

Analyse temporelle et spatiale des apports de crue sur un bassin méditerranéen: relation avec les processus hydrologiques

J. M. GRESILLON, A. TAHA & F. LE MEILLOUR

Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE, INPG, UJF, CNRS URA 1512), BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

J. LAVABRE

Centre d'Etude du Machinisme Agricole, du Génie Rural des Eaux et des Forêts (CEMAGREF), Le Tholonet, BP 31, 13612 Aix-en-Provence Cedex 1, France

C. PUECH

Centre d'Etude du Machinisme Agricole, du Génie Rural des Eaux et des Forêts (CEMAGREF), BP 5095, 34033 Montpellier Cedex, France

Abstract The way by which rainwater reaches the river bed during a flood is still often unknown, especially on that kind of basin where the climate is dry but the soil well covered with vegetation. Earlier studies on a mediterranean basin show that contributive saturated areas, if not alone, play an important role (Gresillon, 1994). The aim of this paper is to determine which kind of hydrological features can be related to the flow generation mechanisms. The Real Collobrier basin (a 70 km² French basin), situated in the Maures mountains, is examined at three different scales (basin, sub-basin and hillslope scale). At each of these scales, some relation between the hydrological characteristics and the flow generation mechanisms is established. The annual storage capacity is examined at the basin scale, its spatial distribution is analysed at the sub-basin scale, and even for flood events. Then, at the hillslope scale, the movement of water is described for some flood events. The effect of a fire on a small sub-basin is also used in order to fit the main role of the vegetation on the flow mechanisms.

INTRODUCTION

Les mécanismes qui commandent la formation des débits dans les rivières sur les bassins versants méditerranéens restent encore très peu connus. Sur le bassin du Réal Collobrier (sud de la France), la sécheresse des étés, la grande profondeur des nappes phréatiques pérennes sur ce type de bassin rendaient peu vraisemblable l'hypothèse de la constitution de zones saturées capables de refuser l'infiltration et de provoquer des écoulements de surface. Pourtant, au travers d'une analyse temporelle et spatiale des capacités d'absorption du bassin, du comportement d'un versant pendant un hiver, ou d'un sous-bassin après incendie, l'étude qui suit permet de valider ce mode de formation des débits et d'en attribuer la responsabilité à la présence de la végétation.

ANALYSE A L'ECHELLE GLOBALE DU BASSIN

Le bassin du Réal Collobrier est situé dans le massif des Maures. L'axe général de l'écoulement est orienté est-ouest, prenant naissance dans les reliefs de la bordure est du bassin. Les altitudes sont élevées à l'est (maximum 770 m), nettement plus faibles à l'ouest (80 m à l'exutoire). La pluviométrie moyenne annuelle subit de forts gradients de l'est où elle dépasse 1200 mm, à l'ouest où, à douze kilomètres de là, elle n'est plus que de 800 mm. Les formations géologiques sont cristallines et présentent un métamorphisme décroissant d'est en ouest: gneiss, schistes, phyllades. Les dépôts alluvionnaires sont limités à la partie ouest de la plaine du Réal Collobrier. Les sols sont peu profonds sur les gneiss, davantage sur les phyllades et peuvent atteindre quelques mètres dans les alluvions. La végétation est abondante, composée de forêts de chênes, pins et châtaigniers en altitude, de vignes dans la vallée; quelques zones de roche nue apparaissent notamment en altitude. Les débits sont mesurés sur onze stations limnimétriques délimitant autant de sous-bassins emboîtés dans celui du Réal Collobrier (la surface des bassins concernés varie de 70 ha à 70 km²).

Analyse temporelle

Le décalage temporel entre le débit et la pluie, dû à des phénomènes de transferts, est bien connu, à l'échelle de temps de l'épisode. Bien que d'une toute autre nature, un décalage temporel existe aussi lorsque l'on travaille à l'échelle de temps annuelle; dans ce cas, il s'explique par la régulation du stockage de l'eau dans le sol et le sous-sol sous l'effet de l'évaporation. Sur le bassin du Réal Collobrier, où les étés sont très secs, les écoulements sont faibles en automne en dépit d'une pluviosité élevée. En hiver au contraire, les écoulements sont importants pour des pluies du même ordre. Weesakul (1992) et Puech (1993) montrent qu'après l'été, il faut en moyenne que le total cumulé des précipitations ait atteint environ 300 mm pour qu'une pluie puisse engendrer des écoulements conséquents dans la rivière. Globalement, les écoulements engendrés par une pluie sont de plus en plus abondants d'octobre à février, les pluies de l'automne et du début de l'hiver servant d'abord à reconstituer des réserves souterraines avant de nourrir les écoulements. Schématiquement, si R est le volume de stockage à reconstituer après chaque été, la pluie P_i de l'année qui suit ne peut donner qu'un volume d'écoulement $P_i - R$. En conséquence, les proportions moyennes d'écoulement sur une année $(1 - R/P_i)$ sont croissantes avec la pluviométrie annuelle P_i . La Figure 1 relative au bassin du Réal Collobrier à la station "Pont de fer" (70 km²), illustre cette croissance qui a été exprimée sous forme linéaire pour plus de simplicité.

Le même décalage temporel est observé entre les pluies et les débits à l'échelle de chaque sous-bassin. La Figure 2 (Lavabre *et al.*, 1991) compare les pluies médianes et les écoulements médians, mois par mois, de la période 1967-1990 pour le sous-bassin "Rimbaud" (1.4 km²), dont les épaisseurs de sol sont pourtant parmi les plus faibles que l'on puisse observer sur le bassin du Réal Collobrier. Le décalage entre pluie et débit est net: pour des cumuls pluviométriques comparables, les écoulements après janvier sont nettement supérieurs à ceux du début de l'année hydrologique (août à décembre). La recharge des nappes souterraines dans le bassin du Réal Collobrier mobilise donc les eaux des premières pluies après l'été. Le bassin étant capable d'absorber les pluies très

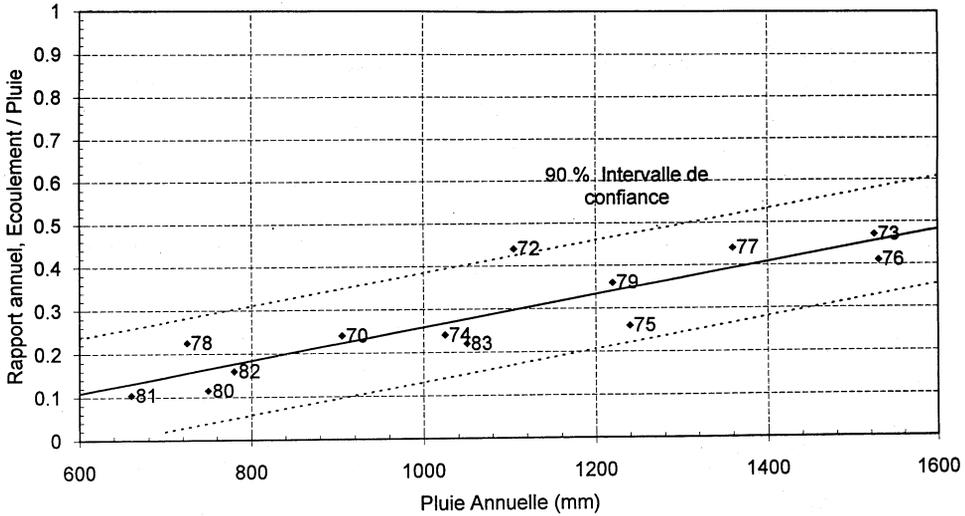


Fig. 1 Liaison entre le rapport des écoulements sur les pluies et la pluviométrie annuelle sur le bassin du Réal Collobrier.

intenses de l'automne mais pas celles de l'hiver, la capacité d'infiltration des sols du bassin ne semble pas être liée à des caractéristiques physiques du bassin telles que les conductivités hydrauliques. La génération des écoulements de crue n'est pas dominée par des phénomènes de refus d'infiltration de type hortonnien.

Analyse spatiale

Echelle de temps annuelle La répartition spatiale des apports sur le bassin complet a été étudiée, à l'échelle de temps annuelle, en adoptant la méthode qui suit.

Sur l'ensemble du bassin, certaines catégories de zones hydrologiquement homogènes ont été supposées. Il s'agit de surfaces qui, en raison de leur géologie, de leur pente ou de leur végétation (etc.), transforment la même proportion de la pluie en débit et telles que leurs contributions à la rivière s'ajoutent. Pour chacun des onze sous-bassins du Réal Collobrier sur lesquels des mesures de pluie et de débit sont disponibles, l'hypothèse a été faite que les différences de rendements hydrologiques annuels (rapport des volumes écoulés aux volumes précipités) proviennent de l'importance relative de ces différentes zones homogènes. De telles zones homogènes du point de vue de la catégorie végétale notamment ont été identifiées en utilisant la télédétection comme technique de définition spatiale (Weesakul, 1992; Puech, 1993). Elle conduit au découpage de l'ensemble du bassin en zones représentant cinq catégories végétales (sols nus, chênes, châtaigniers, pins et vignes). La résolution numérique du système linéaire à laquelle conduit cette hypothèse amène à distinguer nettement ces espèces végétales du point de vue de leur réponse hydrologique. Certaines essences, comme la vigne et les chênes, semblent absorber toute la pluie, tandis que d'autres, comme les châtaigniers et les pins, restituent à la rivière une part plus importante des eaux de pluie. Les sols nus (souvent des gneiss) génèrent des écoulements importants. L'étude montre par ailleurs qu'aucun

autre critère de découpage de l'espace (géologie, pentes etc.) ne permet de différencier aussi nettement les zones d'apport.

Ces résultats peuvent être interprétés en terme de capacité de stockage des sols: très faible ou nulle sur les sols nus ou presque nus, cette capacité est plus grande mais limitée pour les châtaigniers et les pins (400 mm), encore plus importante pour les zones couvertes de chênes (750 mm) et davantage encore dans les vignes. Ces dernières étant concentrées dans les vallées alluviales, on peut comprendre ce résultat, les alluvions ayant une capacité d'absorption très importante. En ce qui concerne les autres catégories végétales, dont la distribution spatiale est indépendante de la géologie et des sols, la question posée est la suivante: le rôle des essences végétales sur les volumes d'écoulements ou de stockage provient-il de l'interception de la pluie par la canopée (Obled *et al.*, 1993) qui diffère selon les essences, ou bien du développement d'un système racinaire propre à chaque espèce, et de son effet sur l'infiltrabilité du sol?

Echelle de temps de l'épisode En sélectionnant quelques épisodes de crues violentes sur l'ensemble du bassin et de ses sous-bassins, il est possible de calculer un coefficient d'écoulement par bassin versant, rapport du volume écoulé sur chaque bassin à celui de la pluie qui l'engendre (Le Meillour, 1992). La pluie est mesurée sur chaque sous-bassin, les volumes écoulés sont déterminés en retranchant le débit initial et en considérant que la pluie engendre des débits pendant une dizaine de jours (jusqu'à ce que le débit revienne pratiquement à sa valeur d'origine).

La Figure 3 donne un exemple de la répartition spatiale des coefficients d'écoulements pour un épisode d'hiver sur l'ensemble des sous-bassins du Réal Collobrier. Pour toutes les crues, le résultat garde la même structure spatiale: à l'échelle de temps de quelques jours, les sous-bassins situés à l'est et en altitude restituent une proportion beaucoup plus importante des eaux de la pluie qu'ils reçoivent que la partie alluviale, moins haute et plus plate. Les "zones contributives" sur le Réal Collobrier (au Pont de

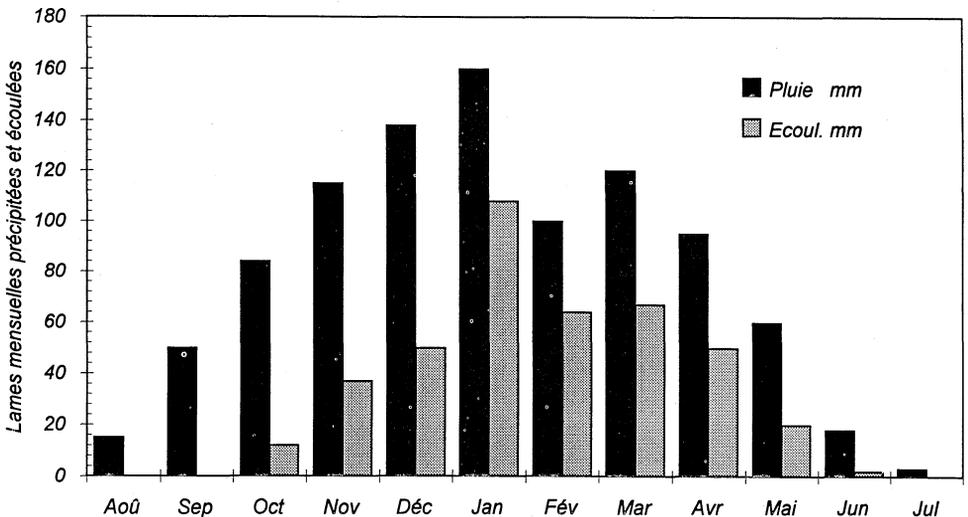


Fig. 2 Valeurs médianes des pluies et des écoulements mensuels sur le sous-bassin du Rimbaud, période 1967-1990.

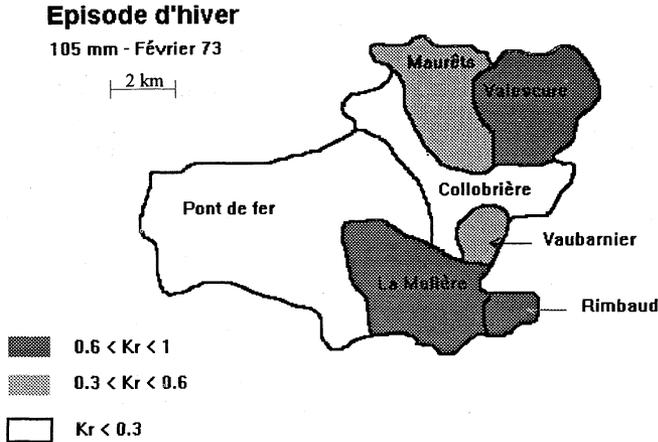


Fig. 3 Répartition spatiale des apports pour une crue d'hiver sur le bassin du Réal Collobrier.

Fer) se situent à l'amont et pratiquement pas à l'aval, sauf quelques cas particuliers.

En conformité avec l'analyse précédente, il est probable que ce résultat provient du fait que les zones de stockage des eaux se situent à l'aval (alluvions) beaucoup plus qu'à l'amont (sols peu profonds) dans ce bassin. Les "nappes" sont à l'aval, elles sont rares à l'amont où, lorsqu'elles existent, elles affleurent et engendrent des sources.

La saturation des sols de surface sur ce bassin, résultat de l'intersection des nappes avec la surface du sol, apparaît plus vite à l'amont qu'à l'aval en raison des faibles profondeurs de sols. Une modélisation des surfaces saturées qui ne tiendrait pas compte des profondeurs de sols sur le bassin du Réal Collobrier conduirait probablement à des résultats irréalistes.

ANALYSE A L'ECHELLE D'UN SOUS BASSIN

Le sous-bassin nommé "Maurets" a une superficie de 8.4 km². il est situé au nord-est du grand bassin, sa couverture végétale est conforme à celle du bassin entier, seules les vignes y sont très peu représentées. Le sens de son écoulement est nord-sud, le substratum est formé de phyllades au nord, d'amphibolites au centre et de schistes et de gneiss au sud. Sa pluviométrie moyenne est de 1100 mm, sans gradient d'altitude sensible (en raison de son orientation parallèle aux isohyètes annuels).

Sur ce sous-bassin, une station limnimétrique a été installée en 1991, fermant la partie nord (station "Guérin"), constituée de phyllades. La superficie contrôlée par cette station est de 5.4 km². Cette nouvelle station limnimétrique permet de comparer les apports en provenance de l'amont du sous-bassin avec ceux de l'aval où les sols, surtout amphibolitiques, sont en moyenne plus profonds. La comparaison des débits spécifiques moyens journaliers de la partie amont de ce sous-bassin avec ceux de l'ensemble du sous-bassin, montre que, en période d'étiage, seul l'amont fournit du débit, l'aval absorbant plutôt. Dans la tranche des débits supérieurs à 3 l s⁻¹ km⁻², l'aval et l'amont du bassin semblent fournir des apports équivalents. En période d'étiage, alors que le

bassin est très sec, les capacités d'absorption sont donc plus fortes à l'aval qu'à l'amont, puis, pour les épisodes de crues intervenant sur bassin plus humide, elles semblent bien équilibrées et équivalentes entre l'aval amphibolitique et l'amont moins altéré.

Dans le même espace des débits spécifiques amont comparés à ceux de l'ensemble du sous-bassin, mais au pas de temps de la demi-heure, il semble que, pour des crues importantes, la différence de comportement entre les deux parties du bassin (amont et aval) ne soit perceptible qu'au delà de $100 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ où l'amont (Guérin) fournit davantage que l'aval (Fig. 4). Une durée de transfert de une heure entre les deux stations limnimétriques qui sont séparées par une distance de trois kilomètres a été supposée pour établir ces graphiques. Ainsi, à l'occasion des crues, le bassin a une réaction à la pluie spatialement quasi uniforme si on raisonne à l'échelle de temps de l'épisode, sauf au delà des débits très importants où l'amont produit davantage que l'aval.

La différence de comportement entre l'amont (Guérin) et l'aval (Maurets) est particulièrement nette au moment des premières pluies après l'été. Le Tableau 1 montre

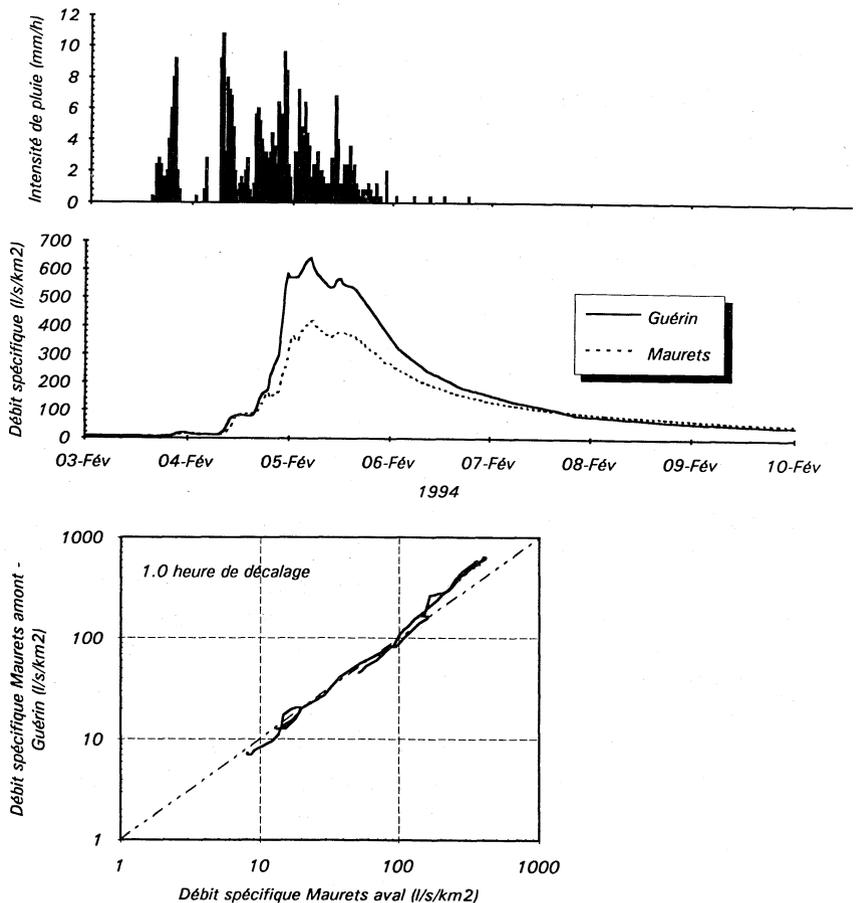


Fig. 4 Comparaison des débits spécifiques entre l'amont du sous-bassin des Maurets (Guérin) et l'ensemble du sous-bassin, au pas de temps de la demi-heure pour une crue de février 1994.

Tableau 1 Comparaison des débits maxima observés après un été aux stations amont et aval sur les Maurets.

Date de la crue	Pluie (mm)	Débit max. amont ($l\ s^{-1}$)	Débit max. aval ($l\ s^{-1}$)
22 septembre 1992	41	31	0
27 septembre 1992	61	121	18
03 décembre 1992	27	56	67
28 février 1993	113	762	1030

l'évolution des débits de pointe de crue aux deux stations amont et aval du bassin depuis la fin de l'été 1992, jusqu'à l'hiver 1993. Il montre que les volumes de stockage se situent surtout dans la partie aval du bassin et que les pluies remplissent d'abord ces volumes avant d'engendrer des débits conséquents, tandis qu'à l'amont ces derniers progressent plus rapidement.

Ces résultats montrent aussi que la part des pluies qui contribuent à la recharge du sol et du sous-sol diminue tout au long de l'automne et au début de l'hiver. Le "débordement" de ces réservoirs souterrains n'apparaît pas à partir d'un seuil de pluie, mais constitue un phénomène dont la dynamique est liée à l'état d'humidité du bassin, à la manière d'un développement de zones saturées.

ANALYSE AU NIVEAU D'UN VERSANT

L'observation à l'échelle hebdomadaire des niveaux piézométriques et tensiométriques dans un versant de la rive gauche de la rivière des Maurets permet de préciser les conditions d'apparition des débits dans la rivière. La Figure 5 montre la chronique des pluies, pressions capillaires mesurées avec des tensiomètres à différentes profondeurs, niveaux piézométriques et débits dans la rivière pour la période de février à mai 1993. Les tensiomètres sont situés à vingt mètres de la rivière, à une cote de trois mètres au dessus de celle-ci, les trois piézomètres sont respectivement distants de dix mètres (BL4), trente mètres (BH4) et cinquante mètres (BH3) de la rivière. Ces mesures montrent que la crue importante du 26 avril est intervenue lorsque la succion capillaire dans l'ensemble du profil était quasi nulle, et qu'en conséquence, la pluie a pu pénétrer verticalement dans le sol et faire monter le niveau dans les piézomètres.

Les tensiomètres ayant été automatisés à la fin de 1993, des résultats plus précis au pas de temps de la demi-heure sont disponibles depuis cette date. La Figure 6 donne un exemple des mesures tensiométriques relevées à l'occasion d'une crue importante (7 janvier 1994). Les premières pluies (6 janvier) permettent d'atteindre la quasi saturation des sols jusqu'à la profondeur de 60 cm dès le milieu de la journée; néanmoins les véritables débits ne sont apparus que le 7 janvier, à la faveur d'une averse dont l'effet a été de créer des pressions positives dans le sol (entre 3 h et 12 h, voir Fig. 6). Les gradients verticaux de charge hydraulique sont alors très faibles, l'eau ne peut pratiquement plus pénétrer dans le sol, ce qu'elle pouvait encore faire auparavant bien que les pressions capillaires aient été quasi annulées. Cet épisode montre que l'annulation des pressions capillaires du sol n'est pas suffisante pour que la surface qui

les domine devienne "contributive": dès le milieu de la journée du 6 janvier les sols sont saturés sans engendrer de véritables débits. Il faut en outre que les gradients verticaux soient faibles ou nuls, ce qui est le cas le 7 janvier entre 3 h et midi, période correspondant précisément au maximum de la crue. Dans le cas de l'épisode présenté, une nappe fugitive est apparue sur une courte période; elle a rempli l'ensemble du profil du sol à l'endroit où se trouvent les tensiomètres et a pratiquement atteint la surface du sol. Le profil des pressions et des charges au moment de la crue montre qu'il subsiste un faible gradient vertical. Compte tenu de la valeur de la conductivité hydraulique des sols (Taha et al., 1993), un débit d'infiltration de l'ordre du mm h^{-1} continue de pénétrer dans le

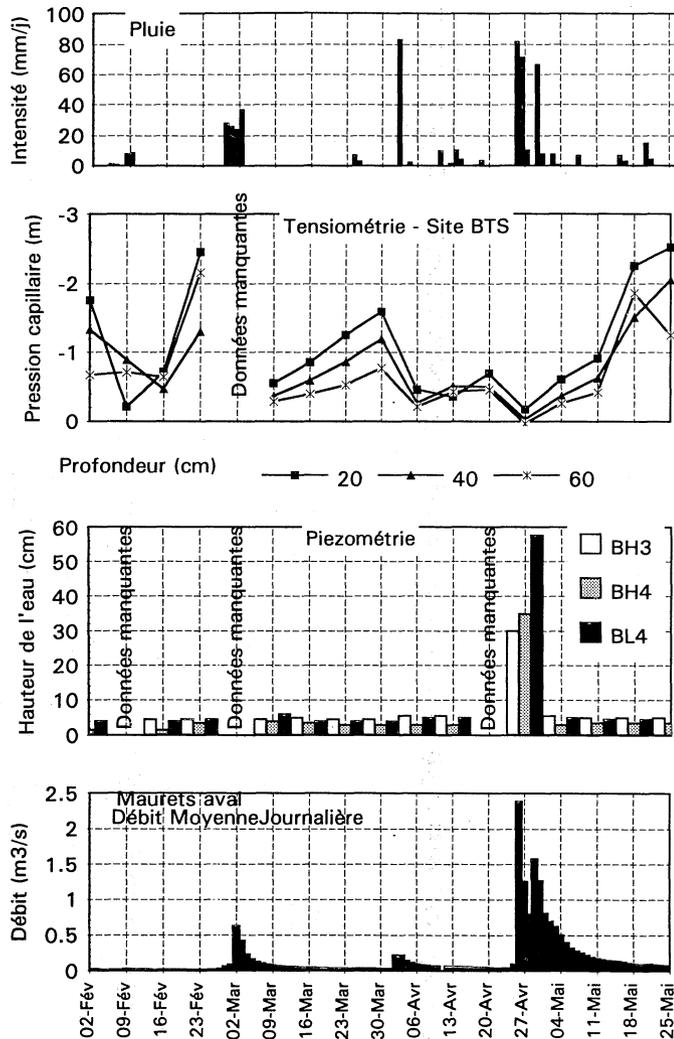


Fig. 5 Chronique des mesures de pluies, tensiométrie, piézométrie (pas de temps hebdomadaire) et débits de février à mai 1993 sur un versant des Maurets.

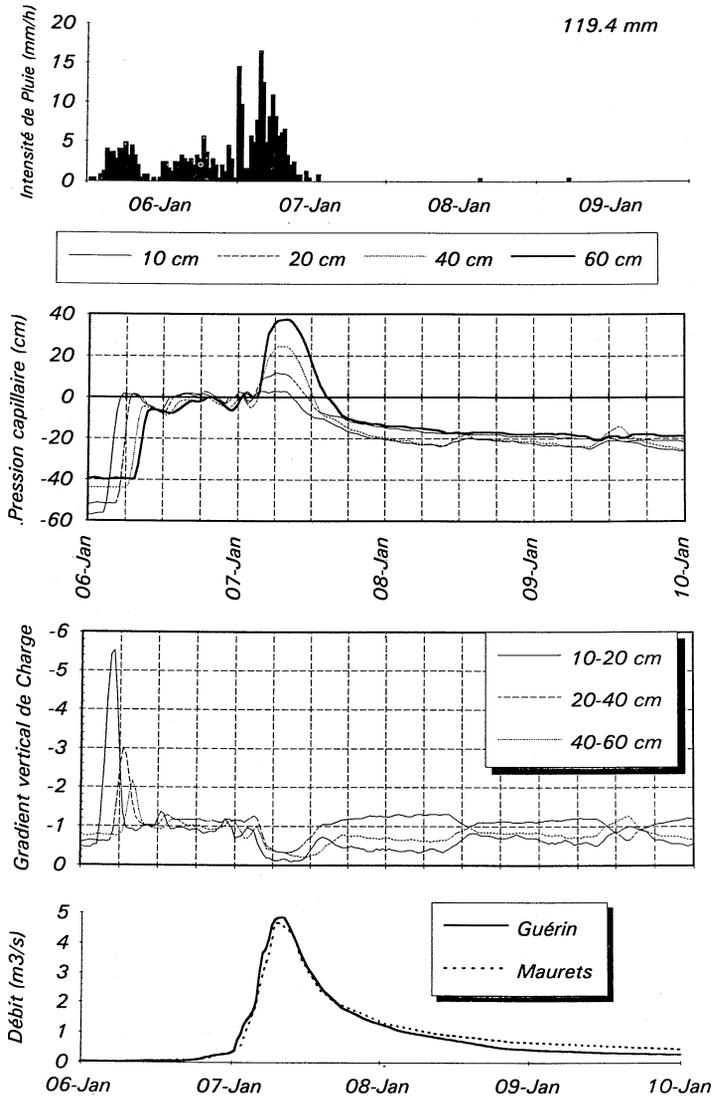


Fig. 6 Chronique des pluies, tensiométrie, gradients de charge associés et débits au pas de temps de la demi-heure pour la crue du 7 janvier 1994 sur un versant des Maurets.

sol au moment du plus fort de la crue. Cette nappe disparaît très vite après la pluie. Le parallélisme entre la décroissance du débit dans la rivière et celle des pressions capillaires est remarquable. D'autres épisodes manifestent le même type de comportement.

Ainsi, au niveau d'un versant en pente, à proximité de la rivière, une intumescence de nappe se manifeste clairement à l'occasion des crues importantes. Cette nappe n'a pu être constituée qu'après que des pluies antérieures (indépendamment de leurs intensités) aient pénétré dans le sol et fait disparaître les pressions capillaires.

APPORT D'UN INCENDIE A LA COMPREHENSION DE L'HYDROLOGIE DU BASSIN

Les effets hydrologiques de l'incendie de l'année 1990 sur le bassin du Rimbaud, ont été analysés (Lavabre *et al.*, 1991). Ils montrent que, durant la première année après l'incendie, lorsqu'aucune végétation n'a pu reprendre, les modifications suivantes sont observées:

- le déficit initial d'écoulement (cumul des pluies depuis le début de l'année hydrologique avant intervention des écoulements permanents) est largement diminué;
- les écoulements mensuels sont nettement supérieurs à ceux que l'on calcule au moyen d'un modèle hydrologique (GR3M) calé sur les données avant incendie;
- les débits maxima journaliers sont largement supérieurs à ceux que prévoit un modèle hydrologique calé sur les données avant incendie (GR3J). A l'échelle journalière, les temps de réponse sont fortement raccourcis par l'incendie.

Tout se passe comme si l'absence de végétation favorisait l'intervention des écoulements de surface de type hortonien. A contrario, une couverture végétale dense favorise l'infiltration et le stockage souterrain. L'analyse fine des conductivités hydrauliques (Taha *et al.*, 1993; Mertz, 1994) montre d'ailleurs que celles-ci sont très fortes en surface lorsqu'un système racinaire est bien développé, et qu'elles décroissent en dessous. Cette zone racinaire constitue une zone tampon par laquelle s'effectue l'alimentation des couches moins perméables, sur une échelle de temps plus longue que celle de la pluie. Au contraire, l'absence de végétation détruit l'organisation de surface du sol, ferme les pores superficiels ("battance"), rend inactive la zone racinaire tampon et contribue à une plus grande violence des crues.

CONCLUSION

L'alimentation des crues est fortement conditionnée par les capacités de stockage du sous-sol du bassin étudié. Fortes dans les parties basses des bassins, ces capacités de réserves sont beaucoup moins importantes à l'amont des bassins. La présence de la végétation, notamment celle qui développe un système racinaire dense, favorise l'infiltration et donc le remplissage des réservoirs souterrains. Après que ces volumes aient été remplis, l'alimentation des rivières provient des surfaces saturées contributives qui interviennent plus tôt à l'amont qu'à l'aval des bassins. D'autre part, il semble que la saturation réelle des sols ne soit effective que lorsque les gradients de charge verticaux deviennent très faibles, c'est-à-dire lorsque de véritables nappes apparaissent. Ce n'est que dans ce cas que des débits conséquents apparaissent en rivière. D'autre part, sur le bassin du Réal Collobrier, ces intumescences de nappes semblent fugitives, leur durée de vie ne dépassant pas celles de la crue. Enfin, la destruction de la végétation par un incendie sur un petit sous-bassin a rendu les écoulements beaucoup plus violents, probablement en raison de l'intervention beaucoup plus massive des écoulements de surface de type hortonien, inactivant partiellement le rôle des volumes de stockage souterrains.

Ainsi, les stockages souterrains et leur effet de décalage temporel entre la pluie et le débit à l'échelle annuelle sur un bassin versant, semblent bien être la marque de la dominance des apports par surfaces saturées contributives à l'occasion des crues.

REFERENCES

- Gresillon, J. M. (1994) Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants. Approches numériques et expérimentales à différentes échelles. *Document présenté pour le Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches*.
- Lavabre, J., Sempere Torres, D. & Cernesson, F. (1991) Etude du comportement hydrologique d'un petit bassin versant méditerranéen après la destruction de l'écosystème forestier par un incendie. Premières analyses. *Hydrol. continent.* 6(2), 121-132.
- Le Meillour, F. (1992) Analyse spatiale et temporelle des apports à la rivière Réal Collobrier. *Mémoire DEA Université Joseph Fourier, Grenoble*.
- Mertz, M. C. (1994) Caractérisation hydrodynamique d'un sol au voisinage de la surface. Influence des macropores et conséquences sur l'infiltration. *DEA Université Joseph Fourier, Grenoble*.
- Obled, Ch., Beven, K. & Wendling J. (1993) The role of spatially variable rainfalls in modelling catchment response: an evaluation using observed data. (Soumis à *J. Hydrol.*).
- Puech, C. (1993) Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Applications à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche. Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Taha, A. & Gresillon, J. M. (1994) Modeling the link between hillslope water movement and river flow: Application to a small Mediterranean catchment. In: *Oceans, Atmosphere, Hydrology & Non-Linear Geophysics* (Proc. XIX EGS General Assembly, Annales Geophysicae, Grenoble), Part II, suppl. II to vol. 12.
- Weesakul, U. (1992) Apports de la télédétection et de l'information géographique numérique dans la compréhension du fonctionnement hydrologique de bassins versants méditerranéens. Thèse Université des Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier.