

## CONSEQUENCES D'UNE COUPE FORESTIERE SUR LES CRUES ET SUR L'EROSION DES VERSANTS

Claude COSANDEY , CNRS  
et Philippe BERNARD-ALLEE, Université de Limoges.

**ABSTRACT :** The Latte river basin, 20 ha wide and covered with a spruce forest, is located on the southern slope of the Mont Lozère ( South of the Cevennes Mountains, France). Average annual rainfall is about 1900mm, with daily records over 400 mm . Floods are sudden and often damaging. The subject of this paper is the consequences of the forest harvest on floods and sediment delivery. Large floods do not seem to be affected by the logging. On another hand, rapid flow increases are significant during "small floods", in relation with the formation of new gullies. Consecutive erosion on the monitoring basin, during 3 year measurements, is about 3 t/ha/yr ; most of the material does not leave the basin : 85% is stored in deposit cones and 15% in the main talweg. Only a small part - a little more than 1 m<sup>3</sup>/3 years - is exported as suspended sediments.

Dans les régions de montagne, et notamment dans les Cévennes méridionales, les déboisements du 18ème siècle avaient été considérés comme responsables d'un certain accroissement de la fréquence et de l'intensité des crues, ainsi que de l'augmentation de la charge solide des cours d'eau. C'est sur la base de ces affirmations qu'avaient été votées les lois R.T.M. (Restauration de Terrains de Montagne) dans la deuxième moitié du 19ème siècle.

Les études actuelles ont montré que le rôle de protection de la forêt n'est pas aussi simple qu'on a pu le croire, notamment en comparaison d'autres types de végétation couvrant bien le sol.

La coupe à blanc d'une pessière occupant environ 80% de la surface d'un petit bassin-versant granitique, pour lequel on disposait de 5 années d'observations hydrologiques préalables, permet d'étudier certaines des modifications apportées par la disparition de la forêt. Ainsi, les conditions de genèse du ruissellement et de l'écoulement rapide de crue, et leurs modifications à la suite des opérations de coupe sont tout d'abord étudiées ; l'érosion qui en découle est mesurée à différents niveaux d'échelle spatio-temporelle. Ces études permettent de préciser les rôles respectifs de la disparition de la forêt et des opérations de coupe, ainsi que les conditions d'extrapolation des résultats.

### 1.SITE EXPERIMENTAL ET DISPOSITIFS D'ETUDE.

#### 11-Le bassin-versant de la Latte.

Le bassin-versant de la Latte, d'une superficie d'environ 20 ha, fait partie de l'ensemble expérimental des bassins-versants du Mont Lozère. Il est situé sur le versant Sud de

cette montagne, entre 1300 et 1500 mètres, entièrement développé sur un granite inégalement altéré et couvert par un manteau irrégulier de formations gélifluées. Les sols sont minces, de texture gravelo-sableuse, très perméables ; les pentes sont modérées (5 à 15°) mais très irrégulières et interrompues par de nombreux replats.

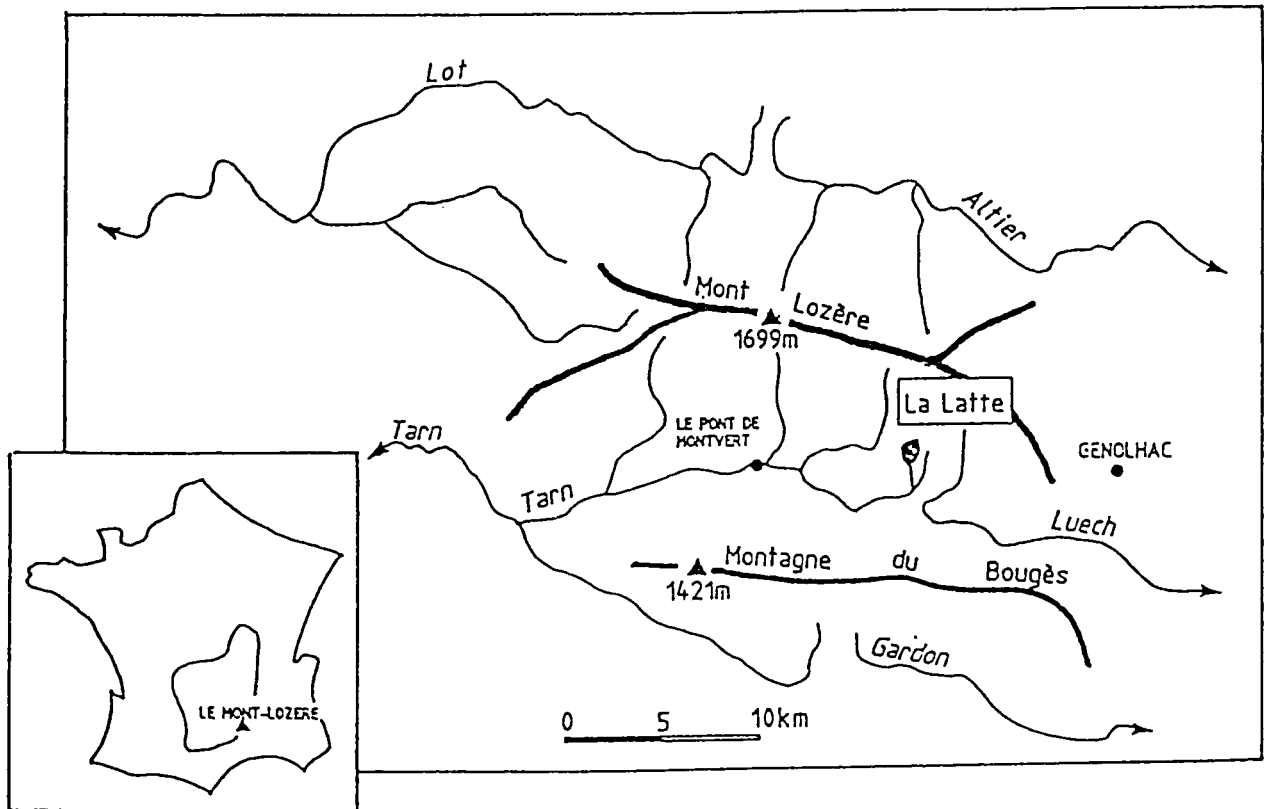


Figure 1 - Situation géographique du bassin-versant de la Latte

Dans ce milieu de moyenne montagne méditerranéenne, les conditions climatiques sont sévères : 6 ° de température moyenne, avec de nombreux cycles de gel-dégel (>100). La pluviosité annuelle élevée (1900 mm) se caractérise par des abats d'eau très importants en automne et au printemps ( 450 mm en 2 jours en Novembre 1982), et par des orages d'été extrêmement violents.

Le couvert végétal avant la coupe résulte d'un reboisement effectué par l'ONF vers les années 1933-1934. La décision de coupe fait suite à une attaque des arbres par un parasite (dendroctone) qui avait provoqué le dépérissement et la mort de nombreux arbres. Les opérations de coupe, commencées à l'automne 1987, se sont étalées sur 3 ans avec le calendrier suivant :

en 1987 : 20% de la surface est déboisée

en 1988 : 60 %

en 1989 : achèvement des travaux de coupe, mise en andains des branchages et plantation de jeunes plants qui, pour une part, ne reprennent pas en raison de conditions climatiques défavorables.

Les opérations de coupe ont été réalisées avec les techniques et le matériel habituellement utilisés dans la région.

Les grumes ont été tirées jusqu'à la piste forestière par un tracteur, créant ainsi 5 pistes de débardage dont la surface a été fortement érodée et tassée, et qui ont ensuite évolué par ravinement. Une ravine particulièrement importante a été provoquée par le passage d'un engin dans une narse ; les ornières ont formé drain, et comme le sol était plutôt profond à cet endroit, l'évolution a été rapide dès le printemps 1988.

#### 12-Mesures hydrologiques.

La mesure des précipitations sur l'ensemble des bassins expérimentaux est assurée par quatre pluviographes complétés par des tubes totalisateurs. La station de jaugeage de la Latte est équipée d'un seuil à parois minces, avec un déversoir triangulaire permettant une bonne connaissance des débits jusqu'à environ 150 l/s. Au delà de ce seuil, la mesure demeure très approximative (DUPRAZ, 1984).

#### 13-Protocole de mesure de l'érosion.

Pendant trois ans, de l'été 1987 à l'été 1990, les débits solides ont été mesurés sur les versants et à l'exutoire du bassin-versant de la Latte.

Sur les versants, les mesures ont été les suivantes :

- suivi des profils en travers des ravines apparues après la coupe, permettant d'identifier les combinaisons saisonnières de processus.

- calcul du volume global de sédiments sorti des versants, par l'intermédiaire du cubage de dépôts corrélatifs piégés en de nombreux points du bassin (essentiellement sous forme de cônes de déjections construits sur les replats et d'atterrissement dans les chenaux d'écoulement temporaires).

A l'exutoire, la construction d'une fosse à sédiments a permis de mesurer la totalité de la charge de fond. Pour la charge en suspension, en revanche, seule une estimation a pu être faite à partir de campagnes de prélèvements effectuées au cours de quelques épisodes hydrologiques significatifs.

Enfin, quelques prélèvements manuels de MES ont été réalisés lors des crues, en amont et en aval de la pseudo-tourbière située dans le chenal de la Latte ; ceci afin d'étudier son rôle de filtre vis-à-vis des fines.

## 2. CONSEQUENCES DE LA COUPE SUR LES CONDITIONS DE GENÈSE DES CRUES.

### 21. Les processus de genèse des crues

Des études préalables à la coupe avaient permis de connaître les processus responsables de la formation de l'écoulement rapide de crue. Ainsi, l'étude de la relation d'ensemble pluie-écoulement rapide (défini comme l'intumescence de l'hydrogramme) avait montré qu'il existait deux familles de relations, l'une correspondant aux "petites crues", dont les volumes écoulés étaient toujours très faibles, et l'autre aux "grosses crues" de type "crues cévenoles" qui présentent au contraire des écoulements très importants (fig. 2). Cette hypothèse était confortée par le fait qu'il existait un hiatus important entre les valeurs de pointe de crue des "petites" et des "grosses" crues.

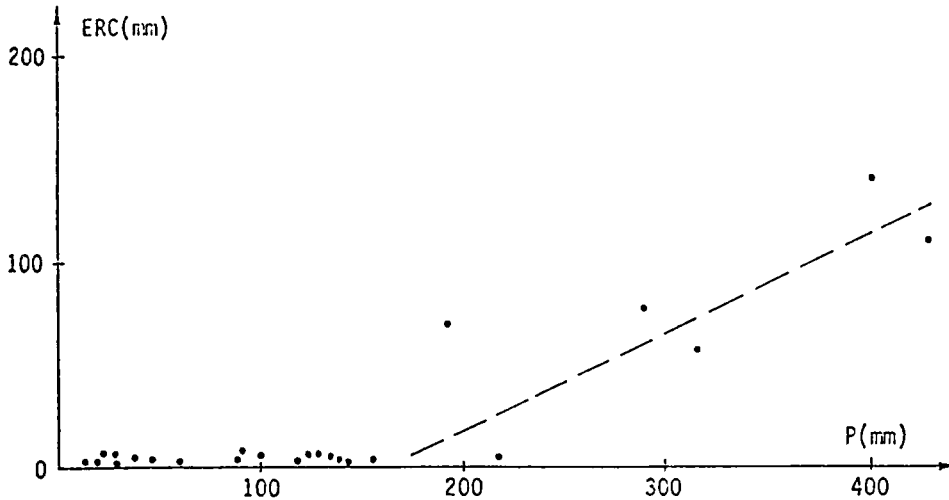


Figure 2-Relation entre le volume d'écoulement rapide et la hauteur de précipitation, pour l'ensemble des crues étudiées.

### 211. Les crues cévenoles.

Il existe de toute évidence un seuil à partir duquel les crues deviennent soudaines et abondantes. Ce seuil ne peut être simplement pluviométrique, puisque des hauteurs semblables de précipitation provoquent des écoulements extrêmement différents. Il a été démontré (COSANDEY et DIDON, 1989) qu'il correspond à une certaine valeur du stock hydrique (ensemble des réserves hydriques et hydrologiques) du bassin-versant, à partir duquel la saturation des sols s'installe rapidement sur de larges surfaces du bassin qui fonctionnent alors comme "aires contributives" (DUNNE et BLACK, 1970). Suivant l'état hydrique préalable à la précipitation, ce seuil, estimé comme étant de l'ordre de 270 mm, est atteint plus ou moins rapidement.

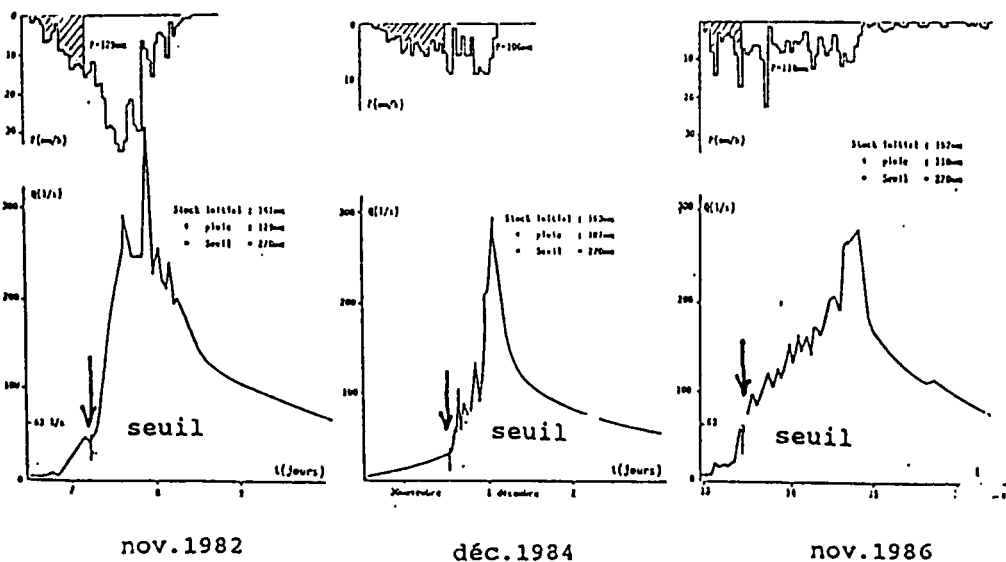


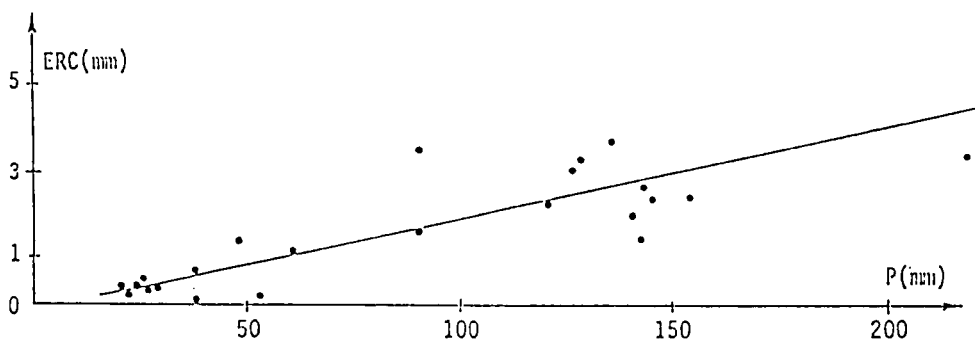
Figure 3 -Seuil calculé et début d'une crue cévenole (avant la coupe)

La pertinence de ce seuil a été vérifiée : d'une part, aucune crue importante ne se produit lorsque ce seuil n'est pas atteint ; d'autre part, lorsque ce seuil est atteint, une montée de crue importante et rapide se produit dans tous les cas rencontrés (COSANDEY, 1991), comme cela se vérifie sur la figure 3. L'importance de la crue dépend ensuite de la continuation des pluies.

#### 212. Les petites crues

Les petites crues sont celles qui se produisent lorsque le seuil n'est pas atteint. Le ruissellement sur les versants est faible ou inexistant et s'il existe, trop discontinu pour aboutir à l'exutoire et contribuer notablement à l'écoulement de crue.

L'étude de la relation pluie-débits montre que, d'une part les volumes d'écoulement rapide sont toujours très faibles, ne dépassant pas 3 mm pour la lame écoulée, et que d'autre part, il existe une assez bonne relation entre la hauteur de précipitation et la lame d'eau écoulée (fig.4).



**Figure 4-** Avant la coupe : relation entre l'écoulement rapide (ERC) et la précipitation incidente (P) lors des "petites crues"

Les caractéristiques du lit du cours d'eau permettent de proposer une explication basée sur l'existence d'une pseudo-tourbière, qui occupe environ 3% de la surface du bassin, et qui constitue la seule zone humide proche du cours d'eau. Lorsqu'il pleut, l'eau qui tombe sur cette surface ruisselle ou contribue par effet-piston à l'écoulement rapide. La situation topographique de cette pseudo-tourbière, en position encaissée, explique que la surface des aires contributives soit relativement stable d'un événement pluviométrique à l'autre.

Il ressort de cette étude des conditions de genèse des crues que les processus sont différents dans le cas de "petites crues" et dans celui des crues cévenoles. Dans le premier cas, l'écoulement trouve son origine exclusivement dans les précipitations tombées sur une surface quasi-saturée en permanence, très limitée dans l'espace. Le coefficient d'écoulement rapide ( $K_r$ ) est assez constant, plafonnant à 3%. Dans le second cas, les écoulements importants ne commencent que lorsqu'un seuil est atteint, moment à partir duquel les conditions de circulation de l'eau sur les versants changent de façon fondamentale. La quantité de pluie

nécessaire pour atteindre ce seuil (et dont dépendra le Kr) sera en relation avec l'état hydrique préalable du bassin.

## 22. Les écoulements de crue après la coupe forestière

### 221-Les crues cévenoles.

Les crues cévenoles demeurent des événements rares, et l'échantillonnage dont on dispose est faible : 3 avant la coupe, 2 en tout début de coupe, et une seule alors que la coupe est achevée (seules les crues d'automne peuvent être prises en compte, parce qu'il n'existe pas de données sur le manteau neigeux qui permettraient l'étude des crues de printemps).

Les montées de crue paraissent se produire dans les mêmes conditions avant, pendant et après la coupe, comme cela ressort de la figure 5.

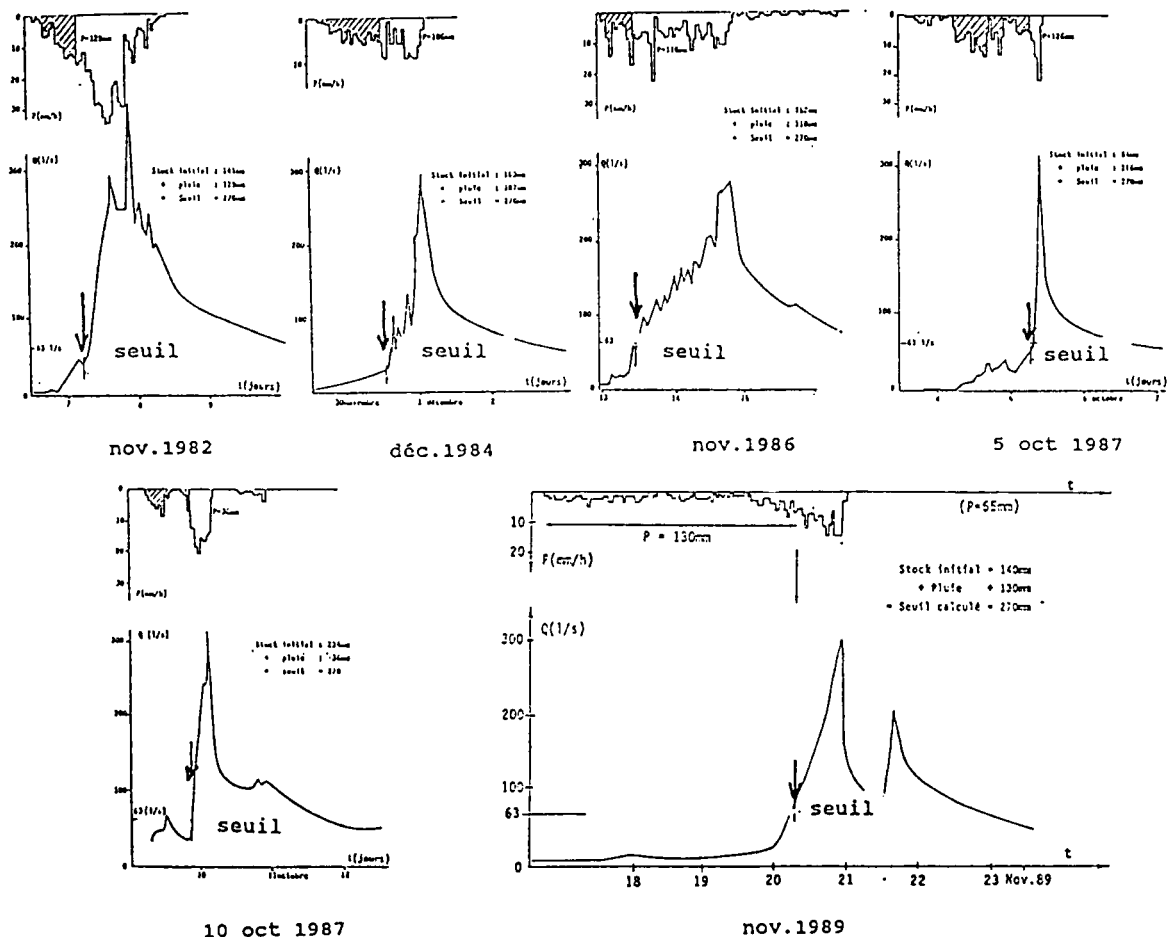
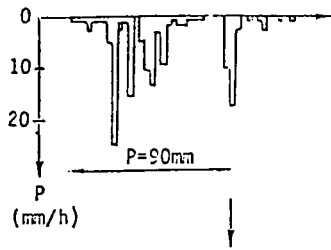


Figure 5- Seuil calculé et début de crue cévenole. Avant, pendant et après la coupe.

Enfin, pas plus que précédemment, une montée de crue ne se produit lorsque le seuil n'est pas dépassé. Le bilan d'une période pluvieuse à la mi-octobre 1988 est à ce sujet significative : le 19 le seuil est théoriquement atteint, aux erreurs de mesure près ; pas plus qu'avant la coupe dans des conditions semblables (à la mi-octobre 1986, par exemple), il n'y a d'amorce de crue cévenole, alors que la bassin est coupé à 80% (fig.6).



Stock initial = 180mm  
 + Pluie + 90mm  
 = Seuil calculé = 270mm

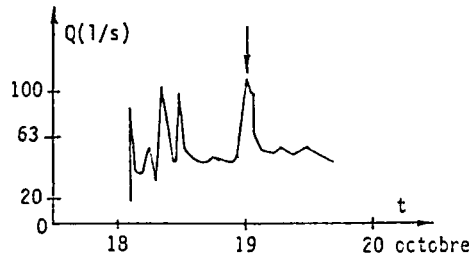


Figure 6- Pluies et écoulements du 18 au 20 octobre 1988.

### 222-Les "petites" crues.

L'étude de la relation pluie-écoulement rapide, avant et après le début des opérations de coupe, permet les observations suivantes (fig.7).

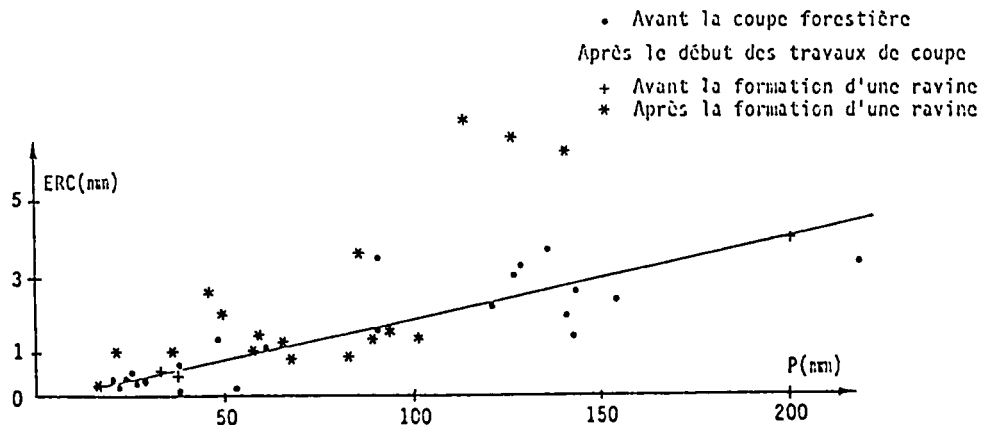


Figure 7-Relation entre le volume d'écoulement rapide et la pluie, avant et après le début de la coupe, lors des "petites crues".

- Certains des événements qui se produisent après le début des opérations de coupe se situent tout à fait dans la relation d'ensemble

- Trois événements, en revanche, s'en écartent significativement. Ils ont en commun de se produire, d'une part après l'initialisation de la ravine principale durant l'hiver 1987-88, et d'autre part, comme le montre la fig.8, lorsque le débit de base est élevé.

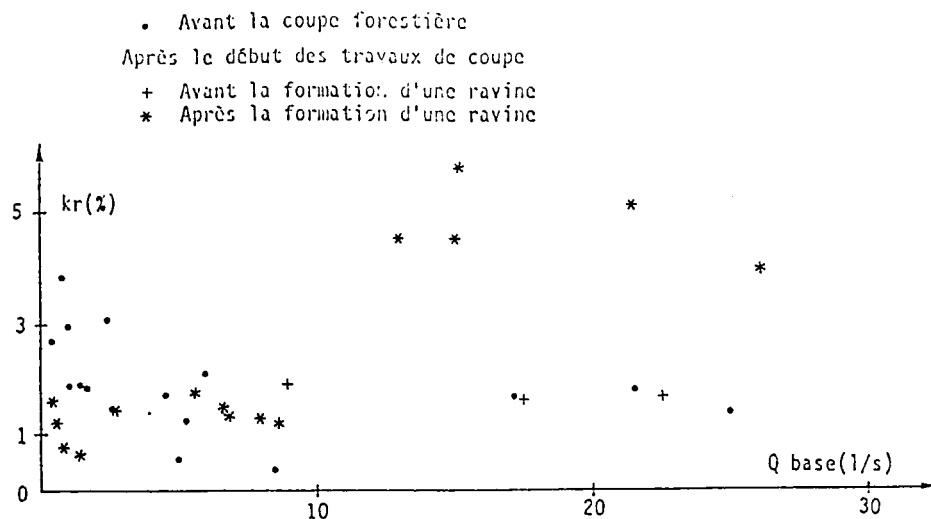


Figure 8- Relation entre l'écoulement rapide lors des "petites crues" et le débit de base initial, avant et après le début de la coupe.

Les débits de base élevés témoignent de l'importance des nappes de versant. Celles-ci n'affleurent généralement pas (sauf très localement pour se réinfiltrer immédiatement en aval) en dehors des épisodes de crues cévenoles. Lorsqu'il pleut, elles se rechargent rapidement et, lorsqu'elles atteignent un certain niveau, elles sont drainées par les ravines résultant des opérations de coupe : le volume de l'écoulement rapide est augmenté d'autant. Mais si les nappes sont trop rabatues, les pluies, sauf exceptionnellement abondantes, ne suffisent pas à provoquer l'écoulement dans les ravines ; l'écoulement rapide demeure, comme avant la coupe, limité à la pseudo-tourbière.

Il semble donc, en conclusion, que les conditions d'apparition des crues cévenoles ne soient guère affectées par la coupe de la forêt. En contrepartie, les petites crues peuvent l'être, par l'intermédiaire de ravines résultant des opérations de coupe forestière. De la densité de ces ravines dans la zone étudiée, de leur position par rapport au drain principal va dépendre l'importance des modifications de l'écoulement ; il paraît bien évident, dans ces conditions, que l'extrapolation des résultats, même à l'échelle simplement régionale, est très difficile, et ne peut se faire qu'à partir de la compréhension du fonctionnement du système étudié.

Ce sont davantage les opérations de coupe, avec les aléas de formation de ravines, que le changement de couvert végétal en lui-même qui sont à l'origine des modifications de l'écoulement observées après la disparition de la forêt.

### 3-CONSEQUENCES DE LA COUPE FORESTIERE SUR L'EROSION DES SOLS.

S'il apparaît que la disparition de la forêt, et même les opérations de coupe n'ont que de faibles conséquences sur les conditions de formation des écoulements de crue, il n'en est plus de même en ce qui concerne l'érosion des sols.

#### 31-Bilan global.

Trois ans après le début de la coupe, le volume total érodé sur l'ensemble des versants déboisés (17 ha) s'élève à



103 m<sup>3</sup>, soit un taux de dégradation spécifique de 3 t/ha/an. En fait, cette érosion est essentiellement discontinue dans l'espace et dans le temps, et les résultats soulignent l'importance fondamentale des effets d'échelle dans la quantification de l'érosion physique ( ALLEE et al., 1991).

### 32-Discontinuité dans l'espace.

Les sources de sédiments sont très localisées. Les anciennes ravines cicatrisées n'ont pas été réactivées ; le ruissellement diffus sur les versants n'a pas eu beaucoup d'efficacité : la litière et les andains accumulés sur le sol lui ont assuré une bonne protection.

En fait, l'érosion s'est exercée au seul détriment des chemins de débardage et de la piste forestière, là où le sol avait été fortement décapé et compacté par le passage répété des engins. Plusieurs petites ravines se sont formées, dont l'évolution ultérieure a été fonction de l'épaisseur des sédiments et des possibilités d'alimentation en eau. En effet, ces ravines drainent l'écoulement hypodermique, et fonctionnent chaque fois que l'alimentation des nappes est suffisante, comme on l'a vu dans le chapitre précédent.

Les chemins forestiers qui fournissent la quasi-totalité du matériel érodé n'occupent que 5% de la surface déboisée.

### 33-Discontinuité dans le temps :

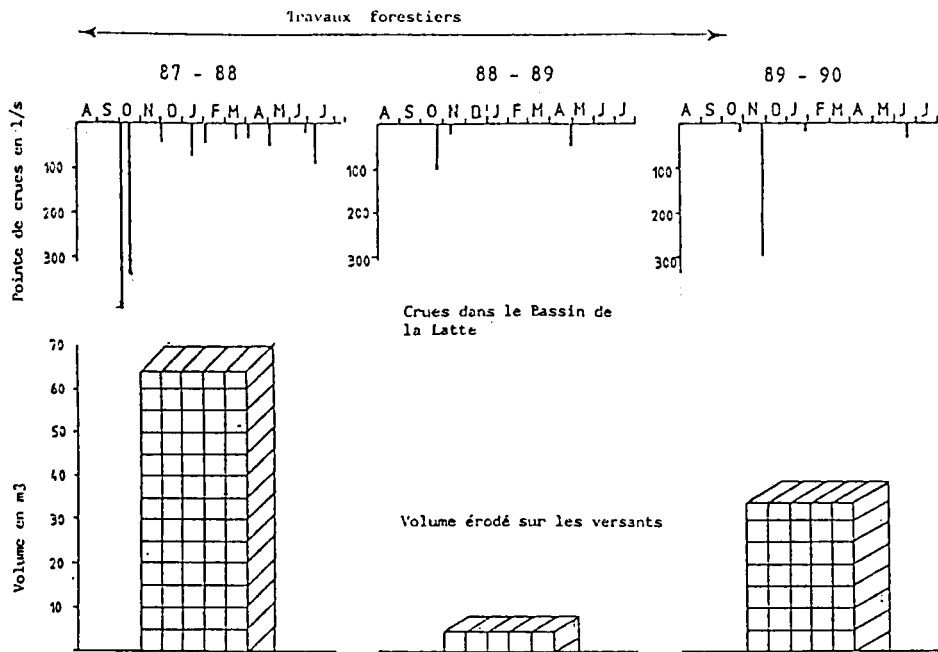
La première discontinuité est saisonnière. Les ravines s'incisent en fonction des événements hydrologiques, principalement lors des crues importantes d'automne et de printemps, à la suite du débordement des nappes de versant et de la concentration du ruissellement par les ravines.

Au cours du cycle hydrologique 89-90, quatre épisodes érosifs ont pu être observés; l'abat d'eau de fin novembre (290 mm en 3 jours), à l'origine d'une crue cévenole, a provoqué 95% de l'érosion de l'année sur les versants. En contrepartie, lors du même cycle hydrologique, une violente averse orageuse survenue en juin (90 mm en 3 heures) n'a provoqué qu'une érosion très faible, de même qu'elle n'avait provoqué qu'un écoulement dérisoire (1.5 mm).

Le débordement des nappes de versant, le drainage et la canalisation des eaux de ruissellement par les ravines formées sur les sentiers fortement perturbés par le passage des engins constituent, de très loin, le principal mécanisme d'érosion hydrique sur les versants déboisés. Les crues cévenoles représentent bien les temps forts de la morphogénèse dans le bassin-versant ; leur irrégularité conditionne l'irrégularité interannuelle de la vitesse de l'érosion. Ainsi, la deuxième est interannuelle : pendant la période étudiée, la vitesse d'érosion a varié d'un facteur 16, en fonction de l'absence ou l'occurrence de tels événements (fig.9).

### 34-Effet d'échelle :

La grande irrégularité des pentes interrompues par de nombreux replats, combinée avec la nature très filtrante des sols provoque de nombreuses discontinuités dans les transferts de sédiments. Trois années après le début des travaux de coupe, la quasi-totalité du matériel érodé sur les versants n'a pas atteint l'exutoire du bassin :



**Figure 9-** Irrégularité interannuelle des pointes de crue et des débits solides

- 85% des sédiments ont été piégés sur d'anciens cônes de déjection construits au pied des versants, ou dans d'anciennes ravines lorsque les pistes de débardage les traversent.

- 15% seulement des sédiments ont atteint la partie supérieure du chenal temporaire de la Latte, mais il y sont provisoirement piégés sous forme d'atterrissement. Cette répartition a été à peu près la même chaque année.

Pendant la période d'observation, la charge solide mesurée à l'exutoire est restée très faible : 1.15 m<sup>3</sup> au total pour la charge de fond, qui ne provient pas des versants déboisés mais bien d'une reprise d'érosion par sapement de berge dans un stock alluvial d'origine anthropique situé quelques 30 m. en amont. Il y a là une discontinuité spatio-temporelle importante entre la crise érosive qui sévit sur les versants et la charge de fond exportée simultanément hors du bassin, qui, elle, résulte de l'évacuation retardée d'un stock alluvial vieux de plusieurs siècles.

La charge en MES est restée également très faible : moins de 30 mg/l. pour la plus forte concentration observée, probablement inférieure à 1 m<sup>3</sup> pour l'ensemble de la période. Ceci peut s'expliquer par la faible teneur en limons des sols, et surtout par le fait que l'essentiel des fines est resté piégé dans le bassin, dans les cônes de déjection, mais aussi dans la pseudo-tourbière, qui peut piéger jusqu'à 80% des MES transportées.

Ainsi, au terme de trois années d'étude, selon l'échelle de travail choisi et le site où les débits solides sont mesurés, le bilan suivant est obtenu, 103 m<sup>3</sup> érodés des versants, 16 m<sup>3</sup> parvenus dans le talweg, 2 m<sup>3</sup> exportés du bassin-versant, dont la moitié seulement en MES provenant de

la coupe et l'autre moitié sous forme de charge de fond résultant du remaniement d'un héritage alluvial historique (fig.10). Entre les versants et le bassin-versant, la vitesse d'érosion varie de 1 à 50, et de 1 à 100 si on exclut les remaniements. C'est dire le rôle fondamental joué par les effets d'échelle dans les mesures d'érosion.

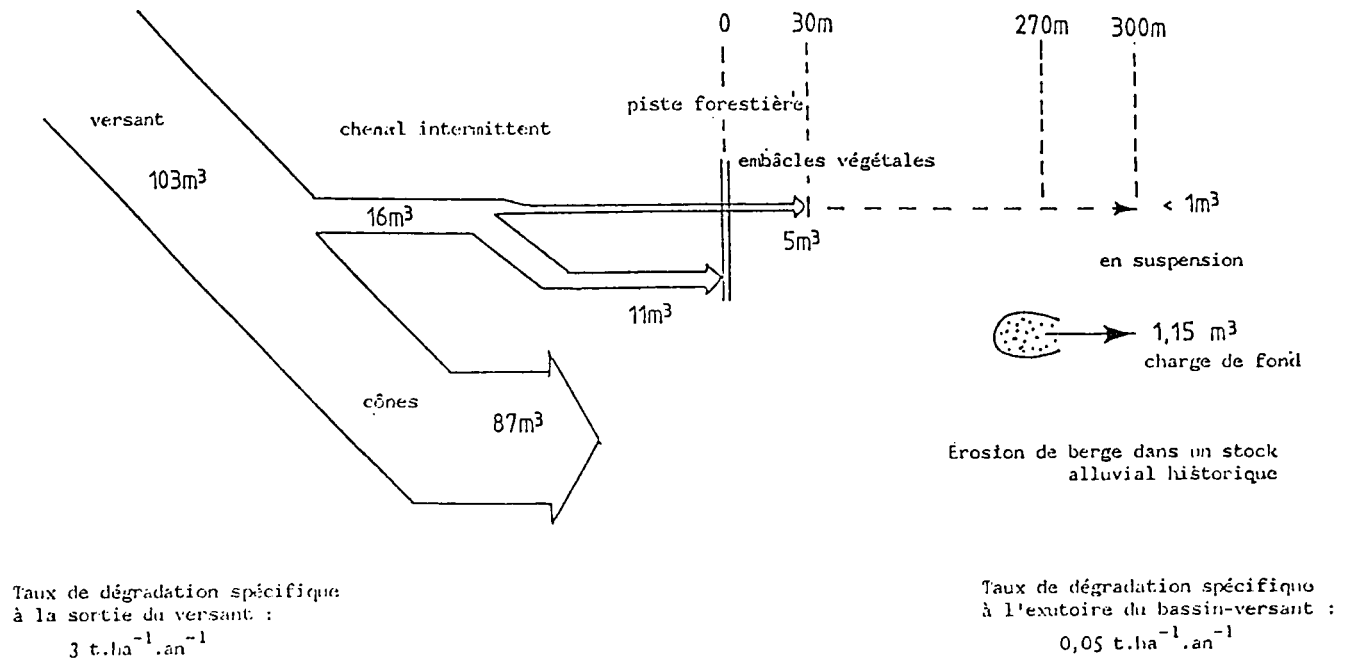


Figure 10- Bilan sédimentaire 1987-1990 : stockage et évacuation.

### CONCLUSION

A l'échelle d'un bassin-versant de 20 ha, la coupe à blanc d'une forêt d'épicéas paraît n'avoir que des conséquences minimales à la fois sur les écoulements de crue et sur le bilan d'érosion. Il n'en est plus de même à l'échelle des versants : les travaux de foresterie ont décapé et tassé les pistes de débardage et le chemin forestier, provoquant la formation de plusieurs ravines. Dès que les réserves hydrologiques sont suffisantes, ces ravines forment drain et augmentent l'écoulement rapide. Lors des crues de type "cévenol", elles concentrent le ruissellement. L'érosion est limitée dans l'espace à ces surfaces perturbées, et dans le temps à ces épisodes paroxysmiques. En dehors de ce type d'événements, il n'existe pas plus qu'avant la coupe, de ruissellement sur les versants susceptibles de provoquer un écoulement de crue, même lors des gros orages d'été. Là où les engins forestiers n'ont pas perturbé le sol, les conditions de circulation de l'eau et des sédiments ne sont pas modifiées. Or ces surfaces occupent plus de 95% du bassin ; ceci explique que les écoulements lors des crues "cévenoles", qui se produisent alors qu'une grande partie du bassin fonctionne comme "aire contributive", ne soit pas modifiés de façon sensible. Ce sont les opérations de coupe,

et non la disparition de la forêt en elle-même, qui expliquent les modifications observées, minimales pour les écoulements de crue, plus importantes pour l'érosion des sols. Enfin, il faut insister sur la disparité des résultats des bilans d'érosion selon l'échelle choisie. L'importance des dépôts intermédiaires est telle que seule une infime partie -moins de 1%- des matériaux arrachés aux versants parvient à l'exutoire. Ces résultats montrent la complexité du rôle de protection de la forêt, et les difficultés qu'il peut y avoir à vouloir transposer des résultats d'études sans une compréhension profonde du fonctionnement du système étudié.

**REMERCIEMENTS.** Cette étude a été réalisée dans le cadre de la recherche menée par les membres de l'Inter-équipe de l'URA-DO 141 (Responsable : A.GODARD), en collaboration avec les chercheurs du programme "bassins-versants du Mont-Lozère" (Responsable : F.LELONG) et le Parc National des Cévennes. Il a été financé avec l'aide de La CEE (programmes "DEFORPA" et "Recherche et développement dans le domaine de l'environnement"). Les données de terrain ont été acquises par J.F. DIDON-LESCOT. Les auteurs remercient en outre tout particulièrement pour leur aide sur le terrain ou leurs conseils : M. GHIO, T. MUXART, B. VALADAS.

#### **BIBLIOGRAPHIE:**

- ALLEE P., VALADAS B., COSANDEY C., MUXART T., GODARD A. (1991) Forest harvesting geomorphic effects in a sub-mediterranean middle mountain. Mont Lozère, South of the Massif Central, France. First results. Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 83, 1-8.
- COSANDEY C. et Al. (1991) Rôle hydrologique de la forêt: Etude des conséquences d'une coupe forestière sur les conditions d'apparition des crues et sur le déficit d'écoulement. Rapport de fin de contrat CEE, Meudon.
- COSANDEY C., DIDON-LESCOT J.F. (1990) Etude des crues cévenoles: conditions d'apparition dans un petit bassin-versant forestier sur le versant sud du Mont Lozère, France. "Regionalization in Hydrology", IAHS Publ 191. Wallingford.
- DIDON J.F. (1985) Contribution à l'étude de la variabilité spatio-temporelle des pluies sur le Mont Lozère. DEA, Univ. de Montpellier.
- DUNNE T., BLACK R.D. (1970) Partial area contributing to runoff production in permeable soils, Water Res. Res., 6.
- DUPRAZ C. (1984) Bilan des transferts d'eau et des éléments minéraux dans trois bassins-versants comparatifs à végétation contrastée (Mont Lozère, France). Thèse de doctorat-ingénieur, Orléans, 363 p. + annexes.
- DURAND P. (1989) Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pelouse, hêtraie, pessière) de moyennes montagnes granitiques (Mont Lozère). Thèse de Doctorat, Université d'Orléans.
- LELONG F., DURAND P., DIDON J.F. (1988) Comparaison des bilans hydrochimiques, des taux d'altération et d'acidification dans trois petits bassins-versants granitiques similaires à végétation contrastée (Mont Lozère, France), Bul. des Sc. Géol., Stasbourg 41 (3-4), 263-278.