HAL
open science

Rôle joué par la forêt sur l'hydrologie des régions méditerranéennes. Synthèse des recherches menées en France

Claude Cosandey, Vazken Andréassian, Claude Martin, Jean-François Didon-Lescot, Jacques Lavabre, Nathalie Folton, Nicolle Mathys, Didier Richard

To cite this version:

Claude Cosandey, Vazken Andréassian, Claude Martin, Jean-François Didon-Lescot, Jacques Lavabre, et al.. Rôle joué par la forêt sur l'hydrologie des régions méditerranéennes. Synthèse des recherches menées en France. J.P. Bariot. Rapport quadriennal (1999-2002) du Comité National Français de Géodésie et de Géophysique, Comité National Français de Géodésie et de Géophysique, pp.239-250, 2003. hal-00325629

HAL Id: hal-00325629

https://hal.science/hal-00325629v1

Submitted on 29 Sep 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport quadriennal (1999-2002) du Comité National Français de Géodésie et de Géophysique, JP Bariot Ed., Toulouse, 2003, p 239-250.

ROLE JOUE PAR LA FORET SUR L'HYDROLOGIE DES REGIONS MEDITERRANEENNES SYNTHESE DES RECHERCHES MENEES EN FRANCE

CLAUDE COSANDEY* ; VASKEN ANDREASSIAN** ; CLAUDE MARTIN*** ; JF DIDON-LESCOT*** JACQUES LAVABRE **** ; NATHALIE FOLTON **** ; NICOLLE MATHYS***** ; DIDIER RICHARD*****

* Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591 du CNRS, 1 Place Aristide Briand, F-92190 MEUDON, France – E-mail : cosandey@cnrs-bellevue.fr

** *Cemagref*, URE Qualité et fonctionnement hydrologique des milieux aquatiques, BP 44, F-92163 ANTONY cedex – E-Mail : vasken.andreassian@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 et didon@ensam.inra.fr

**** *Cemagref*, B.P. 31, Le Tholonet, F-13612 AIX-EN-PROVENCE cedex 1, France – E-Mail : jacques.lavabre@cemagref.fr et nathalie.folton@cemagref.fr

****** *Cemagref*, 2 Rue de la papeterie, BP 76, 38402 SAINT-MARTIN-D'HERES, France – E-Mail : nicolle.mathys@cemagref.fr et didier.richard@cemagref.fr

THE HYDROLOGICAL IMPACT OF THE MEDITERRANEAN FOREST SUMMARY OF RESEARCH CARRIED OUT IN FRANCE

ABSTRACT

In France, research on how forests affect the water balance in Mediterranean climate has been carried out mainly on three groups of Experimental Research Basins (ERB). The study sites differ in climatic, lithological, and pedological conditions, but do share a common characteristic in that each one encompasses the hydrological behaviour of a number of catchments, at least one of which is forested. During the study period, the forested catchments that underwent no change (the Draix catchments) were considered as comparative catchments, and those that were cut (the Lozère catchments) or suffered forest fires (the Réal Collobrier catchments), as experimental catchments. In each case studied, the behaviour of the forested catchment was compared to that of a control catchment. It was easier to demonstrate the forest's specific role when the study was based on the relative change in the catchment's behaviour after the forest disappeared (cuts or fire) with respect to the behaviour of the undisturbed catchment.
Included with the ERB studies are the results of research with a fundamentally different approach. The research is based on a statistical study of the interrelated development of afforestation rates and runoff characteristics for average-sized catchments (around 100 km^2) in that part of the southern French Massif Central which is subject to Mediterranean rainfall conditions.
The results differ considerably from one site to another, indicating the degree of complexity of the rainfall/runoff relationship. An increase in extreme flood events could by no means be confirmed in every case.
A closer look at the hydrological behaviour of the catchments cleared up the apparent inconsistencies.

INTRODUCTION

L'incidence de la forêt sur le fonctionnement hydrologique des bassins méditerranéens, que ce soit pour les crues, les étiages ou même le bilan d'écoulement annuel, est loin de faire l'unanimité. Il est vrai que cette incidence dépend d'un grand nombre de facteurs, ce qui explique la disparité – lorsque ce n'est pas la divergence – des résultats observés.

Dans le Sud de la France, trois sites de BVRE (bassins Versants Expérimentaux Représentatifs) permettent de conduire cette recherche en climat méditerranéen humide. Ces sites diffèrent par leurs conditions pédologiques et géomorphologiques, mais tous sont soumis à de fortes pluies d'automne, et parfois d'été.

La diversité des réponses observées conduit à essayer de dégager les mécanismes hydrologiques qui permettent de rendre compte des conséquences de la végétation sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants.

SITES D'ETUDE ET CONDITIONS D'EXPERIMENTATION

Les trois sites retenus sont : celui de Draix, situé dans les

marnes noires de la région de Digne, dans l'arrière pays provençal ; celui du Réal Collobrier, très proche de la côte méditerranéenne ; celui du Mont-Lozère enfin, sur les contreforts sud-est du Massif Central (Figure 1) :

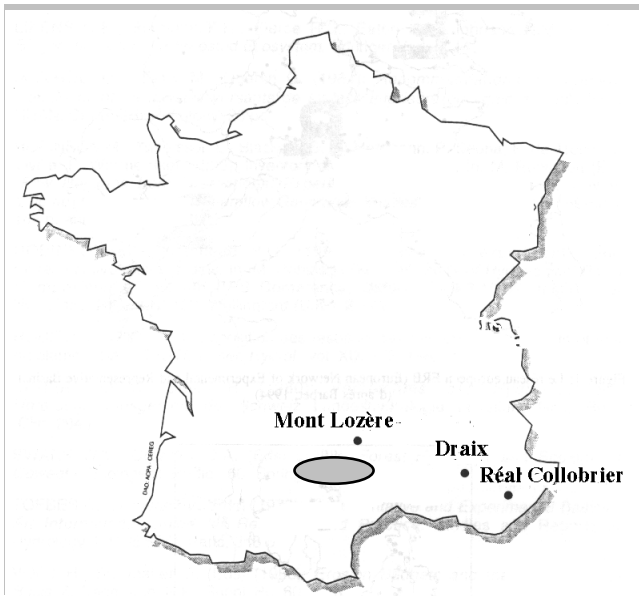


Figure 1 - Les sites de recherche en hydrologie forestière en France méditerranéenne
(en gris la région des bassins étudiés dans le Sud du Massif Central)

Les principales caractéristiques des sites de recherche sont les suivantes (tableau.1) :

Ces trois ensembles de bassins versants n'ont pas été aménagés en fonction du même objectif, et l'hydrologie forestière peut ne pas avoir joué de rôle majeur dans la problématique de mise en place des bassins. Dans ces conditions il n'est pas surprenant que les études, qui ont été conduites indépendamment les unes des autres, utilisent des méthodes différentes :
Les bassins de Draix, situés dans des terrains où les problèmes d'érosion sont très importants (marnes noires de l'Oxfordien), ont pour finalité première d'estimer le rôle protecteur de la forêt dans le cadre de travaux dits de "RTM" (Restauration des terrains de Montagne). Le dispositif expérimental dont les résultats sont utilisés ici, consiste en un bassin reboisé à la fin du 19ème siècle (le Brusquet) et un bassin non reboisé, dont le taux de couverture naturel est faible (cf. Tab. 1). La méthode est donc celle des bassins comparatifs. Les pluies annuelles moyennes sont de l'ordre de 940 mm, avec des maxima journaliers décennaux de 80 mm, et de fortes intensités lors d'orage d'été et d'automne.

* Les bassins du Réal Collobrier ont une finalité plus large d'étude du fonctionnement hydrologique de petits bassins méditerranéens situés sur socle métamorphique (gneiss, micaschistes, phyllades) avec des sols de type ranker, généralement peu épais, ne dépassant pas 30 cm par exemple sur le sous-bassin du Rimbaud. Après un suivi de 25 années, un incendie a notamment détruit plus des 3/4 de la couverture végétale de ce sous-bassin, fournissant l'opportunité d'une étude sur les conséquences hydrologiques de la disparition de la forêt. Les données utilisées ici sont alors celles du bassin du Rimbaud avant et après incendie, comparées avec celles du bassin non modifié du Valescure (Tab. 1). La méthode est donc celle des bassins expérimentaux, même si l'expérimentation n'a pas été vraiment volontaire… Les pluies annuelles sont de l'ordre de 1200 mm, avec des pluies journalières décennales de 150 mm, et toujours de fortes intensités.

* Les bassins du Mont-Lozère sont situés sur des sols granitiques peu épais (moins d'un mètre, le plus souvent), bien filtrants. Ils ont été conçus comme des lysimètres géants, qui devaient permettre d'établir le bilan géochimique de bassins proches, aussi semblables que possible sauf en ce qui concerne le couvert végétal : une pelouse, une hêtraie climacique et une pessière. Quel que soit le type de végétation, les sols sont bien couverts, sauf pour quelques ravines du bassin en pelouse. Les données utilisées ici sont celles des bassins en pelouse (les Cloutasses) et en résineux (la Latte).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des sites de recherche.

Nom du bassin	*Superficie*	*Occupation du sol*	*Pente*	*Période d'étude*
DRAIX				
Laval	86 ha	22 % bosquets ; 10 % herbe ; 68 % sols nus	58 %	1983 - 2000
Brusquet	108 ha	87 % bois ; 13 % sols nus	53 %	1983 - 2000
REAL COLLOBRIER				
Rimbaud	146 ha	maquis ; feu ; repousse	20 %	1968 - 1990 ; 1990 - 2000
Valescure	930 ha	maquis		1968 - 2000
MONT LOZERE				
Latte	19,5 ha	épicéas ; coupe ; repousse	20 %	1981 - 1987 ; 1987 - 1999
Cloutasses	81 ha	pelouse pâturée	10 %	1981 – 1999
Sapine	54 ha	hêtraie climacique	18 %	1982-1999

Après 6 années de mesures, une attaque parasitaire du bassin boisé de la Latte à conduit à sa coupe à blanc. Les

données obtenues sur ce bassin avant et après la coupe, sont comparées à celles du bassin témoin des Cloutasses. La méthode est celle des bassins expérimentaux. Les pluies sont ici beaucoup plus abondantes que sur les bassins précédents, en raison de l'effet orographique que subissent les vents humides d'origine méditerranéenne (le Mont-Lozère culmine à 1699 m) : les précipitations annuelles moyennes avoisinent 1950 mm et les abats d'eau en 24 heures peuvent atteindre 400 mm.

INCIDENCE DE LA FORET SUR LES CRUES

Les résultats concernant le rôle joué par la forêt sur le régime des crues (pointe ou volume) sont très différents d'un site à l'autre.

A DRAIX

Le premier effet du couvert végétal 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 (Richard et Mathys, 1999). Lorsqu'une crue se produit dans les deux bassins, on observe que les pointes de crue sont retardées d'au moins une demi-heure dans le bassin boisé du Brusquet.

Les pointes de crue sont très fortes pour le Laval, ayant atteint 23 $m^3 s^{-1} km^{-2}$, lors d'un épisode pluvieux de 53 mm. Or pour ce même événement, la pointe de crue dans le bassin reboisé du Brusquet n'a été que de 2,3 $m^3 s^{-1} km^{-2}$, soit 10 fois moindre. Au-delà de cas extrêmes, la majorité des débits de pointe du bassin boisé est cinq fois plus faible que ceux du bassin déboisé du Laval. Un exemple est fourni par la crue du 27 mai 1988 (Figure 2).

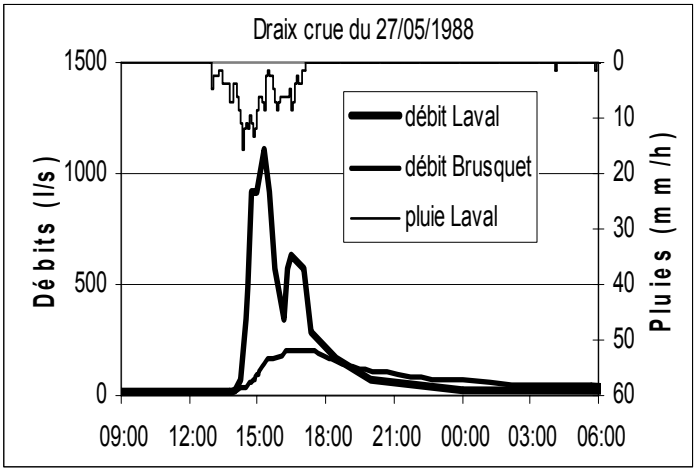


Figure 2 - La crue du 27 mai 1988 dans les bassins du Brusquet (reboisé) et du Laval

Cette crue répond à une averse de 21 mm au Brusquet et de 22 mm au Laval en moins de 4 heures. La pointe de crue au Laval est de 1,3 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ et de seulement 0,2 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ 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* est moins importante que celle de la pointe parce que la crue est plus longue dans le bassin boisé. Dans l'exemple de la crue du 27 mai 1988, 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 ; la réduction du volume de crue dans le bassin boisé est généralement de l'ordre de moitié.

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.

DANS LES BASSINS DU REAL COLLOBRIER

Un incendie de forêt, intervenu durant l'été 1990 à détruit plus de 80 % de la couverture forestière du petit bassin du Rimbaud. L'automne qui a suivi cet incendie, le comportement du ruisseau du Rimbaud est devenu fortement impulsionnel. Ce changement de comportement est bien visible sur la figure 3, qui met en relation les débits instantanés maximaux relevés en automne et les précipitations en 24 h correspondantes.

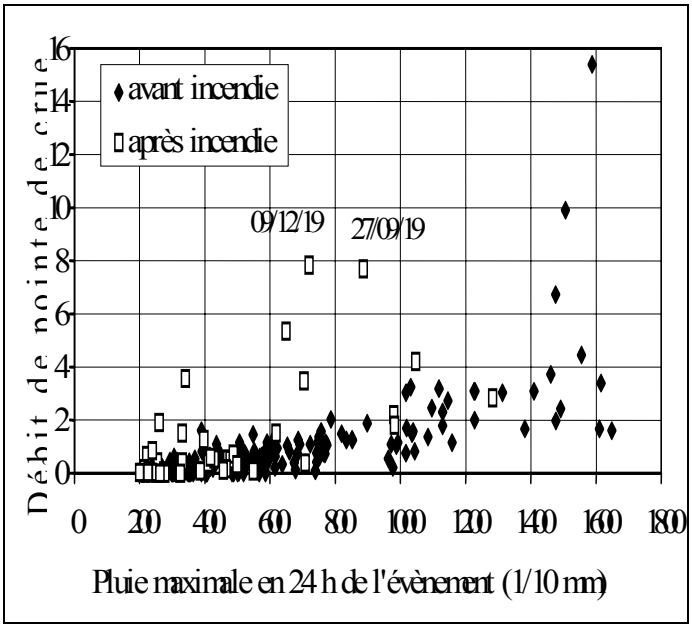


Figure 3 - Relations en automne (septembre, octobre et novembre) entre les débits de pointe de crue (en m^3/s) et les précipitations en 24 heures (période après incendie : septembre 1990 - novembre 1994).

Immédiatement après l'incendie, le débit maximal a atteint 7,8 $m^3 s^{-1}$ le 9 décembre, soit un peu plus que 5 $m^3 s^{-1} km^{-2}$, pour des précipitations ne présentant aucun caractère exceptionnel, ni par leur abondance ni par leur intensité (80 mm, avec des pointes ne dépassant pas 40 mm/h pendant 6 mn). 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 la production d'un ruissellement sur les versants mis à nu par l'incendie (Martin et Lavabre, 1997).
Si l'année suivante (1991-92) n'a connu qu'un seul épisode violent (3,6 m^3s^{-1}, en octobre), plusieurs crues spectaculaires se sont encore produites en 1992-93 (7,7 m^3s^{-1} en septembre ; 3,5 m^3s^{-1} en octobre ; 4,3 m^3s^{-1} en novembre). Ensuite, la reprise végétale est devenue plus efficace 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) : en 1993-94, le débit maximal n'a pas dépassé 2,2 m^3s^{-1}.

Toutefois, de nombreux débits de crue après incendie se positionnent dans le nuage de point représentant les crues avant incendie. Diverses analyses concourent à montrer qu'en fait, ce sont les réponses aux pluies intenses qui sont particulièrement plus violentes après incendie (Lavabre et al., 1997). Les pluies de type frontal, de durée longue et de faibles intensités, génèrent des réponses de crue tout à fait comparables après et avant incendie.

Il apparaît donc que le comportement hydrologique du bassin versant n'est réellement différent après incendie que de façon très fugace lors des pluies intenses. Ce qui se traduit par une augmentation du débit de pointe de certaines crues sans qu'une augmentation sensible des volumes de crue soit discernable.

Ceci est corroboré par l'examen des bilans hydrologiques annuels sur lesquels l'impact de l'incendie de forêt est difficilement discernable et reste dans la marge d'incertitude des mesures et des modélisations utilisées

SUR LE MONT-LOZERE

Les conditions de travail très difficiles qui prévalent lors des pluies cévenoles (dangerosité des orages, fugacité des pointes de crue) empêchent d'établir des courbes de tarage totalement fiables pour les débits les plus forts. La comparaison entre les débits de pointe des bassins en pelouse (les Cloutasses) et en forêt (la Latte) n'est donc pas facile.

Une tentative a pourtant été faite par Lavabre et *al.* (1999) qui, à partir de 48 pointes de crue sélectionnées sur 16 années d'observation, ont déterminé les débits pour les périodes de retour annuelle et décennale, en utilisant la formule de Hazen (1930). Selon ces calculs le débit de pointe annuel serait de 1 $m^3\ s^{-1}\ km^{-2}$ pour le bassin de la Latte et de 1,45 $m^3\ s^{-1}\ km^{-2}$ pour celui des Cloutasses, ce qui tendrait à montrer une certaine réduction de la pointe de crue dans le bassin boisé. En revanche, la tendance change avec les débits décennaux, puisque ceux-ci s'élèveraient à 3,15 $m^3\ s^{-1}\ km^{-2}$ pour le bassin de la Latte et à 3 $m^3\ s^{-1}\ km^{-2}$ seulement pour celui des Cloutasses. Si les pointes de crue semblent amorties par la forêt lors de la crue annuelle, la forêt ne jouerait plus aucun rôle lors de la crue décennale.

La coupe de la forêt, qui intervient après 6 ans d'observation permet une autre approche, à partir de la comparaison des débits mesurés aux stations implantées sur les deux bassins versants pour deux épisodes de fortes crues, celui du 5 au 7 novembre 1984 et celui du 2 au 5 novembre 1994. Cette comparaison ne met pas en évidence une modification sensible du comportement du bassin de la Latte en fonction de la coupe des épicéas (Lavabre *et al.*, 1999b) :

Lors de l'épisode de novembre 1984 (P = 350 mm en 72 h au poste 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 : 2.1 $m^3\ s^{-1}\ km^{-2}$, contre 1.8 $m^3\ s^{-1}\ km^{-2}$ pour celui des Cloutasses. En novembre 1994 (P = 431 mm en 4 jours à La Vialasse, dont 408 mm du 3 au 5), la réponse du bassin de la Latte est encore très légèrement retardée par rapport aux réponses des deux autres bassins et les débits de pointe atteignent respectivement 3.1 $m^3\ s^{-1}\ km^{-2}$ pour le bassin de la Latte et 3 $m^3\ s^{-1}\ km^{-2}$ pour celui des Cloutasses. Or la crue de novembre 1994 est survenue bien après la coupe, dans une période qui marquait peut-être le retour du bassin de la Latte à un fonctionnement semblable à celui qu'il connaissait avant la coupe (Martin *et al.*, 2000).

Si les pointes de crue sont difficiles à connaître, en revanche les volumes de crue sont souvent convenablement mesurés. Un simple graphique de double cumul établi à partir des volumes journaliers écoulés lors des fortes crues par les bassins de la Latte (avant et après la coupe) et des Cloutasses (considéré comme témoin) peut donner des informations sur une éventuelle modification de la relation entre les deux bassins. Ce graphique est basé sur les données des jours où le bassin des Cloutasses a écoulé une lame d'eau supérieure à 30 mm (Figure 4). Des écoulements de cette importance se produisent en moyenne moins de 8 fois par an, mais assurent plus du cinquième des écoulements (21,8 % – Martin *et al.*, 2000).

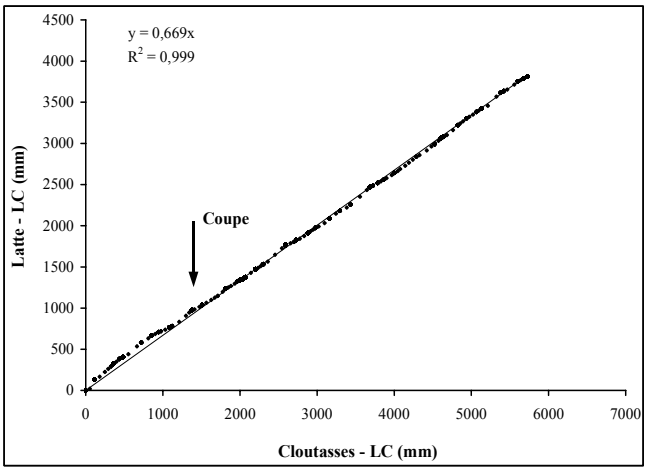


Figure 4 - Double cumul des lames d'eau écoulées par les bassins de la Latte et des Cloutasse lors des très fortes crues.

Cette figure ne montre pas de cassure qui indiquerait un changement de fonctionnement du bassin de la Latte en relation avec la coupe. Ce résultat se retrouve en utilisant un seuil plus faible, puisqu'une étude du même type, menée sur des débits dépassant 20 mm/jour dans le bassin de la Latte, aboutit à des conclusions identiques (Cosandey *et al.*, 2000).

Ainsi la coupe des épicéas du bassin versant de la Latte n'aurait pas entraîné d'augmentation des écoulements lors des fortes crues. Ceci est le fait de la forte perméabilité des sols et des processus spécifiques de formation des crues (Cosandey, 1994).

Il est à noter que les travaux de Cognard-Plancq *et al.* (2001) aboutissent à des conclusions différentes, à savoir que 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. Il n'est donc pas étonnant que, du fait de l'impact très fort de la coupe sur les faibles crues (résultant de la diminution des pertes par interception dont on a montré toute l'importance, Cosandey et al. 2001), cette approche fasse ressortir une tendance globale à l'augmentation des écoulements pour l'ensemble des crues.

LE ROLE DE LA VEGETATION FORESTIERE SUR L'ABONDANCE ANNUELLE DES ECOULEMENTS

A DRAIX

La problématique qui a guidé l'installation des bassins de Draix était celle de l'étude de l'érosion, et la métrologie est essentiellement orientée vers l'observation des événements extrêmes. La mauvaise qualité des mesures de basses eaux ne permet pas d'estimer avec fiabilité les lames d'eau écoulées à l'échelle de l'année hydrologique.

On a vu pourtant que les écoulements de crue étaient beaucoup plus importants dans le bassin non boisé, et il est clair que l'eau retenue dans le bassin boisé est utilisée pour l'alimentation en eau de la forêt, donc perdue pour l'écoulement. Par ailleurs, les observations de terrain montrent que la période sans écoulements est plus courte dans le bassin du Laval, mal couvert, que dans celui du Brusquet, reboisé. Ces observations qui peuvent paraîtrent surprenantes, s'expliquent par la combinaison de deux processus différents.

Si les tarissements sont plus longs dans le bassin forestier dont les sols sont plus épais, les pluies donnant lieu à un écoulement sont beaucoup plus nombreuses dans le bassin non boisé, du fait de la faible perméabilité comme de la faible capacité de rétention des sols.

Une tentative pour combler les lacunes ou corriger les mesures douteuses a pourtant été menée par Poinard (2000), qui a reconstitué les débits annuels pour 2 années caractéristiques. Sa conclusion est que les déficits d'écoulement sont un peu plus élevés – de 5 à 10 % de la pluie incidente– pour le bassin en forêt.

En définitive, bien qu'aucune estimation fiable des différences ne puisse être avancée, les observations conduisent à conclure que dans le bassin boisé de Draix, les pertes par évapotranspiration sont plutôt plus fortes et les écoulements annuels plus faibles que dans le bassin déboisé, bien que cette différence reste minime.

DANS LE BASSIN DU REAL COLLOBRIER

L'étude de l'influence de l'incendie du bassin du Rimbaud est menée par plusieurs approches statistiques et de modélisation pluie-débit (modèles GR). Ces différentes approches sont basées sur la comparaison des écoulements observés après l'incendie avec ceux établis pour la même période à partir d'équations ou de modèles basés sur des relations calculées avant l'incendie entre les pluies et les écoulements du bassin du Rimbaud ou entre les écoulements du bassin du Rimbaud et de celui non incendié de Valescure (Lavabre *et al.*, 2000b).

Toutes les modélisations, que ce soit au pas de temps annuel (Figure 5), au pas de temps mensuel et au pas de

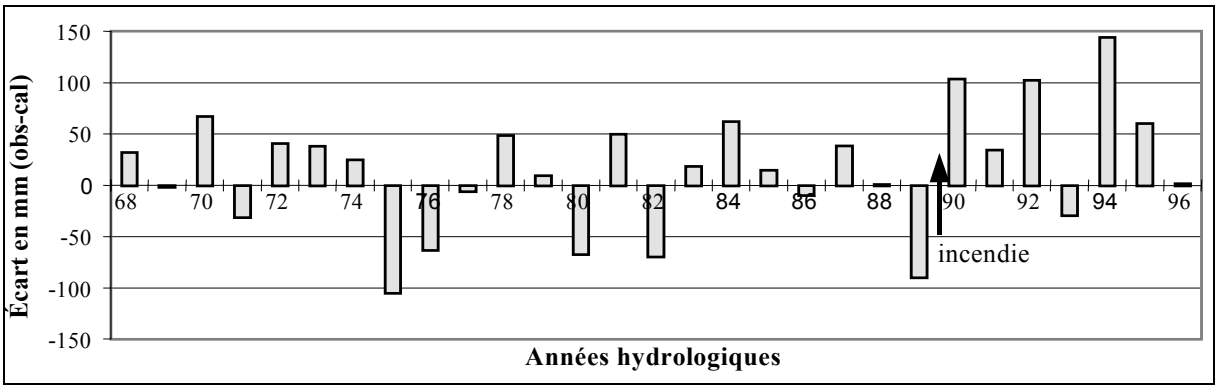


Figure 5 - Écarts entre les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud observés et calculés à partir de la relation pluie-écoulement du bassin du Rimbaud (relation calée avant l'incendie)

temps journalier indiquent une augmentation des écoulements après incendie.

En se fondant sur ces analyses, on pourrait estimer à 100 mm environ le supplément d'écoulement durant les trois années après incendie (ce qui représente une augmentation de l'ordre de 15 %). Il importe pourtant de noter que, ces résultats s'appuient sur le seul pluviographe du bassin du Rimbaud, dont la stationnarité semble devoir être mise en cause : il est probable que la destruction par le feu du couvert végétal autour de l'appareil a provoqué une diminution de son pouvoir de captation (Lavabre *et al.*, 1999a). La comparaison des précipitations enregistrées par le pluviographe du Rimbaud avec celles indiquées par les autres pluviographes du réseau du Réal Collobrier, ne permet pas de trancher (Fourcade, 2001). Mais si, au lieu des pluies mesurées sur le bassin du Rimbaud, on prend comme référence celles mesurées sur le bassin témoin du Valescure, l'augmentation des débits apparaît beaucoup moins nette.

En conclusion, on peut écrire que 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 et des incertitudes métrologiques.

SUR LE MONT-LOZERE

Si l'on compare les écoulements annuels des bassins avant et après la coupe forestière (en année hydrologique, de juillet à juin), on observe une modification sensible après la coupe, comme le montre la figure 6.

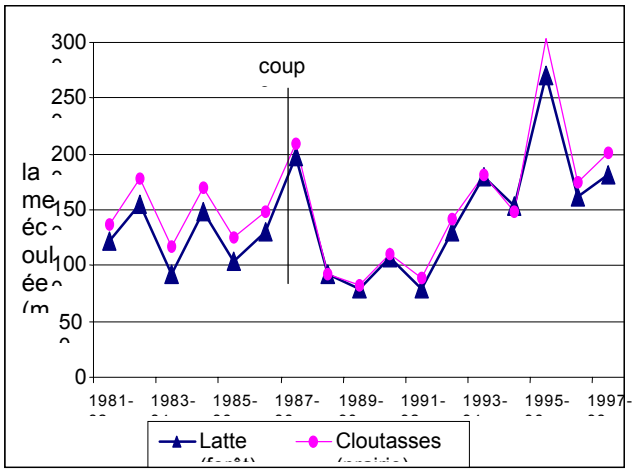


Figure 6 - Ecoulements comparés des bassins de la Latte et des Cloutasses avant et après la coupe.

Avant la coupe, les écoulements des bassins de la Latte sont systématiquement inférieurs à ceux du bassin des Cloutasses. Après la coupe, ils sont confondus ou très proches pendant huit années, ce qui veut dire que les écoulements du bassin de la Latte ont augmenté en valeur relative. Ensuite, il semble que les écoulements redeviennent plus faibles pendant les trois dernières années de mesures.

Cette tendance, s'observe aussi clairement sur un graphique de double cumul entre les débits journaliers du bassin de la Latte et ceux du bassin de référence des Cloutasses (Figure 7).

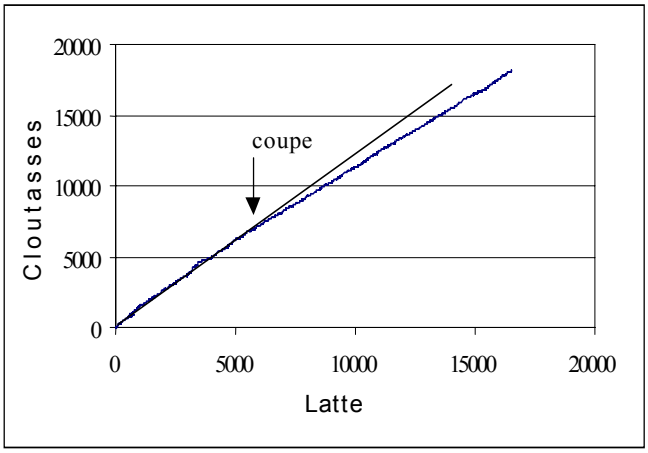


Figure 7 - Double cumul des lames d'eau écoulées mensuelles (mm) des bassins versants de la Latte et des Cloutasses sur la période juillet 1981 - décembre 1998.

Les écoulements mesurés après la coupe sont supérieurs à ceux prévus à l'aide de la régression établie à partir des données recueillies avant la coupe (Martin *et al.*, 2000). Des investigations portant sur les déficits d'écoulement aboutissent à des résultats du même ordre (Cosandey, 1993 ; Didon-Lescot, 1996), de même que des approches par un modèle conceptuel global (le modèle GR, Cognard-Plancq *et al.*, 2001).

En prenant pour référence, non plus le bassin des Cloutasses, mais celui, un peu plus éloigné, de la Sapine (occupé par une hêtraie non modifiée pendant la période d'étude), on aboutit également à des écarts positifs entre, d'une part, les valeurs mesurées et, d'autre part, celles calculées correspondant au fonctionnement antérieur à la coupe. Mais ces écarts se révèlent plus faibles, puisque l'augmentation de l'écoulement annuel ne serait plus que de l'ordre de 5 %.

Cet écart, qui ne s'observait pas pour les très fortes crues (cf. plus haut), s'explique par une augmentation du débit des crues moyennes et faibles, du fait de la diminution des pertes par interception.

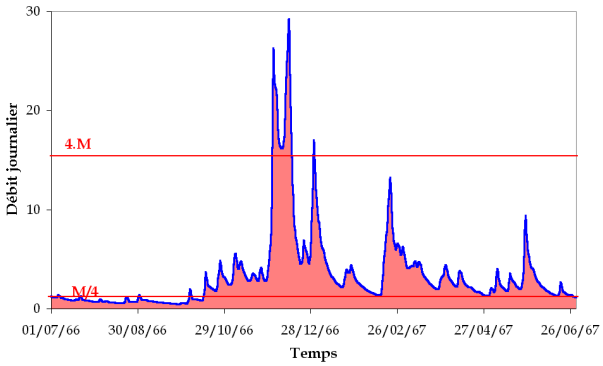
ETUDES MENEES DANS LE SUD DU MASSIF CENTRAL

Il peut être intéressant de compléter cet exposé par le résultat d'une recherche (Andréassian *et al.*, 1999 ; Andréassian, 2002) qui n'a pas été conduite sur des bassins expérimentaux, mais qui a également porté sur les conséquences de la forêt sur le comportement hydrologique des bassins versants, en prenant en compte un plus grand nombre de bassins de superficie plus importante (Tab.2) et une longue période d'observation (de 20 à 30 ans au moins au cours de la période 1960-1996). Les 14 bassins versants

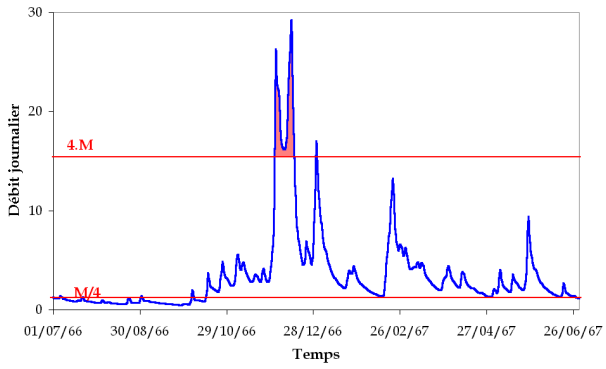
étudiés sont tous situés sur la bordure sud du Massif Central (Figure 1). Leur climat méditerranéen présente cependant un caractère nettement montagnard.

Cette recherche s'est intéressée à quatre variables hydrologiques représentatives du comportement hydrologique d'un bassin versant. Ces variables sont les suivantes (voir Figure 8) :

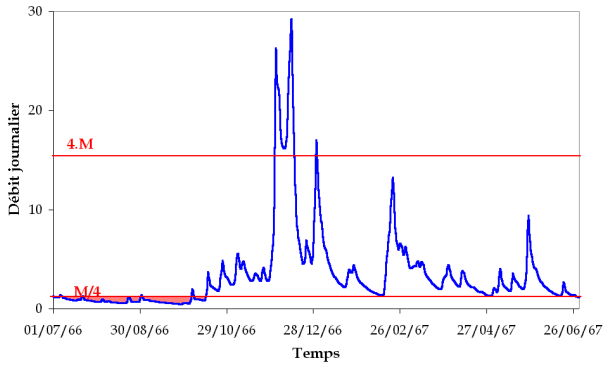
1. l'écoulement total ;
2. l'écoulement en crue (défini comme le volume écoulé au-dessus d'un seuil égal à 4 fois le module de l'écoulement) ;
3. l'écoulement en étiage (défini comme le déficit d'écoulement au-dessous d'un seuil égal à un quart du module de l'écoulement) ;
4. l'écoulement de base (l'indice considéré correspond au rapport entre l'écoulement de base calculé par la méthode de L'vovitch (1979) et l'écoulement total).



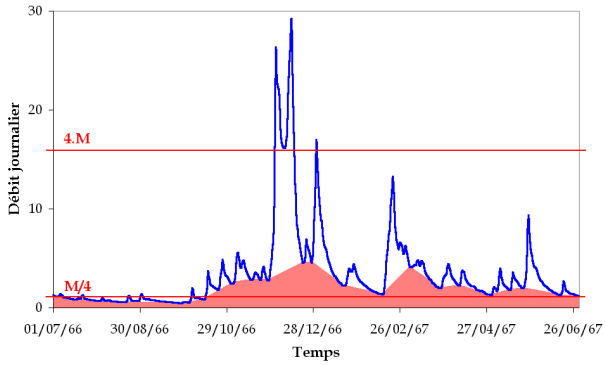
(1) : écoulement total



(2) : écoulement en crue



(3) : déficit d'écoulement en étiage



(4) : écoulement de base

Figure 8 : hydrogramme présentant les lames d'eau correspondantes à chacune des variables hydrologiques retenues. Les deux lignes horizontales représentent respectivement les seuils retenus pour définir les crues (4 fois le module) et les étiages (un quart du module).

L'étude menée sur la bordure Sud du Massif central a consisté à analyser conjointement l'évolution des surfaces boisées et celle des quatre variables hydrologiques :

- Les tendances au sein des quatre variables hydrologiques ont été détectées par le test de non-stationnarité présenté par Andréassian (2002), en se

fixant un seuil de significativité de 5%.

- L'évolution du couvert forestier a été déterminée à partir de l'étude de photos aériennes et des données de l'Inventaire Forestier National (méthode présentée par Muraz, 1999).

L'ensemble des bassins versants considérés montrent une tendance à l'accroissement du couvert forestier, en terme de surface comme de densité. Cette évolution n'appelle pas de commentaire spécifique, dans la mesure où elle correspond à la tendance lourde de déprise agricole et de reprise forestière que connaît l'ensemble du Massif Central. Pour ce qui est du comportement hydrologique, les tendances sont bien moins nettes (Tab. 2) :

Tableau 2 - Tendances observées dans la relation pluies-débits pour les 14 bassins versants étudiés dans le Sud du massif central

Bassin Versant	Surface du BV (km²)	Evolution moyenne du couvert forestier sur la période		Tendance apparente pour chacune des variables hydrologiques :			
		en surface terrière (m²/ha/an)	du volume de bois (m3/ha/an)	1 écoulement total	2 écoulement en crue	3 déficit d'écoulement en étiage	4 écoulement de base
Goudeche *à la Cépède*	10	+ 1.28	+ 0.17	o	o	o	o
Rieumalet *au Pont-de-Montvert*	20	+ 0.35	+ 0.05	o	o	o	+
Mirals *à Rhunes*	12	+ 0.85	+ 0.11	-	o	o	o
Briançon *à Cocurès 2*	25	+ 0.13	+ 0.01	o	o	-	+
Brèze *à Meyrueis*	36	+ 0.67	+ 0.08	-	o	+	-
Dourbie *au Mazet*	43	+ 0.73	+ 0.04	o	o	o	o
Agout *à Fraisse*	48	+ 2.94	+ 0.37	o	o	o	+
Gardon de Saint-Martin *à la Roquette*	31	+ 0.10	+ 0.03	o	o	o	o
Gardon de Saint-Germain *à la Bastide*	31	+ 0.07	+ 0.05	o	o	o	o
Gardon de Sainte-Croix *à Gabriac*	33	+ 0.08	+ 0.01	o	o	o	o
Herault *à Valleraugue*	46	+ 0.14	- 0.07	o	o	o	-
Gardon d'Alès *à la Farelle*	30	+ 0.04	+ 0.01	o	o	-	o
Tarn *à Fontchalette*	67	+ 0.49	+ 0.06	+	o	o	o
Gagnière *à Banne*	55	+ 0.97	+ 0.07	-	o	+	-

: + augmentation. : - diminution. o peu de modification.

- Pour ce qui est de **l'écoulement total**, seulement 4 bassins montrent une tendance significative au seuil retenu. Cette tendance est négative dans 3 cas sur 4, ce qui correspond à l'évolution attendue suite au reboisement d'un bassin versant (Bosch et Hewlett, 1982).
- Pour ce qui est de **l'écoulement en crue**, aucun bassin ne montre de tendance significative. A court terme (une trentaine d'années), le reboisement de ces petits bassins versants du Sud du massif central ne semble donc pas capable d'avoir un effet sur les crues. Il faut rappeler que nous nous trouvons ici dans la zone Cévennes-Montagne Noire, où les crues sont la conséquences d'événements pluvieux très violents, sur lesquels les hydrologues s'accordent pour dire que le couvert végétal n'a qu'un rôle négligeable (Cosandey et Robinson, 2000 ; Cosandey, 1990).
- Pour ce qui est de **l'écoulement en étiage**, seuls 4 bassins montrent une tendance significative au seuil retenu. Cette tendance est positive dans 2 cas (aggravation de la sévérité de l'étiages), et négative dans 2 cas. On ne peut donc rien en conclure sur l'effet de l'évolution du couvert forestier.
- Pour ce qui est de **l'écoulement de base**, 6 bassins montrent une tendance significative. A nouveau, les tendances se répartissent à égalité dans un sens et dans l'autre, et on ne peut donc rien en conclure sur l'effet de l'évolution du couvert forestier.

En conclusion, il apparaît que cette étude n'a pas permis de mettre en évidence une relation simple entre les volumes d'écoulement annuel et la modification du couvert végétal dans la zone Cévennes-Montagne Noire. On peut expliquer cet état de fait par les incertitudes qui demeurent assez fortes tant sur l'estimation des surfaces boisées que sur celle des tendances hydrologiques (notamment en raison de l'incertitude relative à l'estimation de la pluie de bassin versant). Il peut aussi dénoter un impact limité de la forêt sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants étudiés.

QUE CONCLURE DU ROLE HYDROLOGIQUE DE LA FORET EN CLIMAT MEDITERRANEEN ?

COMPLEXITE DES RESULTATS OBTENUS

Si l'on se rapporte strictement à 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 à blanc de la forêt augmente les écoulements annuels d'environ 10 % sur les bassins du Mont-Lozère dans les premières années qui suivent la coupe (mais seulement 5 % si l'on change de bassin de référence). Ce résultat rejoint les observations effectuées sur d'autres bassins de par le monde, largement exposés par ailleurs (Bosch et Hewlett, 1982 ; Lavabre *et al.*, 2000a). 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 présence de la forêt diminue les écoulements.

Par ailleurs, on a vu que l'augmentation observée du couvert forestier depuis un demi-siècle sur la bordure sud du Massif Central ne modifie pas de façon sensible les écoulements annuels. Notons pourtant qu'il s'agit de bassins versant de taille nettement supérieure à celle des bassins de recherche, et qu'ils n'ont pas subi de changement brusque et total de l'occupation de l'espace.

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, dans la gamme des fréquences courantes, sont encore plus affectés, puisqu'ils sont réduits dans un rapport de 1 à 5.

Sur le Réal Collobrier, l'incendie du bassin du Rimbaud a entraîné une augmentation très nette des débits de pointe de crue les premières années après l'incendie. mais cette augmentation s'est avérée de courte durée.

Sur le Mont-Lozère, en revanche, aucune modification des débits de pointe de crue n'a été mise clairement en évidence après la coupe pour les fortes crues. Ce sont les débits moyens qui ont été sensiblement augmentés.

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 pas toujours concordants.

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 (lorsque le bassin de référence n'est pas forestier), les conditions climatiques… qui conditionnent à la fois l'évapo-transpiration (donc les écoulements annuels) et la forme comme le volume des crues.

ROLE DE LA FORET DANS LES RELATIONS PLUIES-DEBITS ; CONSIDERATIONS THEORIQUES 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 élevé, les sols sont, sauf très localement, peu épais, ce qui ne permet pas une forte évapotranspiration d'été.

Les pertes par interception, quant à elles, sont d'autant plus fortes 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 se creuser.

Enfin, 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 profondes, 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 "ruissellement par dépassement d'un seuil d'infiltration") et, d'autre part, le refus d'infiltration d'un sol saturé ("excess saturation overland flow", soit "ruissellement 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 [1]).

Il faut en outre noter 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 forcement 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 revanche, 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 impulsionnel du bassin du Rimbaud immédiatement après l'incendie pourrait s'expliquer, au moins en partie, par l'évolution des OPS.

---

[1] 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.

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'infiltre 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, 1993). 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 dans le sol. Cependant tous les auteurs ne sont pas d'accord sur ce point (Rawling et al., 1997) .

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 écoulement superficiel, résultant de la fermeture de la surface du sol sous l'impact des gouttes de pluie, peut se produire 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 un à plusieurs mm par jour, expliquent la forte augmentation des débits pour les crues provoquant des écoulements inférieurs à 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.

CONCLUSION GENERALE

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 que l'on veut estimer : ici le rôle de la végétation. De plus, à ces incertitudes s'ajoutent celles des 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.

BIBLIOGRAPHIE :

Andréassian, V. 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Ph.D. Thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
.

Andréassian V. (Coordinateur), Tangara M., Muraz J., Caugant C., Cosandey C., Dérioz P., Laques A.E., Bourreau J.G., Didon E., Durrieu S., Hamza N., 1999 - 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 Sociétés du CNRS."

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.

Bosch J.M. and Hewlett J.D., 1982 - A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation on water yield and evapotranspiration. J. Hydrol., 55 : 3-23.

Cognard-Plancq A.L., Marc V., Didon-Lescot J.F., Normand M.(2001) - The role of forest cover on streamflows down sub-Mediterranean mountain watersheds : a modelling approach. Journal of Hydrology, vol. 254, p. 229-243.

Combes F., Hurand A., Meunier M., 1994 - La forêt de montagne : un remède aux crues. Actes des 23èmes Journées de l'Hydraulique "Crues et inondations" (Nîmes, 1994), Edit. SHF, pp 475-480.

Cosandey, C., 1990. Etude des crues Cévenoles : conditions d'apparition dans un petit bassin versant forestier sur le versant sud du Mont Lozère. IAHS Publication n° 191: 103-115.

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, 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. and Robinson, M., 2000. Hydrologie continentale. Armand Colin, Paris, 360 pp.

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.

Fourcade B., 2001 - Fonctionnement hydrologique et hydrochimique d'un petit bassin versant méditerranéen. Conséquences de la variabilité hydrologique et d'un incendie de forêt (bassin du Rimbaud, Réal Collobrier, Var). Thèse de l'Université Montpellier II, 181 p.

Hazen A., 1930 - Flood flows, a study of frequencies and magnitudes. Edit. Wiley, New-York.

Lavabre J., Folton N., Arnaud P., Martin C., 1999a - 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 métrologie. 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., avec la collaboration de Didon-Lescot J.F., 1999b - 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.

Lavabre J., Andréassian V., avec la collaboration de Laroussinie O. (2000a) - Eaux et Forêts. La forêt. Un outil de gestion des eaux. Cemagref Editions, coll. Ecosystèmes Forestiers, n° 1, 116 p.

Lavabre J., Martin C., Folton N. (2000b) - 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 Editions, Coll. Etudes - Gestion des milieux aquatiques, n° 16, Martin C. et Lavabre J. édit., pp 33-49.

L'vovitch, M.I., 1979. World water resources and their future. American Geophysical Union, Washington

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. Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 42, n° 6, pp 893-907.

Martin C., Didon-Lescot J.F., avec la collaboration de Cosandey C., 2000 - Le rôle du couvet 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.

Michel C., Edijatno, Leviandier T., 1991 - Progrès et application de la modélisation conceptuelle pluie-débit. Rapport quadriennal pour la XXème 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.

Muraz, J., Durrieu, S., Labbé, S., Andréassian, V. and Tangara, M., 1999. Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG? Ingénieries - EAT, 20(39-58).

Poiniard D., 2000 - Analyse hydrologique de deux bassins montagneux à couvert végétal contrasté. DEA, Université d'Avignon, 42 p + Annexes.

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), Edit. Cemagref, 10 p.

Rawlins B.G., Baird A.J. Trudgll S.T. and Hornung M., 1997 - Absence of preferencial flows in the percolating waters of a coniferous forest soil. Hydrol. Process, vol 11, 575-585.

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.

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.