation progresse et des secteurs où la végétation régresse. En effet, nous n'avons trouvé aucune zone couverte en 1948 et qui ne l'était plus en 1990.

Autrement dit les végétaux qui arrivent à se fixer sur ces terrains, **se maintiennent en place et sont capables de partir à la conquête** des espaces nus dégradés.

Il reste néanmoins à définir quelles sont les influences de la topographie et de l'exposition sur cette dynamique végétale.

3 - Technique d'installation du matériel végétal

C'est le semis qui est envisagé pour la végétalisation des marnes noires, en raison de sa rapidité de mise en oeuvre (semis hydraulique), de l'utilisation aisée du matériel végétal sous forme de graines, et de la possibilité d'obtenir une couverture rapide et dense du sol.

L'utilisation des semences nécessite alors de trouver une technique qui permette d'une part de fixer momentanément sur les versants la couche superficielle d'altération en constante érosion, et d'autre part de retenir les semences le temps de la germination, en favorisant notamment les zones d'accrochage. De nombreux produits existent (géotextiles synthétiques, matériaux naturels) et sont utilisés dans les travaux de réhabilitation ou de protection de sites. Des études comparatives (CANCELLI et col., 1990 ; CROSAZ, 1993) permettent de mieux sélectionner les produits à utiliser en fonction des besoins.

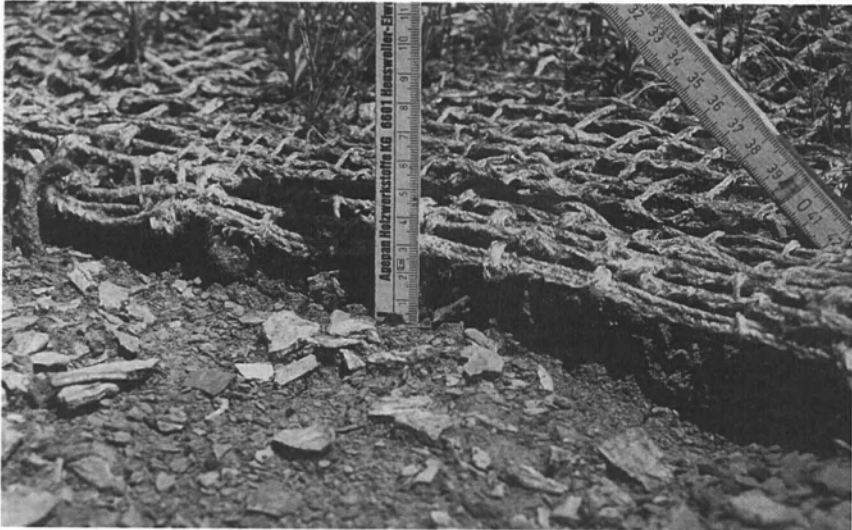
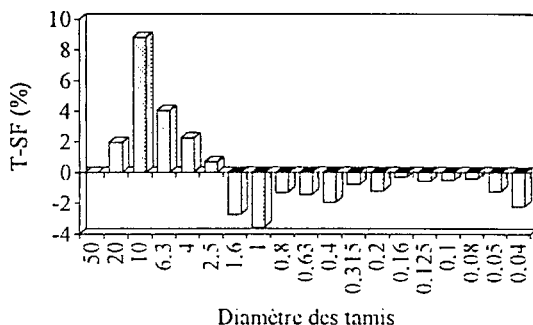


Photo 1 : Le filet fixe la couche superficielle d'altération

Notre objectif est ici de comparer au moyen de parcelles de quelques mètres carrés certains produits qui, a priori, semblent pouvoir être efficaces sur le substrat marneux. Nous étudions principalement deux matériaux naturels et biodégradables. **Un filet** en fibres de jute filées et tissées formant une structure maillée et ouverte d'environ 15 mm par 15 mm, et **un matelas** constitué de fibres végétales cardées (fibres de coton et de bois), contenant un mélange d'espèces autochtones (matelas pré-ensemencé).

Le recul nécessaire à une analyse comparée sérieuse n'est pas suffisant. Néanmoins nous pouvons dès maintenant mettre en évidence l'influence qu'exerce le filet en fibre de jute sur le substrat. Il est en effet incontestable que le filet retient sur place des matériaux (photo 1). L'épaisseur de la couche ainsi fixée en 14 mois varie de 10 à plus de 30 mm suivant les secteurs. Ce résultat est à mettre en relation avec l'ablation moyenne annuelle de l'ordre de 11 à 12 mm, calculée à partir de la production de sédiments (t/an) mesurée aux exutoires des différents B.V.R.E. (BROCHOT et MEUNIER, 1994). **L'impact du filet sur la quantité de matériaux retenus est donc considérable.**



Graphique 5 : Différence de proportion entre le témoin (T) et la parcelle sous filet (SF)

En outre, ce produit a aussi une **influence sur la qualité** des matériaux fixés : toutes les courbes granulométriques sont décalées vers les classes de plus petits diamètres. Sur le graphique 5, nous pouvons constater qu'il existe un **"diamètre seuil"** au dessous duquel les proportions de matériaux sont systématiquement plus grandes pour l'échantillon prélevé sous le filet (SF) que l'échantillon témoin (T). Sur les parcelles témoins, les produits de désagrégation des plaquettes, de plus en plus fins et sensibles au ruissellement, sont régulièrement emportés alors qu'ils sont maintenus sur place, protégés par le filet.

Pente (%)	24	72	92
Diamètre seuil (mm)	[0.8-1]	[1.6-2.5]	[2.5-4]
Différences maximales (%)	1.7	9	28

Tableau 2 : Influence de la pente sur les caractéristiques granulométriques

Ce résultat est le même pour les différentes valeurs de pente étudiées. Par contre, les différences maximales entre les classes (T-SF), ainsi que le "diamètre seuil" augmente lorsque la pente augmente (tableau 2). Ainsi, les différences maximales peuvent atteindre presque 30 % lorsque la pente est de 92 % alors qu'elles ne dépassent pas 2 % lorsque la pente est de 24 %.

4 - Mesure de l'efficacité de la végétalisation

Sur des terrains difficiles et particuliers tels que les marnes noires, les mesures sont difficiles et l'incertitude est grande ; il est alors judicieux de s'en tenir à des ordres de grandeur, plus facilement généralisables à de grands domaines tel qu'un bassin versant. Nous avons donc opté pour un

dispositif simple qui permette d'étudier le fonctionnement des ravines élémentaires. Il est constitué d'un ouvrage en béton disposé à l'aval de la ravine et forme une mini-plage de dépôt qui retient les matériaux grossiers grâce à une grille métallique, escamotable pour faciliter le curage du piège. Les matériaux retenus sont mesurés à l'aide de seaux jaugés.

Deux ravines ont été équipées : la première d'une superficie de 300 m² environ et une pente moyenne de 38 %, la deuxième d'une superficie de 750 m² environ et une pente moyenne de 18 %. Les deux ravines étudiées ont été laissées en l'état naturel dénudé pendant un an puis ont été végétalisées (décembre 1993). Nous avons traité environ 30 % de la surface totale de chacune des ravines en disposant des bandes de filet perpendiculairement aux lignes de pente. Les bandes ont été plaquées sur des inflorescences de Calamagrostide argentée préalablement récoltées.

La modélisation du fonctionnement des ravines est en cours et les paramètres explicatifs avec lesquels nous travaillons sont essentiellement pluviométriques : la hauteur totale d'eau tombée (h tot), l'intensité de la pluie (Int), l'énergie cinétique (Ec) et le coefficient d'érosivité (R) (WISCHMEIER et SMITH, 1958).

Il s'avère que la **capacité maximale d'infiltration du substrat** (Cemagref-ONF/RTM, 1987 ; BUFALO et NAHON, 1992), est un élément important à prendre en compte dans notre modèle. En effet, pour les pluies dont l'intensité est inférieure à la capacité d'infiltration, il ne se produit généralement pas de ruissellement et donc pas de transport de sédiments. Nos premiers résultats vont dans ce sens et les meilleures corrélations sont obtenues pour des seuils d'intensité supérieure à 10 mm/h (tableau 3).

Seuil (mm/h)	0	5	10	15
h tot (mm)	0.36	0.77	0.84	0.89
Σ h tot (mm)	0.17	0.56	0.93	-
Ec (J/m ²)	0.59	0.81	0.86	0.89
Σ Ec (J/m ²)	0.29	0.68	0.94	-

Tableau 3 : Effet de l'introduction d'un seuil d'intensité de pluie sur les corrélations entre les volumes de sédiments mesurés dans la plage et quelques paramètres explicatifs (calculs sur 12 événements de l'année 1993)

La mesure de l'érosion correspondant à l'état végétalisé est en cours. La comparaison de l'érosion des bassins entre les deux états nous permettra d'analyser l'impact de la couverture végétale sur le fonctionnement des ravines et sur les taux d'érosion.

Des expériences sont en préparation à l'échelle de la parcelle (un mètre carré) dans le but de comparer in situ l'érosion superficielle, en particulier les quantités de matériaux transportés et les matières en suspension, entre une surface témoin entièrement dénudée et une surface entièrement recouverte par un tapis herbacé dense mis en place par végétalisation (filet et semis). Nous utiliserons un simulateur de pluie du type ORSTOM, et un dispositif de recueil des eaux de ruissellement et des matériaux spécialement mis au point pour ces essais.

5 - Conclusion et perspectives

Cette recherche est menée dans le cadre d'une thèse, et l'objectif que nous nous sommes fixé est ambitieux, notamment en regard du peu de temps dont nous disposons. En effet, l'utilisation du matériel végétal pour la protection des sols et la lutte contre l'érosion nécessite **une connaissance préalable et approfondie des espèces** quant à leurs potentialités de développement et de fixation des terrains rencontrés. Les études que nous avons entreprises dans ce domaine nous permettront bientôt de proposer **une solution végétale efficace** basée sur la sélection pertinente des plantes les plus adaptées, et sur la quantification de leur impact sur la réduction des taux d'érosion. Néanmoins, dans le but d'améliorer et d'optimiser la méthode de végétalisation des badlands, d'autres recherches devront être menées, en particulier sur le développement de nouveaux géotextiles (structures tridimensionnelles), la connaissance de la pente limite d'intervention, l'étude de la dynamique de conquête des espaces dénudés à partir des zones végétalisées, la recherche d'autres espèces végétales efficaces (arbustes, arbres, plantes exotiques).

6 - Bibliographie

- CANCELLI (A.), MONTI (R.), RIMOLDI (P.), 1990 - *Comparative study of geosynthetics for erosion control*, in Geotextiles. Geomembranes and Related Products, ed. Den Hoedt, Balkema, Rotterdam, pp 403-408.
- BARBERO (M.), BONIN (G.), LOISEL (R.), QUEZEL (P.), 1990 - *Changes and disturbances of forest ecosystems caused by human activities in the western part of the mediterranean basin*. Vegetation, n° 87, pp 151-173.
- BARROUILLET (J.), 1982 - *La revégétalisation dans les Alpes du sud - Choix et emploi des espèces herbacées ou arbustives*. Document technique Cemagref, 148 p.
- BARROUILLET (J.), 1982 - *Guide des espèces d'embroussaillage et d'enherbement dans les Alpes du sud - Annexes*.
- BROCHOT (S.), MEUNIER (M.), 1994 - *Erosion de badlands dans les Alpes du sud - Synthèse*. Rapport d'étude Cemagref - Ministère de la recherche et de l'espace, 44 p.
- BUFALO (M.), NAHON (D.), 1992 - *Erosional processes of Mediterranean badlands : a new erosivity index for predicting sediment yield from gully erosion*. Geoderma, n° 52, pp 133-147.
- Cemagref-ONF/RTM, 1987 - *Bassins versants expérimentaux de Draix-Compte rendu de recherche n° 1 en érosion et hydraulique torrentielle*. Rapport, 128 p.
- COME (D.), CORBINEAU (F.), 1984 - *La dormance des semences des céréales et son élimination - Principales caractéristiques*. C.R. de l'Académie d'Agriculture de France, 70, n° 5, pp 709-715.
- CROCKER (W.), BARTON (L.V.), 1953 - *Physiology of seeds - An introduction to the experimental study of seed and germination problems*. Chronica Botanica Company, Waltham, Mass, USA, 267 p.

CROSAZ (Y.), 1993 - *Recherche sur la fixation des sols et essais de comportements des fixateurs et matériaux composites pour la revégétalisation en zones extrêmes*. Rapport d'étude Cemagref-SIRAS, 44 p.

GABOURIAU (C.), 1984 - *Etudes diachroniques (1900-1980) et cartographie par photo-interprétation de l'évolution des végétations forestières suite à la déprise rurale - Application à un secteur des Alpes Maritimes (06) : Isola, St-Martin-Vésubie*. Thèse, Aix-Marseille III, 82 p.

OZENDA (P.), 1966 - *Perspectives nouvelles pour l'étude phytogéographique des Alpes du sud*. Documents pour la carte de la végétation des Alpes, IV, pp 71-108.

SCHMID (E.), 1936 - *Die reliktföhrenwälder der Alpen*, Beitr. zur geobot. Landes-aufnahme des Schweiz, Bern, 190 p.

WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1958 - *Rainfall energy and its relationship to soil loss*. Trans.-American Geophysical Union, n° 39, pp 285-291.

Expérimentation de végétalisation de marnes noires par hydrosemis à Draix

Michel GOUEFFON et Henri MATHELIN

Service de restauration des terrains en montagne des Alpes-de-Haute-Provence
7, rue Monseigneur Mérieu, 04000 Digne-les-Bains, France

Introduction

Depuis le début 1993, ont été initiés en forêt domaniale de Haute-Bléone, série de Draix, à proximité des bassins de mesure de l'érosion, des essais de végétalisation des marnes noires par hydrosemis.

La technique de l'hydrosemis (hydroseeding) consistant en une projection d'un mélange d'eau, de graines et de fixateurs, est éprouvée, et largement utilisée pour la végétalisation de talus de routes et pistes, ou dans le cadre de travaux d'aménagement de sites (pistes de ski, etc.). L'objectif est ici de tester cette technique en vraie grandeur et sans correction préalable des versants sur les terrains difficiles que sont les marnes noires, à la fois du fait de leur forte érodabilité et du contexte climatique des Alpes du sud.

Les essais, dont les conclusions ne seront définitives qu'après des mesures de recouvrement végétal étalées sur deux ans, devraient permettre de préciser les conditions d'adaptabilité de la technique d'hydrosemis, et si nécessaire d'améliorer le matériel végétal utilisé.

Trois entreprises spécialisées dans ce type d'opérations de végétalisation participent aux essais, en collaboration avec le service R.T.M. et avec l'appui technique de la section technique inter-régionale de l'O.N.F.

Les caractéristiques précises des essais mis en place sont décrites ci-après.

Objectif

Evaluation de l'efficacité de la végétalisation de marnes noires érodées grâce aux techniques actuelles de l'hydrosemis.

Localisation

Département : Alpes-de-Haute-Provence

Commune : Draix

Forêt domaniale RTM de la Haute-Bléone, série de Draix

Région IFN n° 727 - Préalpes de Digne



Mise en place de la végétalisation par semis hydraulique (14/4/1993)

Date d'installation

Printemps 1993.

Station

- **Altitude** : 900 m.
- **Roche-mère** : Marnes noires du Bathonien moyen et du Bajocien supérieur ("Terres noires").
- **Climat** : zone écologique Cemagref n° 134 (Préalpes de Digne).

- Type pluviométrique n°5.

A l'avantage du site d'expérimentation : des relevés pluviométriques précis sont disponibles du fait de l'existence à proximité immédiate d'un pluviomètre Cemagref.

- Sécheresse estivale atténuée par quelques orages violents.

- Type thermique n° 3/2 : fortes amplitudes saisonnières et journalières. Températures moyennes : 10°C ; mais minimales : -6°C et maximales : 28°C.

- Moins d'un mois sec selon Gaussen.

- Bioclimat méditerranéen subhumide à hivers très froids.

- Indice de sécheresse estivale d'Emberger IS = Pété/M : 7 (périméditerranéen).

- **Sol** : quasi inexistant sauf, très localement, à la faveur d'abri dû à une végétation "relique".
- **Végétation** : étage supraméditerranéen supérieur. Série du chêne pubescent.

Végétation précédente

Sol érodé sans végétation sauf très ponctuellement (végétation "relique").

Objet de l'expérience

• Libellé

Tester l'efficacité de différents traitements de végétalisation par hydrosemis pour tenter de reverdir et stabiliser les marnes noires très érodables, sans aucune correction physique ou biologique préalable (petits seuils, fascines, garnissages, plantations fixatrices ...).

• Variables de jugement

- Evolution du pourcentage moyen de recouvrement de la végétation installée.

• Facteur étudié

- Procédé des entreprises spécialisées dans l'hydrosemis en France, qui ont accepté de participer à ces expérimentations.

Ce facteur unique comprend quatre modalités :

- Témoin = absence d'intervention
- Entreprise "PLAN" à Avignon
- Entreprise "ETAVER" à Saclay
- Entreprise "SIRAS" à Lyon

Dispositif

• Unités expérimentales

Ce sont des parcelles unitaires de taille variable selon les blocs (fonction de la constitution du versant en ravines, en versant régulier, en unités topographiques facilement délimitables).

Les parcelles unitaires comprennent 10 à 30 placeaux de comptage où les variables seront mesurées. Une bande périphérique tampon d'environ 5 m sépare les placeaux d'une parcelle à l'autre.

• Nombre de traitements

4 (3 entreprises + témoin : cf. ci-dessus)

Photos représentant l'évolution de la même parcelle à trois dates différentes :



1/4/1993



27/10/93



13/10/94

• **Facteur contrôlé**

Les différentes configurations possibles de zone de traitement ont été contrôlées pour l'installation de 5 blocs.

Site	Séigné		Col de la Cèpe		Grande ravine
	1	2	3	4	
Nature	Grand versant	Petit versant	Petite ravine	Petite "écaille" individualisée	Ravine
Exposition générale	Ouest/nord-ouest	Ouest/nord-ouest	Sud-est	Est	Sud-est
Pente moyenne (grade)	30 à 40	26 à 31	34 à 44	28 à 30	39 à 44
Pendage	Inverse	Inverse	Conforme	Conforme	Conforme
Nombre de placeaux de comptage par traitement	27 à 30	16	10	20	8 + 15 triplets

• **Mesures**

Réalisées sur placeaux de comptage de 1 m² numérotés et étiquetés en couleur.

• **Nature**

- Estimation du pourcentage de recouvrement total sur les placeaux de comptage.
- Suivi photographique périodique des zones. (Voir photos ci-dessus).

• Date et périodicité

- Etat initial : avant traitement.

- Annuellement : en fin de saison de végétation après les grosses sécheresses, (fin septembre ou début octobre).

Réalisation pratique du dispositif

Les trois zones d'expérimentation sont clôturées pour se préserver des moutons.

Chaque traitement dans chaque bloc est délimité de façon visible et permanente.

Chacun des 464 placeaux de comptage est matérialisé définitivement par quatre piquets d'angle.

Ces trois opérations précédentes se sont révélées assez "lourdes". Toute implantation de piquet suppose, en effet, un perçage préalable de la marne au perforateur.

L'ensemble du dispositif a été levé topographiquement.

Le suivi photographique est réalisé à partir de 53 stations repérées par des piquets fixes. A chaque station plusieurs prises de vue différentes sont effectuées suivant des axes de visée constants d'une fois sur l'autre.

Echéancier des traitements

	PLAN	ETAVER	SIRAS
1 ^{ère} intervention	8 avril 1993	14 avril 1993	1 ^{er} avril 1993
2 ^{ème} intervention	néant	néant	29 septembre 1993
3 ^{ème} intervention	19 avril 1994	15 avril 1994	1 ^{er} avril 1994

Aucune autre intervention ne sera réalisée. Les traitements sont considérés achevés.

Analyse des résultats et conclusion provisoire

Un premier comptage a été réalisé début octobre 1993 et le second début octobre 1994.

Aucune conclusion ne sera tirée avant la fin des comptages qui se poursuivront au moins jusque 1995.

Toutefois, il apparaît globalement que la technique de l'hydrosemis des marnes noires offre des résultats positifs et intéressants. D'autres expérimentations peuvent, d'ores et déjà, être envisagées en adaptant les techniques d'hydrosemis actuelles, en les complétant par des techniques, existantes ou à développer, de correction physique ou biologique préalable (seuils, garnissages, plantations fixatrices...), etc .

La collaboration avec les entreprises s'est révélée constructive. Les entreprises semblent apprécier le service et la garantie qu'offrent nos prestations. Aussi, il est envisageable de développer ce type d'expérimentation.

Les régosols du bassin du Brusquet : sensibilité à l'érosion et facteurs de la pédogenèse

Synthèse des travaux réalisés

Daniel VALLAURI

Cemagref, division protection contre les érosions, secteur "forêts de montagne",
2, rue de la Papeterie, BP 76, 38402 - St-Martin-d'Hères Cedex, France

1 - Problématique pédologique générale sur substrats marneux

Le sol est l'interface entre le substrat géologique, dont il représente une altération, et la végétation. Il constitue à la fois le compartiment de l'écosystème qui subit le processus d'ablation et celui qui détermine la végétation supportée et protectrice. Il est donc intéressant d'étudier les sols à plusieurs titres :

- pour mieux connaître la sensibilité à l'érosion des divers sols du bassin versant, des plus superficiels en érosion active aux colluvions stabilisées ou potentiellement remobilisables ;
- pour analyser l'effet de la végétation sur la reconstitution et la fixation des sols, notamment le rôle des pins noirs introduits dans le cadre de la restauration des terrains en montagne ;
- pour évaluer le potentiel dynamique de la végétation protectrice (colonisation naturelle, revégétalisation, reboisement). Dans les zones pédologiquement les plus dégradées, le sol peut devenir la cause du blocage de la dynamique progressive de la végétation.

Dans ce but, plusieurs études ont été réalisées sur le bassin du Brusquet (LAROCHE, 1991, SARTORE, 1993), mais aussi sur le bassin versant du Moulin (SARTORE, 1993) ; d'autres sont en cours sur plusieurs sites sud alpins, incluant ceux de Draix et du Brusquet. Cet article se propose de résumer et discuter les principaux résultats obtenus à ce jour sur le bassin versant du Brusquet.

2 - Essai de typologie des sols

2.1 - L'approche par systèmes géomorphologiques

L'étude des sols nécessite d'une part l'analyse descriptive des différents horizons mais aussi une analyse des mécanismes et des causes de la formation et de l'évolution des sols. Dans le bassin versant du Brusquet, les principaux facteurs abiotiques modifiant la pédogenèse sont les variations du substrat géologique, la géomorphologie générale et les variations du relief, facteurs conditionnant également l'érosion.

Le substrat géologique du bassin versant du Brusquet se partage entre les marnes noires du Toarcien (zone basse jusqu'à la cote 950 m environ) et de l'Aalénien supérieur et les marno-calcaires de l'Aalénien inférieur. Très localement peuvent subsister des placages de matériels du Quaternaire. D'un point de vue géomorphologique, il convient de distinguer les marnes du Toarcien et de l'Aalénien, donnant des reliefs profondément ravinés, des marno-calcaires de l'Aalénien produisant des ravines consolidées.

Toutefois, une analyse plus détaillée des situations topographiques (pentes, expositions, altitude) est indispensable pour comprendre dans le détail les processus pédogénétiques qui s'expriment. L'influence de la méso-topographie est d'autant plus évidente que les milieux ont subi de profondes dégradations par l'érosion, ce qui a tout à la fois appauvri les sols et hétérogénéisé leur distribution spatiale.

2.2 - Types identifiés

Les types décrits ci-dessous font essentiellement appel à la classification de LAROCHE (1991), tentant d'expliquer l'origine génétique des sols. Les caractéristiques des types n'ont pas de représentativité statistique, faute d'un nombre suffisant de profils observés. De même, l'inventaire ci-après n'a pas la prétention d'être exhaustif. D'autre part, ces types ne sont que difficilement comparables à ceux de SARTORE (1993), qui ne reprend que trois grands types classiques (Lithic ou typic udorthents, typic eutrochreps¹) mais approfondit l'analyse de leur répartition spatiale (relations avec les critères principaux de la morphologie des terrains).

D'une façon générale les sols sont caractérisés par une faible profondeur et une texture à tendance dominante limoneuse (résultat d'altération des marnes).

2.2.1 - Système géomorphologique sur marnes noires

- Régosols d'apports allochtones sur marnes du Toarcien (type 1 de LAROCHE) : sols à deux horizons, le premier d'origine allochtone à texture limono-argileuse, le second étant le substrat du Toarcien en place peu altéré. Epaisseur de l'horizon A variant de 25 à 50 cm.

NB. Un relevé met en évidence un horizon B compact et profond (supérieur à 1 mètre), d'origine mal identifiée.

- Régosols peu épais sur marnes noires altérées in situ (type 2 de LAROCHE) : sols à matrice noire, issus de l'altération des marnes en place. Sols rares, limités à des situations topographiques bien précises (bas de pente de ravin non soumis à l'érosion). Epaisseur de l'horizon A égale à 25 cm.
- Régosols épais sur marnes noires de l'Aalénien altérées in situ (type 4 de LAROCHE) : sols épais (horizon A variant de 24-80 cm) à pierrosité faible sur roche mère marneuse et pente moyenne.

2.2.2 - Système géomorphologique sur marno-calcaires

- Régosols à pierrosité importante sur pente forte (type 3 de LAROCHE) : sols à pierrosité importante et grossière (5-10 cm) et profondeur moyenne (horizon A égal à 20 cm, B/C à 10 cm) sur roche mère marno-calcaire.

NB. Un relevé met en évidence un horizon B compact et profond (épaisseur supérieure à 1 mètre), d'origine mal identifiée.

¹Classification américaine des sols

- Régosols épais sur marno-calcaires altérés in situ (type 4 de LAROCHE) : sols épais (horizon A égal à 24-80 cm) à pierrosité faible et de petite taille sur roche mère marno-calcaire et pente moyenne.

2.2.3. Système géomorphologique sur placages peu épais du Quaternaire

- Sols sur placage peu épais (type 5 de LAROCHE) : sols de couleur brun orangé (épaisseur de l'horizon A égal à 30 cm), à pierrosité très fine (0,5 à 1 cm). Placages peu épais, substrat marneux sous-jacent.

2.3 - Caractéristiques et fonctionnement des sols

Les caractéristiques physiques principales [macroporosité (MP), microporosité (mP), épaisseur (E)] des types décrits ci-avant sont résumées dans le tableau 1.

Système géomorphologique	N° de type (LAROCHE, 1991)	Horizon A			Horizon B/C		
		MP (%)	mP (%)	E (cm)	MP (%)	mP (%)	E (cm)
Marnes noires	1	37	25	25	35	20	5-10
	2	37	19	24			
	4	43	26	24-77	35	24	40-70
Marno-calcaires	3	55	20	20			10
	4	43	26	24-77	35	24	40-70
Placage quaternaire	5	62	16	30			

Tableau 1 : Valeurs moyennes pour chaque horizon diagnostic de la macroporosité (MP), de la microporosité (mP) et de l'épaisseur (E)

Le type 4 de LAROCHE est, du fait conjugué de sa porosité totale forte (69 %) et de son épaisseur, le sol ayant la meilleure capacité de rétention.

D'autre part, à partir de mesures de résistance mécanique des sols (pénétrömètre superficiel) et de perméabilité, LAROCHE estime respectivement la cohésion et l'infiltration des types présentés (tableau 2).

Les sols sur substrats marneux et marno-calcaires (sauf type 3 à forte pierrosité et pente) ont une cohésion forte et une capacité d'infiltration moyenne.

Système géomorphologique	N° de type (LAROCHE, 1991)	Horizon A cohésion/infiltration	Horizon B/C cohésion/infiltration
Marnes noires	1	forte / moyenne	
	2	moyenne / moyenne	
	4	forte / moyenne	forte / moyenne
Marno-calcaires	3	faible / rapide	inconnue / moyenne
	4	forte / moyenne	forte / moyenne
Placage quaternaire	5	faible / rapide	

Tableau 2 : Classes de cohésion et d'infiltration pour chaque horizon diagnostic

3 - Les humus

La grande variabilité spatiale des conditions du milieu (topographie, végétation) a largement influencé les processus d'humification. SARTORE (1993) a cartographié divers types d'humus (Humimor, Hemimor, Lignomor, Mormoder, Leptomoder, Lignomoder, Mullmoder, Vermimull, Rhizomull). D'une façon générale, quand il y a présence d'humus au sol, les types Mull occupent la partie basse du bassin versant, où il y a à la fois confluence d'eau et un peuplement forestier de moindre densité. Les humus de types Moder occupent plus de la moitié de la surface du bassin versant et se rencontrent dans la partie moyenne et haute de celui-ci, à couverture forestière résineuse monospécifique extrêmement dense.

4 - Répartition des types de sols

En dehors des aspects strictement cartographiques, les études réalisées confirment clairement l'importance des relations entre la géomorphologie générale et la répartition des sols et des humus. Ainsi, SARTORE (1993) note que :

- dans 77 % des cas en position "versant" les sols présents sont de type Typic eutrochreps (profondeur supérieure à 50 cm et présence d'un horizon d'accumulation d'argile), de même que pour 53 % des positions "talweg". L'information serait sans doute encore plus nette si la distinction entre haut et bas de versant/talweg avait été faite, c'est-à-dire entre des zones de départ et d'accumulation par colluvionnement.
- dans 64 % des cas en position "crêtes" les sols sont de type Lithic udorthents (profondeur inférieure à 50 cm, horizons peu différenciés).

Par contre, pour la position "plateau", les fréquences sont beaucoup plus partagées, du fait de la définition trop imprécise des 3 types de sols et la plus forte influence d'autres facteurs de variations (moindre impact de l'érosion). Il conviendrait donc de moduler et/ou de préciser les résultats par une analyse plus fine des conditions de milieu (topographie très locale, végétation notamment).

5 - Conclusion générale

5.1 - Caractères généraux des sols

Les sols sur substrats marneux du bassin versant du Brusquet sont peu évolués et récents (peu épais et à horizons peu différenciés). En liaison avec les processus d'érosion, ils apparaissent très influencés par les variations du modelé de terrain (géomorphologie et topographie). Le matériel d'altération des marnes est de granulométrie fine (40 à 60 % de limons), composé principalement en limons fins de taille comprise entre 2 et 20 μm .

La macroporosité varie de 35 à 55 % sur marnes et marno-calcaires. Sur les mêmes substrats, la microporosité est moins variable (19 à 26 %). Globalement, la porosité représente environ 55 à 75 % du volume du sol. Cela constitue une capacité de rétention en eau non négligeable malgré les faibles épaisseurs des sols. Les plus profonds (type 4 de LAROCHE), situés essentiellement dans la partie amont du bassin, ainsi que les sols les plus poreux (type 3 de LAROCHE à pierrosité forte), possèdent une capacité de rétention 1,5 fois plus importante que les sols d'apport sur marnes noires (type 1) présents dans la partie aval du bassin versant.

5.2 - La sensibilité des sols à l'érosion

Il est délicat d'estimer la variabilité de la sensibilité des sols à l'érosion à partir des données présentées. Celle-ci varie classiquement avec la granulométrie (les limons fins sont les plus sensibles), la structure, le pourcentage de matières organiques.

Toutefois, le tableau 2 donne d'ores et déjà des informations sur la cohésion des matériaux de chaque horizon. En dehors des régosols à pierrosité importante sur pente forte (type 3 de LAROCHE), la cohésion des sols sur substrat marneux semble peu variable. Pour évaluer plus précisément la sensibilité à l'érosion, il conviendrait alors d'étudier le fonctionnement hydrologique des sols dans le bassin versant (intensité et influence des écoulements superficiels sur l'érosion en fonction de la position dans le bassin versant).

5.3 - Les potentialités végétales

La distribution de la végétation naturelle des roubines (badlands sur substrats marneux des anglo-saxons) est très largement sous l'influence du niveau de dégradation passé des sols et de l'intensité actuelle de l'érosion (GUARDIA et al., 1992, BROWN et al., 1971, GOETZ et al. 1986). Comme les sols (et en relation avec eux), les communautés végétales s'organisent à partir de gradients dont la géomorphologie et la topographie locale semblent les descripteurs les plus efficaces.

Dans le cas du bassin versant du Brusquet (couverture végétale monospécifique, de même origine génétique et peuplements en grande partie équiens), les variations dendrométriques du peuplement devraient refléter assez rigoureusement les différences de potentialités de chacun des sols. D'où l'intérêt de l'étude des relations sols/peuplements dans le but de répondre aux nombreuses questions se posant sur le renouvellement et la diversification de la couverture végétale protectrice.

6 - Bibliographique succincte

Travaux pédologiques analysés

LAROCHE (H.), 1991 - *Les sols sur matériaux d'altération et d'érosion dérivés des marnes noires (Toarcien-Aalénien) d'un bassin versant reboisé dans les Alpes du sud (Le Brusquet) : répartition des principaux types de sol, caractérisation hydrique et tests physiques simples*. Mémoire de D.E.A. "Géographie, écologie et aménagement des montagnes" de l'Université J. Fourier à Grenoble, 64 pages + annexes.

SARTORE (L.), 1993 - *Etude des stations de deux bassins versants caractérisés par une différente réponse à l'érosion hydrique (Le Brusquet et le Moulin, bassins de Draix, Digne)*. Mémoire UJF Grenoble, Università di Torino, ENITA Clermont-Ferrand, 82 pages.

Travaux étrangers de référence

BROWN (R.W.), 1971 - *Distribution of plant communities in the southwestern Montana badlands*. American midland naturalist, 85 : 458-477.

GOETZ (B.J.), RICHARDSON (J.L.), 1986 - *Vegetation and soil-landscape relationships in the north Dakota badlands*. American midland naturalist, 116(2) : 378-386.

GUARDIA (R.), NINOT (M.), 1992 - *Distribution of plant communities in the badlands of the upper Llobregat basin (southeastern Pyrenees)*. Studia geobotanica, 12 : 83-103.

Quelles sont les principales caractéristiques des bassins versants représentatifs expérimentaux de Draix ? Quelles recherches pluridisciplinaires conduit-on sur ces BVRE ?

Cet ouvrage regroupe en cinq chapitres le large éventail des thématiques de recherche traitées : mise au point d'une instrumentation adaptée aux bassins torrentiels ; étude des phénomènes physiques : crues, érosion, transport solide ; étude des modalités de végétalisation des espaces érodés.

Un document d'actualité pour les équipes universitaires et les chercheurs en instrumentation, hydrologie, érosion, transport solide et génie biologique en montagne.

ISBN 2-85362-417-X

Prix : 249 F TTC



9 782853 624176