

PRÉDICTION DE L'ÉROSION HYDRIQUE APRÈS INCENDIE DE FORÊT DANS LA PARTIE OCCIDENTALE DU MASSIF DES MAURES (VAR, FRANCE)

Claude MARTIN ⁽¹⁾, Annie MARTIN- DECOME ⁽²⁾ et Philippe ALLÉE ⁽³⁾

- (1) : UMR 6012 "ESPACE" du CNRS, Département de Géographie de l'Université de Nice - Sophia-Antipolis, 98 Boulevard Édouard Herriot, BP 3209, 06204 NICE Cedex 03. Courriel : martincl@infonie.fr .
 (2) Courriel : annie.d.martin@wanadoo.fr .
 (3) : UMR 6042 du CNRS (Clermont-Ferrand) et Département de Géographie de l'Université de Limoges, 39E Rue Camille Guérin, 87036 LIMOGES. Courriel : philippe.allee@unilim.fr .

RÉSUMÉ : Après l'incendie de forêt d'août 1990, l'érosion hydrique a été quantifiée sur le bassin versant du Rimbaud (1,46 km²), à partir du suivi des flux de produits solides à l'exutoire, et sur trois autres bassins (la Saute, Gageai 1 et Gageai 2 : 0,19 à 0,96 km²), par cubage des sédiments accumulés dans des retenues collinaires.

En 1990-91, le bassin versant du Rimbaud, sur lequel la pente moyenne des versants avoisine 17 %, a subi une érosion modérée (579 t/km²) par rapport aux autres bassins (1914 t/km² pour le Gageai 2) qui offrent des pentes plus fortes (29 à 36 %). Mais ces derniers ont connu en automne un orage très violent qui explique largement les différences.

Une simulation des pertes de terre a été réalisée sur la période 1966-91. Le risque d'érosion annuel moyen lié à une destruction du couvert végétal s'établit à un peu plus de 1000 t/km² pour le bassin versant du Rimbaud (aux précipitations abondantes et aux versants faiblement inclinés) et pour ceux du Gageai 1 et du Gageai 2 (aux précipitations plus faibles, mais aux pentes très fortes). Dans le cas du bassin de la Saute, qui reçoit des précipitations inférieures à celles des autres bassins et qui présente des versants moyennement inclinés, le risque annuel moyen est inférieur à 700 t/km².

Les risques d'érosion varient énormément d'une année à l'autre en fonction des conditions climatiques. Les valeurs maximales sont obtenues pour les bassins du Gageai (3969 t/km² pour le Gageai 1 en 1971-72).

MOT-CLÉS : bassin versant, érosion hydrique, incendie de forêt, indice d'agressivité pluviométrique, quantification, simulation.

ABSTRACT : After the forest fire that devastated the western part of the Maures massif in August 1990, we quantified water erosion on the Rimbaud catchment (1.46 km²) using sediment transport monitoring data gathered at the outlets of this and three other catchments (the Saute, Gageai 1, and Gageai 2: 0.19-0.96 km²) from the cubic measurement of accumulated sediment in the retention dams. Comparisons of the catchments provided no information on the role that relief (particularly slope gradient) might play in erosion development.

In 1990-91, the Rimbaud catchment, where average slope gradient is around 17 %, experienced moderate erosion (579 t.km⁻²) compared to the other catchments (1914 t.km⁻² for the Gageai 2) where slope gradient is higher (29-36 %). These other catchments, however, suffered a very violent storm during the autumn, which explains the differences. The sediment loss for the period 1966-91 was simulated based on a single year of observation on the Rimbaud catchment. The simulation relied heavily on coefficients that had been chosen by other authors to evaluate the influence of topographical factors. When applied to the year 1990-91, it showed that, over and above a certain level of violence in the rains, the sediment loss levelled off.

The average annual risk of erosion linked to the destruction of the vegetation cover was set at a little more than 1000 t.km⁻², not just for the Rimbaud catchment (with abundant precipitation and more gentle slopes), but also for the Gageai 1 and the Gageai 2 catchments (with less precipitation, but with very steep slopes). For the Saute catchment, which has less precipitation than any of the others and which has moderately steep slopes, the average annual risk is less than 700 t.km⁻². The risk of erosion varies tremendously from year to year as a function of climatic conditions.

The lowest values don't exceed a few dozen tons per square kilometre. The minimum values apply to the catchments receiving the least amount of rain: the Saute, the Gageai 1, and the Gageai 2. On the other hand, when rains are abundant and violent, slope gradient plays a major role and it is the maximum values which

apply to the Gageai catchments (3969 t.km⁻² for the Gageai 1 in 1971-72).

KEY-WORDS : catchment, water erosion, forest fire, rainfall erosion index, quantification, simulation.

I - INTRODUCTION

L'incendie qui, en août 1990, a détruit 8400 ha de forêt et de maquis dans la partie occidentale du massif Maures, a été suivi d'observations sur l'érosion mécanique des sols dans des secteurs du Bassin Versant de Recherche et Expérimental du Réal Collobrier géré par le Cemagref depuis 1966 (C. MARTIN *et al.*, 1996, 1997-a, 1997-b). Ces travaux restent les plus instructifs réalisés à ce jour dans le massif des Maures. En effet, les études entreprises après les incendies de l'été 2003 ont été handicapées par l'absence de réseau d'observation hydrologique dense sur les terrains brûlés et par la modestie des précipitations au cours de l'année qui a suivi les feux (D. FOX *et al.*, 2006).

Sans rapporter l'ensemble des résultats obtenus, mais en prolongeant leur interprétation en vue d'établir une méthode de prédiction des pertes solides, l'article de plus abouti sur l'impact de l'incendie d'août 1990 en matière d'érosion mécanique des sols a été publié dans le numéro 20 du *Bulletin du Réseau Érosion* (C. MARTIN *et al.*, 2000). Nous le reproduisons ici – inchangé sur le fond, mais avec quelques corrections (dans le paragraphe II-2) –, afin d'en diversifier l'audience et de le rendre accessible *via* internet.

La simulation des pertes de terre que nous avons réalisée ne s'appuie pas sur une modélisation fine des transports solides à partir des données pluviométriques, des données hydrologiques et des mesures des transports solides, du type de celles qui ont été tentées dans le massif des Maures (B.T. LUKEY *et al.*, 1995 ; S. BROCHOT et M. MEUNIER, 1996) ou de celle que M. BERGAOUI (1998) a menée en Tunisie centrale. Ces approches sont du reste actuellement incapables de servir à une spatialisation satisfaisante des phénomènes d'érosion mécanique. Pour notre part, nous avons recherché une méthode simple permettant de prédire, fut-ce assez grossièrement, les pertes de terre totales que subirait toute partie du terrain d'étude après un incendie en fonction de sa topographie et des conditions climatiques.

II - LA PARTIE OCCIDENTALE DU MASSIF DES MAURES ET LES BASSINS VERSANTS EXPÉRIMENTAUX

En dépit d'altitudes modestes (inférieures à 800 m), le relief de la partie occidentale du massif des Maures est très disséqué, ce qui s'accompagne d'une forte inclinaison des versants.

Le substratum est constitué de roches métamorphiques qui vont de phyllades plus ou moins quartzes, à l'ouest, à des gneiss, qui affleurent au cœur du massif, en passant par des micaschistes associés à des amphibolites et des leptynites. Les sols les plus fréquents sont des rankers sur roches, peu épais, caillouteux et à texture sableuse (J. PORTIER, 1974 ; C. MARTIN, 1986). Les rankers se sont parfois formés à partir de formations rubéfiées déplacées, très caillouteuses mais à texture fine, dont l'épaisseur peut atteindre deux mètres.

Le climat est de type méditerranéen humide. Dans la partie occidentale du massif, les précipitations décroissent fortement d'est en ouest, dans le sens des vents humides provenant de la mer. La répartition des pluies est en relation avec la diminution des altitudes maximales. Les précipitations annuelles moyennes, qui dépassent 1100 mm au cœur du massif, tombent à moins de 750 mm à son extrémité occidentale où les altitudes sont inférieures à 250 m.

La végétation associe le chêne liège, le pin maritime et le pin d'Alep (localisé sur la bordure ouest du massif) aux essences du maquis (arbousier, bruyère arborescente...). Le chêne vert et le chêne pubescent se maintiennent localement et le châtaignier est cultivé dans les secteurs favorables.

Quatre bassins versants ont été suivis pour l'étude de l'érosion mécanique après l'incendie d'août 1990, ceux du Rimbaud, du Gageai 1, du Gageai 2 et de la Saute (Fig. 1). Leurs caractères physiques sont résumés dans le tableau I.

Les sols des bassins versants du Rimbaud et de la Saute sont presque exclusivement des

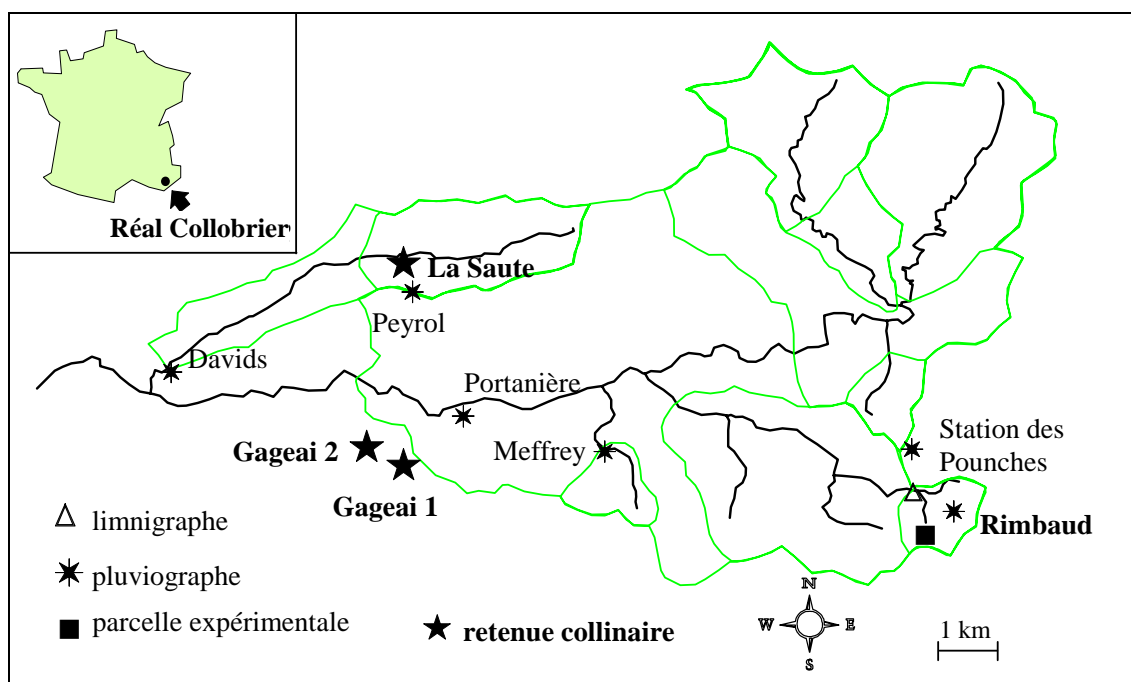


Figure 1 - Localisation des bassins versants étudiés au sein du BVRE du Réal Collobrier et équipements utilisés.

Tableau I - Caractères physiques des bassins versants du Rimbaud, du Gageai 1, du Gageai 2 et de la Saute.

	Rimbaud	Gageai 1	Gageai 2	La Saute
Superficie (km ²) *	1,46	0,960	0,185	0,251
Roches	Gneiss	Phyllades	Phyllades	Phyllades
Alt. max. (m)	622	427	293	437
Alt. min. (m)	427	140	150	180
Dd (km/km ²)	4,86	4,06	5,50	4,78
Pente moyenne (%)	16,7	36,4	31,5	28,7
Partie incendiée (%)	84	90	95	90

* : les superficies des bassins versants sont données après soustraction des retenues collinaires. Alt. max : altitude maximum. Alt. min. : altitude minimum. Dd : densité de drainage (d'après la carte topographique IGN au 1/25000). Pente moyenne : pente moyenne des versants.

rankers sur roches. Dans le bassin du Rimbaud, les formations superficielles ont une épaisseur moyenne de l'ordre de 30 cm, mais les gneiss viennent affleurer localement sous forme de chicots. Les rankers sur formations rubéfiées déplacées couvrent des superficies importantes dans le bassin du Gageai 2 (essentiellement à proximité de la retenue) et, plus encore, dans celui du Gageai 1.

III - LES MESURES DE L'ÉROSION

1) Bassin versant du Rimbaud

Les transports solides ont été mesurés à

l'exutoire du bassin versant grâce à une station limnigraphique (Photos 1 et 2) équipée d'un préleveur automatique d'échantillons (prélèvements au pas de temps de 30 minutes pendant les crues). Des prélèvements manuels ont fourni des informations complémentaires. 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 pour les échantillons les moins chargés.

Les pesées ont été réalisées après passage au dessiccateur des culots de flacon et des membranes. La teneur maximale en produits solides s'est élevée à 29,9 g/l (en septembre 1990, pour

un débit de $4,4 \text{ m}^3/\text{s}$ – débit maximal observé en 1990-91 : $7,8 \text{ m}^3/\text{s}$ en décembre).

Une relation entre la concentration et le débit, de type bi ou semi-logarithmique, a été établie pour chaque phase de récession et pour chaque montée de crue. Les équations obtenues ont permis de calculer les transports solides en tenant compte de tous les points de l'hydrogramme utilisés pour déterminer l'écoulement.

Immédiatement après l'incendie, 8 m^3 de galets et de blocs associés à des graviers et des sables grossiers ont été retirés de la fosse en amont du déversoir (Photo 1). Ce dépôt représentait l'essentiel de l'érosion des matériaux minéraux depuis l'installation du limnigraphe en 1966.

En tenant compte des variations du stock de sédiments derrière le déversoir, les taux d'érosion spécifiques ont avoisiné $579 \text{ t}/\text{km}^2$ en 1990-91 (Précipitations = 955 mm ; lame d'eau écoulée = 642 mm), $76 \text{ t}/\text{km}^2$ en 1991-92 (P = 785 mm ; L = 349 mm) et $73 \text{ t}/\text{km}^2$ en 1992-93 (P = 1004 mm ; L = 658 mm). En dépit de travaux au bulldozer menés par l'Office National des Forêts dans la partie inférieure des vallons (Photo 3), la revégétalisation du bassin versant (Photo 4) a entraîné une forte diminution des pertes dès la deuxième année après le feu, année où il est très peu humide qui n'a connu qu'un seul épisode hydrologique violent ($3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en octobre). Les taux de couverture des versants par les arbres et les arbustes avoisinaient 15 % dès l'été 1991, 30-35 % en août 1992 et 40-50 % en août 1993.

Sur les versants, l'érosion a surtout été le fait de la saltation pluviale et du ruissellement diffus. Elle a provoqué le déchaussement partiel des graviers et cailloux, et l'apparition d'un début de pavage. Les écoulements concentrés ont emprunté des axes de drainage élémentaires préexistants où l'écoulement se fait généralement sur roche : l'érosion linéaire est donc restée bloquée. Des amorces de rigoles de quelques mm à quelques cm de profondeur pour une largeur de quelques cm, souvent discontinues, se sont formées sur des versants à pente moyenne ou forte ($> 16 \%$). La minceur des sols, leur texture sableuse et leur pierrosité (40 à 60 % d'éléments $> 2 \text{ mm}$) expliquent le développement modeste de ces formes. Les rigoles les plus nombreuses et les plus profondes ont été creusées au cours de l'automne

1991 dans des secteurs de la partie aval des vallons après leur travail au bulldozer.

Les recherches ont été complétées par l'exploitation d'une parcelle expérimentale (Photos 5 et 6 – $75,2 \text{ m}^2$; 12 m de long ; pente de 19,4 %) sur laquelle ont été mesurés le ruissellement et les pertes solides (C. MARTIN *et al.*, 1996, 1997-b).

2) Bassins versants du Gageai 1, du Gageai 2 et de la Saute

Après l'incendie d'août 1990, les retenues collinaires ont joué le rôle de pièges à sédiments. Les observations de terrain ont montré que l'érosion s'est réalisée aux dépens des horizons superficiels des sols, sans creusement ou approfondissement de ravines dans les formations de solifluxion.

Dans le cœur des retenues, zone d'accumulation des dépôts fins, la quantification des dépôts a été effectuée par des sondages à la tarière. Le maillage minimum adopté est d'un sondage pour 8 m^2 (4 m dans le sens de la longueur \times 2 m dans celui de la largeur). La bonne précision des résultats est attestée par la faible différence entre les valeurs calculées avec le maillage retenu et ceux obtenus en utilisant un maillage plus lâche (C. MARTIN *et al.*, 1997-a). Des carottages ont permis de prélever des échantillons de sédiments.

Dans la partie amont des retenues, où se sont déposés des matériaux grossiers (Photo 7), l'estimation du volume des sédiments a nécessité le creusement de tranchées à la pelle mécanique. Cette opération n'a pas été réalisée dans le cas de la Saute. En effet, la retenue se trouve sur le ruisseau du Maraval, dans lequel se jette celui de la Saute. Or le cône grossier est ici constitué par les apports peu discernables l'un de l'autre de deux incendies successifs (1986 et 1990) qui ont touché des parties différentes du bassin versant du Maraval.

Rapportées à la superficie des bassins versants, les quantités de sédiments mesurées (Tab. II) soulignent l'impact de l'incendie sur les transports de matériaux. Avant incendie, les pertes annuelles mesurées dans le massif des Maures étaient inférieures à $6 \text{ t}/\text{km}^2$ (C. MARTIN, 1986).

Tableau II - Taux d'érosion spécifiques (t/km²) déduits des quantités de sédiments déposés dans les retenues collinaires en 1990-91.

	Cœur des retenues	Queues des retenues	Total des dépôts
Gageai 1	537	643	1180
Gageai 2	1228	686	1914
La Saute	1016	-	-

La retenue de Gageai 2 fournit les données les plus fiables. En effet, si les retenues du Gageai 1 et du Gageai 2 ont la même étendue (1450 m²), la superficie du bassin versant du Gageai 2 (0,185 km²) est beaucoup plus faible que celle du bassin du Gageai 1 (0,96 km²). La retenue du Gageai 2 est en outre plus profonde (Photos 8 et 9). Par rapport aux sédiments accumulés dans la retenue du Gageai 1 en 1990-91, ceux de la retenue du Gageai 2 se révèlent plus riches en matières organiques et en terre fine, et leur texture est plus fine (Tab. III), ce qui traduit un piégeage plus efficace.

En 1990-91, 353 tonnes de sédiments se sont déposés dans la retenue du Gageai 2. Ces sédiments se composaient de 17,8 tonnes de cailloux ; 66,7 tonnes de graviers ; 99,6 tonnes de sables ; 97,6 tonnes de limons ; 39,8 tonnes d'argile ; et 31,9 tonnes de matières organiques. Si l'on considère, d'une part, que tous les sables ont été piégés et, d'autre part, que pour des analyses effectuées selon les protocoles utilisés pour les sédiments et les sols sur phyllades, l'indice d'entraînement sélectif de la somme "Limons + Argile" atteint 1,56 sur la parcelle du Rimbaud (Ies = teneur dans la terre fine des sédiments / teneur dans la terre fine des sols – É.J. ROOSE, 1977), on doit admettre que la quasi-totalité des éléments apportés sont restés dans la retenue (Ies entre les sédiments et les rankers = 1,57).

Les teneurs en limons déterminées dans les sédiments prélevés dans la retenue du Gageai 2 ne témoignent pas en faveur d'apports importants de matériaux dus à des incisions linéaires dans les formations de solifluxion rubéfiées. Ce phénomène s'opérant normalement sans entraînement sélectif des particules les plus fines, si tous les sables déposés dans la retenue provenaient d'une érosion de ce type, les dépôts devraient contenir – d'après la composition granulomé-

trique moyenne des formations de solifluxion – 46,7 tonnes de limons (contre 97,6 trouvées réellement) et 43,4 tonnes d'argile (contre 39,8 trouvées réellement). Certes, l'érosion en nappe des formations de solifluxion apparaissant sur les versants des ravines aurait pu fournir des quantités de limons plus fortes. Mais la prise en compte des quantités d'argile entraînées par cette érosion en nappe et qui auraient dû s'échapper de la retenue pour que l'on obtienne la teneur mesurée, empêche d'accorder à ce phénomène une grande efficacité. En effet, cette classe granulométrique est très sujette à la floculation dans les conditions observées après incendie : les rapports entre les teneurs dans les sédiments du Gageai 1 et celles dans les sédiments du Gageai 2 sont d'ailleurs plus élevés pour l'argile (0,86) que pour les limons fins (0,75).

Enfin, à supposer, d'une part, que la composition de la terre fine des sédiments déposés dans la retenue du Gageai 2 est représentative de celle des matériaux érodés de tous les bassins versants et, d'autre part, que la retenue du Gageai 1 a piégé tous les sables, on obtient pour cette retenue un taux d'érosion de 1358 t/km² (dont 377 t/km² de sables, 369 t/km² de limons et 151 t/km² d'argile). Cette valeur reste inférieure au taux d'érosion du bassin du Gageai 2. Mais la retenue du Gageai 1 a été pratiquement remplie de sédiments, ce qui a favorisé une forte exportation de tous les éléments fins.

En 1991-92, la sédimentation fine a été estimée à partir de l'épaisseur des dépôts sur des bâches disposées dans les retenues. Les taux d'érosion correspondants sont inférieurs à 30 t/km². Les dépôts ne sont plus gris, mais beiges. La diminution de l'érosion est liée, pour beaucoup, à la reprise végétale observée sur les versants (Photo 10) : taux de recouvrement par les arbres et les arbustes supérieur à 30 % dès l'automne 1991 (C. MARTIN *et al.*, 1997-b).

Tableau III - Composition granulométrique des matériaux déposés dans les retenues du Gageai 1 et du Gageai 2 en 1990-91, et des sols sur phyllades.

Retenues	Matières minérales			Granulométrie de la terre fine						Matières organiques
	Cx	Gr	Tf	Sg	Sm	Sf	Lg	Lf	A	
Gageai 1 *	7,2	23,7	69,1	14,5	11,5	23,4	9,5	26,6	14,5	6,5 ♂
Gageai 2 *	5,5	20,7	73,7	16,4	7,6	18,0	5,5	35,7	16,8	9,0 ♂
A ₁₂ **	38,3		61,7	63,1			24,6	12,3	2,0 ♂♂	
(B)C **	40,6		59,4	52,5			24,6	22,9	0,2 ♂♂	

* : Laboratoire de Géographie Physique (LGP) à Meudon. ** : valeurs moyennes pour 24 échantillons de l'horizon A₁₂ (prélèvements à 5-15 cm de profondeur) et 7 échantillons de l'horizon (B)C (J. PORTIER, 1974 ; C. MARTIN, 1986). Matière minérales : après traitement des sédiments à l'eau oxygénée. Cx : cailloux (> 2 cm). Gr : graviers (2 à 0,2 cm). Tf : terre fine (< 2 mm). Sg : sables grossiers (0,5 à 2 mm). Sm : sables moyens (0,2 à 0,5 mm). Sf : sables fins (0,05 à 0,2 mm). Lg : limons grossiers (20 à 50 µm). Lf : limons fins (2 à 20 µm). A : argile (< 2 µm). ♂ : perte au feu à 500 °C diminuée de l'eau d'imbibition à 110 °C (teneur exprimée par rapport à l'ensemble des matériaux). ♂♂ : Carbone organique ANNE × 1,72 (sur la terre fine). Les teneurs sont exprimées en % du poids du matériel séché à l'air.

IV - BASES POUR LA PRÉDICTION DES PERTES SOLIDES

1) Relation entre le bassin versant et la parcelle expérimentale du Rimbaud

La confrontation des données mensuelles recueillies en 1990-91 sur le bassin versant et sur

la parcelle incendiée du Rimbaud montre une absence totale de relation (Fig. 2). Cela n'a rien de surprenant, car les échelles d'observation sont différentes. Mais il ressort évidemment que les observations sur parcelle ne peuvent pas servir à la prédiction des phénomènes d'érosion mécanique sur bassin versant. Seules les données trouvées pour le bassin versant doivent être utilisées.

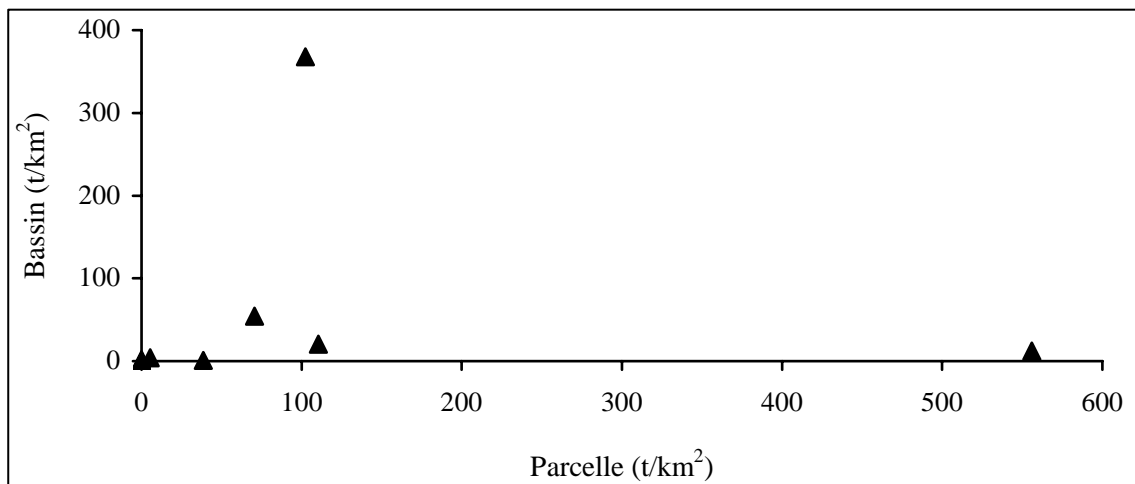


Figure 2 - Relation entre les pertes solides mensuelles du bassin versant et de la parcelle expérimentale incendiée du Rimbaud en 1990-91.

2) L'indice d'agressivité pluviométrique mensuel IAPmBV

établi à partir des valeurs mensuelles de l'érosion du bassin versant du Rimbaud en 1990-91 :

L'indice IAPmBV est un indice empirique

$$\text{IAPmBV} = A \times F' \times C / 10$$

où :

$$A = (P - 0,3 \text{ ETP}) \times \log (0,95 \text{ i.M} + 0,05 \text{ i.Q3})$$

$$F' = [(0,89 \times \log (0,7 \text{ i.M} + 0,3 \text{ i.Q3})) + 1,214] \times \text{i.Q3}$$

$$C = (P \text{ max. en n jours} / P \text{ mensuelles})^2$$

ETP, exprimée en mm, est l'évaporation potentielle selon la formule de TURC (calculée par référence à la station climatologique des Pouches) ; P sont les précipitations mensuelles exprimées en mm ; i.M , exprimée en mm/h, est la médiane des intensités momentanées de la pluie (en tenant compte du volume des précipitations) ; i.Q3, exprimée en mm/h, est le troisième quartile des intensités momentanées de la pluie (en tenant compte du volume des précipitations) ; P max en n jours : les précipitations maximales en n jours.

Les précipitations maximales en n jours sont déterminées de la manière suivante : Si les précipitations mensuelles sont inférieures à 100 mm, on calcule les précipitations maximales mensuelles sur deux jours successifs auxquelles on applique le coefficient " P mensuelles / 100 ". Si les précipitations mensuelles sont supérieures à 100 mm (tout en étant inférieures à 200 mm), on prend en considération les précipitations mensuelles sur deux jours successifs et on leur ajoute les précipitations d'une autre période de deux jours successifs (sans chevauchement avec la période utilisée précédemment) multipliées par le coefficient " (P mensuelles - 100) / 100 ". Les jours sont choisis pour obtenir la plus forte valeur possible de P max en n jours. On procède de la même façon pour chaque nouvelle tranche de 100 mm.

Le terme A est représentatif de l'abondance des ruissellements superficiels sur les versants. Sa valeur est limitée à la hauteur d'eau précipitée mensuelle. Le terme F' traduit la violence de l'action érosive développée par les gouttes de pluie. Le terme C prend en compte la concentration des précipitations dans le temps.

En négligeant les dépôts derrière le seuil de la station hydrométrique, les exportations mensuelles du bassin du Rimbaud en 1990-91 sont liées à l'indice IAPmBV par une relation de

type polynomial (Fig. 3) établie pour que la courbe passe par l'origine. En exprimant les pertes en tonnes par km² de surface réellement incendiée, l'équation devient :

$$\text{Érosion (t/km}^2\text{)} = 0,980 \cdot 10^{-5} \text{ IAPmBV}^3 + 0,00163 \text{ IAPmBV}^2 + 0,0545 \text{ IAPmBV} .$$

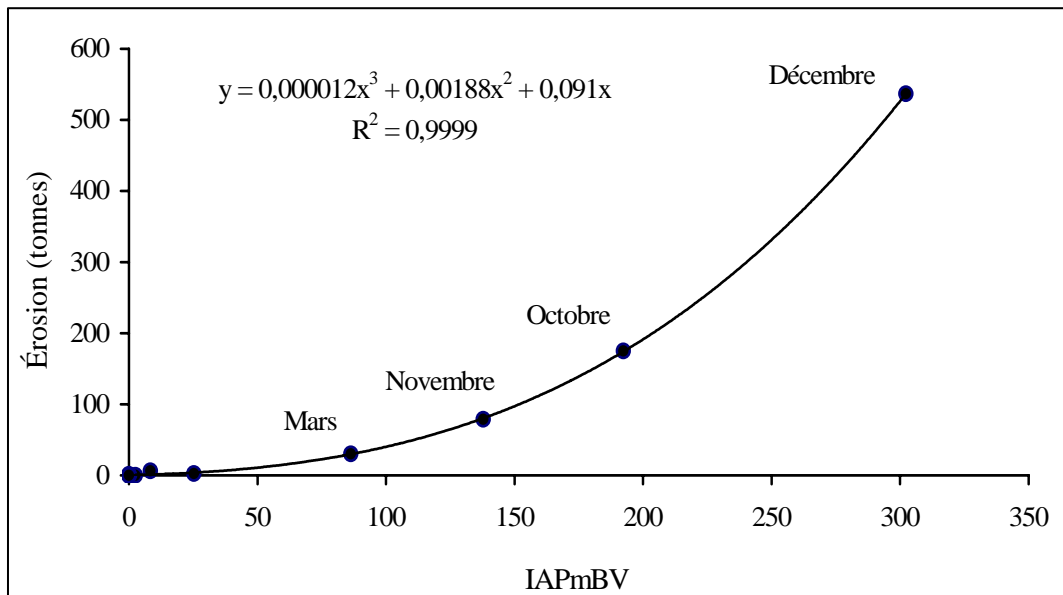


Figure 3 - Relation entre les pertes solides mensuelles et l'indice IAPmBV sur le bassin versant du Rimbaud en 1990-91.

3) Les autres facteurs de l'érosion

Les tentatives de spatialisation des phéno-

mènes érosifs (F. BONN, 1998 ; B. TOUAÏBIA *et al.*, 1999) doivent s'appuyer sur les acquis des travaux consacrés à l'influence de l'érodibilité des

sols et des conditions topographiques.

a. L'érodibilité des sols

Dans le massif des Maures, la sensibilité des sols à l'érosion hydrique a été évaluée à l'aide de l'indice de stabilité structurale I_s de S. HÉNIN et G. MONNIER (1956), de l'indice K de W.H. WISCHMEIER *et al.* (1958) et de l'équation de J. DUMAS (1965). Ces méthodes mettent en évidence une faible érodibilité des rankers. Ainsi, pour 32 échantillons prélevés sur phyllades, gneiss et micaschistes, les valeurs de l'indice K fournies par le nomographe de W.H. WISCHMEIER *et al.* (1971) sont-elles comprises entre 0,04 et 0,18 après modification pour tenir compte de l'abondance des éléments supérieurs à 2 mm (C. MARTIN, 1986).

b. Les conditions topographiques

L'érosion croît de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente (N.W. HUDSON, 1973). Dans la partie occidentale du massif des Maures, l'influence de l'inclinaison de la pente se trouve limitée par la faible érodibilité des sols, et tout particulièrement par la résistance au creusement que leur confère une pierrosité élevée. Les observations effectuées sur des parcelles expé-

mentales indiquent une valeur de l'indice de 1,1 (C. MARTIN, 1986).

Pour la plupart des auteurs (W.H. WISCHMEIER *et al.*, 1958 ; É.J. ROOSE, 1977), l'érosion spécifique augmente également de façon exponentielle avec la longueur des unités de ruissellement. Dans le cas du massif des Maures, du fait de la faible sensibilité des rankers à l'action abrasive du ruissellement, l'exposant ne dépasse certainement pas 0,2.

Par ailleurs, les pistes ouvertes sur les versants perturbent le cheminement des eaux de ruissellement. C'est notamment le cas sur les bassins versants du Rimbaud et du Gageai 1. Mais l'influence de ces perturbations sur les phénomènes d'érosion mécanique est d'autant plus difficile à estimer qu'à la réduction de la longueur des unités de ruissellement sur les versants s'oppose la concentration des eaux qui s'opère sur les pistes.

4) Synthèse

En définitive, on peut envisager d'apprécier les taux d'érosion mensuels d'un bassin versant totalement incendié de la partie occidentale du massif des Maures à l'aide d'une équation du type :

$$\text{Érosion}_{\text{BASSIN}} (\text{t/km}^2) = \text{ER}_{\text{BASSIN}} (\text{t/km}^2) \times (\alpha_{\text{BASSIN}}^{1,1} / \alpha_{\text{RIMBAUD}}^{1,1}) \times (\text{L}_{\text{BASSIN}}^{0,15} / \text{L}_{\text{RIMBAUD}}^{0,15})$$

où :

- $\text{ER}_{\text{BASSIN}}$ est fourni par l'équation suivante établie avec les données climatologiques correspondant au bassin versant considéré :

$$\text{ER}_{\text{BASSIN}} (\text{t/km}^2) = 0,980 \cdot 10^{-5} \text{IAPmBV}^3 + 0,00163 \text{IAPmBV}^2 + 0,0545 \text{IAPmBV}$$

- α_{BASSIN} et α_{RIMBAUD} représentent les valeurs moyennes de l'inclinaison des versants (en %) sur le bassin considéré et sur le bassin du Rimbaud.

- L_{BASSIN} et $\text{L}_{\text{RIMBAUD}}$ sont des valeurs indicatives de la longueur moyenne des unités naturelles de ruissellement dans le bassin versant considéré et dans celui du Rimbaud. Elles sont calculées comme suit (C. MARTIN, 1986) : $L (\text{m}) = (A / 2l) / \cos \alpha$ avec A , la superficie du bassin versant (en m^2) ; l , la longueur totale des chenaux indiqués sur les cartes au 1/25000 (en m) ; et α , la valeur moyenne de l'inclinaison des versants (en degrés). L atteint 104 m pour le bassin du Rimbaud ; 131 m pour celui du Gageai 1 ; 96,5 m pour celui du Gageai 2 ; et 109 m pour celui de la Saute.

Le facteur "érodibilité des sols" est ici négligé, les rankers ayant partout des caractères à peu près identiques.

V - LES ENSEIGNEMENTS DE L'ANNÉE 1990-91

Les précipitations sur les bassins du Gageai 1 et du Gageai 2 ont été calculées à partir des données des pluviographes du Meffrey, de la

Portanière, du Peyrol et des Davids (Fig. 1) en tenant compte de la localisation des bassins ; celles sur le bassin de la Saute ont été fournies par le poste du Peyrol (A. DECOME, 2000). Les valeurs de l'ETP ont été estimées en adoptant un gradient de diminution de la température avec l'altitude de 0,5 °C pour 100 m.

En 1990-91, les précipitations annuelles s'élèvent à 955 mm pour le bassin versant du Rimbaud, 905 mm pour celui du Gageai 1, 904 mm pour celui du Gageai 2 et 875 mm pour celui de la Saute.

Les totaux pluviométriques d'octobre 1990 (de 230 mm, au Rimbaud, à 258 mm, au Gageai 1) ne rendent pas bien compte de la répartition spatiale très hétérogène de l'épisode orageux du 1^{er} de ce mois : le pluviographe du Rimbaud a enregistré des précipitations de 27 mm, alors que les hauteurs d'eau ont atteint 47 mm au Meffrey, 68 mm à la Portanière, 81 mm au Peyrol et 81 mm aux Davids. Les précipitations calculées pour les bassins versants du Gageai 1 et du Gageai 2 avoisinent 72 mm. La violence des pluies qui se sont abattues sur les bassins versants du Gageai 1, du Gageai 2 et de la Saute le 1^{er} octobre 1990, se traduisent par des valeurs mensuelles du troisième quartile des intensités de la pluie ($i.Q_3 > 55$ mm/h) et de l'indice IAPmBV (1027 à 1130) beaucoup plus fortes que celles obtenues pour le bassin du Rimbaud ($IQ_3 = 24$ mm/h et IAPmBV = 197). L'hypothèse initialement formulée selon laquelle les différences relevées en 1990-91 entre le bassin du Rimbaud et les autres bassins résulteraient surtout de l'inclinaison des versants (C. MARTIN *et al.*, 1997-a) se trouve ainsi contredite. Aucune information sur l'influence du facteur pente ne peut donc être tirée.

Pour octobre 1990, la reconstitution des pertes solides indique 30000 t/km² pour le bassin du Gageai 1, 29000 t/km² pour celui du Gageai 2 et 25000 t/km² pour celui de la Saute. À l'évidence, l'extrapolation des mesures réalisées sur le bassin du Rimbaud, où les valeurs d'IAPmBV sont restées inférieures à 300 en 1990-91, donne des résultats trop élevés lorsqu'elle est appliquée à des pluies en théorie très agressives. Le plafonnement de l'érosion auquel nous sommes amenés à conclure, doit être rapproché d'observations effectuées sur les parcelles expérimentales du massif des Maures : l'érosion est limitée lors des précipitations les plus intenses par l'épaississement de la lame d'eau superficielle qui protège les sols de l'impact des gouttes de pluie (C. MARTIN, 1975, 1986 ; C. MARTIN *et al.*, 1997-b).

Dans le bassin du Gageai 2, où la retenue a constitué un piège à sédiments très efficace, on peut considérer que l'érosion s'est élevée à 1476 t/km² en octobre 1990 (taux d'érosion annuel donné par le cubage des sédiments, diminué de la somme des taux d'érosion calculés pour les autres mois). En tenant compte du pourcentage de la surface brûlée sur le bassin du Gageai 2 et des conditions topographiques sur chacun des bassins (inclinaison et longueur des versants), il est possible d'évaluer le taux d'érosion qui correspondrait aux mêmes conditions climatiques (IAPmBV = 1130) sur le bassin versant du Rimbaud :

$$\text{Érosion}_{\text{RIMBAUD}} = \text{Érosion}_{\text{GAG}} \times (L_{\text{RIM}}^{0,15} / L_{\text{GAG}}^{0,15}) \times (\alpha_{\text{RIM}}^{1,1} / \alpha_{\text{GAG}}^{1,1}) \times (100 / 95)$$

où l'érosion est exprimée en t/km², la longueur moyenne des unités naturelles de ruissellement (L) en m et l'inclinaison moyenne des versants (α) en % et le taux de surface brûlée (TB) en %. Pour le bassin du Rimbaud, la pente moyenne des surfaces brûlées est estimée à 17,6 %.

On obtient de cette manière un taux d'érosion mensuel de 829 tonnes par km² de surface brûlée. D'après la relation entre les pertes solides du bassin versant du Rimbaud et l'indice IAPmBV, ce taux – que l'on peut considérer comme limite – est déjà atteint pour un IAPmBV de 387. Les exportations solides mensuelles maximales de chacun des bassins versants sont évaluées à partir de cette valeur de l'indice, ce qui donne : 1956 t/km² pour le bassin du Gageai 1 ; 1654 t/km² pour celui du Gageai 2 ; et 1118 t/km² pour celui de la Saute.

La démarche adoptée pour fixer la valeur limite de l'indice IAPmBV repose uniquement sur les observations d'octobre 1990. De plus, elle

correspond à une situation où n'intervient qu'un seul épisode excessivement agressif dans le mois. Fort heureusement, la répétition d'épisodes de ce type bien individualisés au cours du même mois ne peut être que tout à fait exceptionnelle.

VI - SIMULATION DES PERTES SUR LA PÉRIODE 1966-91

Pour le calcul de l'indice IAPmBV entre 1966 et 1991, nous avons utilisé les précipitations et l'ETP sur les bassins versants. Par ailleurs, nous sommes partis des médianes et des troisièmes quartiles des intensités momentanées

de la pluie déterminées pour le pluviographe du Rimbaud pour évaluer – en tenant compte des différences de pluviométrie – les valeurs de i.M et i.Q3 concernant les autres bassins.

La démarche adoptée pour les intensités de la pluie n'est pas réellement satisfaisante lorsque des épisodes orageux introduisent une grande hétérogénéité spatiale, comme ce fut par exemple le cas en octobre 1990. Toutefois l'objectif poursuivi n'est pas de reconstituer des phénomènes qui, sauf en 1990-91, ne se sont pas produits. Il s'agit simplement de simuler des pertes de terre pour des conditions topographiques et climatiques bien définies. Les calculs ont été menés selon l'hypothèse d'une destruction totale du couvert végétal des bassins versants.

Pour le bassin versant du Rimbaud, le risque d'érosion annuel moyen s'établit à 1050 t/km², donc assez nettement au-dessus de l'érosion

mesurée en 1990-91. Mais les valeurs annuelles varient énormément (Fig. 4), de 32 t/km² (année 1978-79) à 2728 t/km² (année 1973-74). L'écart-type atteint 877 t/km² et l'écart moyen arithmétique, 716 t/km².

Du fait de précipitations plus abondantes, le bassin versant du Rimbaud présente un risque d'érosion annuel moyen voisin de ceux du Gageai 1 (1192 t/km²) et du Gageai 2 (1005 t/km²), et supérieur à celui de la Saute (585 t/km²). Toutefois les conditions topographiques font que les risques d'érosion annuels sont plus élevés sur les bassins du Gageai lorsque les précipitations manifestent une grande agressivité (valeurs maximales : 3969 t/km², pour le Gageai 1, et 3355 t/km², pour le Gageai 2, en 1971-72). Pour le bassin de la Saute, la valeur annuelle maximale s'établit à 2242 t/km² (année 1968-69).

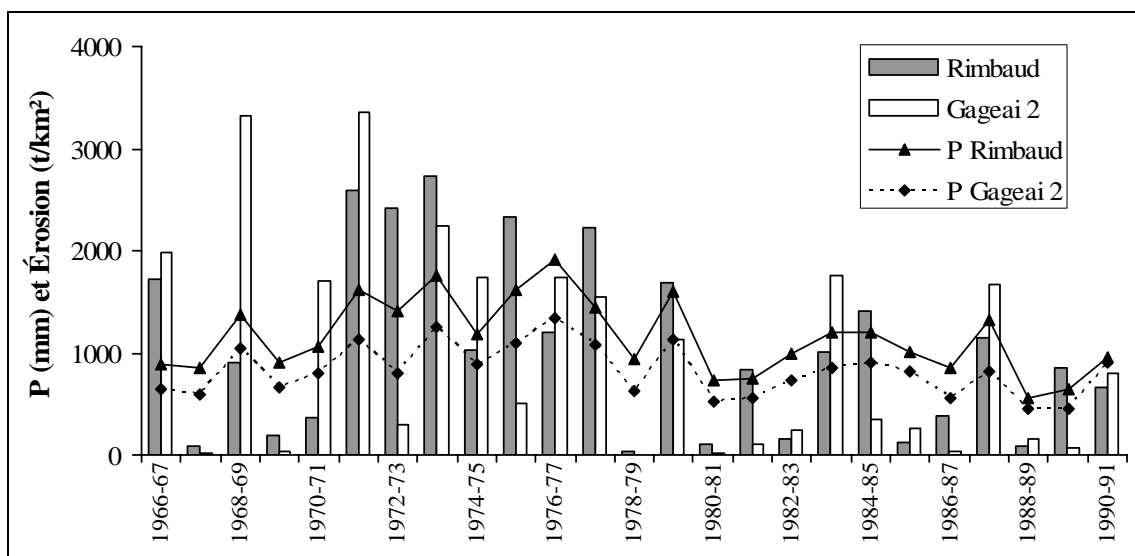


Figure 4 - Simulation des pertes solides des bassins versants du Rimbaud et du Gageai 2 sur la période 1966-91.

VII - CONCLUSION

La quantification de l'érosion hydrique réalisée sur des bassins versants de la partie occidentale du massif des Maures après l'incendie d'août 1990 débouche sur un essai de prédiction des pertes solides en fonction des conditions climatiques et des facteurs topographiques. La méthode retenue s'appuie sur un petit nombre de mesures, mais elle est confortée par le fait que les observations sur bassins versants se révèlent plus

pertinentes que celles sur parcelles expérimentales.

Sur les bassins versants étudiés, l'érosion se stabilise lorsque les valeurs de l'indice IAPmBV dépassent 397. Aussi les estimations des risques d'érosion annuels approchent-ils seulement 4000 t/km² sur la période 1966-91. Notons enfin que la faible agressivité des pluies en 1991-92 ne permet pas de juger pleinement des effets de la revégétalisation au début de la deuxième année après le feu (risques calculés < 120 t/km² sur l'ensemble de l'automne).



Photo 1 - Station du Rimbaud en cours de curage en septembre 1991.



Photo 2 - Station hydrométrique du Rimbaud lors de la crue du 27 septembre 1992.



Photo 3 - Les travaux ONF dans la partie inférieure du bassin du Rimbaud en 1991-92.



Photo 4 - Une vue du bassin versant du Rimbaud en octobre 1991.



Photo 5 - La parcelle de mesure de l'érosion du Rimbaud en septembre 1990.



Photo 6 - La parcelle de mesure de l'érosion du Rimbaud en octobre 1990.



Photo 7 - Dépôts grossiers en amont de la retenue du Gageai 1 (printemps 1991).



Photo 8 - La retenue du Gageai 1 après curage, en automne 1992 ; le déversoir (flèche) n'est pas très haut par rapport au fond de la retenue.



Photo 9 - La retenue du Gageai 2, vue du barrage, au printemps 1992.

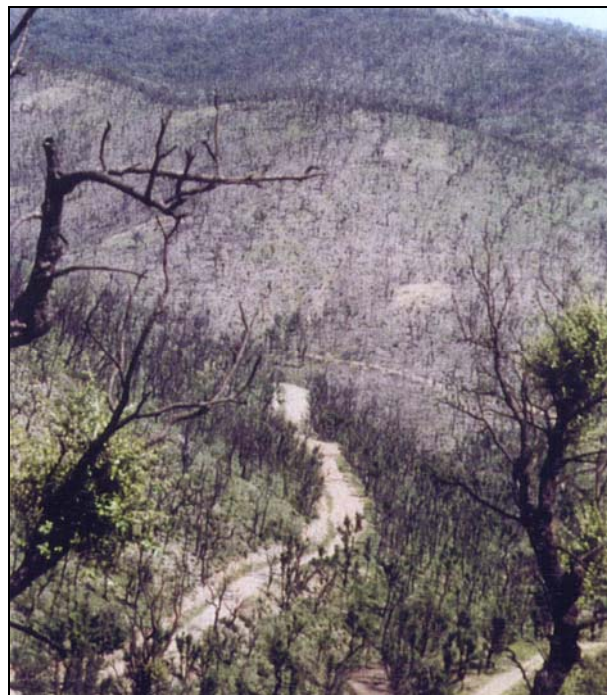


Photo 10 - Le bassin du Gageai 1 au printemps 1991.

Remerciements : Nous sommes reconnaissants à J. LAVABRE et N. FOLTON (Groupement d'Aix-en-Provence du *Cemagref*) de l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée. Les recherches ont été menées dans le cadre du projet européen DM2E et avec l'aide du Conseil Régional de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERGAOUI M. (1998) - Essai de modélisation du transport solide sur les microbassins versants de Tebaga (Tunisie centrale). *Sécheresse*, vol. 9, n° 1, p. 51-57.
- BONN F. (1998) - La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*, vol. 9, n° 3, p. 185-192.
- BROCHOT S. et MEUNIER M. (1996) - Un modèle d'érosion des torrents de crue (ETC). *Ingénieries - EAT*, n° 6, p. 9-18.
- DECOME A. (2000) - *Essai d'évaluation des risques d'érosion hydrique après incendie de forêt dans le massif des Maures (Var, France)*. Mémoire de DEA, Univ. Nice-Sophia-Antipolis, 53 p.
- DUMAS J. (1965) - Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol III, n° 4, p. 307-333.
- FOX D., BÉROLO W, CARRÉGA P. et DARBOUX F. (2006) - Mapping erosion risk and selecting sites for simple erosion control measures after a forest fire in Mediterranean France. *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 31, p. 606-621.
- HÉNIN S. et MONNIER G. (1956) - Évaluation de la stabilité de la structure du sol. VI^{ème} Congrès Ass. Sci. Sol, Paris, vol. B, p. 49-52.
- HUDSON N.W. (1973) - *Soil conservation*. Édit. B.T. Batsford Ltd, Londres, 320 p.
- LUKEY B.T., SHEFFIELD J., BATHURST J.C., LAVABRE J., BROCHOT S. et MARTIN C. (1995) - Simulating the effect of vegetation cover on the sediment yield of mediterranean catchments using SHETRAN. *Phys. Chem. Earth*, vol. 20, n° 3-4, p. 427-432.
- MARTIN C. (1975) - L'érosion des sols sur roches métamorphiques en milieu méditerranéen provençal : les enseignements d'une station expérimentale. *Rev. Géomorph. Dyn.*, t. XXIV, p. 49-63.
- MARTIN C. (1986) - *Contribution à l'étude de la dynamique des versants en roches métamorphiques ; l'exemple du massif des Maures*. Thèse de Doctorat d'État, Univ. Paris I, 935 p.
- MARTIN C., avec la collaboration de BÉGUIN É., LEVANT M. et QUILLARD J. (1996) - L'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle d'un petit bassin versant après incendie de forêt dans le massif des Maures. *Étude et gestion des sols*, vol. 3, n°3, p. 179-192.
- MARTIN C., ALLÉE P., BÉGUIN É., KUZUCUOGLU C. et LEVANT M. (1997-a) - Mesure de l'érosion mécanique des sols après un incendie de forêt dans le massif des Maures. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 2, p. 133-142.
- MARTIN C., avec la collaboration de BÉGUIN É. et LEVANT M. (1997-b) - L'érosion hydrique après incendie de forêt dans le bassin versant du Rimbaud (Var, France) : relations avec l'agressivité des précipitations. *Bull. Réseau Érosion*, n° 17, p. 83-92.
- MARTIN C., DECOME A. et ALLÉE P. (2000) - Essai d'évaluation des risques d'érosion hydrique après incendie de forêt dans la partie occidentale du massif des Maures (Var, France). *Bull. Réseau Érosion*, n° 20, p. 440-451.
- PORTIER J. (1974) - *Carte pédologique Toulon au 1/100000*. Carte pédologique de la France à moyenne échelle, Publication n° 3, INRA, Versailles, notice explicative, 130 p.
- ROOSE É.J. (1977) - *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest ; vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Travaux et documents ORSTOM, Paris, n° 78, 108 p.
- TOUAÏBA B., DAUTREBANDE S., GOMER D. et AIDAOUÏ A. (1999) - Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'Oued Mina. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 44, n° 6, p. 973-986.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. et UHLAND D.R. (1958) - Evaluation of factors in the soil-loss equation, *Agricultural Eng.*, t. 39, n° 8, p. 458-462 et 474.

WISCHMEIER W.H., JOHNSON C.B. et CROSS
B.V. (1971) - A soil erodibility nomograph
for farmland and construction sites. *J. of Soil*

and Water Conservation, vol. 26, n° 5,
p. 189-192.