

Impact d'un incendie de forêt sur l'hydrologie et l'érosion hydrique d'un petit bassin versant méditerranéen

J. LAVABRE

CEMAGREF, Groupement d'Aix-en-Provence, BP 31, Le Tholonet, F-13612 Aix-en-Provence Cedex 1, France

C. MARTIN

CAGEP-URA 903 du CNRS, Université de Provence, Institut de Géographie, 29 Avenue Robert Schuman, F-13621 Aix-en-Provence Cedex 1, France

Résumé La communication examine l'impact d'un incendie de forêt sur l'hydrologie et l'érosion des sols d'un petit bassin versant méditerranéen. Après incendie, on note une forte augmentation des débits de crue du bassin versant. Les écoulements observés sur une parcelle de 75 m², essentiellement générés par des fortes intensités de pluie, ne sont pas très bien représentatifs du fonctionnement hydrologique du bassin versant. Alors qu'elle était pratiquement nulle avant incendie, l'érosion hydrique a connue une accentuation considérable tout de suite après l'incendie. L'érosion s'est très vite réduite sur le bassin versant. Elle est restée plus longtemps active sur la parcelle. Comme précédemment dans son histoire de déclenchement des phénomènes érosifs est lié au feu, corollaire de l'activité humaine.

INTRODUCTION

Depuis 1967, le Cemagref gère le bassin de recherche du Réal Collobrier, observatoire hydrologique implanté dans le massif des Maures (Fig. 1). En août 1990, la zone d'étude a été partiellement incendiée. Certains bassins versants contrôlés ont été en partie touchés, d'autres totalement épargnés. Le bassin versant du Rimbaud étudié ici, a été particulièrement affecté par l'incendie et on estime que 85% de sa couverture initiale de maquis arbustif a été détruite par le feu (Puech *et al.*, 1991).

Le fonctionnement du bassin versant a été profondément affecté. Lavabre *et al.* (1996) estiment que le supplément d'écoulement annuel observé après incendie est de l'ordre de 15% de la pluie annuelle. Ce supplément d'écoulement se manifeste surtout lors des crues. Par ailleurs, l'incendie a eu un impact très marqué sur l'érosion des sols (Martin *et al.*, 1993).

La présente publication examine l'évolution des effets érosifs durant les quatre années suivant l'incendie, en liaison avec l'hydrologie du cours d'eau.

LE SITE EXPERIMENTAL

Le bassin versant

Le bassin du Rimbaud (1.46 km²) est constitué de gneiss massifs affectés d'un très fort pendage vers le nord-ouest. Les altitudes sont comprises entre 470 et 622 m. La

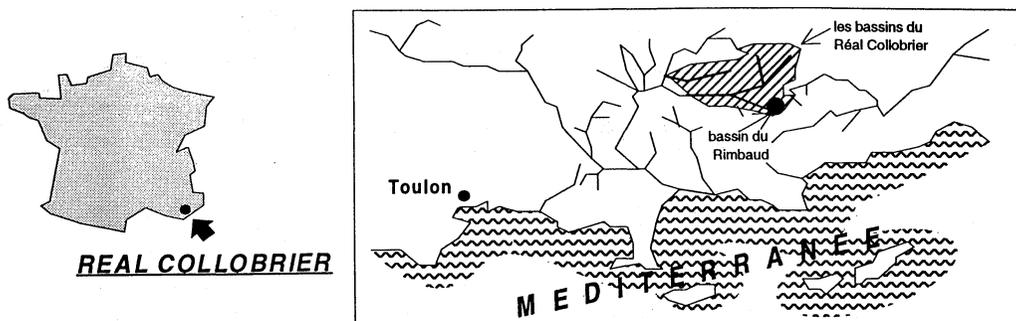


Fig. 1 Situation des bassins de recherche du Réal Collobrier.

pente moyenne des versants avoisine 9° ; mais leur inclinaison dépasse souvent 20° à proximité des thalwegs. Les sols — peu épais, caillouteux, à texture sableuse, et à structure grumeleuse à submotteuse — appartiennent à la classe des rankers. Ils recouvrent généralement des roches altérées cohérentes.

Avec des précipitations annuelles moyennes supérieures à 1100 mm et une température moyenne de 12°C environ, le bassin versant connaît un climat de type méditerranéen humide. La massivité des roches, la minceur des formations superficielles et les caractères morphométriques du bassin versant (Kc de Gravelius = 1.07; $Dd = 4.86 \text{ km km}^2$; Rc de Strahler = 2.81) s'associent pour que le ruisseau du Rimbaud réagisse violemment aux précipitations. En revanche, l'écoulement s'interrompt pendant une partie de l'été. Sur la période août 1967-septembre 1990, la lame d'eau écoulee annuelle moyenne, s'élève à 634 mm.

Le dispositif de mesure à l'exutoire du bassin (Fig. 2)

L'équipement qui était en place au moment de l'incendie nous a permis d'être immédiatement opérationnels. La station de mesure des débits est équipée d'un déversoir triangulaire qui garantit une bonne précision même pour les forts débits. Un pluviographe à augets basculeurs est situé au centre du bassin versant.

Les transports solides à l'exutoire du bassin versant ont été mesurés grâce à un préleveur automatique d'échantillons fonctionnant à un pas de temps de 30 minutes pendant les crues, et à des prélèvements manuels lors des passages sur le terrain.

La parcelle expérimentale

Le précédent dispositif a été complété par une parcelle de mesure de l'érosion des sols (Fig. 2).

La parcelle (75.2 m^2 pour une longueur de 12 m) a la forme d'un parallélogramme délimité par une double rangée de tôles enfoncées d'une quinzaine de centimètres. La pente avoisine 11° . La parcelle est reliée par une gouttière à une batterie de deux cuves réceptrices dont la première sert de partiteur au 1/9. Le dispositif est complété par un pluviographe. Le sol (Tableau 1) a une épaisseur de

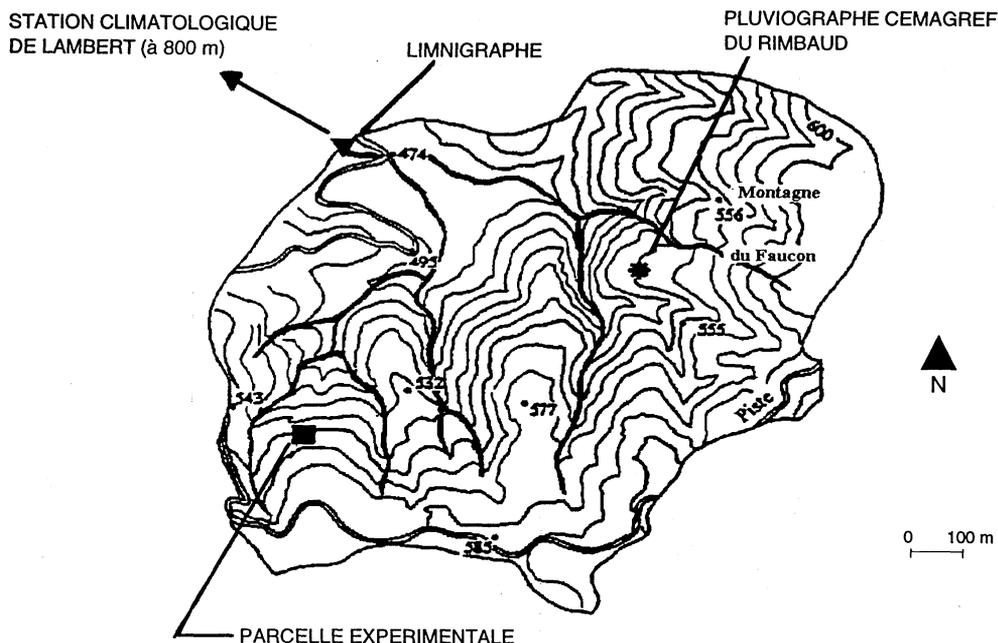


Fig. 2 Présentation du bassin versant du Rimbaud.

Tableau 1 Caractères physiques des sols de la parcelle expérimentale incendiée. Analyses : M. Levant, Centre de Géomorphologie du CNRS (Caen). Les données sont exprimées en % du poids du matériel séché à l'air.

Tout-Venant		Terre fine								
Cx	Gr	Tf	SG	SM	SF	LG	LF	A	MO	Eau 105
15.6	30.4	54.0	22.5	20.6	29.1	5.5	11.3	11.1	5.0	1.8

Cx: cailloux (>2 cm). Gr: graviers (0.2 - 2 cm); Tf: terre fine (<2 mm); SG: sables grossiers (0.5-2 mm); SM: sables moyens (0.2-0.5 mm). SF: sables fins (0.05-0.2 mm); LG: limons grossiers (20-50 μ m); LF: limons fins (2-20 μ m); Argile (<2 μ m); MO: matière organique (carbone Anne \times 1.72); Eau 105: eau à 105°C.

20 cm environ. Le couvert végétal (bruyères arborescentes, arbousiers, jeunes pins maritimes) a été entièrement détruit par le feu. La revégétalisation, essentiellement à base de pins, s'est révélée beaucoup plus lente que sur l'ensemble du bassin versant.

LES OBSERVATIONS DE TERRAIN

Pour la suite de l'étude, les écoulements annuels sont calculés pour l'année hydrologique, août de l'année a à juillet de l'année $a + 1$. Par convention, nous retenons l'année de début pour dénommer l'année hydrologique. Ainsi la première année après incendie est l'année 1990.

Les observations sur parcelle expérimentale

Les écoulements sur la parcelle n'excèdent pas 100 mm en 1990 et 1995, alors qu'ils dépassent 200 mm en 1992 (Fig. 3(a)). Les pertes solides annuelles (Fig. 3(b)) atteignent 883 t km⁻² en 1990, 1634 t km⁻² en 1991 et 835 t km⁻² en 1992. Elles tombent à 31 t km⁻² en 1993, après une reprise végétale plus active. Les exportations de matériaux sont concentrées sur quelques mois: octobre 1990, octobre 1991 et septembre 1992 fournissent 63.6% des pertes totales entre septembre 1990 et août 1994 (Fig. 4).

Sur la période 1990-1993, les matériaux minéraux représentent 87% des transports solides (Tableau 2). Le taux de matière organique est de 11%. Le reste correspond à l'eau d'imbibition. Les éléments minéraux supérieurs à 2 mm sont beaucoup moins abondants dans les sédiments que dans les sols (23% des matériaux sans la matière organique dans les sédiments, contre 47% dans les sols. Le refus à 2 mm est essentiellement constitué de petits graviers. Sur une parcelle défrichée manuellement implantée dans le même secteur de septembre 1976 à août 1980 (Martin, 1989), la teneur en éléments > 2 mm n'avait pas dépassé 0.5%.

La comparaison des compositions granulométriques de la terre fine des sols et des sédiments met en évidence des phénomènes d'entraînement sélectif: les limons sont particulièrement sensibles à l'érosion; les argiles le sont un peu moins; et les sables grossiers sont plus facilement entraînés que les sables fins et moyens.

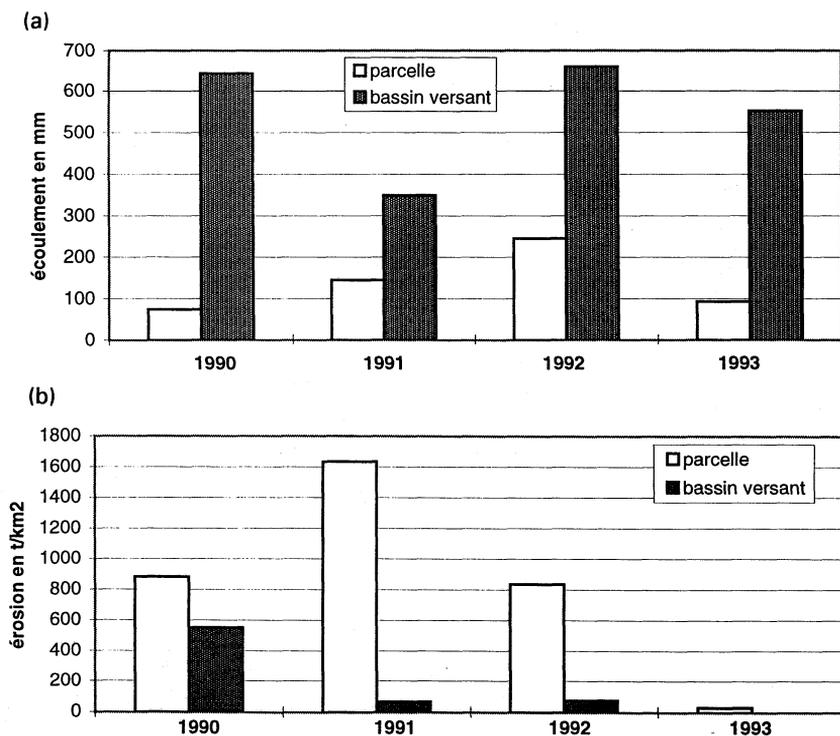


Fig. 3 (a) Écoulements annuels et (b) Taux d'érosion annuels observés sur la parcelle et à l'exutoire du bassin versant.

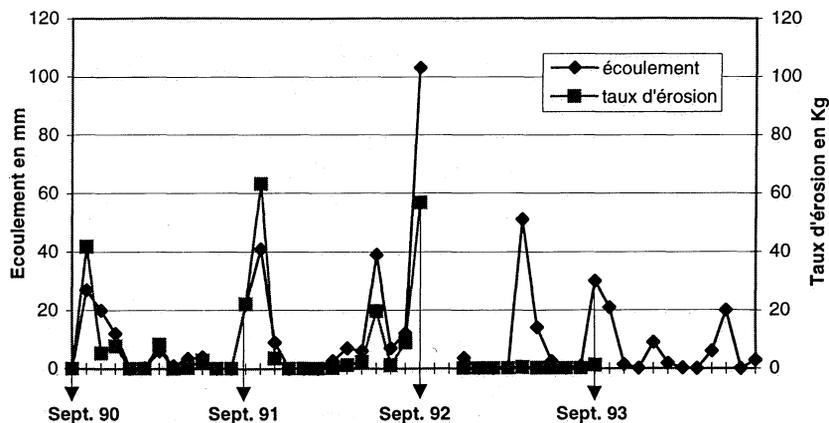


Fig. 4 Ecoulement et taux d'érosion mensuels observés sur la parcelle.

Les écoulements à l'exutoire

Sur la période 1968-1994, nous avons sélectionné l'ensemble des événements qui présentait une pluie journalière supérieure à 20 mm (le débit du cours d'eau peut être nul).

La distribution des débits de pointe de crue au cours de cette période fait l'objet de la Fig. 5 et le Tableau 3 rappelle quelques informations relatives aux deux périodes. La relation débits de pointe de crue-pluies journalières les ayant occasionnés (Fig. 6), est représentée par des symboles différents pour les périodes avant et après incendie.

Tableau 2 Caractères physiques des pertes solides de la parcelle expérimentale incendiée. Analyses: M. Levant, Centre de Géomorphologie du CNRS (Caen). Les données sont exprimées en % du poids du matériel séché à l'air. Elles correspondent aux moyennes des analyses de tous les prélèvements effectués dans la cuve amont, avec pondération par les quantités de sédiments récupérées.

	MO G	Min. G	SG	SM	SF	LG	LF	A	MO Tf
1990-1991	4.4	12.8	15.1	11.4	16.6	5.3	14.8	10.3	9.0
1991-1992	1.9	22.2	15.2	11.2	14.9	5.7	12.3	8.7	7.8
1992-1993	2.3	22.4	12.5	9.8	19.0	4.8	11.5	9.5	8.4
1993-1994	2.7	19.8	14.5	10.9	16.4	5.4	12.8	9.3	8.3

MO G: matière organique >2 mm; Min. G: matériaux minéraux >2 mm; MO Tf: matière organique <2 mm (valeur estimée); SG, SM, SF, LG, LF, A: voir Tableau 1.

Les mesures à l'échelle du bassin versant

Immédiatement après l'incendie, le nettoyage du seuil du limnigraphe (d'une contenance d'une dizaine de m³) en septembre 1990 a livré 7.5 m³ environ de galets et de blocs associés à des graviers et des sables grossiers. Ce dépôt représente l'essentiel de l'érosion de matériaux minéraux depuis la mise en place du limnigraphe en 1966 (Martin *et al.*, 1993).

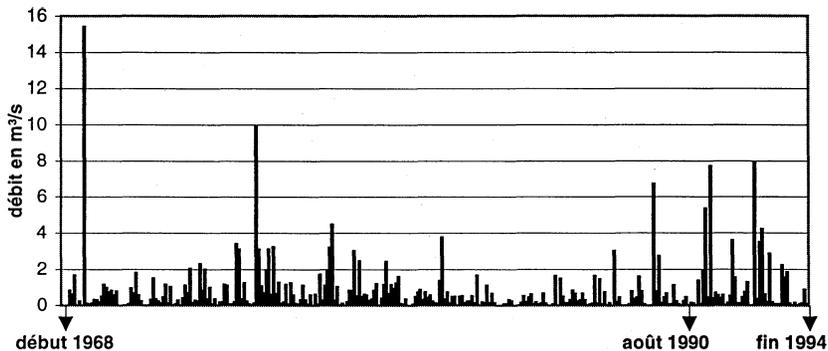


Fig. 5 Les débits de pointe de crue du bassin versant du Rimbaud de 1968 à 1994.

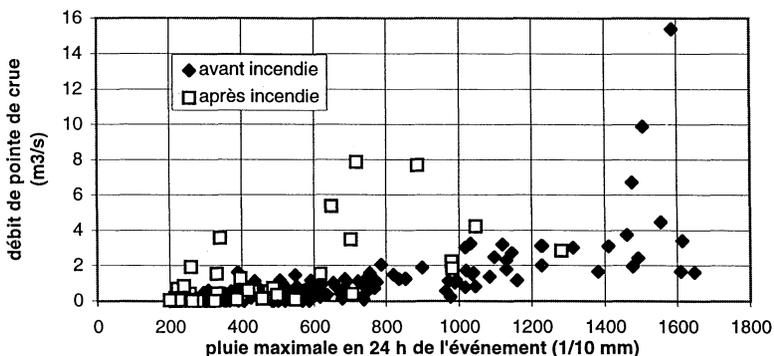


Fig. 6 Relation entre les débits de pointe de crue et la pluie en 24 h ayant occasionné la crue.

Dès les premières pluies après le feu, de fortes exportations de sédiments ont été mesurées, bien que le ruissellement superficiel n'ait provoqué que des amorces de rigoles de quelques mm à quelques cm de profondeur. Aucun sapement des berges ne s'est produit le long des cours d'eau.

Dès l'été 1991, la reprise végétale assurait localement une protection efficace contre l'érosion, le plus souvent grâce à la constitution d'un couvert de graminées (taux de couverture par les arbustes: 15% — Puech *et al.*, 1994 et communication orale). Pendant l'automne et l'hiver 1991-1992, l'Office National des Forêts a procédé à différents travaux, dont certains au bulldozer. La sécheresse sévère qui les a suivis, en a limité les conséquences sur le plan de l'érosion. Le taux de recouvrement par les arbustes avoisinait 35% en août 1992 et 50% en août 1993 (Puech *et al.*, 1994 et communication orale).

Tableau 3 caractéristiques des événements de crue.

Période	Nombre d'événements	Débit de pointe:	
		1er quantile	médiane
1968-1989	260	0.8 m ³ s ⁻¹	0.29 m ³ s ⁻¹
1990-1994	46	1.5 m ³ s ⁻¹	0.41 m ³ s ⁻¹

En 1992, une part importante (plusieurs dizaines de tonnes) des exportations solides a été fournie par les stocks constitués après l'incendie (Béguin, 1993). En août 1993, très peu de sédiments restaient dans les thalwegs.

Les crues d'octobre et de novembre 1990, bien qu'elles aient présenté à deux reprises des débits supérieurs à $5.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (le 3 octobre et le 25 novembre), ont transporté essentiellement des matériaux peu grossiers. Le seuil de la station limnigraphique n'était pas rempli à plus de 50% à la fin de novembre. La crue du 9 décembre 1990 ($7.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) s'est traduite par une activité érosive intense et par des transports nettement plus graveleux et même finement caillouteux. Si au cours des mois précédents, l'essentiel de l'écoulement en pointe de crue a certainement été fourni par le ruissellement diffus se produisant sur les versants à la proximité immédiate des thalwegs, la pluie du 9 décembre a provoqué l'apparition du ruissellement concentré, notamment dans la partie amont des drains élémentaires encombrée de matériaux colluviaux.

Les transports solides à l'exutoire du bassin versant ont été mesurés grâce à un préleveur automatique d'échantillons fonctionnant au pas de 30 minutes pendant les crues, et à des prélèvements manuels lors des passages sur le terrain.

Les échantillons d'eau ont été traités: soit par décantation dans le flacon, vidange presque totale et séchage à 40°C , soit par filtration sur membrane. Avant pesée, les culots de flacon comme les membranes étaient passés au dessiccateur. La concentration maximale mesurée a été de 29.9 g l^{-1} le 9 décembre 1990, pour un débit de $4.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La relation entre la concentration et le débit (corrélation bi ou semi-logarithmique) a été étudiée pour chaque phase de récession et pour chaque montée de crue. Les équations établies ont permis de calculer les transports solides en considérant tous les points de l'hydrogramme utilisés pour déterminer l'écoulement.

Les exportations mesurées (Fig. 3(b)) indiquent des taux d'érosion spécifique annuels de 569 t km^{-2} en 1990, 66 t km^{-2} en 1991, et 76 t km^{-2} en 1992. Les dépôts dans le seuil correspondent à une érosion supplémentaire d'une dizaine de t km^{-2} en 1990 et 1991. En 1992, la diminution du stock de sédiments dans le seuil entre le début et la fin de l'année, conduit à minorer le taux d'érosion de 3 t km^{-2} environ.

INTERPRETATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

Les écoulements

Il apparaît clairement que l'hydrologie du cours d'eau a été particulièrement affectée par l'incendie. Les débits de pointe de crue sont significativement plus élevés comme en témoigne la Fig. 6. Ceci résulte d'une augmentation des coefficients d'écoulement en crue, mais surtout d'une diminution du temps de transit dans les émissaires "nettoyés" par l'incendie.

Le dispositif de mesure des écoulements de la parcelle ne capte que les eaux de ruissellement de surface. Ce mode de fonctionnement est essentiellement généré par les pluies intenses et on constate que, en première approximation, il est très lié à l'intensité maximale des précipitations. Les ruissellements n'ont été importants que pour les mois où l'intensité des pluies en 6 minutes a excédé 60 mm h^{-1} .

Ce mode de fonctionnement n'est pas le processus de génération unique des écoulements à l'exutoire, où se superposent écoulements subsurface et drainage des sols et du sous-sol. Rien d'étonnant, que les écoulements sur la parcelle soient toujours inférieurs et mal corrélés, à ceux du bassin versant (Fig. 3(a)).

L'érosion des sols

L'absence de protection des versants par la végétation et les vitesses d'écoulement plus élevées dans les cours d'eau ont provoqué une augmentation considérable des pertes solides, à l'exutoire du bassin versant, immédiatement après le feu. De tels phénomènes de reprise d'érosion après incendie de forêt ont déjà été mis en évidence par plusieurs auteurs (Vega & Diaz-Fierros, 1987; Ramade, 1987; Brown, 1990).

Consécutivement à la reprise végétale, les exportations à l'exutoire ont très vite diminués, et tendent vers la situation antérieure à l'incendie, durant laquelle l'érosion pouvant être considérée comme négligeable.

Durant les trois premières années postérieures à l'incendie, les écoulements de surface ont provoqué de l'érosion des sols sur la parcelle. Malgré des ruissellements significatifs durant l'été 1993 et en 1994, l'érosion y a été limitée, rejoignant en ce sens le fonctionnement du bassin versant. Il semblerait que ceci soit le fait de la revégétalisation, à base de pins, qui s'est manifestée à cette période et avec un certain retard par rapport à l'ensemble du bassin versant.

Situation de cet événement dans l'histoire du bassin

Quatre cycles hydrologiques après l'incendie, il apparaît que l'impact de l'incendie sur l'érosion des sols s'estompe très rapidement. Nous avons observé une crise érosive comme le bassin versant en a déjà subi de nombreuses depuis le Néolithique. En effet, Bernard-Allée *et al.* (1992), sur la base de fouilles effectuées à l'exutoire ont identifié qu'un alluvionnement important s'était mis en place au cours du dernier millénaire, en liaison avec les activités humaines (10-12ème siècle: période féodale, 15-17ème siècle: Bas Moyen-Age et temps modernes, et la période récente postérieure au début du 18ème siècle). L'abondance de lentilles charbonneuses présentes dans ces dépôts, démontrent la liaison entre l'activité détritrique et les incendies de forêt.

Que ce soit intentionnellement, le feu était alors un mode de défrichement souvent lié au sylvopastoralisme, ou accidentellement, suite à une reconquête spontanée de l'espace sans aucun contrôle humain, l'activité érosive de ce bassin, et cela est certainement vrai pour la zone méditerranéenne, est liée à la destruction du couvert végétal.

CONCLUSION

L'incendie de forêt, qui a détruit la quasi-totalité de la végétation du bassin versant du Rimbaud a eu un impact très fort sur l'hydrologie et l'érosion des sols du bassin.

Le fonctionnement du bassin versant a surtout été modifié lors des épisodes pluvieux et des débits de crue importants ont été observés pour des pluies relativement modestes.

Alors qu'elle était très faible sous couvert végétal, l'érosion hydrique a connue une accentuation considérable. Elle atteint, pour la première année hydrologique après l'incendie, 569 t km⁻² sur le bassin et 883 t km⁻² sur une parcelle expérimentale. Suite à une revégétalisation difficile, l'érosion s'est poursuivie en 1992 et 1993 sur la parcelle, alors qu'elle se réduisait considérablement sur le bassin versant.

L'érosion hydrique semble stoppée en 1994, alors qu'il est encore difficile de conclure en ce qui concerne les processus de formation de crues.

Le bassin versant du Rimbaud a, une nouvelle fois, connu les effets de l'éradication de sa couverture végétale. Comme précédemment dans son histoire, le déclenchement des phénomènes érosifs est lié au feu, corollaire de l'activité humaine. Suite à l'abandon de ces espaces, il faut incriminer en 1990, la reconquête spontanée et incontrôlée du milieu par la végétation.

Remerciements Ces recherches sont poursuivies grâce aux soutiens financiers de l'Union Européenne (contrat de recherche en environnement sur la désertification de la zone méditerranéenne), la Région Provence, Alpes, Côte-d'Azur et le Programme National sur les Risques Naturels. Nous remercions également les techniciens de terrain sans lesquels de telles recherches ne pourraient pas être conduites.

REFERENCES

- Béguin, É. (1993) Erosion mécanique après l'incendie du massif des Maures. Le bassin versant du Rimbaud. *Mém. DEA, Univ. Aix-Marseille I, France*.
- Bernard-Allée, Ph., Martin, C., Guendon, J. L. & Delgirovine, A. (1992) Approche historique de l'érosion mécanique des sols. In: *Actes du Workshop final du projet européen DM2E* (Barcelone, 1992). Cemagref, Aix-en-Provence, France.
- Brown, A. G. (1990) Soil erosion and fire in areas of Mediterranean type vegetation: Results from chaparral in southern California, USA, and matorral in Andalusia, southern Spain. In: *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*, 269-288. Wiley, Chichester, UK.
- Lavabre, J., Folton, N., Arnaud, P. & Michel, C. (1996) Approche de la modification des écoulements d'un petit bassin versant méditerranéen après un incendie de forêt. In: *Ingénierie Eau-Agriculture-Territoires*. Cemagref, France, (sous presse).
- Martin, C. (1986) Contribution à l'étude de la dynamique des versants en roches métamorphiques; l'exemple du massif des Maures. Thèse Doct. État, Univ. Paris I, France.
- Martin, C. (1989) Dégradation d'un sol défriché à la station de Lambert (massif des Maures, Var, France). *Rev. Géomorph. Dyn.* XXXVIII, 17-29.
- Martin, C., Bernard-Allée, Ph., Béguin, É, Levant, M. & Quillard, J. (1993) Conséquences de l'incendie de forêt de l'été 1990 sur l'érosion mécanique des sols dans le massif des Maures. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, no. 5, 438-447.
- Puech, C., Lavabre, J. & Martin, C. (1991) Les feux de forêt 1990 dans le Massif des Maures: cartographie à l'aide de l'imagerie satellitaire, premières conséquences sur le cycle hydrologique, recherches sur les phénomènes d'érosion. In: *Sécheresse*, 1991(2), 175-181.
- Puech, C., Viné, P. & Leibreich, J. (1994) Evolution comparée entre variations d'écoulement et couvert végétal suite à incendie. Réal Collobrier 1990-1993. In: *Actes du Workshop final du projet européen DM2E* (Barcelone 1994). Cemagref, Aix-en-Provence, France.
- Ramade, F. (1987) *Les Catastrophes Ecologiques*. McGraw Hill, Paris, France.
- Vega, J. A. & Diaz-Fierros, F. (1987) Wildfire effects on soil erosion. *Ecologia Mediterranea* III(4), 1119-1125.