

# CONSEQUENCES HYDROLOGIQUES DE LA FORET MEDITERRANEENNE : RAPPORT SUR LES RECHERCHES MENEES EN FRANCE

## INTRODUCTION

**L**es recherches menées en France sur les conséquences de la forêt sur le régime des eaux en climat méditerranéen sont conduites essentiellement à partir de trois groupes de BVRE (bassins versants représentatifs et expérimentaux). Il s'agit (cf. carte hors texte) :

- des bassins de Draix, gérés par le Cemagref (Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts) de Grenoble ;
- des bassins du Mont Lozère, gérés par le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et l'Université de Nice-Sophia Antipolis ;
- des bassins du Réal Collobrier, gérés par le Cemagref d'Aix en Provence.

Ces sites diffèrent par leurs conditions climatiques, lithologiques et pédologiques. Ils ont en commun de prendre en compte les fonctionnements hydrologiques de plusieurs bassins versants, dont un au moins est en forêt, et dont les autres comportent des types d'occupations différents. Au cours de la période d'étude, le bassin forestier a pu ne pas être modifié (bassins de Draix), et il s'agit alors seulement de comparaisons ; il a pu être coupé (bassins du Lozère) ou incendié (bassins du Réal Collobrier) : on parle alors de bassin expérimentaux.

Dans chacun des cas étudiés, le fonctionnement du bassin en forêt est comparé à celui d'un bassin témoin. La mise en évidence du rôle spécifique de la forêt est plus claire lorsque les études s'appuient sur le changement relatif de comportement du bassin après la disparition de la forêt (coupe ou incendie) par rapport au comportement du bassin non perturbé.

Chacun de ces sites expérimentaux, ainsi que les principaux résultats qu'ils ont permis d'acquérir, vont être présentés successivement (§ 1, 2 et 3). On y ajoutera les résultats d'une recherche foncièrement différente, basée sur une étude statistique des relations entre les évolutions conjointes des taux de boisement et des caractéristiques de l'écoulement de bassins versants de taille moyenne (de l'ordre de 50 km<sup>2</sup>) dans la partie méridionale du Massif Central, soumise aux conditions pluviométriques méditerranéennes (§ 4).

Une synthèse portera ensuite sur la comparaison des résultats, et les enseignements qu'on peut en tirer quant au rôle hydrologique de la forêt méditerranéenne (§ 5).

## LES BASSINS DE DRAIX

Nicolle Mathys et Didier Richard

*Cemagref*, 2 Rue de la papeterie, BP 76, 38402 SAINT-MARTIN-D'HERES, France

E-Mail : [nicolle.mathys@cemagref.fr](mailto:nicolle.mathys@cemagref.fr) et [didier.richard@cemagref.fr](mailto:didier.richard@cemagref.fr)

### Conditions de l'étude

Le Cemagref gère depuis 1983, en collaboration avec le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) des Alpes-de-Haute-Provence un ensemble de bassins versants expérimentaux sur les communes de Draix et Le Brusquet (Cemagref, 1988 ; Cambon et al., 1990 ; Richard et al., 1999) (Figure 1). Situés sur les « Terres Noires » du Callovo-Oxfordien, très érodables, ils ont pour principal objet l'érosion torrentielle en montagne, et doivent servir à l'étude des moyens de protection correspondants. Les thèmes et disciplines concernés sont l'hydrologie, l'étude des phénomènes érosifs et l'hydraulique torrentielle. Seuls les aspects concernant l'hydrologie forestière (Brochot, 1995 ; Meunier, 1996 ; Richard et al., 1999 ; Vérité, 1999) sont rapportés ici.

## Dispositif expérimental

Un premier bassin, le Laval a été équipé en 1983. D'une surface de 86 ha, il est fortement dégradé, et les 2/3 de sa surface (64%) sont constitués de sols pratiquement dénudés.

Un second bassin, reboisé dans le cadre des opérations « RTM » (restauration des terrains de montagne) à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle a été instrumenté en 1987. Les surfaces sans végétation n'occupent que 13% du bassin.

Deux autres bassins, plus petits, complètent le dispositif. Les caractéristiques des bassins sont portées dans le Tableau 1.

	Surface (ha)	Taux de couverture (%)				Pente moyenne (%)
		bois	herbe	clairsemé	nu	
Laval	86	21.7	7.8	2.7	67.8	58
Brusquet	108	87			13	53
Moulin	8	10.2	31.1	4.5	54.2	30
Roubine	0.133		21		79	75
Francon	73	42.9		13.4	43.7	41

Tableau 1 - Principales caractéristiques des bassins de Draix

Les bassins sont équipés pour la mesure des pluies, des débits et des transports solides (Figure 1).

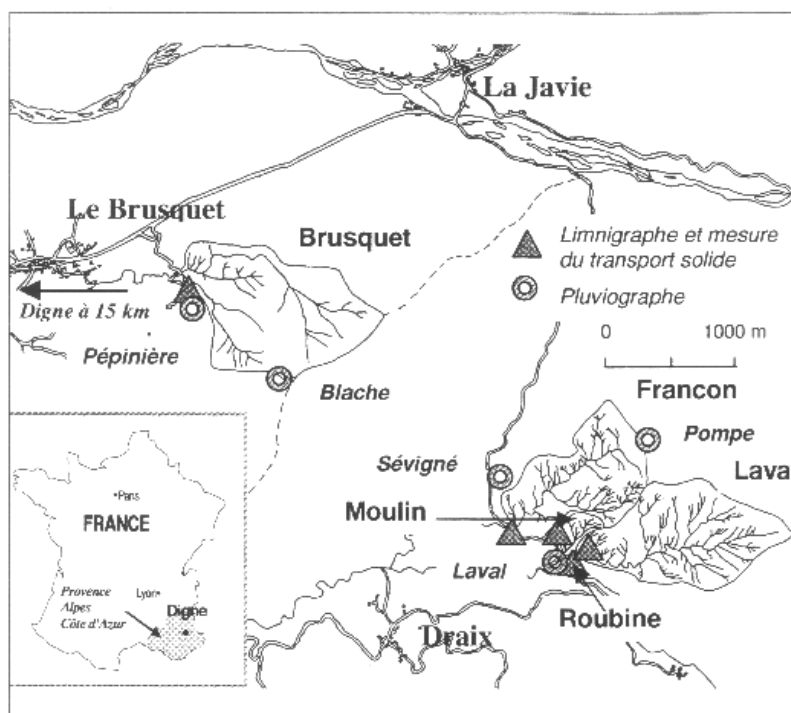


Figure 1 - Localisation et équipement des bassins de Draix

Les données brutes des pluviographes et limnigraphes font l'objet d'une critique et d'une interprétation avant d'être archivées dans des fichiers chronologiques, à pas de temps variable, avec une précision de la minute.

## Conditions climatiques

Le climat, de type méditerranéen, se caractérise par un rayonnement solaire important ( $\approx 2300$  h/an, des hivers doux et peu enneigés et une sécheresse estivale.

La hauteur annuelle des précipitations est de l'ordre de 940 mm, variant pour la période 1984-1996 de 590 mm (1990) à 1220 (1996) Des abats d'eau important se produisent surtout en automne et au printemps, avec des intensités qui peuvent dépasser 60 mm/h pendant quelques minutes plusieurs fois par an. Ce sont d'ailleurs ces

fortes averses qui sont à l'origine des fortes pointes de crue et des épisodes érosifs. La pluie journalière décennale est de 80 mm.

### Fonctionnement hydrologique

Les crues enregistrées sur les bassins de Draix sont particulièrement violentes, avec des débits de pointes considérables compte tenu de la taille des bassins. Les valeurs des forts débits pour les bassins non reboisés sont regroupées dans le Tableau 2.

	Roubine	Moulin	Laval
Débit maximal observé (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> ) (date)	60 (08/09/94)	24 (08/09/94)	23 (08/09/94)
Débit décennal (Gümbel)	36	16	19

Tableau 2 - Valeurs des forts débits de crues

La plus forte crue enregistrée en septembre 1994, a atteint 20 m<sup>3</sup>/s sur le bassin du Laval, de moins de 1 km<sup>2</sup> de superficie. Les montées de crue sont particulièrement rapides sur les bassins dénudés : au Laval, on observe couramment des montées de 1 m dans le seuil de mesure en 2 à 5 minutes ; le débit a pu passer de 10 à 5000 l/s en 11 minutes (le 11 juillet 1995) ou de 10 à 3250 l/s en 15 minutes (13 septembre 1995).

On observe rarement des crues entre décembre et avril. Les épisodes principaux sont situés entre mai et octobre, le mois d'octobre étant le plus critique pour l'ensemble des bassins.

### Principaux résultats obtenus

Contrairement aux deux autres sites expérimentaux qui seront présentés plus loin, les bassins de Draix n'ont pas subi de modification du couvert forestier pendant la période d'étude. Les recherches sont donc menées en comparant les fonctionnements du bassin reboisé du Brusquet avec le bassin très peu végétalisé du Laval. Il s'avère que ces fonctionnements hydrologiques sont fondamentalement différents en ce qui concerne les rythmes d'écoulement.

### Fonctionnement hydrologique - Pluie limite de déclenchement de l'écoulement

Les réserves sont faibles dans le bassin du Brusquet, et plus faibles encore dans celui du Laval. L'écoulement d'été est intermittent, directement lié aux pluies.

Les possibilités de stockage plus faibles dans le bassin non boisé expliquent une apparition plus rapide des crues dans ce bassin. Un exemple particulièrement didactique est fourni par la crue du 6 juillet 1987. Il faut 10 mm de pluie pour qu'un écoulement se produise dans le bassin dénudé, et 16 dans le bassin reboisé (Figure 2).

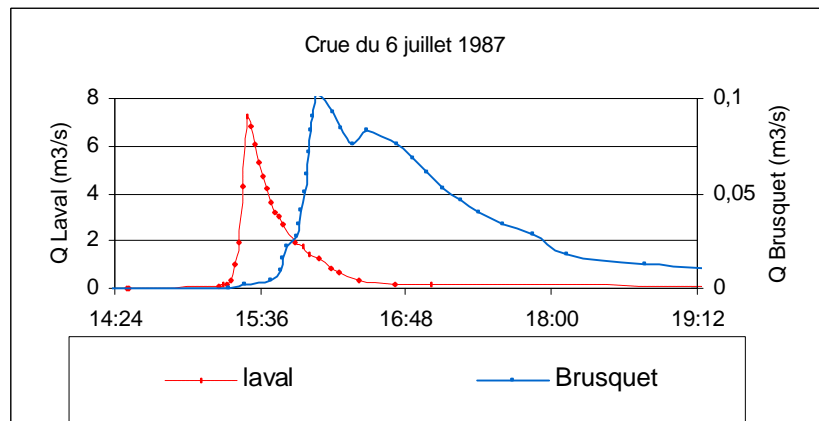


Figure 2 - Crues du 6 juillet 1987 dans les bassins du Laval et du Brusquet (les échelles de débits ne sont pas comparables)

Ces valeurs de « pluie limite » (hauteur d'eau minimum nécessaire pour produire un ruissellement) dépendent évidemment de la longueur de la période sans pluie précédente. Elles sont en relation avec des valeurs-seuils qui rendent compte de la capacité maximum de stockage des bassins, et qui correspondent au stockage effectif en début de crue lorsque les bassins sont très secs.

Les données pour la détermination de cette pluie limite sont rassemblées sur la Figure 3.

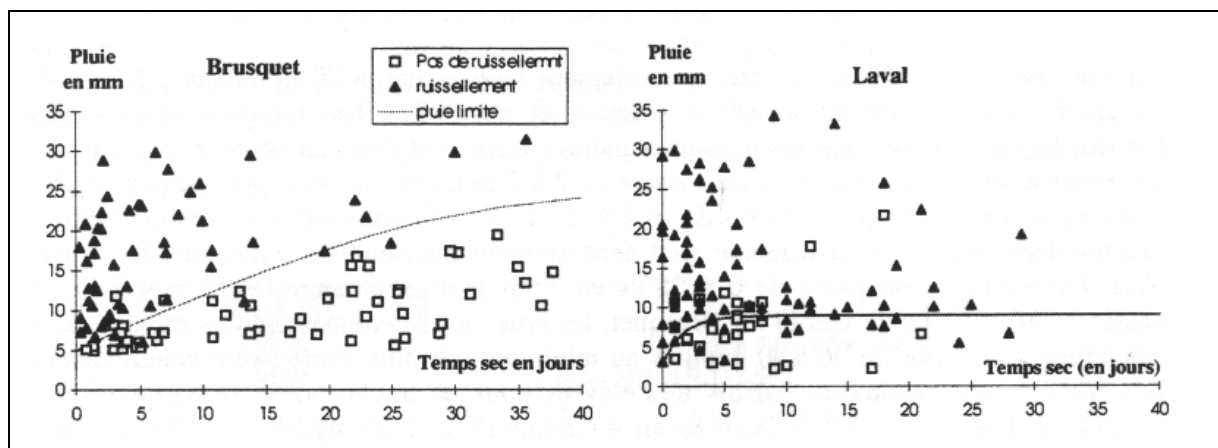


Figure 3 - Valeurs de pluie limite pour les bassins du Laval et du Brusquet

On constate sur cette figure que, dans le bassin du Laval, pratiquement toutes les pluies supérieures à 9 mm donnent lieu à un écoulement, tandis que sur le Brusquet, après une longue saison sèche, même une pluie de 20 mm peut ne provoquer aucun écoulement à l'exutoire du bassin.

Le seuil maximal obtenu pour cette pluie limite est de 9 mm pour le bassin déboisé, de 25 à 30 mm pour le bassin boisé.

### Importance des crues

Le premier effet du couvert végétal, que l'on vient de voir, est l'augmentation du seuil minimal de pluie nécessaire à l'apparition d'un écoulement : les crues du bassin boisé sont moins fréquentes, et de nombreuses averses ne produisent aucun écoulement notable. Si on compare des hydrogrammes produits par des pluies analogues, on observe que les pointes de crue sont retardées d'au moins une demi-heure au Brusquet, comme cela a pu s'observer sur la Figure 2.

**Pointes de crue** - On a vu que les pointes de crue sont très fortes pour le Laval, pouvant atteindre  $23 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ . Or pour cette même crue, correspondant à un épisode pluvieux de 53 mm, la pointe de crue dans le bassin reboisé du Brusquet n'a été que de  $2.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ , soit 10 fois moindre.

Au-delà de cas extrêmes, la majorité des débits de pointe du bassin boisé sont cinq fois plus faibles que ceux du bassin déboisé. Un exemple est fourni par la crue du 27 mai 1988 (Figure 4).

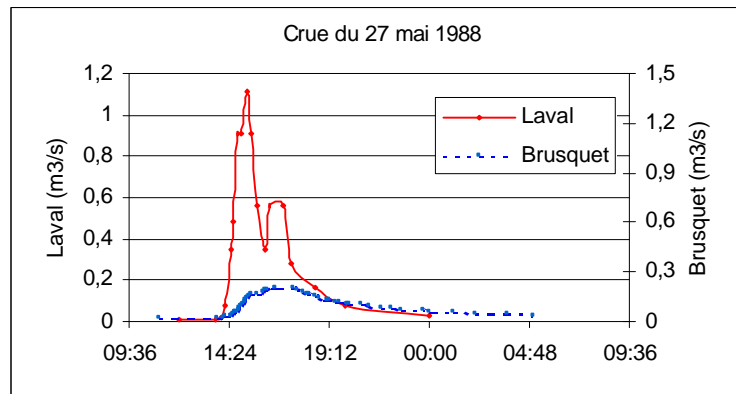


Figure 4 - Crues du 27 mai 1988 pour les bassins du Laval et du Brusquet (les échelles différentes pour les débits des deux bassins compensent les écarts de surface, et rendent la comparaison visuelle instructive)

Cette crue répond à une averse de 21 mm au Brusquet et de 22 mm au Laval. La pluie cesse à 17 h.

La pointe de crue au Laval est de  $1.11 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $1.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ) et de seulement  $0.208 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  au Brusquet, soit dans un rapport de 1 à 6.

Il est pourtant à noter que dans certains cas particuliers (crues du 08/09/87 et du 5/11/94), le rapport n'est plus que de 1 à 2 (Combes et al., 1994), ce qui pose le problème du rôle de la forêt dans certaines situations extrêmes.

La limitation des volumes de crue, si elle est moins importante parce que la durée de la crue est plus grande dans le bassin boisé, est généralement d'au moins 50 %. Dans l'exemple ci-dessus, la lame écoulée est de 10.9 mm dans le bassin du Laval et de seulement 4.3 mm dans celui du Brusquet. Le rapport des volumes écoulés pendant la crue est environ de 1 à 2.5.

Combes et al. (1994), attribuent ces différences de fonctionnement à la présence d'un sol forestier jouant un rôle spécifique dans la rétention de l'eau.

### Écoulement annuel

La mauvaise qualité des mesures de basses eaux ne permet pas d'estimer avec précision les lames d'eau écoulées à l'échelle de l'année hydrologique. Pourtant les travaux de Poinard (2000), qui a tenté une reconstitution des débits annuels pour 2 années caractéristiques, établissent des déficits d'écoulement un peu plus fort, de 5 à 10% pour le bassin en forêt. Par ailleurs, les observations de terrain montrent que la période pendant laquelle se produisent des écoulements est plus longue dans le bassin du Laval, mal couvert, que dans celui du Brusquet, reboisé. Ces observations vont dans le sens d'une évaporation plus grande dans le bassin boisé.

### Conclusion

Les résultats obtenus sur les bassins de Draix montrent très clairement une réduction très forte à la fois des pointes et des volumes de crues. Cette réduction est en moyenne de l'ordre de 1 à 5 pour les pointes de crue, de 1 à 2 pour les volumes.

Ces différences sont attribuées au rôle d'un sol forestier relativement épais, qui n'existe évidemment pas dans le bassin non boisé.

Bien que les données ne soient pas suffisantes pour permettre une estimation précise de l'écart entre les écoulements annuels des bassins, il semble bien que le bassin boisé ait un écoulement annuel moindre que le bassin non boisé.

## Références

- Brochot S. (rédacteur) et al., 1995 - Desertification in Mediteranéan areas. DM 2 projet : final report, Cemagref, Grenoble, 48 p + annexes.
- Cambon J.P., Mathys N., Meunier M., Olivier J.E., 1990 - Mesure des débits solides et liquides sur des bassins versants expérimentaux de montagne. IAHS Public., n° 193, pp 231-238.
- Cemagref, 1988 - Les bassins versants expérimentaux de Draix - présentation et synthèse. Publ. Cemagref, Division protection contre les érosions, Grenoble, 37 p.
- Combes F., Hurand A., Meunier M., 1994 - La forêt de montagne : un remède aux crues. Actes des 23<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydraulique "Crues et inondations" (Nîmes, 1994), Edit. SHF, pp 475-480.
- Meunier M. 1996 - Forest cover and floodwater in small mountain watersheds. Unasylya 185, vol. 147, pp 29-37.
- Poiniard D., 2000 - Analyse hydrologique de deux bassins montagneux à couvert végétal contrasté. DEA, Université d'Avignon, 42 p + Annexes.
- Richard D., Mathys N., 1999 - Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours des dix ans de suivi. Actes du séminaire "Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne" (Draix, Le Brusquet, Digne, 1997), Cemagref-Editions, coll. Actes de colloques, Mathys N. édit., pp 11-28.
- Vérité F., 1993 - Hydrologie de crue des bassins versants de montagne méditerranéens. Mémoire de fin d'étude ENGEES - Cemagref, 119 p.

## LES BASSINS DU MONT LOZÈRE

Claude Martin \*, Claude Cosandey \*\* et JF Didon-Lescot \*

\* UMR 6012 "ESPACE", Equipe GVE, Département de Géographie, 98 Boulevard Edouard Herriot, BP 3209, F-06204 NICE cedex 3, France

E-mail : [martincl@infonie.fr](mailto:martincl@infonie.fr) et [didon@ensam.inra.fr](mailto:didon@ensam.inra.fr)

\*\* Laboratoire de Géographie Physique, CNRS, 1 Place Aristide Briand, F-92190 MEUDON, France

E-mail : [cosandey@cnrs-bellevue.fr](mailto:cosandey@cnrs-bellevue.fr)

## Conditions de l'étude

La partie du BVRE du Mont-Lozère prise en considération dans le présent rapport a été équipée en 1981 pour suivre les relations entre l'eau, le sol et la végétation. Elle comportait trois petits bassins, considérés comme semblables sur le plan lithologique, mais portant chacun une couverture végétale particulière : pessière de reboisement, hêtraie et pelouse pâturée. La coupe de la pessière, alors que le bassin avait déjà été étudié pendant 6 ans, a permis un suivi assez fiable des conséquences hydrologiques de la coupe forestière – sans pourtant qu'il soit toujours possible de faire la part entre la disparition de la végétation forestière, l'impact des opérations de coupe, et l'influence des conditions climatiques.

## Dispositif expérimental

Les trois bassins versants considérés sont situés dans le sud du Massif Central, à une altitude variant de 1150 m à 1495 m. La roche mère, constituée par un granite considéré comme homogène, est recouverte par des sols minces de types rankers ou bruns ocreux humifères, développés sur une arène elle-même généralement peu profonde. La texture grossière de ces sols (SG : 50 à 60% ; SF : 14 à 16% ; L : 20% ; A : 2%) les rend particulièrement filtrants.

Le bassin de la Latte, plus particulièrement étudié ici, présente une superficie de 19.5 ha. La forêt d'épicéas, qui occupait initialement 80% de la surface, a été coupée en 1987-1989, puis replantée à l'automne 1989. Le bassin des Cloutasses (81 ha) est occupé par une pelouse pâturée par des ovins transhumants. Enfin un troisième bassin, celui de la Latte (54 ha), pris en compte ici à titre de contrôle, est occupé par une hêtraie.

Les bassins sont équipés d'un seuil artificiel doté d'un déversoir triangulaire permettant une mesure fine des débits jusqu'à 143 l/s ; les valeurs supérieures sont déduites d'un modèle hydraulique.

Les précipitations sont connues à l'aide de six pluviographes (Figure 5). Les enregistrements sont contrôlés et corrigés par des mesures « au seau » et par les données de pluviomètres totalisateurs. La station météorologique implantée à la Vialasse renseigne, outre sur les précipitations, sur la température de l'air sous abri, l'insolation, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent.

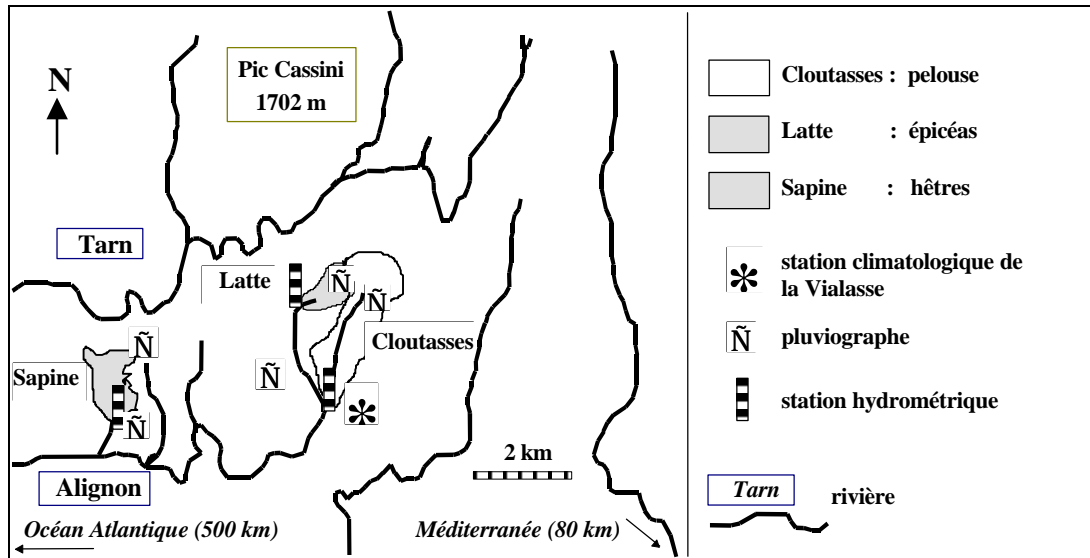


Figure 5 - Le dispositif de mesure sur le Mont-Lozère

### Conditions climatiques

Si les conditions climatiques ne sont guère méditerranéennes pour les températures (la moyenne interannuelle à la station météorologique, à 1300 m d'altitude, n'atteint pas 7°C), elles le sont pour la répartition des pluies, avec des précipitations très abondantes d'automne, et secondairement de printemps. L'ETP, calculée par la formule de Turc, est de l'ordre de 620 mm.

La pluviosité annuelle est élevée. A la station de la Vialasse, sur la période d'étude, elle varie de 1075 mm (1985) à 3377 mm (1996), avec une moyenne interannuelle de 1950 mm. Les abatements d'eau peuvent atteindre 400 mm en 24 h, et l'intensité de la pluie est parfois très forte (170 mm/h pendant une demi-heure le 22 septembre 1992).

### Fonctionnement hydrologique avant la coupe

Sur la période précédant la coupe, soit de juillet 1981 à juin 1987, les cours d'eau manifestent un régime hydrologique caractérisé par un étiage principal d'été et un étiage secondaire d'hiver (Figure 6).

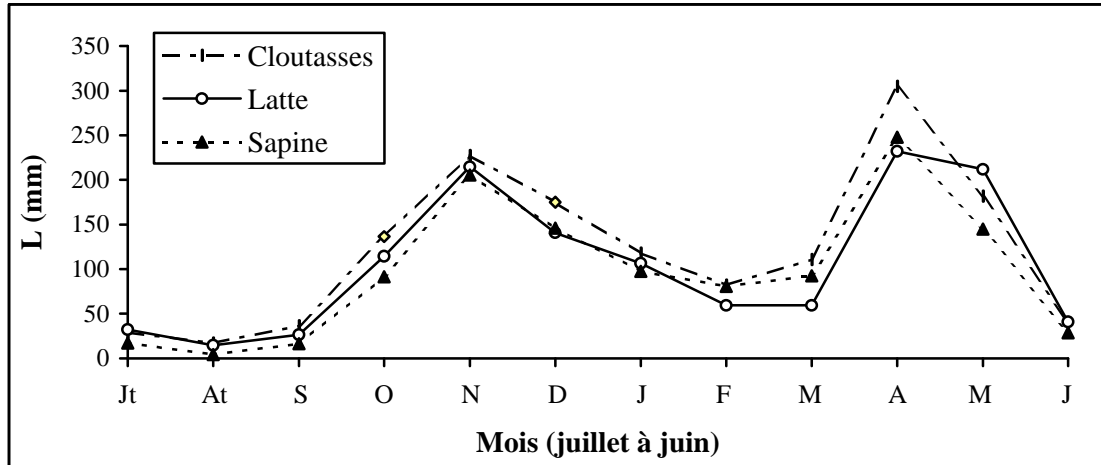


Figure 6 - Lames d'eau écoulées mensuelles moyennes sur la période juillet 1981 - juin 1987

Ces périodes d'étiage sont séparées par deux périodes de hautes eaux constituées, la première, par les mois d'octobre à décembre, et, la seconde, par les mois d'avril et mai. Septembre est caractérisé par des déficits d'écoulement très élevés (Figure 7).

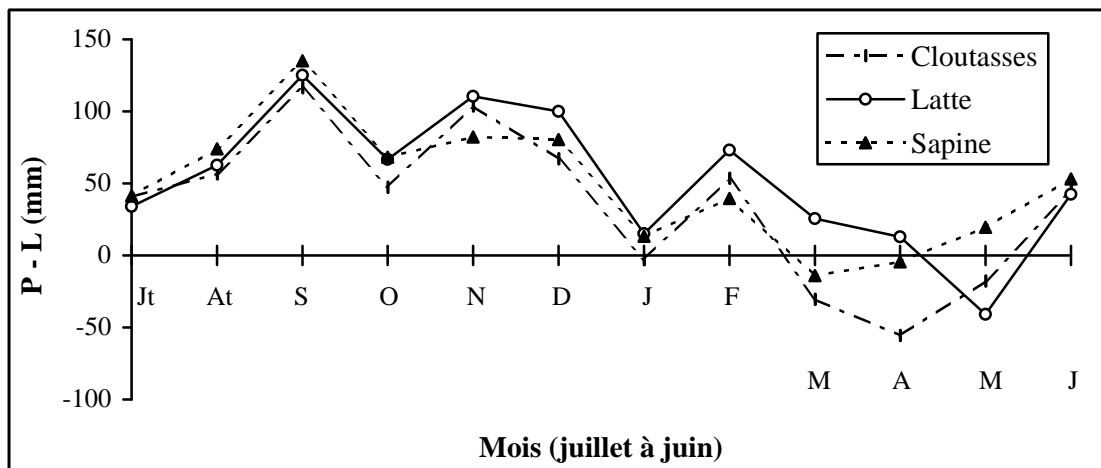


Figure 7 - Déficits d'écoulements mensuels moyens sur la période juillet 1981 - juin 1987

Septembre reçoit des précipitations abondantes (de l'ordre de 150 mm en moyenne), mais une grande partie sert à reconstituer les réserves en eau des bassins versants et une autre alimente une évapotranspiration encore active. Les précipitations moyennes d'octobre sont voisines de celles de septembre. Les écoulements sont cependant plus abondants, car les réserves sont partiellement reconstituées. Les précipitations mensuelles maximales se placent en novembre (300 mm environ en moyenne). Les pluies génèrent alors des écoulements extrêmement abondants. Les déficits d'écoulement demeurent toutefois élevés. Les déficits d'écoulement chutent en janvier (pour des précipitations de 115 mm environ en moyenne), puis remontent en février (précipitations de 130 mm en moyenne). De mars à mai, les déficits d'écoulement sont très faibles, et même souvent négatifs. Les écoulements les plus abondants se produisent en avril (pour des précipitations de 245 mm environ en moyenne). Au début du printemps, les écoulements générés par les pluies sont grossis par la fonte des neiges accumulées au cours des mois précédents (la période 1981-87 a été marquée par un fort enneigement). En relation avec l'altitude, l'exposition et le couvert végétal, on observe des différences importantes entre les réponses des bassins versants à la fonte des neiges : le bassin de la Sapine (altitudes comprises entre 1160 et 1395 m) réagit rapidement, mais faiblement ; celui des Cloutasses (altitudes comprises entre 1290 et 1495 m) répond fortement

et de manière prolongée (mars à mai) ; celui de la Latte (altitudes comprises entre 1340 et 1495 m) présente une réponse tardive (mai).

Les déficits d'écoulement annuels sont souvent supérieurs à l'évapotranspiration selon la formule de Turc, en particulier pour les bassins versants boisés de la Latte et de la Sapine. Selon certains auteurs, l'interception d'eau de pluie par le couvert végétal pourrait provoquer un accroissement de l'évapotranspiration (Humbert et Najjar, 1992 ; Cosandey et Robinson, 2000). Quoi qu'il en soit, et au-delà des questions d'ordre méthodologique que les observations effectuées sur le Mont Lozère obligent tout de même à se poser (choix de la formule pour le calcul de l'évapotranspiration ; imprécisions sur la mesure des précipitations et des écoulements), il semble surtout que l'on puisse considérer que les arbres, sur les bassins versants étudiés, bénéficient presque toujours d'une alimentation en eau optimale.

**Les conditions de formation des crues** dites « cévenoles » sont particulières, étant donné la forte perméabilité du milieu et le taux de recouvrement par la végétation très important. En dépit de la hauteur et de l'intensité des pluies, aucune crue importante ne peut se produire tant que l'ensemble des altérites du bassin n'est pas saturé. En effet, les versants convexo-concaves présentent des épaisseurs d'altérites beaucoup plus grandes en bas de versant que sur les sommets, ce qui est très classique. Les sols amont, plus minces, seaturent les premiers. Ils génèrent un ruissellement qui se ré-infiltre en aval, où les formations superficielles, plus épaisses, ne sont pas encore saturées. Ce n'est que lorsque, d'amont en aval, les surfaces saturées rejoignent le bas du versant que l'ensemble du versant contribue aux écoulements de crue (Cosandey, 1994). La montée de crue est alors soudaine et rapide.

Ce type de fonctionnement est le même dans les trois bassins. Pourtant, le bassin de la Latte (pessière) présente un démarrage plus tardif des crues et un coefficient d'écoulement plus faible que le bassin en pelouse des Cloutasses, sans doute en relation avec des épaisseurs d'altérites un peu plus importantes.

**Relations pluies-débits et débits-débits** - Les relations pluies-débits établies pour le bassin de la Latte pendant la période pré-coupe vont servir de référence pour tenter de mesurer les perturbations des fonctionnement hydrologiques générés par la coupe. Dans le même but des relations entre les écoulements du bassin de la Latte et des bassins voisins seront établies.

Du fait des nombreux autres paramètres qui influencent les écoulements (stockage ou restitution progressive d'eau par les formations superficielles et les aquifères, valeur de l'évapotranspiration, précipitations sous forme neigeuse, fonte des neiges, interception par le couvert végétal, ...), les régressions entre les pluies et les débits mensuels ne sont pas très bonnes ( $R^2 = 0,583$ ). Une prise en compte plus globale de chacun des facteurs influençant les relations pluies-débits peut être réalisée en travaillant sur les données annuelles. La qualité des régressions entre les précipitations et les lames d'eau écoulées s'en trouve sensiblement améliorée (Figure 8), tout en restant insuffisante pour définir une tendance qui puisse être appliquée à d'autres périodes que la période d'observation considérée.

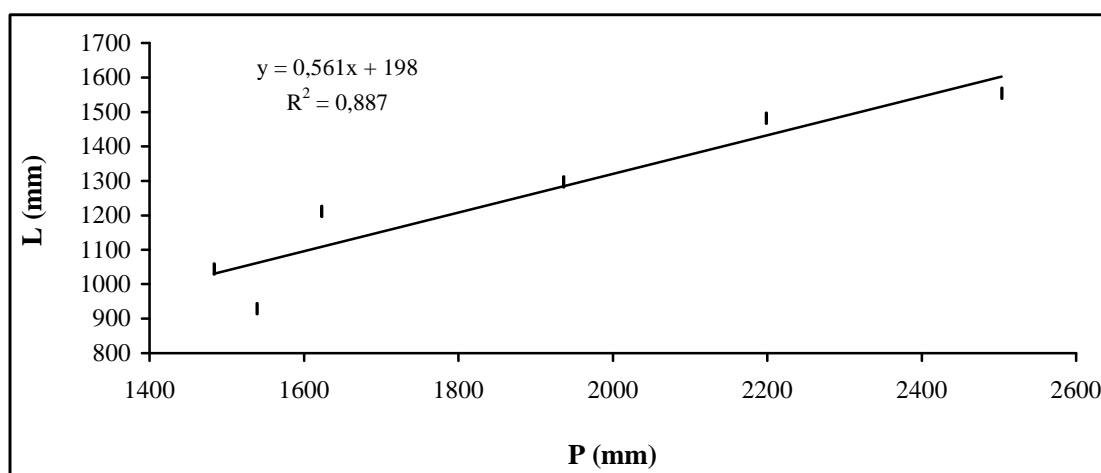


Figure 8 - Relation entre les lames écoulées annuelles et les précipitation annuelles pour le bassin versant de la Latte (1981-82 à 1986-87)

Par ailleurs, du fait que les réponses hydrologiques de chacun des bassins versants dépendent des conditions propres à ce bassin versant (volume des précipitations bien sûr, mais aussi remplissage des aquifères, état du couvert végétal, ...), les régressions entre les lames d'eau journalières écoulées par les bassins versants sont de qualité moyenne ( $R^2 = 0.790$ ). Le traitement de données mensuelles conduit à une amélioration sensible du coefficient de corrélation (Figure 9).

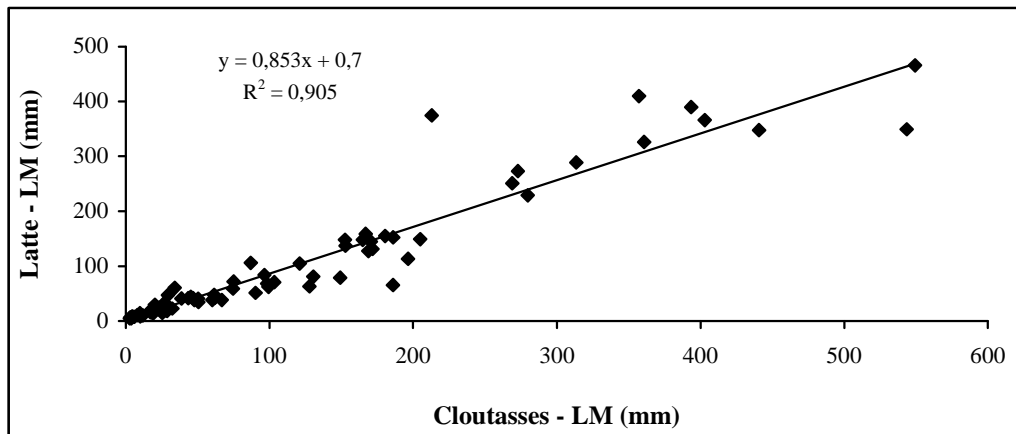


Figure 9 - Relation entre les lames d'eau écoulées mensuelles des bassins versants de la Latte et des Cloutasses de juillet 1981 à juin 1987

### Modalités de la coupe forestière

Les travaux de coupe ont été réalisés par un exploitant privé, selon les modalités habituelles, sans précautions particulières pour l'environnement. Les engins ont emprunté les chemins forestiers et créé de nouvelles pistes, qu'ils ont défoncées profondément, mais sans modifier la topographie. Le passage des engins de débardage a provoqué la formation d'ornières dont la profondeur est généralement restée limitée, du fait de la présence de blocs de roche saine. Ne pouvant plus passer dans des chemins devenus impraticables, les tracteurs ont dû circuler directement à travers bois, provoquant la formation d'une ravine. Les arbres abattus ont été ébranchés et les résidus d'exploitation laissés sur place.

Les travaux ont commencé à la fin de l'été 1987, sur environ 35% de la surface totale du bassin. Ils ont été poursuivis durant l'été et le début de l'automne 1988. La surface traitée est ainsi passée à 65% de la surface du bassin. La dernière phase d'abattage des arbres, menée en 1989, a porté à 80% la part coupée de la surface du bassin versant. L'évacuation des grumes achevée, les branchages laissés sur place ont été mis en andains, selon les courbes de niveau. Le reboisement effectué en bandes disposées selon les courbes de niveau, utilise diverses essences résineuses, l'épicéa restant dominant.

Au moment où la coupe est achevée, soit à l'automne 1989, la couverture végétale du bassin est faible, mais les sols sont en grande partie recouverts de branchages et ne présentent que peu de surfaces non protégées. Les chemins et la ravine provoquée par la coupe et leurs abords immédiats, sont en voie de recolonisation rapide.

### Impact de la coupe sur les écoulements

#### Principe de l'étude

Pour étudier le rôle de la végétation, et plus particulièrement de la végétation forestière sur les débits extrêmes, deux approches sont utilisées :

- une première approche consiste à comparer les valeurs des variables hydrologiques mesurées après la coupe avec les valeurs déduites de équations établies avant la coupe. Cette démarche est également utilisée dans les études menées dans les bassins du Réal Collobrier (§ 3) ;

- par ailleurs, afin de pouvoir, d'une part, apprécier le fonctionnement hydrologique sur la période référence (1981-87) à travers un lissage des variations dans le temps de la relation entre les variables considérées et, d'autre part, visualiser à la fois la tendance ainsi définie et les écoulements effectivement réalisés au cours des années ultérieures, nous avons utilisé la méthode du double cumul.

Ajoutons que des modélisations pluies-débits ont été menées dans le cadre du programme FOREX (Marc et al., 2000). Elles ont utilisé deux modèles : GRHUM développé par le *Cemagref* et TOP MODEL. Les résultats de ces travaux ne seront que rapidement évoqués, car ils apportent peu d'informations sur les problèmes traités dans le présent rapport.

## Impact de la coupe sur les écoulements annuels

Si on compare les écoulements annuels des bassins avant et après la coupe forestière, on observe que les écoulements des bassins de la Latte et des Cloutasses présentent un écart net avant la coupe, et se confondent après. En revanche, la comparaison avec le bassin de la Sapine donne des résultats beaucoup moins nets (Figure 10).

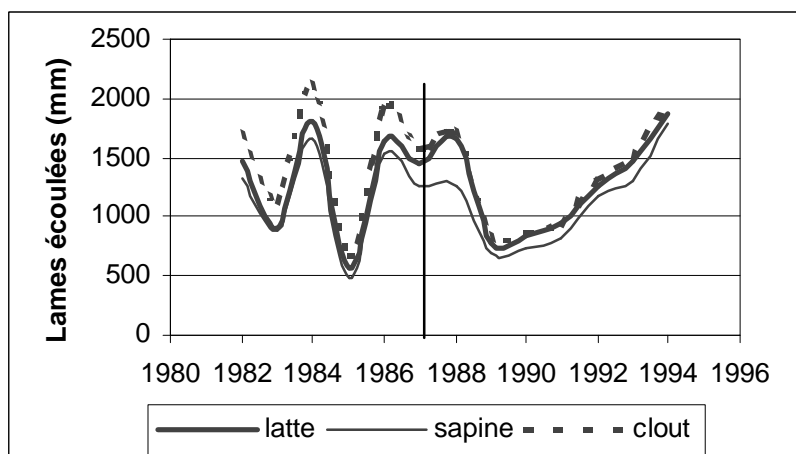


Figure 10 - Ecoulements comparés des bassin de la Latte, des Cloutasses et de la Sapine avant et après la coupe

La tendance à une modification des écoulements du bassin de la Latte après la coupe apparaît également sur un graphique de double cumul entre les débits du bassin de la Latte et ceux du bassin de référence des Cloutasses (Figure 11).

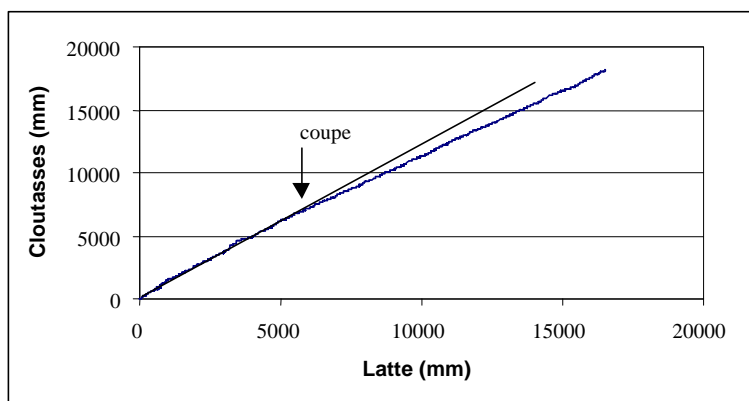


Figure 11 - Double cumul des lames d'eau écoulées mensuelles des bassins versants de la Latte et des Cloutasses sur la période juillet 1981 - décembre 1998

Si, à titre de contrôle, on mène la même comparaison à partir des données du bassin de la Sapine (hêtraie), on obtient des résultats semblables, mais moins marqués.

Par ailleurs, les comparaisons entre les écoulements mesurés après la coupe et ceux prévus à l'aide des régressions établies à partir des données recueillies avant la coupe fournissent les résultats portés dans le Tableau 3.

Régression utilisée	Augmentation des débits constatés pour la période 1987-94
LAC Latte - PAC Latte $y = 0,655x + 75,0$ ; $R^2 = 0,9993$	+ 5,41 %
LJC Latte - LJC Cloutasses $y = 0,849x + 57,0$ ; $R^2 = 0,9996$	+ 11,52 %
LMC Latte - LMC Cloutasses $y = 0,849x + 55,8$ ; $R^2 = 0,9996$	+ 12,69 %
LJC Latte - LJC Sapine $y = 1,069x + 1,0$ ; $R^2 = 0,9996$	+ 9,66 %
LMC Latte - LMC Sapine $y = 1,069x - 0,9$ ; $R^2 = 0,9996$	+ 9,59 %

LAC : lames d'eau écoulées annuelles cumulées. PAC : précipitations annuelles cumulées.

LJC : lames d'eau journalières cumulées. LMC : lames d'eau mensuelles cumulées.

Tableau 3 - Estimations de la modification des écoulements annuels du bassin versant de la Latte en relation avec la coupe des épicéas

Toutes les régressions mettent en évidence une augmentation des écoulements annuels à la suite de la coupe. La faiblesse de l'impact de la coupe indiquée par la régression entre les lames d'eau écoulées et les précipitations du bassin de la Latte montre les limites de cette régression qui intègre mal l'ensemble des facteurs intervenant dans la relation pluies-débits. Les régressions entre les lames d'eau écoulées par des bassins versants voisins sont, à cet égard, beaucoup plus satisfaisantes. Sur la période 1987-94, les écoulements auraient donc subi une augmentation comprise entre 9,6 et 12,7%. Notons que la modélisation par le modèle GRHUM a donné une valeur proche de 10% (Marc et al., 2000). TOP MODEL, en revanche, s'est révélé mal adapté aux conditions des bassins versants du Mont-Lozère. Par ailleurs, des études portant sur les seuls bilans aboutissent à des résultats du même ordre (Cosandey, 1993 ; Didon-Lescot, 1996). Des approches par modélisation (GR) parviennent à des conclusions similaires (Cognard-Plancq et al., soumis).

Si l'on cherche à préciser ces résultats, on peut travailler non plus sur les lames d'eau écoulées mais sur les déficits d'écoulement des bassins versants, ce qui permet d'inclure le facteur précipitations dans l'analyse des fonctionnements hydrologiques.

Une comparaison entre les déficits d'écoulement des bassins de la Latte et des Cloutasses montre nettement que les déficits d'écoulement annuels du bassin de la Latte ont subi une nette diminution après la coupe des épicéas. Il est évidemment tentant de relier cette diminution à une réduction de l'évapotranspiration. Les trois dernières années après la coupe (1995-98) montrent un redressement de la courbe (Figure 12).

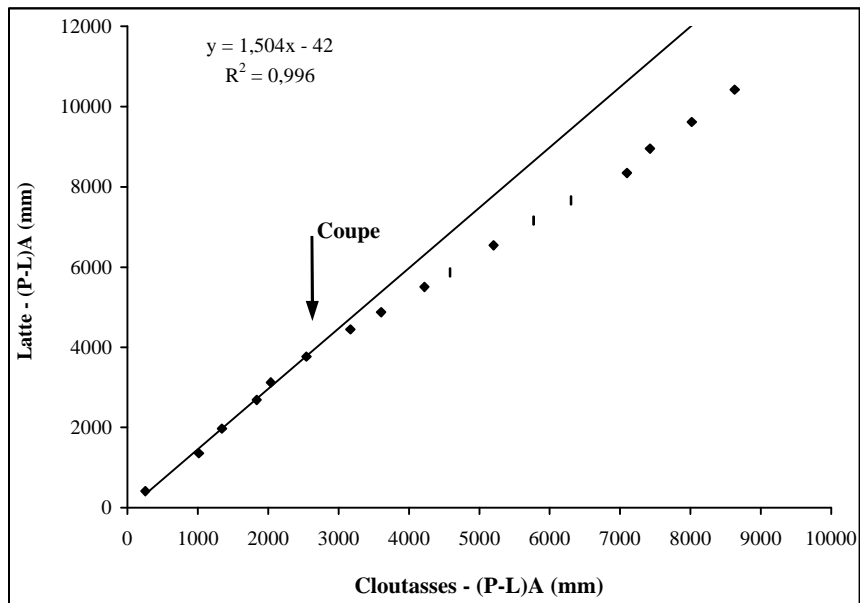


Figure 12 - Double cumul des déficits d'écoulement annuels des bassins versants de la Latte et des Cloutasses sur la période juillet 1981 - juin 1998

Les droites de régression portées sur les figures sont établies pour la période d'observation avant la coupe des épicéas du bassin de la Latte (1981-87).

Si pourtant, à titre de contrôle, on mène la même comparaison sur les bassins des Cloutasses et de la Sapine (tous les deux non modifiés) on trouve aussi une modification de la relation entre les deux bassins, au-delà de la période qui correspond à celle de la coupe sur la Latte (Figure 13).

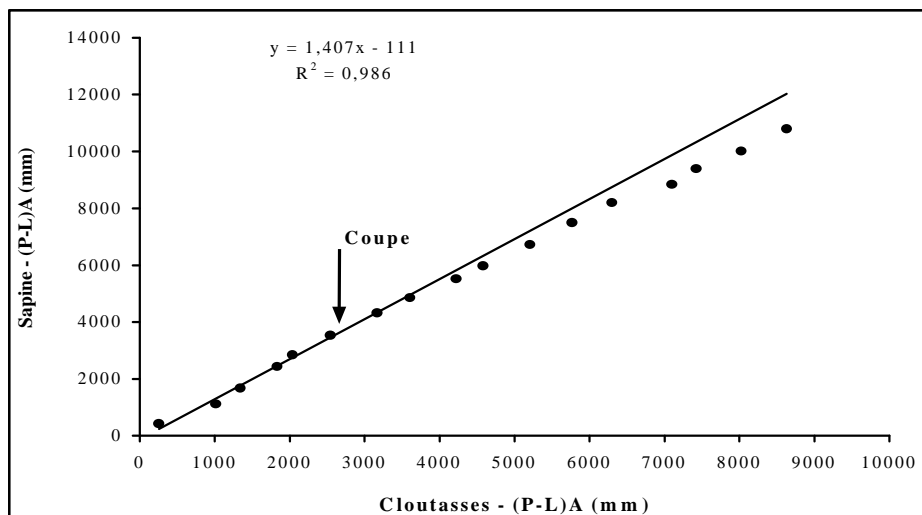


Figure 13 - Double cumul des déficits d'écoulement annuels des bassins versants de la Sapine et des Cloutasses sur la période juillet 1981 - juin 1998

Cette anomalie peut être attribuée à une discontinuité d'origine météorologique sur la mesure des précipitations des Cloutasses, sans qu'il soit possible d'avancer d'explication.

En conséquence, la comparaison du bassin versant de la Latte avec celui de la Sapine fournit des écarts moins grands que celle avec les Cloutasses (Figure 14).

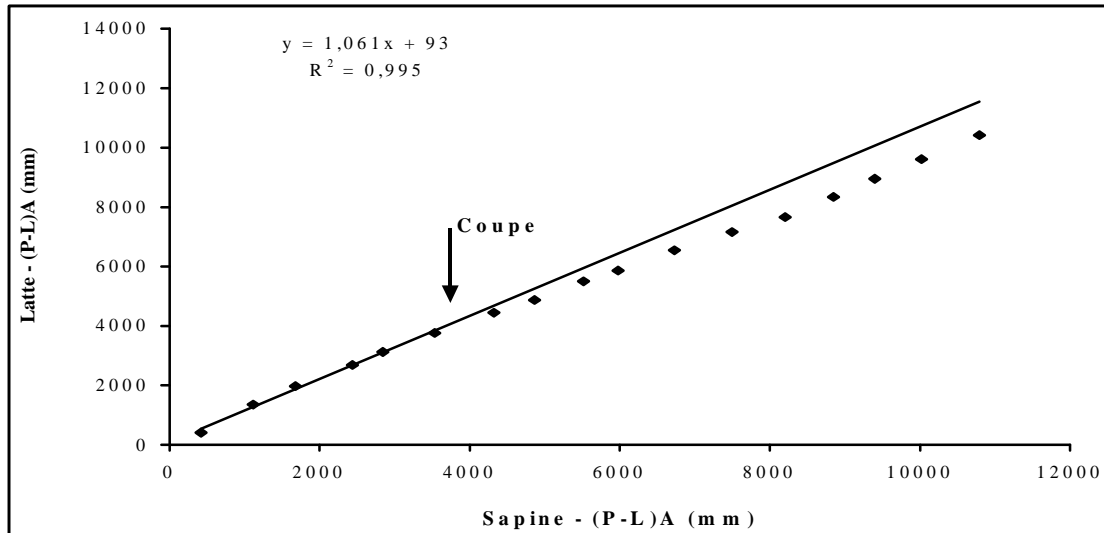


Figure 14 - Double cumulé des déficits d'écoulement annuels des bassins versants de la Latte et de la Sapine sur la période juillet 1981 - juin 1998

#### Impact de la coupe sur les écoulements de crue

**Pointes de crue** - En traitant les crues les plus violentes (48 pointes de crue sélectionnées sur 16 années d'observation), Lavabre a déterminé les débits pour les périodes de retour annuelle et décennale (Lavabre et al., 1999). Les débits annuels (selon la formule de Hazen) s'établissent à 10 l/s/ha pour le bassin de la Latte, 13,5 l/s/ha pour le bassin de la Sapine et 14,5 l/s/ha pour celui des Cloutasses. Les débits décennaux s'élèvent à 31,5 l/s/ha pour le bassin de la Latte, 30 l/s/ha pour celui des Cloutasses et 25,5 l/s/ha pour celui de la Sapine.

La comparaison des débits mesurés aux stations implantées sur les trois bassins versants pour deux épisodes de fortes crues, celui du 3 au 6 novembre 1984 et celui du 5 au 8 novembre 1998, ne permet pas de mettre en évidence une modification sensible du comportement du bassin de la Latte en fonction de la coupe des épicéas (Lavabre et al., 1999). Lors de l'épisode de novembre 1984 ( $P = 308$  mm en 72 h à la station de la Vialasse), après une réponse initiale moins marquée que celle des deux autres bassins, le bassin de la Latte (pourtant boisé) présente le plus fort débit spécifique de pointe : 20,6 l/s/ha, contre 18 l/s/ha pour celui des Cloutasses et 16,4 l/s pour celui de la Sapine. En novembre 1994 ( $P = 444$  mm), où la réponse du bassin de la Latte est encore très légèrement retardée par rapport aux réponses des deux autres bassins, les débits de pointe atteignent respectivement 31 l/s/ha pour le bassin de la Latte, 27,8 l/s/ha pour celui des Cloutasses et 25,4 l/s/ha pour celui de la Sapine.

On notera cependant que la crue de novembre 1994 est survenue bien après la coupe, au cours d'une année (1994-95) dont il a été montré par ailleurs (Martin et al., 2000) qu'elle marquait peut-être le retour du bassin de la Latte à un fonctionnement semblable à celui qu'il connaissait avant la coupe.

**Volumes de crue** - Pour compléter et affiner l'analyse, nous avons appliqué la méthode du double cumulé aux lames d'eau écoulées journalières des bassins de la Latte et des Cloutasses correspondant à des périodes de très forte crue, de crue moyenne, et enfin d'étiage. A titre de contrôle, une comparaison avec le bassin de la Latte a également été conduite.

En ce qui concerne les très fortes crues, ont été pris en compte les jours où le bassin des Cloutasses a écoulé une lame d'eau supérieure à 30 mm (Figure 15). Des écoulements de cette importance se produisent en moyenne moins de 8 fois par an, mais assurent près du quart des écoulements.

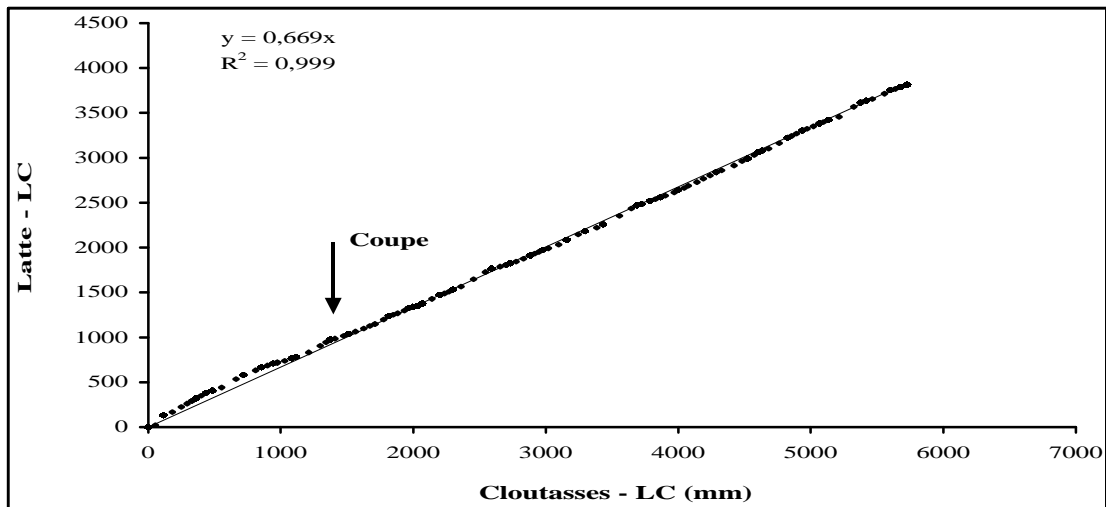


Figure 15 - Double cumulé des lames d'eau écoulées par les bassins de la Latte et des Cloutasses lors des très fortes crues

Le traitement des données effectué en extrapolant à la période après coupe, les données recueillies avant la coupe (voir *supra*), indiquerait une diminution des débits de crue pour la période 1987-94 de l'ordre de 9.5%. les résultats sont très proches si on mène la comparaison avec le bassin de la sapine.

Une étude du même type, menée sur des débits supérieurs à 20 mm/jour dans le bassin de la Latte, aboutit à des conclusions identiques (Cosandey et al., 2000).

D'après ces résultats, la coupe des épicéas du bassin versant de la Latte n'aurait pas produit d'augmentation des écoulements lors des fortes crues. Cette observation, qui serait surprenante sur d'autres terrains (Martin et Lavabre, 1997), s'explique ici par la forte perméabilité des sols et les processus spécifiques de formation des crues (Cosandey et al., 1999). La coupe semblerait même avoir eu pour conséquence une diminution des débits en hautes eaux sur la période 1987-94. Mais une telle évolution serait bien surprenante, et les limites de la méthode d'investigation ont déjà été évoquées.

Il est à noter par ailleurs que les travaux de Cognard-Plancq et al. (soumis) aboutissent aux conclusions inverses, puisque d'après les résultats auxquels ils aboutissent, la coupe de la forêt aurait provoqué une augmentation des débits de crue de 9 à 13%. Toutefois l'approche par modélisation globale des relations pluies-débits utilisée ne permet pas de distinguer fortes et faibles crues, et il est vraisemblable que l'impact très fort sur les faibles crues a entraîné vers une tendance à l'augmentation des écoulements l'ensemble des crues.

#### Impact de la coupe sur les moyennes et basses eaux

L'étude des moyennes et basses eaux a porté, pour la relation entre les bassins de la Latte et des Cloutasses, sur les jours où ce dernier a écoulé une lame d'eau inférieure à 5 mm (Figure 16), ce qui représente 80% du temps et 34% des volumes écoulés.

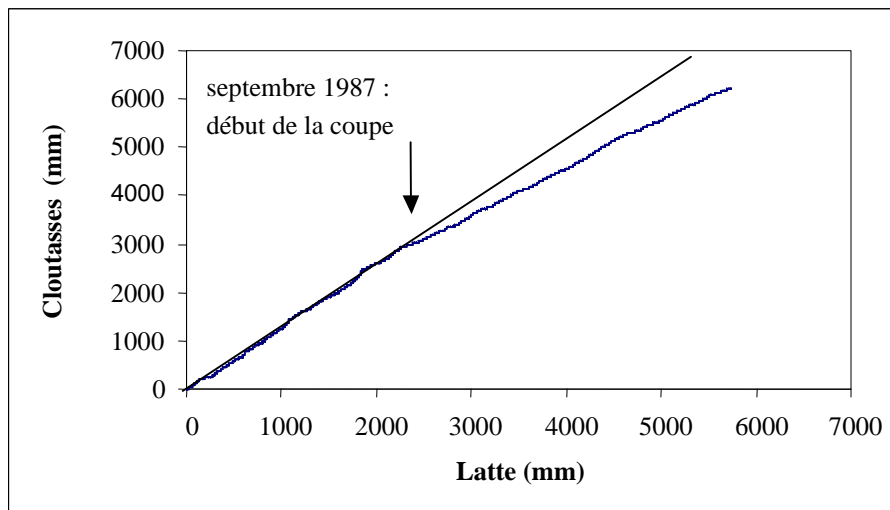


Figure 16 - Double cumulé sur les écoulements des bassins de la Latte et des Cloutasses pour les écoulements inférieurs à 5 mm/jour

Avant la coupe, les valeurs des deux bassins étaient pratiquement confondues. A partir de la coupe, celles du bassin de la Latte manifestent une augmentation relative évaluée à près du quart par Cosandey et al. (2000) et comprise entre 11 et 20% pour Martin et al. (2000).

Si, comme semblent le prouver certaines études (Cosandey *et al.*, 2001) l'interception est le facteur essentiel de sur-évaporation des milieux forestiers, il n'est pas étonnant que ce soit sur les faibles valeurs de l'écoulement (faibles valeurs relatives ; dans d'autres conditions climatiques, 5 mm/jour représentent déjà un écoulement conséquent) que la modification liée à la réduction de la forêt soit particulièrement sensible.

## Conclusion

La comparaison des données du bassin versant de la Latte avec celles du bassin des Cloutasses a permis de dégager les grandes tendances de la modification des comportements hydrologiques de ce bassin versant à la suite de la coupe à blanc qu'il a subie de 1987 à 1989. L'utilisation des données du bassin de la Sapine, moins bien étudié et moins proche, a pourtant permis de préciser les limites de validité des résultats.

La coupe a provoqué un accroissement des écoulements annuels que l'on peut estimer entre 10 et 15% sur la période 1987-94. Avec la revégétalisation progressive du bassin versant, l'impact de la coupe s'est réduit à cet égard au bout de 7 à 8 ans.

En dépit de la mise à nu des sols, les écoulements de crue n'ont pas subi d'augmentation perceptible. Même sous les averses les plus violentes, la forte perméabilité des sols est suffisamment élevée pour empêcher le développement d'un ruissellement superficiel généralisé sur les versants. Celui-ci ne peut se déclencher qu'après saturation totale des profils, donc pour des pluies extrêmement abondantes pendant lesquelles l'interception d'eau par le couvert végétal ne peut jouer qu'un rôle relativement modeste. Lors des crues les plus fortes, les différences de comportement entre les bassins versants sont surtout déterminées par la disposition du réseau hydrographique et par la capacité de stockage d'eau des altérites et des sols, qui ne sont pas modifiés par la coupe de la forêt.

Il en est tout autrement pour les écoulements « moyens » (inférieurs à 5 mm/jour), qui ont été fortement augmentés par la coupe. Le taux d'augmentation est certainement compris entre 15 et 20%. Cette forte augmentation est attribuée à une réduction importante des pertes par interception à la suite de la disparition de la forêt.

Du fait des incertitudes sur les mesures et des limites des méthodes d'investigation (prise en compte généralement insuffisante du facteur précipitations), les résultats sont parfois contradictoires. Ainsi les comparaisons avec le bassin versant de la Sapine indiquent-elles, pour les dernières années d'observation, d'une

part, le retour à des lames d'eau écoulées annuelles à un niveau correspondant au fonctionnement antérieur à la coupe et, d'autre part, le maintien d'une augmentation des écoulements en basses eaux. Les recherches devront s'attacher à lever ces contradictions afin d'affiner les estimations de l'impact de la coupe.

## Références

- Cognard-Plancq A.L., Marc V., Didon-Lescot J.F., Normand M., soumis - The role of forest cover on streamflows within submediterranean mountain watersheds : a modelling approach. *Journal of Hydrology*.
- Cosandey C., 1993 - Conséquences hydrologiques d'une coupe forestière. Le cas du bassin de la Latte (Mont-Lozère, France). In : *L'eau, la terre et les hommes*, Hommage à René Frécaut, Griselin M. édit., Presses Universitaires de Nancy, pp 355-363.
- Cosandey C., 1994 - Formation des crues "cévenoles" dans des bassins élémentaires du Mont Lozère. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 7, pp 377-393.
- Cosandey C., avec la collaboration de Didon-Lescot J.F., 1999 - Conditions de genèse des crues "cévenoles" dans des bassins élémentaires de moyenne montagne méditerranéenne. *Actes du séminaire "Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne"* (Draix, Le Brusquet, Digne, 1997), Cemagref-Éditions, coll. Actes de colloques, Mathys N. édit., pp 29-40.
- Cosandey C., avec la collaboration de Martin C. et Didon-Lescot J.F., 2000 - *Forêt et écoulements : étude des conséquences d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel, les crues et les étiages*. Rapport sectoriel pour le rapport final du contrat européen FOREX, 34 p.
- Cosandey C., Robinson M., 2000 - *Hydrologie continentale*. Edit. Armand Colin, 360 p.
- Cosandey C., Didon-Lescot J.F., Martin C., 2001 - Forêt et écoulements : Etude des processus responsables des modifications du bilan annuel à l'occasion d'une coupe forestière. In : *Eaux sauvages, Eaux domestiquées*, Livre en hommage à Lucette Davy, Publications de l'Université de Provence, Prosper-Laget V. édit., pp 155-176 .
- Didon-Lescot J.F., 1996 - *Forêt et développement durable au Mont-Lozère. Impact d'une plantation de résineux, de sa coupe et de son remplacement, sur l'eau et sur les réserves minérales du sol*. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, 161 p + bibliographie et annexes.
- Humbert J., Najjar G., 1992 - *Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone*. Edit. CEREG, Univ. Louis Pasteur - Strasbourg I, 85 p.
- Lavabre J., Martin C., avec la collaboration de Didon-Lescot J.F., 1999 - *Appréciation de l'impact des coupes forestières sur l'hydrologie et l'érosion des sols. Cas de la forêt d'Altefage (commune du Pont-de-Montvert - 48)*. Rapport à la DDAF de Lozère, Edit. Cemagref, Aix-en-Provence, 28 p.
- Marc V., Cognard-Plancq A.L., Cosandey C., Durand P., avec la collaboration de Martin C. et Didon-Lescot J.F., 2000 - *The impact of forests and silvicultural practices upon the extreme flows of rivers (FOREX). Participant P4 report*. Rapport final pour le contrat européen FOREX, 32 p + annexes (30 p).
- Martin C., Lavabre J., 1997 - Estimation de la part du ruissellement sur les versants dans les crues du ruisseau du Rimbaud (massif des Maures, Var, France) après l'incendie de forêt d'août 1990. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 42, n° 6, pp 893-907.
- Martin C., Didon-Lescot J.F., 2000 - Le rôle du couvert végétal sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants expérimentaux du Mont-Lozère. In : *Etude intégrée du bassin versant du Haut-Tarn appliquée à la gestion des ressources en eau et des fonctionnements hydrobiologiques : contribution de l'UMR "ESPACE" à la connaissance des fonctionnements hydrologiques et hydrochimiques*, Rapport intermédiaire pour le Parc national des Cévennes et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, pp 34-53.

## LES BASSINS DU RÉAL COLLOBRIER

Jacques Lavabre \*, Claude Martin \*\* et Nathalie Folton \*

\* Cemagref, B.P. 31, Le Tholonet, F-13612 AIX-EN-PROVENCE cedex 1, France

E-Mail : [jacques.lavabre@cemagref.fr](mailto:jacques.lavabre@cemagref.fr) et [nathalie.folton@cemagref.fr](mailto:nathalie.folton@cemagref.fr)

\*\* UMR 6012 "ESPACE", Equipe GVE, Département de Géographie, 98 Boulevard Edouard Herriot, BP 3209, F-06204 NICE cedex 3, France

E-mail : [martincl@infonie.fr](mailto:martincl@infonie.fr) ]

## Conditions de l'étude

Les bassins du Réal Collobrier (Figure 17) sont situés dans le massif des Maures (Sud-Est de la France) à proximité de la mer. Ce massif cristallin présente différentes roches métamorphiques : gneiss, micaschistes phyllades. Onze bassins sont instrumentés, présentant des caractéristiques géologiques, pédologiques et de végétation différentes.

Les suivis hydrologiques ont débuté en 1966. En août 1990, l'un des bassins, celui du Rimbaud, a été parcouru par un incendie qui a ravagé au total 8400 ha de maquis et de forêt dans la partie occidentale du massif des Maures. L'incendie du bassin du Rimbaud a permis de mener des recherches sur le rôle hydrologique de la végétation, notamment à travers une comparaison avec le bassin voisin non perturbé du Valescure. Ce sont les résultats de ces travaux (Lavabre *et al.*, 1997, 1999, 2000, 2001) qui sont présentés ici.

## Dispositif expérimental

Le bassin versant du Rimbaud (1.5 km<sup>2</sup>) est situé sur des gneiss massifs, relativement homogènes, qui apparaissent en surface sur quelques % de la surface totale du bassin. Les formations superficielles, d'une épaisseur moyenne de 30 cm, recouvrent des roches altérées mais cohérentes. Elles se composent pour l'essentiel de sols sableux, très caillouteux, de type rankers. Avant l'incendie, la couverture végétale était essentiellement formée d'un maquis à bruyères arborescentes et arbousiers, associé à de jeunes pins maritimes et des chênes lièges peu développés.

Le bassin versant du Valescure occupe une surface de 9.3 km<sup>2</sup>. Le substrat, moins homogène que celui du Rimbaud, est constitué de gneiss et de micaschistes, avec quelques bancs d'amphibolites. Les formations superficielles, globalement plus épaisses que celles du Rimbaud, varient avec la lithologie. La végétation est calcifuge : maquis, chênes lièges et châtaigniers.

Les stations de mesure des débits sont équipées de déversoirs triangulaires garantissant une bonne précision de la mesure dans toute la gamme de débits, et d'enregistrement en continu de la hauteur d'eau. la pluviométrie est connue par intégration des mesures de pluviomètres placés sur et autour du bassin.

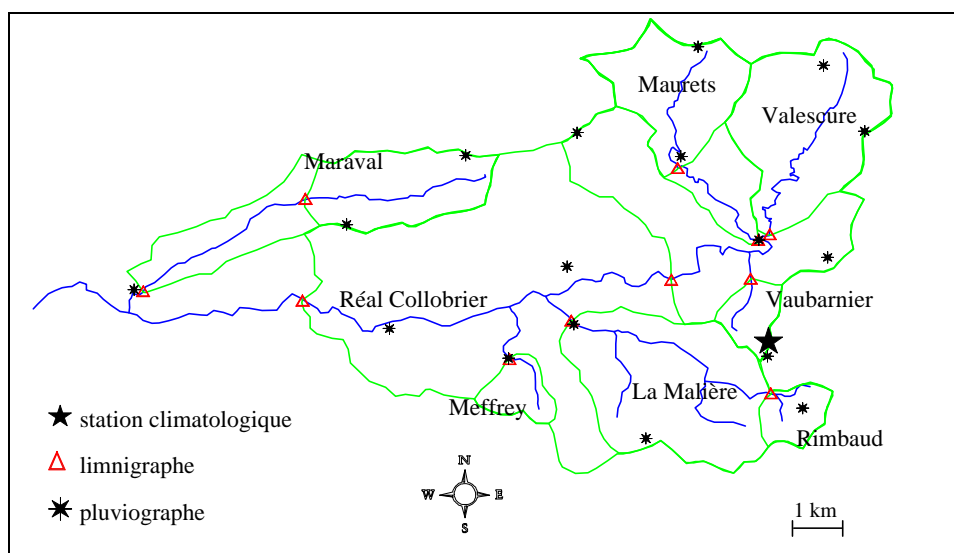


Figure 17 - Les bassins du Réal Collobrier

## Conditions climatiques

Le climat est de type méditerranéen humide. Les températures moyennes, de l'ordre de 12°C, oscillent de plus de 4°C en janvier à moins de 21°C en juillet. La pluviométrie annuelle moyenne des deux bassins est comparable, de l'ordre de 1200 mm (1135 mm sur la période août 1967-juillet 1997 pour le bassin du

Rimbaud) ; la variabilité interannuelle est importante, avec des valeurs extrêmes de 536 mm en 1988-89 et de 1835 mm en 1976-77. La pluie décennale journalière est de 150 mm. L'écoulement annuel moyen, avant incendie, était de 683 mm pour le Rimbaud et 456 mm pour le Valescure (période 1968-1989).

Sur la période août 1968 - juillet 1990, le bassin versant du Valescure a reçu des précipitations annuelles moyennes de 1207 mm (écart-type : 368 mm) et l'écoulement annuel moyen a atteint 456 mm (écart-type : 271 mm).

La distribution mensuelle des précipitations est tout à fait classique sous climat méditerranéen : sécheresse marquée des mois d'été et, au contraire, hiver et printemps généralement pluvieux.

### Fonctionnement hydrologique du bassin du Rimbaud

**Les écoulements annuels** sont relativement abondants (660 mm en moyenne – Tableau 4), bien que le ruisseau présente quasi systématiquement des étiages nuls pendant une partie de l'été. Le déficit d'écoulement annuel, calculé comme la différence entre la pluviométrie et l'écoulement annuels, n'est pas très élevé. Il est de plus relativement stable, comme en témoigne son coefficient de variation (écart-type/moyenne) qui est de 15%. Ce comportement indique une faible capacité de stockage du bassin, ce qui est cohérent avec la minceur des formations superficielles et la massivité des roches.

	$P_A$	$L_A$	$D_A$
Moyenne (mm)	1154	660	494
Écart-type (mm)	357	337	75
Valeurs extrêmes (mm)	536 - 1845	105 - 1234	390 - 690

$PA$  : pluie annuelle.  $LA$  : écoulement annuel.  $DA$  : déficit d'écoulement annuel (=  $PA - LA$ )

Tableau 4 - Pluviométrie, écoulement et déficit d'écoulement annuels sur le bassin versant du Rimbaud d'août 1967 à juillet 1990 (année hydrologique : août à juillet)

En ce qui concerne les écoulements, on remarque classiquement :

- des déficits relativement élevés en début d'année hydrologique, en relation avec la recharge souterraine ;
- une bonne correspondance avec la pluviométrie à partir du mois de janvier.

Sur la période 1967-1990, le *débit de pointe de crue* décennal, estimé à partir d'une distribution de fréquence empirique, en utilisant la formule de Hazen (1930), s'établit à 7 m<sup>3</sup>/s environ, soit 4,7 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Cette violence des écoulements est une réponse aux intensités des pluies, mais aussi aux caractéristiques du bassin versant (massivité des roches, minceur des formations superficielles et caractères morphométriques favorables)

### L'incendie d'août 1990

En août 1990, un incendie a dévasté 8400 ha dans la partie occidentale du massif des Maures. Le feu a parcouru, selon les estimations, de 74% à 84% du bassin versant du Rimbaud. Seule l'extrémité orientale du bassin et une châtaigneraie située dans la partie aval ont été épargnées.

A l'automne 1991, l'Office National des Forêts a procédé, dans la partie inférieure du bassin, au traitement d'une dizaine d'hectares de terrain incendié. Un bulldozer a raboté les versants pour ne plus laisser que le sol à nu. Les arbres morts, des blocs rocheux, mais aussi de la terre ont été déversés dans le lit des ruisseaux. Ces travaux ont été suivis d'un sous-solage qui a préparé une replantation en résineux. Par ailleurs, au cours de l'hiver 1991-92, les arbres morts et la végétation en cours de régénération ont été détruits (sauf les chênes lièges) sur près de 70 ha, à l'aide de tracteurs gyrobroyeurs ou à la tronçonneuse.

### L'impact de l'incendie sur les écoulements

#### Principe général de la démarche

Les conséquences du feu sur le comportement hydrologique du bassin versant du Rimbaud sont appréhendées en comparant les écoulements observés sur le bassin versant après incendie avec les valeurs des

écoulements calculées pour la même période à partir de relations établies avant incendie. Le calcul des écoulements est basé soit sur l'information pluviométrique disponible sur le bassin, soit sur les écoulements d'un bassin versant témoin. Le bassin versant du BVRE du Réal Collobrier présentant les meilleures garanties pour servir de témoin est celui du Valescure. Toutefois ce bassin présente un substratum associant aux gneiss, des roches plus fissiles et/ou plus altérables : des micaschistes et des amphibolites. De plus, en relation avec la dissection du relief, la décompression des roches est ici assez forte. La combinaison de ces éléments explique que l'écoulement annuel moyen n'atteigne pas 40% de la pluviométrie, alors qu'il approche 60% sur le bassin du Rimbaud.

Les résultats ainsi obtenus font l'objet d'une analyse critique, à travers la confrontation – menée selon la même approche – des écoulements du bassin versant témoin avant et après l'incendie.

**Les régressions entre les données annuelles** - Cette approche ne fournit qu'une image extrêmement lissée de la réalité hydrologique, laquelle résulte de l'intervention de nombreux processus (interception des pluies par la végétation, évaporation et évapotranspiration, formation des écoulements de crue, etc.) dont la combinaison génère des phénomènes non reproductibles. Les enseignements possibles sont donc limités et se réduisent en fait à un bilan numérique. Au demeurant, ce type d'approche exige beaucoup de prudence. A titre d'exemple, le tableau 5 présente les écarts entre les écoulements observés et ceux calculés en utilisant deux équations de régression établies à partir de la même information.

Années	1990-91	1991-92	1992-93	1993-94	1994-95	1995-96	1996-97
Régression 1 <sup>α</sup>	-111	-143	-97	1	22	-8	71
Régression 2 <sup>αα</sup>	-50	-110	-38	60	84	-102	-102

<sup>α</sup> : régression 1 :  $La = 0.7104 Pa - 4011,2$  ;  $R^2 = 0.929$

<sup>αα</sup> : régression 2 :  $La = 0.0344 (Pa/100)^{2,44}$  ;  $R^2 = 0.922$

La : écoulement annuel. Pa : pluviométrie annuelle

Tableau 5 - Bassin versant du Valescure : écarts (mm) entre les écoulements observés et ceux calculés en utilisant deux équations de régression établies à partir de la même information avant incendie (août 1968 - juillet 1990)

Il est clair que l'interprétation d'une différence de quelques dizaines de mm serait, pour le moins, hasardeuse.

Les équations de régression sont établies sur la période commune de suivi des bassins versants avant incendie : août 1968 - juillet 1990 (Tableau 6). Les coefficients de détermination élevés témoignent de la qualité des liaisons.

Liaisons	y	x	a	b	R <sup>2</sup>
Écoulement Rimbaud - Pluie Rimbaud	La(r)	Pa(r)	0.895	- 363	0.97
Écoulement Rimbaud - Pluie Valescure	La(r)	Pa(v)	0.887	- 398	0.93
Écoulement Rimbaud - Écoulement Valescure	La(r)	La(v)	1.14	+ 161	0.91
Écoulement Valescure - Pluie Valescure	La(v)	Pa(v)	0.710	- 401	0.93
Pluie Rimbaud - Pluie Valescure	Pa(r)	Pa(v)	0.967	0	0.96

y : variable expliquée. x : variable explicative. a et b : termes de la relation  $y = ax + b$ . R<sup>2</sup> : coefficient de détermination.

La : écoulement annuel (mm). Pa : pluviométrie annuelle (mm). (r) : bassin versant du Rimbaud. (v) : bassin versant du Valescure.

Tableau 6 - Différentes liaisons de la forme  $y = ax + b$

**La modélisation des écoulements** - Les modèles utilisés appartiennent à la famille GR développée au Cemagref (Michel et al., 1991). Il s'agit des modèles GR2, pour le calcul des débits mensuels et GR3, pour le calcul des débits journaliers et des débits au pas de temps de quelques minutes. Ce sont des modèles conceptuels empiriques qui prennent en compte deux réservoirs (un réservoir S soumis à l'évapotranspiration et un réservoir R d'eau gravitaire), plus 2, ou 3, paramètres optimisés.

## Impact de la coupe sur l'abondance des écoulements

Les équations de régression, comme les résultats des modélisations, permettent de calculer les variables expliquées sur la période de calage (août 1968 - juillet 1990) et sur la période après incendie (août 1990 - juillet 1997). Un exemple est donné pour les résultats obtenus à partir de la relation pluie-écoulement du Rimbaud (Figure 18).

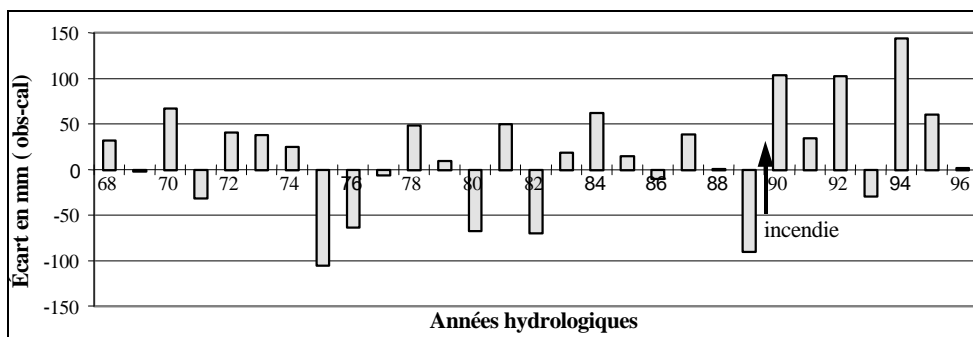


Figure 18 - Écarts entre les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud observés et calculés à partir de la relation pluie-écoulement du bassin du Rimbaud

Ce résultat, ainsi que ceux déduits des modèles GR montrent un supplément d'écoulement du bassin versant du Rimbaud. En se fondant sur ces analyses, on pourrait estimer à 100 mm l'ordre de grandeur du supplément d'écoulement durant les trois années après incendie (soit 10 à 15% de la pluviométrie annuelle). Toutefois les résultats peuvent être contradictoires dans les répartitions annuelles.

Au demeurant, si on étudie la relation pluie-écoulement pour le bassin versant du Valescure, on constate que ce bassin versant présente des déficits d'écoulement de l'ordre de 100 mm en 1990-91, 1991-92 et 1992-93 (Figure 19), alors qu'il n'a pourtant subi aucune perturbation.

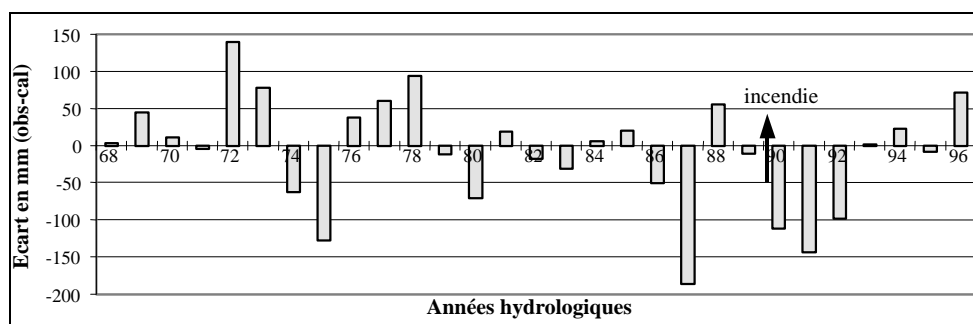


Figure 19 - Écarts entre les écoulements annuels du bassin versant du Valescure observés et calculés par la relation avec les pluies annuelles du bassin versant du Valescure

Ces écarts sont opposés à ceux du Rimbaud. Mais ils posent un problème d'ordre méthodologique, ou de stationnarité des séries. Comment en effet interpréter une succession de trois années déficitaires alors que le bassin n'a subi aucune modification ? On est conduit à se demander si, pendant cette période, le bassin du Valescure n'a pas accusé la sécheresse des années précédentes.

Il s'avère donc qu'en utilisant une série de régressions, en apparence toutes satisfaisantes, du moins à la lumière des coefficients de détermination, on aboutit à des résultats divergents, qui montrent la complexité de l'interprétation des résultats de la démarche entreprise.

La relation entre les écoulements et les pluies annuels du bassin versant du Rimbaud fait apparaître des suppléments d'écoulement après incendie - Ce résultat est conforme à la conception que nous pouvons avoir *a priori* de l'impact du feu. Mais les calculs s'appuient sur les données d'un seul pluviographe, qui plus est situé dans un milieu soumis à une très forte perturbation. Et si on néglige l'information pluviométrique recueillie sur le bassin versant du Rimbaud, l'analyse des écoulements conduite en s'appuyant sur la pluviométrie du bassin

versant témoin du Valescure, conclut à un impact nul de l'incendie. Les pluies du bassin versant témoin sont établies à partir des données de plusieurs pluviographes, lesquels se trouvent en outre situés dans un milieu qui n'a pas été perturbé. Il y a donc toute raison de croire en la fiabilité de la série pluviométrique.

Il semble en effet que la chronique pluviométrique du bassin versant du Rimbaud soit affectée d'une non-stationnarité. La pluviométrie annuelle de ce bassin apparaît souvent très déficitaire par rapport à la valeur calculée à partir de la pluviométrie du bassin du Valescure, mais cela est tout particulièrement net sur la période août 1990 - juillet 1996 (écart moyen de 100 mm). Des écarts inverses se sont produits sur la période août 1975 - juillet 1983.

Le pluviographe du Rimbaud ayant été remplacé à l'identique après sa destruction par l'incendie, quatre hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer la non-homogénéité de la chronique pluviométrique :

1. Les incertitudes sur les données des pluviographes.
2. L'hétérogénéité spatio-temporelle des pluies sur le bassin versant du Rimbaud.
3. L'hétérogénéité spatio-temporelle des pluies entre les bassins versants du Rimbaud et du Valescure.
4. La modification de l'environnement immédiat du pluviographe du Rimbaud : En détruisant la végétation, l'incendie a peut-être affecté le pouvoir de captation du pluviographe en provoquant une accélération du vent au sol. Selon cette hypothèse, la pluie réelle serait plus abondante que la pluie mesurée, ce qui réduirait proportionnellement les suppléments d'écoulement calculés.

Les données du pluviographe *Cemagref* du Rimbaud ont été comparées à celles d'un autre pluviographe implanté dans le même bassin (dans un secteur également incendié) dans le cadre du suivi de parcelles expérimentales de mesure de l'érosion. La comparaison a montré que les précipitations ne sont pas homogènes sur l'ensemble du bassin. Les écarts sont plus ou moins marqués selon les années. Mais la différence entre les deux appareils, mise en évidence avant l'incendie, s'est largement maintenue après celui-ci.

Conclure au sujet de l'influence de l'incendie sur les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud s'avère bien délicat. Les résultats sont dans la marge d'incertitude des relations utilisées, et la non-stationnarité apparente de la chronique pluviométrique du bassin du Rimbaud ne facilite pas les interprétations. Le travail s'oriente donc vers une exploitation plus fine, au pas de temps journalier, des données de la modélisation. L'information sera en outre complétée par le calcul des écoulements des bassins versants du Rimbaud et du Valescure à partir de la pluviométrie du bassin du Valescure.

La relation entre les écoulements des bassins versants du Rimbaud et du Valescure fait apparaître un supplément d'écoulement sur le bassin versant incendié durant les trois premières années après le feu. Cette observation est partagée avec Viné et al. (1999). Toutefois les écoulements du bassin témoin semblent être affectés d'une non-stationnarité (Figure 19) à laquelle pourraient être imputés les suppléments d'écoulement attribués au bassin versant incendié !

## Le comportement en crue

La question de la stationnarité de la chronique pluviométrique du Rimbaud se pose aussi pour l'étude des crues. Mais elle présente, dans ce cas, beaucoup moins d'acuité, étant donné la clarté des résultats (Figure 20, ci-dessous).

**Approche descriptive sur les seuls débits** - En 1990-91, le comportement du ruisseau du Rimbaud est devenu fortement impulsionnel, en relation avec le développement du ruissellement superficiel sur les versants (Martin et Lavabre, 1997). Le débit maximal a atteint 7.8 m<sup>3</sup>/s le 9 décembre, pour des précipitations ne présentant aucun caractère exceptionnel, ni par leur abondance (88.0 mm) ni par leur intensité (intensité maximale en 6 minutes de l'ordre de 40 mm/h). Un autre très fort débit a été observé le 23 novembre (5.5 m<sup>3</sup>/s). Les montées de crue ont souvent demandé moins de cinq minutes, et les décrues ont été elles-mêmes très rapides. Le caractère excessif pris par les réactions du cours d'eau aux précipitations s'explique par le ruissellement sur les versants mis à nu par l'incendie. L'année 1991-92 n'a connu qu'un seul épisode violent (3.6 m<sup>3</sup>/s, en octobre), mais plusieurs crues spectaculaires se sont encore produites en 1992-93 (7.7 m<sup>3</sup>/s en septembre ; 3.5 m<sup>3</sup>/s en octobre ; 4.3 m<sup>3</sup>/s en novembre). En 1993-94, le débit maximal a atteint 2.2 m<sup>3</sup>/s seulement. La reprise végétale est alors intervenue pour amortir la réponse des écoulements aux précipitations (taux de recouvrement des surfaces incendiées par les arbustes : 15% en août 1991, 30-35% en août 1992 et 45-50% en août 1993 – en s'appuyant pour partie sur les observations de Puech et al., 1994, et de Viné, 1997).

Les débits de pointe de crue les plus élevés de la période post-incendie ont été générés par des pluies d'un volume très modéré pour le terrain d'étude. Sur la Figure 20, qui met en relation les débits instantanés maximaux

relevés en automne et les précipitations en 24 h correspondantes, plusieurs crues après incendie s'individualisent nettement. Il apparaît, en particulier, que les débits de crue de fréquence décennale sont liés à des pluies en 24 h tout à fait courantes, de l'ordre de 80 mm alors que la pluie décennale en 24 h est estimée à 160 mm. De nombreux débits de crue après incendie se positionnent toutefois dans le nuage des points représentant les crues avant incendie.

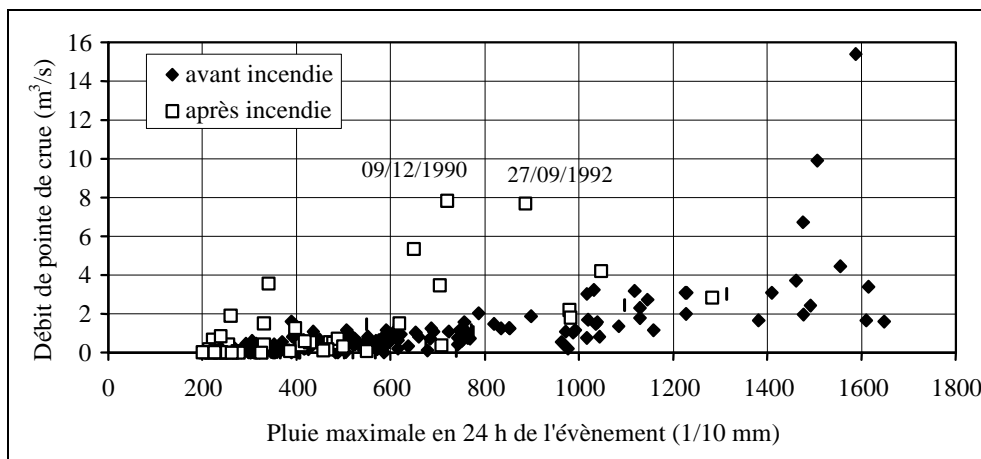


Figure 20 - Relations en automne (septembre, octobre et novembre) entre les débits de pointe de crue et les précipitations en 24 heures (période après incendie : septembre 1990 - novembre 1994)

**Modélisation pluie-débit par événement** - Le traitement est réalisé au pas de temps de 15 minutes. L'examen porte uniquement sur la saison automne (mois de septembre, octobre et novembre), afin de le limiter à une typologie bien particulière de crue : crues générées sur un bassin en cours de ré-humectation et consécutives à des pluies de forte intensité. Seules les pluies journalières supérieures à 20 mm constituent un événement, à condition d'avoir provoqué une réponse du ruisseau. Le pourcentage d'événements rejetés s'avère être sensiblement le même avant et après incendie. Les échantillons ainsi établis comportent 44 événements avant incendie et 15 après.

De manière très générale, le Tableau 7 indique que les coefficients d'écoulement de crue après incendie ont augmenté de façon sensible ; ils sont en moyenne multipliés par deux. Une augmentation plus forte est notable sur le ratio débit maximum de la crue/pluie maximale en 6 h de l'événement, qui est en moyenne multiplié par quatre.

Périodes	Q6h / P6h	Qmax / P6h
1968-69 - 1989-90	9,8 %	0,94 %
1990-91 - 1994-95	17,5 %	3,6 %

Tableau 7 - Valeurs médianes du coefficient d'écoulement du bassin versant avant et après incendie

Q6h et P6h représentent respectivement l'écoulement maximum et la pluie maximale de l'événement calculés sur une durée de 6 heures. Ils sont exprimés en mm. Qmax (m³/s) est le débit maximum de l'événement.

La simulation de crues par le modèle paramétré avec les valeurs médianes estimées sur les chroniques avant et après incendie met en évidence que des réponses très différentes peuvent être générées selon les caractères de la pluie. Le rapport entre les débits maximaux de crue consécutifs à une même pluie intense, après et avant incendie, avoisine 5 (Figure 21). Il n'est que légèrement supérieur à 1 dans le cas d'une pluie longue et de faible intensité (Figure 22).

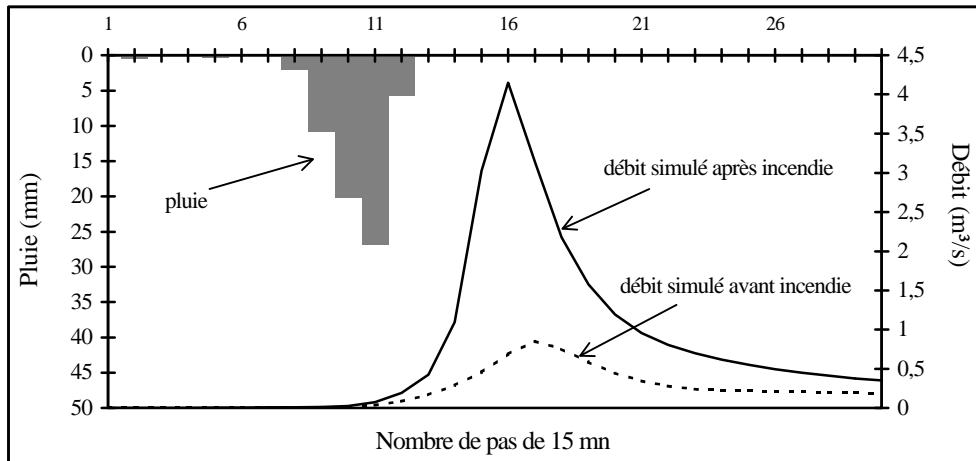


Figure 21 - Simulation d'une crue du ruisseau du Rimbaud générée par une pluie brève et intense

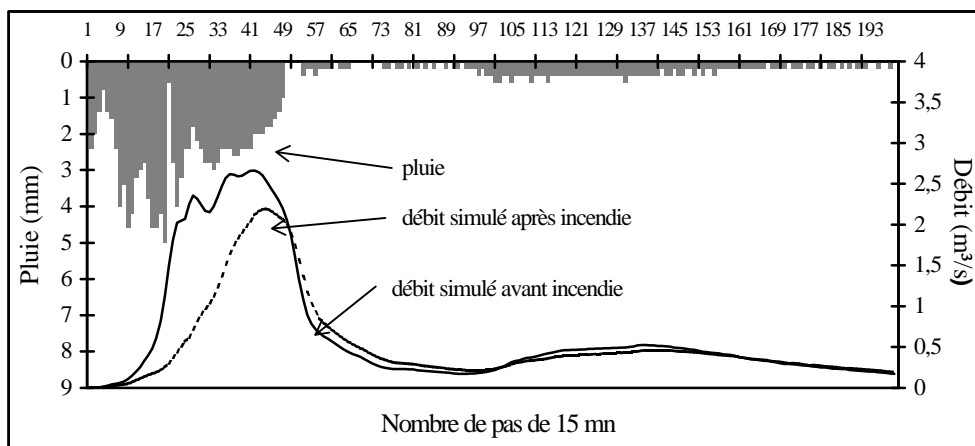


Figure 22 - Simulation d'une crue de ruisseau du Rimbaud générée par une pluie de faible intensité et de longue durée

L'interprétation physique des résultats de la modélisation n'est pas à l'abri d'une certaine subjectivité. Toutefois l'approche "en aveugle" qui a été retenue est parfaitement rigoureuse. Il n'en aurait pas été ainsi en utilisant des modèles qualifiés de physique (malgré tout l'empirisme qu'ils comportent) dont la mise en œuvre aurait impliqué d'introduire au préalable les modifications engendrées par l'incendie, et donc de les imposer *a priori* ! L'étude descriptive des mécanismes mis en jeu, exposée dans le paragraphe précédent, fournit des éléments d'interprétation des résultats de la modélisation.

Lors des pluies intenses, les phénomènes de ruissellement superficiel sur les versants prennent une très grande importance. Une modification radicale de la fonction de transfert est alors constatée, avec une très nette augmentation des débits de pointe.

Lors des pluies d'intensité modeste, la forte conductivité hydraulique des sols à caractère sableux qui prédominent sur le bassin versant, induit un comportement sensiblement différent. L'alimentation des ruisseaux par le ruissellement superficiel sur les versants est alors circonscrite aux secteurs rocheux proches des thalwegs et les flux correspondant à ce mode d'alimentation restent faibles. Pour ces épisodes, par rapport à la situation antérieure à l'incendie, le temps de réponse est réduit et le supplément de volume écoulé conséquent, mais les débits de pointe n'atteignent pas des valeurs significativement plus élevées.

**Modélisation « pluie-débit » au pas de temps journalier** - La comparaison des débits moyens journaliers observés du 26 octobre 1990 au 31 décembre 1991, avec les débits simulés sur la même période en utilisant le modèle de prévision des écoulements GR3J (Michel et al., 1991), calé sur les données recueillies avant l'incendie (Lavabre et al., 1993), fait ressortir les effets de la disparition du couvert végétal en périodes pluvieuses (Figure 23).

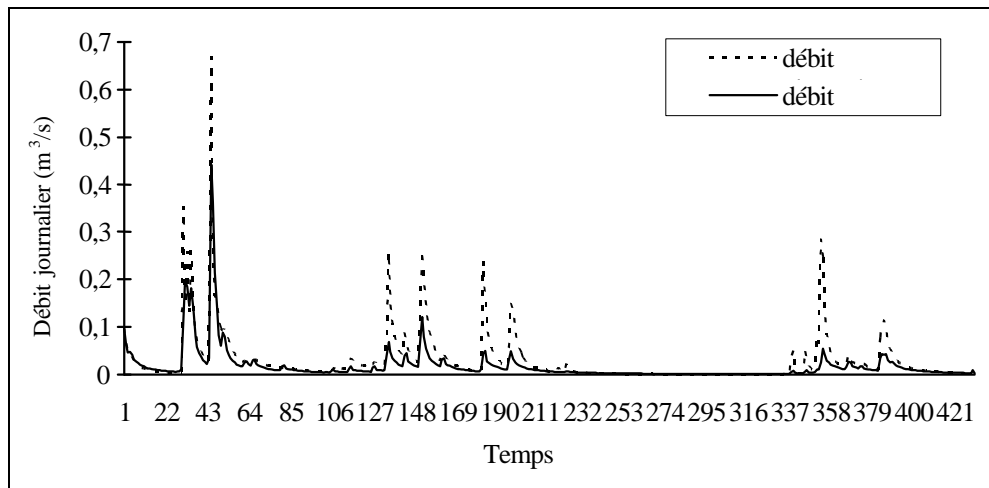


Figure 23 - Comparaison des débits journaliers mesurés après l'incendie avec les valeurs reconstituées à partir des informations recueillies avant le feu (la période représentée démarre le 26 octobre 1990)

## Conclusion

Le traitement à l'échelle annuelle des données du bassin versant du Rimbaud fait apparaître un accroissement des écoulements de l'ordre de 15% après l'incendie de forêt d'août 1990. Toutefois la stationnarité de la chronique pluviométrique du poste du Rimbaud – lequel influence de façon déterminante le calcul des précipitations sur le bassin versant – est bien loin d'être démontrée. Pour sa part, la relation entre les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud et les précipitations annuelles du bassin du Valescure ne fait ressortir aucune augmentation des écoulements après l'incendie. Sur le bassin versant du Rimbaud, qui est constitué de roches très massives et dispose d'une capacité de stockage en eau extrêmement réduite, les conséquences de l'incendie sur les écoulements annuels sont modestes et se situent dans la marge d'incertitude des méthodes utilisées.

En revanche, le feu s'est traduit par une modification très nette du fonctionnement hydrologique lors des crues. Le comportement du ruisseau est devenu fortement impulsif. En effet, la destruction du couvert végétal a favorisé le déclenchement du ruissellement superficiel sur les versants et donc la multiplication de crues violentes. En décembre 1990 et septembre 1992, des débits de pointe de crue correspondant à la fréquence décennale avant incendie se sont produits à la suite de précipitations dont l'intensité et l'abondance ne présentaient pourtant aucun caractère exceptionnel. L'impact de l'incendie s'est ainsi manifesté pendant plus de deux ans. La revégétalisation du bassin versant a ensuite pondéré la réponse des écoulements aux précipitations, le taux de recouvrement par les arbustes des surfaces incendiées approchant 50% en août 1993.

## Références

- Hazen A., 1930 - *Flood flows, a study of frequencies and magnitudes*. Edit. Wiley, New-York.
- Lavabre J., Sempere-Torres D., Cernesson F., 1993 - Hydrological consequences of fire : changes on the hydrological response of a little Mediterranean basin a year after the fire. *J. Hydrol.*, vol. 142, pp 273-299.
- Lavabre J., Arnaud P., Folton N., Michel C., 1997 - Les écoulements d'un petit bassin versant méditerranéen après un incendie de forêt. *Ingénieries - EAT*, n° 7, pp 21-30.
- Lavabre J., Folton N., Arnaud P., Martin C., 1999 - Impact d'un incendie de forêt sur l'hydrologie d'un petit bassin versant méditerranéen. Incertitudes liées à la méthodologie d'analyse et à la météorologie. *Actes du*

séminaire "Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne" (Draix, Le Brusquet, Digne, 1997), Cemagref-Editions, coll. Actes de colloques, Mathys N. édit., pp 41-52.

Lavabre J., Martin C., Folton N., 2000 - Impact de l'incendie sur le comportement hydrologique du bassin versant. Chapitre III. In : *Conséquences d'un incendie de forêt dans le bassin versant du Rimbaud (massif des Maures, Var, France) : destruction et régénération du couvert végétal, impacts sur l'hydrologie, l'hydrochimie et les phénomènes d'érosion mécanique*, Cemagref-Éditions, Coll. Etudes, Série "Gestion des milieux aquatiques", n° 16, Martin C. et Lavabre J. édit., pp 33-49.

Lavabre J., Martin C., 2001 - Impact de l'incendie de forêt d'août 1990 sur le comportement hydrologique du bassin versant du Rimbaud (massif des Maures, Var, France). In : *Eaux sauvages. Eaux domestiquées*, Livre en hommage à Lucette Davy, Publications de l'Université de Provence, Prosper-Laget V. édit., pp 139-154.

Martin C. et Lavabre J., 1997 - Estimation de la part du ruissellement sur les versants dans les crues du ruisseau du Rimbaud (massif des Maures, Var, France) après l'incendie de forêt d'août 1990. *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 42, n° 6, pp 893-907.

Michel C., Edijatno, Leviandier T., 1991 - Progrès et application de la modélisation conceptuelle pluie-débit. *Rapport quadriennal pour la XX<sup>ème</sup> Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale* (Vienne, 1991), publié avec le concours de l'Académie des Sciences de Paris, pp 219-222.

Puech C., Viné P., Leibreich J., 1994 - Evolution comparée entre variations d'écoulement et couvert végétal suite à incendie. Réal Collobrier 1990-1993. *Actes du Workshop Final du Projet Européen DM2E* (Barcelone, 1994), Édit. Cemagref, 10 p.

Viné P., 1997 - *Identification de l'hétérogénéité spatio-temporelle des comportements hydrologiques. Apports de la télédétection satellitale. Application aux bassins versants du Réal Collobrier (France) et de la Mare d'Oursi (Burkina-Faso)*. Thèse de Doctorat de l'Université J. Fourier - Grenoble I, 285 p.

Viné P., Puech C., Grésillon J.M., 1999 - Apport de la télédétection à l'étude de l'impact hydrologique de la reprise végétale après un incendie de forêt. Application au bassin versant méditerranéen du Réal Collobrier (Var, France). In : *Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne* (Actes du séminaire de Draix-Le Brusquet-Digne, 1997), Mathys N. édit., Cemagref Éditions, Collection Actes de colloque, pp 89-101.

## RELATION ENTRE TAUX DE BOISEMENT ET CARACTÉRISTIQUES DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DANS LE SUD DU MASSIF CENTRAL

Vasken Andréassian \*

Cemagref, URE Qualité et fonctionnement hydrologique des milieux aquatiques, BP 44, F-92163 ANTONY cedex

E-Mail : [vasken.andreassian@cemagref.fr](mailto:vasken.andreassian@cemagref.fr)

Une autre démarche, très différente des démarches précédentes, a été utilisée par Andréassian (1999), dans le cadre d'un projet du programme « Environnement, Vie et Société » financé par le CNRS.

L'approche est basée sur l'utilisation conjointe de données d'écoulement et de végétation pour un nombre relativement élevé de bassins versants (14) présentant des surfaces beaucoup plus importantes (de 10 à 67 km<sup>2</sup>). Le traitement des données, pour une période au moins égale à 30 ans, a cherché à mettre en évidence une relation entre l'écoulement annuel et le boisement.

### Conditions de l'étude

#### Positionnement du problème

De toutes les activités humaines qui peuvent avoir des conséquences sur le fonctionnement hydrologique d'un milieu, les modifications de couvert végétal sont probablement celles qui interviennent le plus largement à l'échelle mondiale. Parmi ces modifications, boisement et déboisement concernent à la fois les plus grandes surfaces et de longues périodes de temps. Le *comportement hydrologique* d'un bassin versant, intégrateur de l'ensemble des transformations affectant cet espace, peut nous fournir un indicateur des changements qui ont lieu.

La connaissance du rôle hydrologique de la forêt est encore imparfaite (Bruijnzeel, 1990 ; Calder, 1998); cependant, pour ce qui est des conséquences de la forêt sur les volumes d'écoulement, il semble bien que, globalement, une végétation abondante ait tendance à augmenter l'évapotranspiration et donc à réduire l'écoulement. Pour ce qui est des effets sur les crues et les étiages, des controverses subsistent, l'impact semblant être très spécifique aux situations locales.

## Objectifs

Le comportement d'un bassin versant est intégrateur de toutes les évolutions qui affectent la surface du bassin. L'objectif de cette recherche était d'étudier la possibilité de passer d'un *intégrateur* à un *indicateur*, et d'obtenir ainsi à partir d'une mesure ponctuelle une information globale relative à une zone géographique.

Cet objectif nécessitait au préalable de valider nos connaissances en hydrologie forestière en établissant, sur des bassins versants connus, un parallèle entre les modifications de leur comportement pluies-débits et l'évolution de leur couvert forestier.

## Zone d'étude

Dans cette étude, nous avons choisi de travailler sur 14 bassins versants de la bordure sud du Massif Central (Cévennes et Montagne Noire), région à la fois relativement homogène, qui a connu une forte déprise agricole depuis l'après-guerre, et dont les ressources en eau sont précieuses pour le littoral méditerranéen.

N°	Code Station	Nom de la station	Taille du bassin (km <sup>2</sup> )
17	O3006710	Goudesche à la Cépède (La)	10
18	O3015520	Rieumalet à Pont de Montvert (Le)	20
19	O3026210	Mirals à Rhunes	11.7
20	O3035210	Briançon à Cocures 2 (Le)	25
21	O3165010	Brèze à Meyrueis (La)	36.1
22	O3314010	Dourbie au Mazet (La)	42.9
23	O4102510	Agout à Fraisse (L')	48
39	V7104010	Gardon de Saint Martin à la Roquette (Le)	31
40	V7105210	Gardon de Saint Germain à la Bastide (Le)	31
41	V7115010	Gardon de Sainte Croix à Gabriac (Pont Ravagers) (Le)	33
46	Y2002010	Herault à Valleraugue (L')	46.2
47	V7155020	Gardon d'Alès à la Farelle (Le)	30
G	O3011010	Tarn à Fontchalette (Le)	67
T	V5425210	Gagnière à Banne (La)	55.3

Tableau 8 - Liste des bassins versants des Cévennes et de la Montagne Noire retenus pour cette étude

Les données utilisées concernaient le débit à l'exutoire des bassins versants, l'ETP (moyenne régionale) et la pluie sur une sélection de postes de Météo-France. Pour les données de l'Inventaire Forestier National, il s'agissait de photographies aériennes (3 cycles), de données dendrométriques, de couches SIG. La période d'étude concernée différait un peu suivant les bassins versants et les départements. Il s'agissait globalement de la période 1960-1996.

## Relation entre boisement et écoulement annuel

### Méthodologie

Les bassins versants ont été soumis à des tests pour détecter d'éventuelles modifications de leur comportement pluies-débits. On a, d'autre part, cherché à quantifier l'évolution du couvert forestier au moyen

des photographies aériennes et de la base de données dendrométriques de l'Inventaire Forestier National (IFN). Enfin, les deux types d'évolution ont été croisés.

Pour suivre l'évolution du couvert forestier, nous avons commencé par développer une méthode d'interprétation régressive des couvertures de photographies aériennes de l'IFN, passant par la réalisation d'ortho-photographies. Ensuite, nous avons exploité la base de données dendrométriques de l'IFN, pour obtenir des estimateurs régionaux de densité forestière (les trois paramètres retenus étant le volume de bois sur pied, l'accroissement moyen, et la surface terrière). La combinaison de ces deux types d'information a permis d'obtenir des indicateurs globaux de l'évolution du couvert forestier à l'échelle d'un bassin versant.

Pour suivre *l'évolution du comportement hydrologique*, et détecter les tendances dans la relation pluies-débits, nous avons développé une méthode qui constitue en une transposition, au moyen de modèles pluies-débits, de la méthodologie des « bassins versants appariés » [Hewlett, 1971, 1982], proposée au début du siècle et mise en œuvre pour la première fois sur le site du Wagon Wheel Gap, dans les montagnes du Colorado [Bates et Henry, 1928]. On a imaginé de se ramener au plan d'expérience des bassins versants appariés en reconstituant un « bassin de référence virtuel » au moyen d'un modèle pluies-débits. En calant le modèle sur les pluies et débits d'une période de calage, on a obtenu des jeux de paramètres « représentatifs » du fonctionnement du bassin sur cette période. Après « traitement », on a comparé le comportement observé du bassin à celui simulé par le modèle.

## Résultats

L'ensemble des bassins versants étudiés montrait une tendance à l'accroissement du couvert forestier, en terme de surface comme en densité. Les indicateurs globaux d'évolution du couvert forestier sont donc tous positifs sur la période étudiée (1960-1996).

Pour ce qui est du comportement hydrologique des bassins versants, les tendances sont moins nettes (Tableau 9), et les conclusions dépendent bien entendu du seuil de signification que l'on souhaite accepter. Nous avons arbitrairement placé ce seuil très bas (2%), en étant conscient de l'imperfection du modèle pluies-débits, imperfection inhérente à toute modélisation dès lors que l'on s'intéresse à un système naturel aussi complexe qu'un bassin versant.

Bassin	Tendance apparente pour l'écoulement total	Significativité	T de Student
17	→	(> 20 %)	-0.10
18	↗	(8 %)	+1.57
19	↘	(7 %)	-1.71
20	→	(> 20 %)	-0.32
21	↘	(5 %)	-2.14
22	↘	(14 %)	-1.21
23	→	(> 20 %)	-0.83
39	→	(> 20 %)	-0.70
40	↘	(10 %)	-1.57
41	↘	(7 %)	-1.63
46	→	(> 20 %)	+0.91
47	→	(> 20 %)	-0.60
G	↗	< 2 %	+2.69
T	↘	(15 %)	-1.11

→ : augmentation. ↘ : peu de modification. ↗ : diminution.

Tableau 9 - Tendances observées dans la relation pluies-débits des 14 bassins versants étudiés (variable hydrologique étudiée : écoulement total)

Sur les 14 bassins versants étudiés, nous n'observons aucune tendance dans 6 cas (là où la probabilité d'un effet du hasard est  $> 20\%$ ), une tendance décroissante dans 6 cas, et une tendance croissante dans 2 cas. Seule l'une de ces tendances semble vraiment significative au plan statistique, mais cela dépend bien sûr du niveau de signification seuil que l'on se donne. Cependant, il est intéressant de constater que les valeurs du T de Student sont négatives dans 11 des 14 cas, ce qui correspond à une décroissance (plus ou moins significative suivant les cas) du rendement pluies-débits.

Le lien entre les tendances observées sur une variable hydrologique (l'écoulement total) et une caractéristique dendrométrique du couvert forestier à l'échelle du bassin versant (le volume sur pied) a été analysé au travers du graphe présenté en Figure 24.

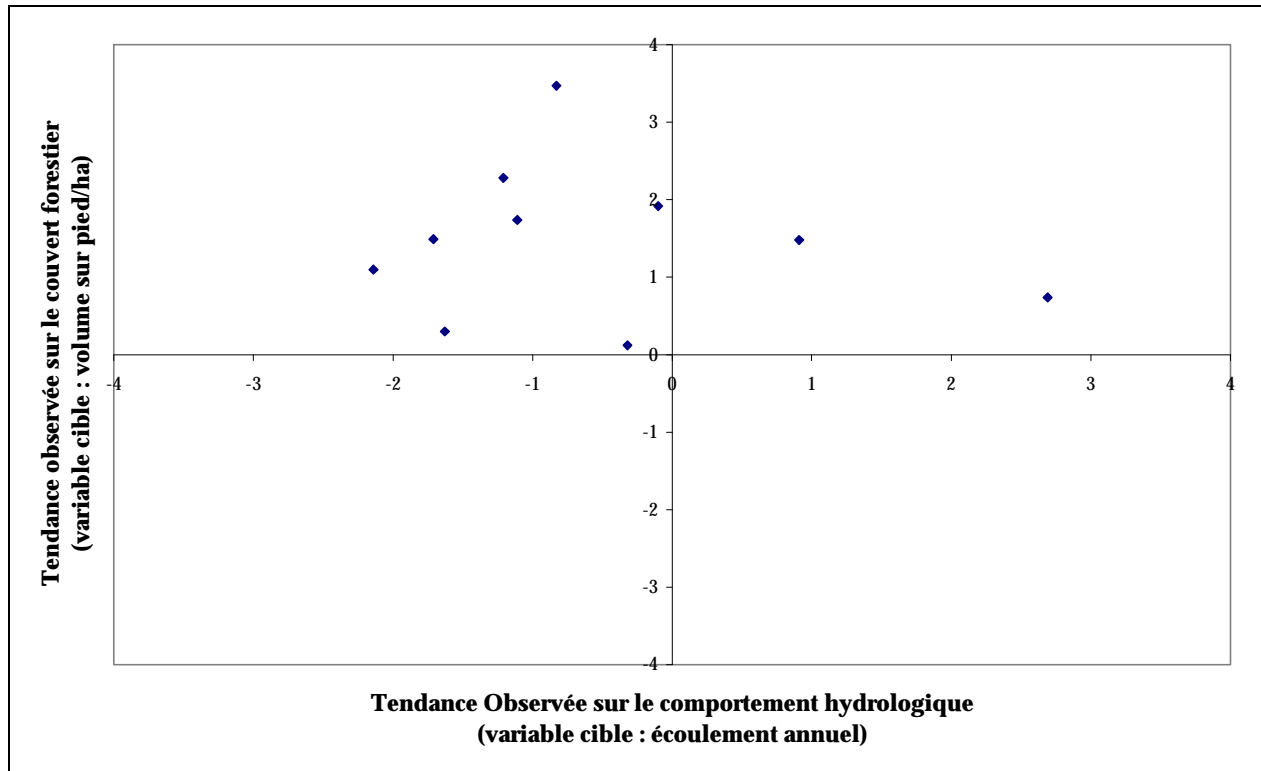


Figure 24 - Confrontation graphique des tendances observées sur le comportement hydrologique et l'évolution des paramètres du couvert forestier

Il apparaît que la Figure 24 n'est malheureusement pas interprétable en l'état, car le nombre de points (10) reste trop réduit. Il ne nous a donc pas été possible, à ce stade, de confirmer ou d'infirmer le rôle de la forêt sur l'écoulement. Il faut pour cela poursuivre ce travail, pour disposer de bassins versants supplémentaires.

## Conclusion

Il n'a pas été possible de mettre en évidence une relation simple entre les caractéristiques de l'écoulement (en l'occurrence les volumes d'écoulement annuel) et la modification du couvert végétal, telle que nous l'avons appréhendée. Cela semble dénoter un impact limité de la forêt sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants étudiés, mais pourrait aussi s'expliquer par les incertitudes qui restent assez fortes sur l'estimation des variables dendrométriques et sur l'estimation des tendances hydrologiques (notamment en raison de l'incertitude relative aux pluies).

Il n'en demeure pas moins que les résultats de cette étude sont très intéressants du point de vue de la gestion forestière : en effet, il apparaît bien que la gestion courante de la forêt de ces régions n'a qu'un très faible impact – s'il en a – sur le fonctionnement hydrique des bassins versants, et que cet éventuel impact est complètement occulté par la variabilité climatique.

## Références

- Andréassian V. (Coordinateur) - 1999 : M. Tangara, J. Muraz, C. Caugant, C. Cosandey, P. Dérioz, A.-E. Laques, J.G. Bourreau, E. Didon, S. Durrieu et N. Hamza - Indicateur d'impact de l'évolution du couvert forestier sur la ressource en eau à l'échelle des bassins versants des Cévennes et de la Montagne noire. Rapport de recherches du programme "Environnement, Vie et Société du CNRS."
- Caugant C. -1998 . Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique de baïna versants du Massif central : croisement des archives de pluies, de débits et d'inventaire forestier. mémoire de DEA, université de P I et Cemagref
- Bates, C.G. et A.J. Henry, 1928. Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado. Mon. Weather Rev. Suppl., 30: 1-79.
- Bosch, J.M. et J.D. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 55: 3-23.
- Bruijnzeel, L.A., 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion : a state of knowledge review. UNESCO, I.H.P. publication of the Humid Tropics Programme. 224 p.
- Calder, I.R., 1998. Water-Resource and Land-Use issues. SWIM Paper 3. IWMI, Colombo, Sri Lanka. 24 p.
- Cosandey, C., 1995. La forêt réduit-elle l'écoulement annuel? *Annales de Géographie*, n°581-582: 7-25.
- Hewlett, J. D., 1971. Comments on the catchment experiment to determine vegetal effects on water yield. *Water Resources Bulletin*, 7(2): 376-381.

## QUE CONCLURE DU RÔLE HYDROLOGIQUE DE LA FORÊT EN CLIMAT MÉDITERRANÉEN ?

### Complexités des résultats obtenus

Si l'on rapporte strictement l'ensemble des résultats acquis lors des différentes études exposées plus haut, on note :

#### Pour ce qui est de l'abondance des écoulements annuels

La coupe de la forêt augmente les écoulements annuels d'environ 10 % sur les bassins du Mont-Lozère. Ce résultat rejoint les observations effectuées sur d'autres bassins de par le monde. Sur les bassins du Réal Collobrier, une tendance identique semble se manifester après le feu, mais la certitude n'est pas acquise. Enfin, à Draix, même si les estimations manquent de précision, il semblerait que la forêt diminue les écoulements.

Par ailleurs, les travaux d'Andréassian et al. (1999) montrent que l'augmentation observée du couvert forestier depuis un demi-siècle sur la bordure sud du Massif Central ne modifie pas de façon tangible les écoulements annuels.

#### Pour ce qui est des crues

Les résultats obtenus à Draix sont très explicites sur ce plan. Les volumes de crue du bassin forestier sont inférieurs de moitié à ceux du bassin non couvert. Les débits de pointe de crue sont encore plus affectés, puisqu'ils sont réduits dans un rapport de 1 à 5.

Sur le Réal Collobrier, l'incendie du Rimbaud a entraîné une augmentation très nette des débits de pointe de crue les premières années après la coupe.

Sur le Lozère, en revanche, aucune modification des débits maximaux n'a été mise clairement en évidence après la coupe pour les fortes crues. Seules les « petites crues » ont été sensiblement augmentées.

Ainsi synthétisés, les résultats obtenus peuvent apparaître peu concordants, voire contradictoires, et amener à penser qu'il est bien difficile de conclure quant au rôle hydrologique de la forêt. Cette impression est d'autant plus forte que des études différentes, parfois menées par les mêmes auteurs, portant sur les mêmes expérimentations quand ce n'est sur les mêmes jeux de données, peuvent aboutir à des résultats divergents.

Pourtant, loin d'être opposés, les résultats des recherches rapportées sont complémentaires et leurs apparentes contradictions ne font que mettre en évidence la complexité des relations pluies-débits. Ils ne peuvent se comprendre sans prendre en compte les rôles spécifiques que jouent la nature et l'épaisseur des sols, le type

de végétation (autre que forestier, dans le bassin de référence), les conditions climatiques qui conditionnent à la fois l'évapotranspiration (donc les écoulements annuels) et la forme comme le volume des crues.

## Rôle de la forêt dans les relations pluies-débits ; considérations théoriques et discussion

### Rôle de la forêt sur l'abondance des écoulements annuels

La forêt intervient sur l'évaporation à partir de deux processus essentiels : d'une part, une meilleure utilisation des réserves hydriques en été, et, d'autre part, la perte par interception d'une partie des pluies incidentes.

L'utilisation plus grande de la réserve hydrique sous forêt suppose des sols assez profonds (sinon, tout le sol est colonisé par les racines, même en cas de végétation de prairie ou de buissons), mais aussi un déficit hydrique ( $ETP - P$ ) important pendant l'été (sinon, une faible réserve hydrique suffit à satisfaire la demande en eau des plantes), ce qui est le cas en climat méditerranéen. Dans les régions étudiées, si le déficit hydrique d'été est important, les sols sont, sauf très localement, peu épais, ce qui ne permet pas une forte évapotranspiration d'été.

Par ailleurs, on sait que les pertes par interception sont d'autant plus importantes que les pluies sont abondantes, peu intenses et fréquentes. Si la première condition est assez bien remplie dans les régions étudiées, puisqu'on a des totaux pluviométriques qui en moyenne dépassent toujours 900 mm/an, les fortes intensités des averses méditerranéennes sont peu favorables aux pertes par interception.

Les conditions pédologiques et climatiques ne sont donc pas celles dans lesquelles les écarts dans les valeurs d'évapotranspiration, et donc d'écoulement, entre végétation forestière et végétation basse ont tendance à être importants.

Par ailleurs, il faut remarquer que les travaux portant sur les conséquences de la forêt sur les écoulements montrent en général que les coupes partielles n'ont que peu d'influence sur l'évaporation, même dans les situations où les coupes totales en ont de sensibles. La raison en est que l'interception demeure globalement forte et que l'évaporation est favorisée, le vent circulant mieux à travers une forêt ouverte. Il n'en est pas de même lors de la croissance d'une jeune forêt après une coupe à blanc, du moins tant que sa taille ne lui confère pas un pouvoir d'interception élevé et une rugosité suffisante pour assurer une forte turbulence de l'air et donc une bonne utilisation de l'énergie advective. Mais des situations aussi tranchées ne sont pas identifiées en tant que telles dans les études menées ici.

Il n'est donc pas surprenant que les travaux d'Andréassian dans le sud du massif Central, n'aient pas réussi à mettre en évidence une relation simple entre les volumes d'écoulement annuel et la modification du couvert végétal. Et si une tendance semble pourtant apparaître, lors des études en bassin versant, qui va dans le sens d'un écoulement plus fort en faveur des bassins non forestiers, elle n'est que faible (10% de l'écoulement annuel) quand elle est avérée.

### Rôle de la végétation forestière sur les crues

Les crues sont liées à une circulation rapide de l'eau sur les versants, que cette circulation soit strictement superficielle (on parle de ruissellement) ou par transmission de pression dans l'épaisseur du sol et exfiltration rapide de la nappe dans le cours d'eau. Lorsque les processus résultent des circulations souterraines, le type de végétation n'intervient guère. Il influence en revanche la formation du ruissellement, comme on va le voir.

On distingue classiquement deux types de ruissellement : d'une part, le ruissellement par refus d'infiltration d'un sol non saturé (« excess infiltration overland flow », qu'on traduit en français par « infiltration par dépassement d'un seuil d'infiltration ») et, d'autre part, le refus d'infiltration d'un sol saturé (« excess saturation overland flow », soit « infiltration par dépassement d'un seuil de saturation »). Cette distinction présente pourtant l'inconvénient de ne pas faire la différence entre le ruissellement dit « hortonien », pour lequel la modestie de l'infiltration est liée à une très faible perméabilité intrinsèque des sols, et le ruissellement résultant de l'évolution – parfois très rapide – de l'état de surface de sols mal protégés par la végétation sous l'impact des gouttes de pluie (évolution des OPS <sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup> OPS signifie "organisation pelliculaire superficielle" et fait référence à la réorganisation des particules à la surface du sol sous l'impact des gouttes de pluie.

Il faut noter par ailleurs le fait que la forêt modifie les caractères hydrodynamiques des sols forestiers en agissant à la fois sur leur structure et sur leur stabilité à différentes échelles, soit directement, soit indirectement. Or ces sols forestiers sont une composante essentielle du comportement hydrologique des bassins versants forestiers lors des crues. Comme ils peuvent mettre très longtemps à se constituer, les effets d'un boisement ou d'un déboisement peuvent être limités par le fait que la nature du sol n'a pas changé. Une déforestation, si elle ne s'accompagne pas de mise en culture ou d'érosion des sols, ne provoque pas forcément une aggravation significative des crues, surtout lorsque la végétation de remplacement s'installe rapidement et densément. C'est bien ce qui s'observe sur le Mont-Lozère, il est vrai dans des conditions pluviométriques (précipitations très abondantes qui minimisent le rôle atténuateur de la forêt sur les crues) et pédologiques (sols extrêmement filtrants qui empêchent l'apparition du ruissellement par dépassement du seuil d'infiltration) assez particulières.

### **Sur les volumes de crue**

Dans tous les cas, l'interception d'une partie de la pluie incidente par la végétation forestière (interception plus importante pour la forêt que pour tout autre type de végétation) diminue d'autant la pluie qui arrive au sol. Mais l'interception est proportionnellement plus faible lors de fortes pluies, qui sont justement celles qui provoquent les crues : dans le cas du Mont-Lozère, l'effet de la forêt est limité pour les très fortes crues, alors qu'il est avéré pour les écoulements plus faibles.

Lorsque le ruissellement générateur des crues présente un caractère hortonien, avec des sols très peu perméables, la forêt modifie la structure du sol, améliorant ses capacités d'infiltration. Mais ces caractéristiques restent acquises indépendamment du couvert végétal, et le sol peut les conserver longtemps après déboisement.

Lorsqu'il s'agit de ruissellement généré par des évolutions des états de surface (OPS), les arbres, et leur litière, ne protègent pas mieux que d'autres types de végétaux couvrant bien le sol. En contrepartie, si la coupe de la forêt laisse le sol à nu (ce qui n'a pas été le cas sur le Mont-Lozère) ou si l'incendie détruit complètement la végétation (ce qui a été le cas pour le Rimbaud), le sol mal protégé est soumis à une modification des OPS, ce qui peut favoriser le déclenchement d'un ruissellement qui ne se produisait pas avant. Le fonctionnement très impulsif du bassin du Rimbaud immédiatement après l'incendie pourrait s'expliquer, au moins en partie, par l'évolution des OPS.

Lorsqu'il s'agit de ruissellement par saturation à partir d'une remontée de nappe, le type de couvert n'intervient pas directement sur la progression des surfaces saturées pendant la durée des pluies – et donc pas davantage sur le coefficient de ruissellement. Mais le type de couvert peut jouer sur l'état des réserves hydrologiques par l'intermédiaire de l'interception, laquelle est susceptible de réduire la quantité d'eau qui s'infiltré jusqu'à la nappe.

Par ailleurs, l'installation d'une forêt s'accompagne souvent d'une reprise d'érosion des cours d'eau, liée à la diminution de la charge sédimentaire en provenance des versants ; le lit peut alors s'enfoncer si les conditions géomorphologiques s'y prêtent (Bravard, 1994). Or un enfoncement du lit contribue au rabattement de nappe, et peut ainsi limiter l'extension des surfaces saturées, donc l'importance des crues qu'elles peuvent générer.

### **Sur les pointes de crue**

Pour un bassin versant donné, l'importance des pointes de crue dépend de la vitesse de circulation de l'eau sur les versants. Or l'on considère souvent que la végétation forestière freine la circulation du ruissellement, et ralentit donc les temps de concentration. Ce ralentissement n'est pourtant pas plus efficace, sinon moins, que celui exercé par d'autres types de végétation, prairie notamment. Là encore, la différence essentielle se situe entre sol nu et sol végétalisé, plus qu'entre un type de végétation et un autre.

Lorsque les transferts d'eau résultent essentiellement de processus de subsurface, on peut penser que les sols forestiers, généralement très perméables en raison de leur structure, peuvent favoriser les transmissions de pression et/ou les vitesses de circulation de l'eau. Cependant tous les auteurs ne sont pas d'accord sur ce point.

Enfin, la mise en place de la forêt favorise la reprise de l'érosion linéaire, du fait de la réduction de la charge solide des cours d'eau. Dans certaines conditions géomorphologiques, cette évolution est susceptible d'entraîner une accentuation de la pente longitudinale des thalwegs. L'évacuation plus rapide des crues qui en résulte (Arnaud-Fassetta *et al.*, 1993) peut jouer un rôle dans les vitesses de concentration en aval.

## Discussion

Il ressort de ces différents exposés que, si dans certaines conditions la forêt semble devoir diminuer les pointes de crue, il apparaît bien que, dans d'autres, elle semble ne pas avoir d'effet, au moins par rapport à un autre type de végétation en bon état, et couvrant bien le sol.

En fonction de ces considérations, il est facile de comprendre la diversité des résultats obtenus.

Tout d'abord, il importe de noter que le protocole expérimental n'est pas le même dans les trois bassins. Dans les cas du Mont-Lozère et du Réal Collobrier il s'agit de *déboisement*, ce qui veut dire que le sol forestier initial existe, et continue de jouer un rôle hydrologique. Ce sol forestier n'existe pas pour le bassin non boisé de Draix. Enfin, un incendie de forêt n'est pas une coupe : le premier laisse le sol complètement nu et peut en outre s'accompagner de modifications de la surface du sol résultant des fortes températures ; le second laisse un sol protégé par les branchages des arbres coupés, dont seuls les troncs ont été exportés. Un ruissellement superficiel, résultant de la fermeture de la surface du sol sous l'impact des gouttes de pluie, peut s'installer dans le premier cas. Il n'a guère de facilités pour le faire dans le second.

Ensuite, les pluies et les crues ne sont pas les mêmes. En dépit d'abats d'eau beaucoup plus forts sur le Mont-Lozère (les maximums journaliers observés approchent 400 mm ; ils atteignent seulement 150 mm sur le Réal Collobrier et 80 mm à Draix pour des pluies décennales), les pointes de crue du bassin des Cloutasses, sous pelouse, restent bien en deçà des débits enregistrés sur les bassins déboisés du Rimbaud (Réal Collobrier) et du Laval (Draix). La raison en est que les sols très filtrants et bien protégés par la végétation n'alimentent le ruissellement que lorsqu'ils sont totalement saturés : le fonctionnement hydrologique d'un bassin sous pelouse n'est donc pas différent de celui d'un bassin forestier. Dans ces conditions, on comprend que la coupe des arbres du bassin de la Latte n'ait pas changé grand chose. Par contre, en Lozère, les pluies abondantes permettent à l'interception des eaux par la forêt de réduire de beaucoup la pluie qui arrive au sol – et presque d'autant les écoulements. De telles pertes par interception, qui peuvent être de l'ordre de 1 à plusieurs mm par jour, expliquent la forte augmentation des débits pour les crues dont les débits ne dépassent pas 5 mm/jour, qui sont très fréquentes sur le Mont-Lozère.

C'est presque toujours l'opposition « sol nu/sol couvert », plus que celle « forêt/autre type de végétation » qui détermine des processus hydrologiques très différents.

Il faut donc, pour comprendre et prévoir les effets du boisement sur l'hydrologie, déterminer la façon spécifique dont se forment les écoulements dans la région étudiée. Il sera ensuite possible de prévoir si ces processus risquent, ou non, d'être modifiés par la disparition – ou la mise en place – de la forêt.

## Références

Arnaud-Fassetta G., Ballais J.L., Béguin E., Jorda M., Meffre J.C., Provansal M., Roditis J.C., Suanez S., 1993, - La crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (22.09.92). Ses effets morphodynamiques, sa place dans le fonctionnement d'un géosystème anthropisé. *Rev. Géomorph. Dyn.*, t. XLII, n° 2, pp 34-48.

Bravard J.P., 1993 - L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. *Rev. Géogr. Lyon*, vol. 69, n° 1, pp 5-10.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les études menées en France sur l'hydrologie forestière sous climat méditerranéen ont montré la complexité du rôle de la forêt sur les écoulements. Il est aussi faux de considérer que la forêt n'a pas d'influence sur les crues que d'affirmer qu'elle les réduit systématiquement !

La complexité des relations pluies-débits fait qu'il n'est pas possible de prévoir les conséquences d'un boisement ou d'un déboisement sans comprendre le fonctionnement hydrologique du milieu considéré. Celui-ci dépendra – entre autres – de la nature des formations superficielles, des conditions climatiques, des caractéristiques de la végétation.

Par ailleurs, il n'est pas inutile d'attirer l'attention sur le fait que les incertitudes sur les données de base (pluies et débits) à partir desquelles on raisonne sont probablement souvent du même ordre que les effets des paramètres qu'on veut estimer : ici le rôle de la végétation. Et quant à ces incertitudes s'ajoutent les hypothèses des modèles.

Il est pourtant possible de tirer de cette synthèse un certain nombre de conclusions :

- D'abord, l'opposition est avant tout entre sol nu et sol couvert par la végétation (quel que soit le type de végétation), bien plus qu'entre un type de couvert végétal et un autre. Si les défrichements provoquent généralement de fortes perturbations du milieu, c'est parce que la forêt est le plus souvent remplacée par des cultures, et que ces cultures laissent le sol à nu une grande partie de l'année. Les effets de l'incendie du Rimbaud sur les crues se sont atténués dès que le sol a été largement recolonisé par une végétation buissonneuse ou arbustive. Il n'y a guère de différence de fonctionnement sur le Mont-Lozère entre le bassin en pelouse et ceux en forêt (si ce n'est, mais assez faiblement, pour l'abondance annuelle des écoulements). A l'opposé, le bassin du Laval à Draix, très mal couvert, présente un comportement hydrologique radicalement différent du bassin boisé du Brusquet.
- Ensuite, il faut noter l'importance du sol forestier. Son maintien après la disparition de la forêt peut expliquer les faibles conséquences de la disparition des arbres. Mais le sol forestier doit être considéré comme une création de la forêt, même s'il demeure comme une entité indépendante après la disparition de celle-ci.
- En conclusion, il importe de noter que le rôle de la forêt, même s'il se révèle parfois considérable, est loin d'être toujours et partout très important. Et ce n'est pas le moindre des résultats d'Andréassian *et al.* (1999), que d'avoir montré que la gestion courante de la forêt du versant méditerranéen du Massif Central n'a qu'un très faible impact sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants, et que cet impact – s'il existe vraiment – est complètement occulté par la variabilité climatique. ◆

Contact :


**Claude COSANDEY**

CNRS, Dept de Géographie, UMR 8591, 1 place A. Briand, 92190 Meudon (France)

E-mail : [cosandey@cnrs-bellevue.fr](mailto:cosandey@cnrs-bellevue.fr)



• BVRE

 Localisation des bassins étudiés par Andréassian et al.

### LOCALISATION DES SITES ETUDIÉS