

L'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle et d'un petit bassin versant après incendie de forêt dans le Massif des Maures

Cl. Martin⁽¹⁾

avec la collaboration d'E. Béguin⁽¹⁾, Michèle Levant⁽²⁾ et J. Quillard⁽²⁾

(1) : CAGEP - URA 903 du CNRS, Institut de Géographie de l'Université de Provence, 29 Avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence cedex 1.

(2) : Centre de Géomorphologie du CNRS, 24 Rue des Tilleuls, 14000 Caen.

RÉSUMÉ

Des mesures de l'érosion ont été réalisées à l'exutoire du bassin versant du Rimbaud (1,46 km²) et sur une parcelle expérimentale (75,2 m² ; longueur : 12 m ; pente 19 %) à la suite de l'incendie de forêt d'août 1990.

Sur la parcelle, l'érosion s'est traduite par un entraînement sélectif de la matière organique (dont une partie sous forme de cendres au cours de la première année) et de particules fines. La revégétalisation de la parcelle et la constitution d'un pavage ont limité l'érosion en 1993-94.

La correspondance n'est pas bonne entre les pertes, annuelles ou mensuelles, du bassin versant et celles de la parcelle. Il faut voir en cela, à côté d'un effet d'échelle, la conséquence de la revégétalisation hétérogène du bassin versant (particulièrement lente sur la parcelle). En dépit du décapage de certains bas de versant effectué par les forestiers de l'ONF à la fin de l'été 1991 pour préparer des plantations, les pertes de terre ont été faibles en 1991-92. L'impact de ces travaux s'est toutefois marqué par la persistance de transports solides en 1992-93.

Mots clés

Bassin versant, parcelle expérimentale, érosion hydrique, incendie de forêt.

SUMMARY

EROSION FROM A RUNOFF PLOT AND A LITTLE WATERSHED AFTER A FOREST FIRE IN THE MASSIF OF MAURES

The Measurements of Soil erosion in the Rimbaud watershed (1.46 km²) after the August 1990 forest fire, were made at the outlet of the basin and on an experimental plot (75.2 m² ; 12 m long ; 19 % slope).

Out of the entire period studied (1990-1994), the observations on the plot show a selective exportation of organic matter (tables 1 and 2), a part of it being as ashes during the first year, and of thin particles (table 5). Because the plants recovered in the plot and because the ground was paved, the losses of soil were very significantly limited in 1993-94.

There is no good relation (figure 2) between the annual or monthly losses from the basin (table 7) and the annual or monthly losses from the plot (table 2). This may not only show a scale effect but also the consequence of an heterogeneous recovery of the plants in the basin (which was particularly slow on the plot). Despite the clearing made at the bottom of certain slopes by some forest workers

from the ONF administration at the end of the Summer 1991 in order to prepare for planting, the loss of ground was low in 1991-92. However, the impact of the work increased in 1992-93 with remaining solid transfers.

Key-words

Watershed, experimental plot, erosion, forest fire.

RESUMEN

EROSIÓN HYDRICA EN UNA PARCELA Y EN UNA PEQUEÑA CUENCA VERTIENTE DESPUÉS DE UN INCENDIO DE BOSQUES EN EL MACIZO DE MAURES

Las medidas de erosión se han realizado en el exutorio de la cuenca del Rimbaud (1,46 km²) y en una parcela experimental (75,2 m²; longitud : 12 m ; pendiente : 11°) desde el incendio de bosques de agosto 1990.

En la parcela, la erosión se ha manifestado por un arrastre selectivo de la materia orgánica (de la cual una parte en forma de cenizas durante el primer año) y partículas finas. El crecimiento de la vegetación de la parcela y la constitución de un revestimiento han limitado la erosión en 1993-94.

La correspondancia no es buena entre las pérdidas, anuales o mensuales, de la cuenca vertiente y las de la parcela. En esto hay que ver, además de un efecto de escala, la consecuencia del crecimiento heterogéneo de la vegetación de la cuenca vertiente (particularmente lenta en la parcela). A pesar del decapaje de algunos bajos de la vertiente efectuada por los forestadores de la ONF al final del verano 1991 para preparar las plantaciones, las pérdidas de tierra han sido bajas en 1991-92. El impacto de estos trabajos ha sido afectado por la persistencia del transporte de sólidos en 1992-93.

Palabras claves

Cuenca vertiente, parcela experimental, erosión hydrica, incendio de bosques.

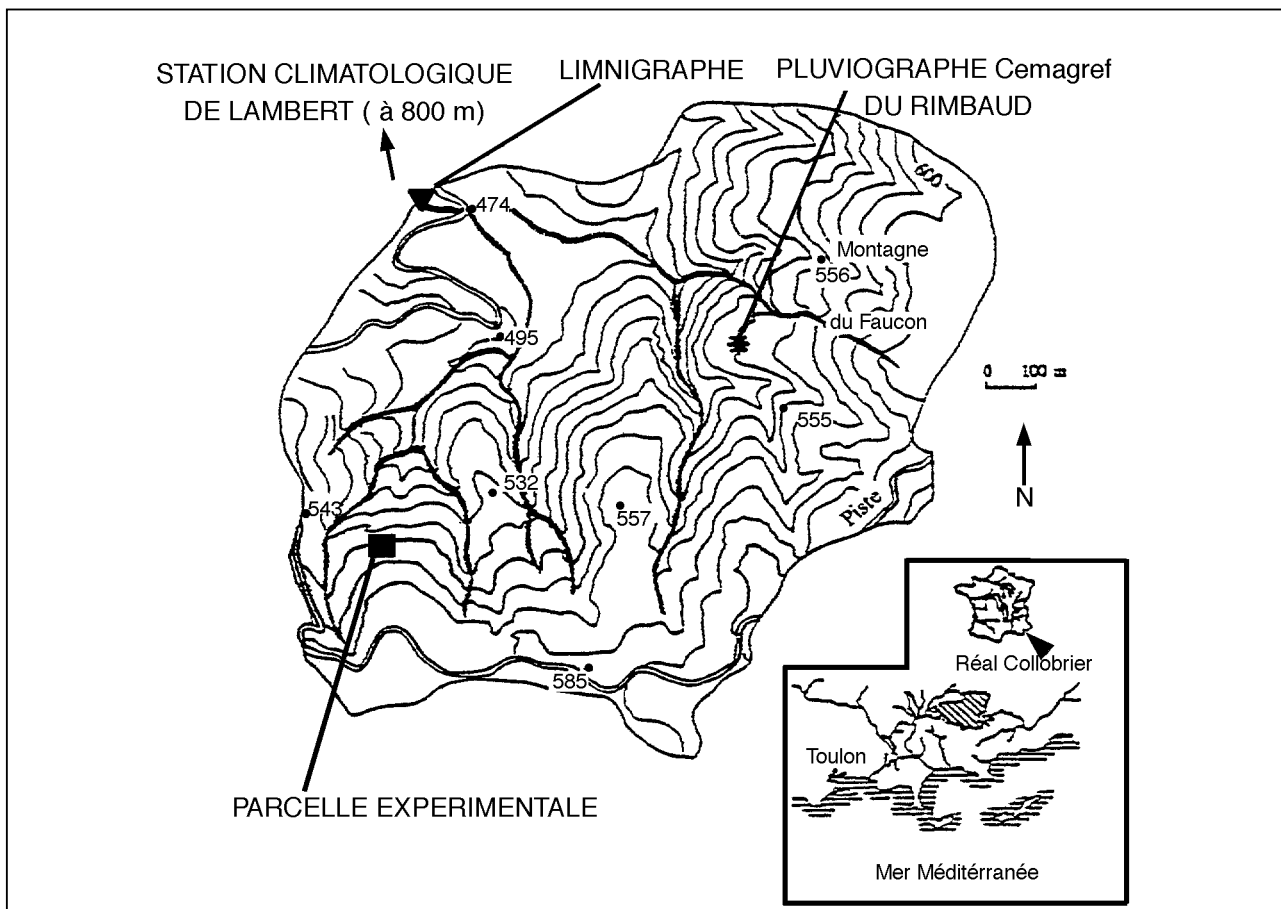
En août 1990, un incendie a ravagé 8400 ha de forêt et de maquis dans la partie occidentale du massif des Maures. Les observations sur les conséquences du feu ont été menées sur le bassin versant de recherche et expérimental (BVRE) du Réal Collobrier, géré par le Cemagref depuis 1966. Elles ont porté notamment sur l'hydrologie (Lavabre et al., 1993 ; Travi et al., 1994), l'hydrochimie (Martin, 1995) et les pertes de terre (Martin et al., 1992).

Les observations sur l'érosion hydrique ont été conduites, soit en mesurant les transports solides - dans le bassin versant du Rimbaud -, soit en quantifiant les dépôts de sédiments dans des retenues ayant servi de piège à sédiments. Nous présentons ici les résultats obtenus sur le bassin versant du Rimbaud (figure 1). Les données recueillies sur ce bassin ont par ailleurs servi à des essais de modélisation des transports solides (Lukey et al., 1995 ; Brochot et Meunier, 1996).

Sur le plan méthodologique, l'étude des conséquences des incendies de forêt pose d'énormes difficultés. Il faut en effet pouvoir s'adapter très vite à des événements dont on ne peut

prévoir ni le moment ni le lieu où ils vont se produire. Cela explique que les connaissances sur les conséquences des incendies de forêt soient encore insuffisamment développées pour mettre en valeur le rôle de facteurs très nombreux qui interviennent souvent en interaction les uns avec les autres (sols et formations superficielles, couvert végétal, intensité du feu, lithologie, relief, conditions climatiques - et en particulier intensité des pluies -, revégétalisation). Dans le massif des Maures, nous avons eu la chance que le feu touche un terrain sur lequel des études hydrologiques et hydrochimiques étaient en cours. Nous disposions donc immédiatement de stations limnigraphiques dont les courbes de tarage étaient fiables, d'un réseau de pluviographes très peu touché par le feu. Malheureusement, le personnel nécessaire n'a pas été disponible avant la fin de la première année hydrologique, si bien que tout le travail de terrain et de laboratoire s'est trouvé initialement concentré entre les mains d'un seul chercheur. De fait, pour réunir un jour les informations nécessaires à une vision à la fois synthétique et prospective des conséquences des incen-

Figure 1 - Présentation du bassin versant du Rimbaud.

Figure 1 - Presentation of the Rimbaud drainage basin.

dies de forêt, il faudrait constituer des groupes de recherche spécialisés, capables de lancer sans délai une opération et de multiplier les terrains d'observation. Le présent article fournit un exemple des travaux susceptibles d'être conduits sur le sujet.

LE TERRAIN D'ÉTUDE

Le bassin versant du Rimbaud (1,46 km²) est constitué de gneiss massifs affectés d'un très fort pendage vers le NO. Les altitudes sont comprises entre 470 et 622 m. La pente moyenne des versants avoisine 16 % ; mais leur inclinaison dépasse souvent 37 % à proximité des thalwegs. Les sols - peu épais (moins de 30 cm en général), caillouteux (teneur pondérale en cailloux et graviers de 40-45 % en moyenne), à texture sableuse, et à structure grumeleuse à submotteuse - appartiennent à la classe des Rankers. Ils recouvrent des roches altérées cohérentes, mais on trouve aussi, très localement, des arènes sableuses conservées sous forme de poches. L'épaisseur

moyenne des formations superficielles est de 30 cm environ.

Avec des précipitations annuelles moyennes supérieures à 1 100 mm et une température moyenne de 12 °C environ, le bassin versant connaît un climat de type méditerranéen humide. Les pluies se produisent surtout d'octobre à mars. La massivité des roches, la minceur des formations superficielles et les caractères morphométriques du bassin versant (Kc de Gravelius = 1,07 ; Dd = 4,86 km³/km² ; 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, déterminée par le Cemagref, s'élève à 634 mm.

L'incendie d'août 1990 a parcouru plus de 84 % du bassin versant. La végétation détruite était constituée d'un maquis complanté de chênes-liège et de pins maritimes. L'équipement qui était en place au moment de l'incendie (limnigraphe, pluviographe, préleveur automatique d'échantillons) a permis d'être

immédiatement opérationnel. Le dispositif expérimental a été aussitôt complété par une parcelle de mesure de l'érosion des sols (figure 1).

LES MESURES DE L'ÉROSION HYDRIQUE SUR PARCELLE EXPÉRIMENTALE

Présentation de la parcelle

La parcelle a la forme d'un parallélogramme. Elle est délimitée par une double rangée de tôles enfoncées d'une quinzaine de centimètres, dont la disposition empêche le passage des eaux. Le champ expérimental, exposé au nord, recoupe en biais la direction des structures planaires des gneiss. La parcelle présente une superficie de 75,2 m² pour une longueur de 12 m. La pente avoisine 19 %. La parcelle est reliée par une gouttière à une batterie de deux cuves réceptrices, d'une contenance de 1200 et 1000 litres, dont la première sert de partiteur au 1/9. Le dispositif est complété par un pluviographe.

Après chaque épisode pluvieux, nous avons mesuré le volume d'eau ruisselé dans les cuves, récupéré les sédiments déposés au fond, et prélevé des échantillons d'eau pour connaître la composition chimique des eaux et leur teneur en suspensions (voir infra pour la méthode de dosage des suspensions). Sur l'ensemble de la période étudiée, les particules en suspension au moment des prélèvements représentent moins de 2 % des transports solides totaux. Un mélange de tous les prélèvements effectués a fait l'objet d'une analyse granulométrique. En revanche, leurs caractères chimiques ont été assimilés à ceux des dépôts dans la cuve aval.

Le couvert végétal (bruyères arborescentes, arbousiers, jeunes pins maritimes) a subi un feu intense qui n'a rien laissé subsister. La revégétalisation de la parcelle, essentiellement à

base de pins, s'est révélée beaucoup plus lente que sur l'ensemble du bassin versant (taux de recouvrement par la reprise d'un arbousier et la pousse de jeunes pins : < 2 % en août 91 ; < 5 % en août 1992, sans développement herbeux). Elle n'a pris un réel développement qu'au début de la troisième année après le feu (taux de recouvrement par les arbustes : > 20 % en août 1993 ; > 50 % en août 1994, avec en outre quelques plages de graminées dans la partie aval de la parcelle).

Le sol de la parcelle appartient à la classe des Rankers. Son épaisseur moyenne est d'une vingtaine de centimètres. Le tableau 1 indique la composition granulométrique de l'horizon A₁₂ (4 échantillons ont été analysés entre 1990 et 1993, chacun mélangeant trois prélèvements effectués entre 5 et 15 cm de profondeur). La perméabilité du sol est très forte : K1 de Hénin > 3 cm/h (Martin, 1986). Différents indices - Is de Hénin et Monnier (1956), K de Wischmeier et Smith (1960), K de Dumas (1965) - rendent compte de la faible érodibilité des sols (Martin, 1986).

Quantification des pertes de terre

Les pertes solides mensuelles et annuelles sont portées dans le tableau 2. Les taux d'érosion annuels atteignent 883 t/km² en 1990-91, 1634 t/km² en 1991-92, 835 t/km² en 1992-93 et 31 t/km² en 1993-94. Les exportations de matériaux sont concentrées sur quelques mois : octobre 1990, octobre 1991 et septembre 1992 fournissent 63,6 % des pertes totales de la parcelle entre septembre 1990 et août 1994. La mise à nu du sol par l'incendie a provoqué une accentuation considérable de l'érosion : sous couvert végétal, les exportations solides sont pratiquement nulles à l'échelle de la parcelle (Martin, 1975).

A partir d'octobre 1992, la revégétalisation plus poussée de la parcelle limite considérablement l'érosion. Celle-ci tombe à un niveau très faible en 1993-94.

Analyses des matériaux exportés

Tableau 1 - Caractères physiques des sols de la parcelle expérimentale incendiée (horizon A₁₂).

Table 1 - Soil physical characteristics at the experimental burnt plot (horizon A₁₂).

Cx	Analyses de la terre fine									
	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

Analyses₍₁₎. Les données sont exprimées en % du poids du matériel séché à l'air. Cx : cailloux (> 2 cm). Gr : graviers (0,2 à 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 µm). LF : limons fins (2 - 20 µm). Argile : < 2 µm. MO : matière organique (carbone Anne x 1,72). Eau 105 : eau à 105 °C

(1) : Les analyses sédimentologiques ont été effectuées au Centre de Géomorphologie du CNRS de Caen.

Les caractères physico-chimiques des sédiments récupérés dans les cuves ont fait l'objet d'analyses permettant d'établir les valeurs moyennes annuelles (tableaux 3 et 4). La terre fine est séparée à sec à l'aide d'une passoire à trous ronds de 2 mm. Les débris organiques > 2 mm sont extraits par lavage. La granulométrie des sables est effectuée à sec après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée et séparation des éléments < 50 µm par voie humide. Les fractions fines sont déterminées par sédiographie. Des dosages témoins du carbo-

ne total par pyrolyse ont donné des résultats très voisins de ceux du carbone organique par la méthode Anne.

Sur la période 1990-1993, les matériaux minéraux représentent 87 % des transports solides. 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 essentielle-

Tableau 2 - Pertes solides de la parcelle expérimentale incendiée.

Table 2 - Solid losses from the experimental burnt plot.

1990-91	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Ann.
P (mm)	39	186	114	121	10	27	152	74	53	37	7	5	824
i.M (mm/h)	6	8	7	7	1,5	1,9	6	3,1	3,4	3,9	14	3,4	
i.Q3 (mm/h)	20	19	12	20	1,5	3,7	12	4,6	6	20	22	4,3	
i.6' (mm/h)	44	77	60	42	4,5	22	65	12	12	55	28	5	
R (mm)	0,1	27	20	12	0	0,2	6	1,0	3,4	3,9	0	0	74
E (kg)	0	41,8	5,3	7,7	0	0	8,3	0	0,4	2,9	0	0	66,4

1991-92	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Ann.
P (mm)	118	154	70	1,3	71	43	58	40	39	126	19	26	766
i.M (mm/h)	10	9	7	1,4	3,6	1,8	1,9	5,5	4,7	9	7,5	81	
i.Q3 (mm/h)	25	26	11	2,2	5	3,7	3,8	9	8	31	25	102	
i.6' (mm/h)	57	97	39	2,9	11	9	11	24	34	74	34	102	
R (mm)	22	41	9	0	0,04	0	2,6	7	6	39	7	12	145
E (kg)	22,3	63,4	3,6	0	0	0	0,3	1,2	2,3	19,7	1,1	9,0	122,9

1992-93	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Ann.
P (mm)	104	> 175	< 135	47	4,5	51	59	242	72	15	0,8	17	921
i.M (mm/h)	70												
i.Q3 (mm/h)	85												
i.6' (mm/h)	144												
R (mm)	83	> 46	< 23	3,5	0	0,1	0,3	50	14	2,4	0	0,8	222
E (kg)	56,7	> 4,7	< 0,8	0	0	0	0	0,4	0,2	0	0	0	62,8

1993-94	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Ann.
P (mm)	128	237	63	47	174	149	21	42	69	64	2	15	1011
R (mm)	30	21	1,3	0,1	9	1,8	0,2	0	6	20	0	2,9	93
E (kg)	1,1						1,2						2,3

P : précipitations sur la parcelle. i.M : médiane des intensités momentanées de la pluie. i.Q3 : troisième quartile des intensités momentanées de la pluie. i.6' : intensité maximale de la pluie en 6 minutes. R : ruissellement. E : érosion.

Tableau 3 - Caractères physiques des pertes solides de la parcelle expérimentale incendiée.

Table 3 - Physical characteristics of solid losses from the experimental burnt plot.

	1990-91		1991-92		1992-93		1993-94	
	1 (11)	2	1 (13)	2	1 (5)	2	1 (2)	2
MO > 2 mm	4,4	3,6	1,9	1,7	2,3	3,2	2,7	2,6
Min. > 2 mm	12,8	16,6	22,2	23,7	22,4	18,8	19,8	20,6
SG	15,1	17,5	15,2	17,3	12,5	12,8	14,5	16,2
SM	11,4	11,4	11,2	10,7	9,8	11,7	10,9	11,1
SF	16,6	14,7	14,9	16,0	19,0	19,5	16,4	16,5
LG	5,3	5,3	5,7	4,2	4,8	4,6	5,4	4,6
LF	14,8	13,2	12,3	11,0	11,5	11,7	12,8	11,8
A	10,3	7,6	8,7	7,3	9,5	9,7	9,3	8,0
MO < 2 mm	9,0	10,2	7,8	8,0	8,4	8,1	8,3	8,6

Les données sont exprimées en % du poids du matériel séché à l'air. 1 : moyennes des analyses des sédiments récupérés dans les cuves et des éléments restés en suspension, avec pondération par les quantités de matériaux correspondantes (entre parenthèses : nombre de prélèvements dans la cuve amont). 2 : valeurs obtenues en partant d'un échantillon représentatif des dépôts annuels dans la cuve amont. MO : matière organique. Min. : matériaux minéraux. 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 µm). LF : limons fins (2 - 20 µm). A : argile (< 2 µm). MO < 2 mm : valeur estimée

Tableau 4 - Caractères chimiques de la terre fine (< 2 mm) des pertes solides de la parcelle expérimentale incendiée.

Table 4 - Chemical characteristics of the fine material (< 2 mm) of solid losses from the experimental burnt plot.

	1990-91		1991-92		1992-93		1993-94	
	1 (11)	2	1 (13)	2	1 (5)	2	1 (2)	2
pH (eau)	6,79	6,66	5,41	5,39	5,07	5,03	5,64	5,59
Comp. Ads. :								
Ca ²⁺ (méq/100g)	31,34	29,57	15,19	14,08	9,96	9,67	18,49	17,39
Mg ²⁺	3,62	3,63	1,82	1,66	1,25	1,24	2,19	2,12
K ⁺	1,37	1,33	0,68	0,65	0,57	0,57	0,85	0,82
Na ⁺	0,24	0,22	0,21	0,13	0,12	0,12	0,20	0,15
S	36,57	34,75	17,90	16,52	11,90	11,60	21,73	20,41
CEC	31,38	30,10	24,44	22,87	22,12	21,56	25,84	24,60
C %	8,22	9,72	7,56	7,79	6,93	6,86	7,59	8,11
N %	0,51	0,49	0,32	0,35	0,30	0,29	0,37	0,375
Eau 105 °C %		3,27	2,70	2,70	2,73	2,57		2,83
PF %		16,37	13,98	14,34	14,74	14,09		14,85

1 : moyennes des analyses des sédiments récupérés dans les cuves, avec pondération par les quantités de matériaux correspondantes (les éléments restés en suspension ont été comptabilisés avec les sédiments de la cuve aval - entre parenthèses : nombre de prélèvements dans la cuve amont). 2 : valeurs obtenues en partant d'un échantillon représentatif des dépôts annuels dans la cuve amont. Comp. Ads. : complexe adsorbant. S : somme des cations basiques échangeables. CEC : capacité d'échange cationique (Metson). C : carbone organique (Anne). N : azote total (Kjeldhal). PF : perte au feu (1 100 °C).

ment constitué de petits graviers. La présence de cailloux est exceptionnelle. Les éléments supérieurs à 2 mm ont cependant été beaucoup plus abondants qu'ils ne l'avaient été sur une parcelle défrichée manuellement exploitée, dans le même secteur de septembre 1976 à août 1980 (Martin, 1986, 1989). La teneur en éléments grossiers n'avait pas alors atteint 0,5 %.

La comparaison des compositions granulométriques de la terre fine des sols et des sédiments met en évidence des phénomènes d'entraînement sélectif (tableau 5). Les limons sont particulièrement sensibles à l'érosion. Les argiles le sont un peu moins. Il ne faut pas incriminer les effets du feu, puisque les observations réalisées antérieurement sur parcelle défrichée manuellement avaient conduit à la même conclusion. Les sables grossiers sont plus facilement entraînés que les sables fins et moyens. Cela rejoint également les résultats antérieurs.

Sur le plan chimique, les caractères des sédiments sont influencés par les conséquences de l'incendie. Les pH élevés et les très fortes teneurs en cations échangeables au cours de la première année après le feu en témoignent. Certes, l'érosion touche d'abord la partie superficielle des sols enrichie par les cycles biogéochimiques (horizon A₁₁), mais de telles valeurs n'avaient pas été obtenues lors de l'exploitation de la parcelle

en terrain défriché (Martin, 1986). Au cours des années suivantes, du fait de l'entraînement sélectif de la matière organique et des particules fines, les sédiments continuent à être beaucoup plus riches en carbone organique et en éléments nutritifs que l'horizon A₁₂ des sols (tableau 6). La terre fine des sédiments présente cependant des taux de carbone inférieurs aux valeurs trouvées antérieurement sur parcelle défrichée (> 9 %).

LES PHÉNOMÈNES D'ÉROSION À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Sur le terrain d'étude, les crues sont responsables de la totalité des exportations solides. Sur ce plan, l'incendie a nettement modifié le fonctionnement du bassin versant (Lavabre et al., 1993 ; Martin et al., 1994) : le comportement du ruisseau du Rimbaud est devenu fortement impulsif en 1990-91. Les débits en pointe de crue ont dépassé 5,5 m³/s à trois reprises ; et le débit maximal a avoisiné 8 m³/s, le 9 décembre 1990. Les montées de crue demandaient souvent moins de cinq minutes et les décrues étaient elles-mêmes rapides. En 1991-92, les précipitations n'ont déclenché aucun épisode

Tableau 5 - Composition granulométrique de la terre fine (< 2 mm) des sols et des pertes solides de la parcelle expérimentale incendiée (1990-1993).

Table 5 - Granulometric composition of the fine material (< 2 mm) of soil and solid losses at the experimental burnt plot (1990-1993).

	SG	SM	SF	LG	LF	A
Sols	22,5	20,6	29,1	5,5	11,3	11,1
Pertes solides	20,9	15,7	23,7	7,8	18,5	13,4
PS/S	0,93	0,76	0,81	1,42	1,64	1,21

Les teneurs sont exprimées en % du poids du matériel séché à l'air. PS : pertes solides (les données ont été établies à partir des valeurs 1 du tableau 3). S : sols. 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 µm). LF : limons fins (2 - 20 µm). A : argile (< 2 µm).

Tableau 6 - Caractères chimiques de la terre fine des sols (horizon A₁₂) de la parcelle expérimentale incendiée.

Table 6 - Chemical characteristics of soil (horizon A₁₂) at the experimental burnt plot.

N %	pH	Complexe adsorbant (méq/100 g)						C %	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	CEC		
S. 1990	5,13	3,07	0,67	0,33	0,11	4,18	12,60	2,98	0,12
S. 1991	5,47	3,78	0,84	0,29	0,07	4,98	10,96	2,61	0,09
S. 1992	5,34	4,18	0,86	0,25	0,08	5,37	11,62	2,97	0,11

S. : septembre. S : somme des cations basiques échangeables. CEC : capacité d'échange cationique (Metson). C : carbone organique (Anne). N : azote total (Kjeldhal)

spectaculaire. En revanche, plusieurs crues très violentes se sont encore produites en 1992-93 (7,7 m³/s en septembre ; 3,5 m³/s en octobre ; 4,3 m³/s en novembre).

Les recherches sur l'érosion ont été conduites selon deux approches :

- D'une part, nous avons observé les formes d'érosion et d'accumulation sur les versants ainsi que les dépôts dans les thalwegs (Béguin, 1992 ; Béguin, 1993 ; Martin et al., 1992).

- D'autre part, nous avons mesuré les transports solides à l'exutoire du bassin versant.

Les formes d'érosion et d'accumulation un an après le feu

Les observations se placent à la fin d'une année assez pluvieuse (955 mm sur le bassin, contre 1 163 mm en moyenne sur 23 ans), avec une forte concentration des précipitations d'octobre à décembre (502 mm). Les intensités de la pluie n'ont pas été exceptionnelles. Cependant les valeurs maximales ont atteint 79 mm/h en 5', 35 mm/h en 30' et 29 mm/h en une heure.

Sur les versants, l'érosion s'est surtout exercée par saltation (splash) et ruissellement diffus. Elle a provoqué le déchaussement partiel des graviers et cailloux, et l'organisation d'un début de pavage.

Le ruissellement superficiel n'a engendré aucun ravinement important. Certes, les traces d'érosion et les dépôts indiquent que les axes de drainage élémentaires préexistants ont fonctionné en ravines. Mais le ruissellement concentré se faisant presque partout sur roche, l'érosion linéaire est restée bloquée. A l'extrémité supérieure des vallons, se trouvent des dépressions souvent encombrées de stocks colluviaux. Les écoulements y étaient intermittents et faibles sous couvert végétal. Après le feu, elles ont subi quelques petites incisions, sans sapement des berges.

Sur les sols peu épais, très caillouteux et à texture sableuse du bassin versant du Rimbaud, l'érosion n'a produit que des microformes : des amorces de rigoles de quelques mm à quelques cm de profondeur pour une largeur de quelques cm. Ces griffures superficielles sont localisées sur des versants à pente moyenne ou forte (> 16 %). La nature du couvert végétal avant l'incendie ne semble pas influencer l'intensité du phénomène. Toutefois la présence d'un tapis d'aiguilles de pin tombées après l'incendie peut jouer localement un rôle protecteur, en entravant la concentration du ruissellement.

De nombreuses petites incisions ont pour origine les points de déversement des eaux drainées par une piste forestière, parallèle aux courbes de niveau, située à mi-pente des versants. Certaines zones rocheuses jouent un rôle similaire. Enfin, les trous laissés dans le sol par la combustion des souches, en provoquant le soutirage d'écoulements subsuperficiels lors des pluies abondantes, déterminent aussi des

amorces de ruissellement superficiel concentré.

Les rigoles sont souvent discontinues. Elles sont associées à de petits dépôts, épais de quelques mm à quelques cm, qui se distinguent des sols par leur couleur foncée due à la présence de cendres et de charbon de bois. Leur formation résulte d'une diminution locale de la compétence des écoulements superficiels, en relation avec les conditions microtopographiques (petit replat) ou la présence d'un barrage constitué d'un caillou ou de débris végétaux.

Dans la partie moyenne du bassin versant, les ruisseaux coulent sur la roche et les thalwegs ont une pente longitudinale forte (> 12 %). Entaille des lits et accumulation de sédiments sont ici impossibles. Il s'agit d'une zone de transfert.

Dans la partie aval du réseau hydrographique, les thalwegs sont beaucoup moins pentus (< 4 %). Les ruisseaux ont un lit bien marqué, large de 2 à 4 m, et profond de 2 m environ. Les thalwegs présentent un début d'organisation (lit mineur et épaulement de lit majeur). Les écoulements se font généralement sur un pavage constitué d'éléments caillouteux (5 à 20 cm de longueur) disposés en tuiles. Les premières crues après l'incendie ont provoqué une très légère déstabilisation du pavage et le dépôt de matériaux sablo-graveleux dans les zones les plus planes. Il ne s'est produit aucun sapement des berges.

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). L'intensité de la revégétalisation était cependant très hétérogène. Elle était maximale dans les secteurs où la végétation était peu développée avant l'incendie (ce qui a déterminé une moindre intensité du feu) en particulier dans les endroits où les sols sont peu épais, et/ou les phénomènes d'érosion postérieurs ont été les moins efficaces (versants à pente faible, zones où l'abondance des chicots de gneiss gêne le ruissellement superficiel).

Les travaux de l'ONF sur le bassin versant

A la fin du mois de septembre 1991, l'ONF a procédé, dans la partie aval du bassin versant, au traitement d'une dizaine d'hectares de terrain incendié. Un bulldozer a raboté les versants, pour ne plus laisser que le sol à nu. Les arbres morts, des blocs rocheux, mais aussi de la terre ont été déversés dans le lit des ruisseaux.

Ces travaux ont créé des conditions extrêmement favorables à l'érosion, du fait de la diminution de la perméabilité des sols par tassage, de la destruction de leur structure en surface, et de l'élimination de tous les éléments pouvant faire obstacle au ruissellement. L'activité érosive, favorisée par des pentes assez fortes (souvent supérieures à 18 %), a rapidement provoqué la formation de nombreuses rigoles sur les versants traités (2 à 4 par unité de largeur de 5 m). A la mi-

novembre, ces incisions atteignaient jusqu'à 20 cm de profondeur, alors que celles observées sur le reste du bassin versant n'excédaient pas 6 cm. Les observations permettent d'estimer à plus de 50 m³/ha les pertes de matériaux sous l'effet du ruissellement concentré, entre septembre et novembre 1991. Sur les pentes les plus fortes (36 %), l'ablation a dépassé 300 m³/ha.

A la mi-novembre, l'ONF a procédé à un sous-solage (selon les courbes de niveau) dans les zones préalablement parcourues par le bulldozer. Au cours des mois suivants, les arbres morts et la végétation en cours de régénération ont été détruits (sauf les chênes-liège) sur plus de la moitié des surfaces incendiées, soit à la tronçonneuse, soit en utilisant des engins mécaniques. Les conditions de l'érosion ont donc une nouvelle fois changé. Toutefois la grande sécheresse qui a suivi ces travaux, n'a pas permis qu'ils aient des conséquences sur le plan de l'érosion. Le taux de recouvrement par les arbustes avoisinait 30-35 % en août 1992 et 45-50 % en août 1993 (d'après les observations de Puech et al., 1994, Viné, communication personnelle - suivis par télédétection avec contrôles de terrain).

Les pertes solides 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' pendant les crues. La prise d'eau se trouvait sur le bord du déversoir triangulaire de la station limnigraphique, à 30 cm au-dessus de la pointe du V. Une cascade située juste en amont du limnigraphe assure une

bonne homogénéisation des eaux. A ces prélèvements automatiques, nous avons ajouté 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, pour les échantillons les moins chargés, par filtration sur membrane.

Avant pesée, les culots de flacon comme les membranes étaient passés au dessiccateur.

Le seuil du limnigraphe, susceptible de constituer un petit piège à sédiments (< 10 m³), a été vidé immédiatement après l'incendie. Nous en avons retiré 7,5 m³ environ de galets et de blocs associés à des graviers et des sables grossiers. Ce dépôt représentait la plus grande partie de l'érosion de matériaux minéraux depuis la mise en place du limnigraphe en 1966. En effet, les mesures effectuées sur la période 1976-1980, ont permis de constater l'extrême modestie des exportations en suspension de ce bassin versant sous couvert végétal (Martin et al., 1993). Les éléments emportés consistaient alors essentiellement en débris organiques, dont l'origine était vraisemblablement la proximité immédiate des thalwegs.

Le seuil a encore été curé au début de l'année 1991-92. C'est une crue qui a assuré sa vidange en septembre 1992.

Les fluctuations rapides du ruisseau du Rimbaud après l'incendie, ainsi que les problèmes de fonctionnement du préleveur dus à la présence de gros charbons de bois, ont par-

Tableau 7 - Pertes solides (PS) du bassin versant du Rimbaud.

Table 7 - Solid losses (PS) from the Rimbaud drainage basin.

1990-91	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Année
P (mm)	41	231	133	138	14	33	156	96	63,5	38	7	6	955
R (mm)	0	83	88	137	27	25	138	68	66	9	0,6	0,1	642
PS (t)	0	175	79	537	0	0	30	2,5	6,1	1,5	0	0	831

1991-92	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Année
P (mm)	122	130	60	2	80	48	61	44	41	140	21	36	785
R (mm)	5	86	58	10	36	23	26	58	5	31	10	0,8	349

1992-93	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Année
P (mm)	102	221	118	50	6	59	66	264	80	14	8	16	1 004
R (mm)	13	129	138	18	13	7	79	190	68	4	0,9	0,1	658

P : précipitations sur le bassin (calculées par le CEMAGREF à partir des données de tous les postes gérés sur le BVRE du Réal Collobrier, en utilisant la fonction SPLINE 2D - Lavabre, 1988). R : ruissellement. t : tonnes.

fois altéré la qualité du suivi. Certaines concentrations en pointe de crue ont été extrapolées. La concentration maximale mesurée a été de 29,9 g/l le 9 décembre 1990, pour un débit de 4,4 m³/s. 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.

Le tableau 7 regroupe les valeurs mensuelles et annuelles des transports solides au niveau du déversoir de la station limnigraphique.

Les exportations mesurées indiquent des taux d'érosion spécifique annuels de 569 t/km² en 1990-91, 66 t/km² en 1991-92, et 76 t/km² en 1992-93. Les dépôts dans le seuil correspondent à une érosion supplémentaire d'une dizaine de t/km² en 1990-91 et 1991-92. En 1992-93, la diminution du stock de sédiments dans le seuil entre le début et la fin de l'année, oblige à minorer le taux d'érosion de 3 t/km² environ.

Par rapport au fonctionnement avant incendie, la destruction du couvert végétal a bien sûr provoqué une augmentation considérable des pertes solides immédiatement après le feu (Ramade, 1987 ; Vega et Diaz-Ferros, 1987 ; Brown, 1990).

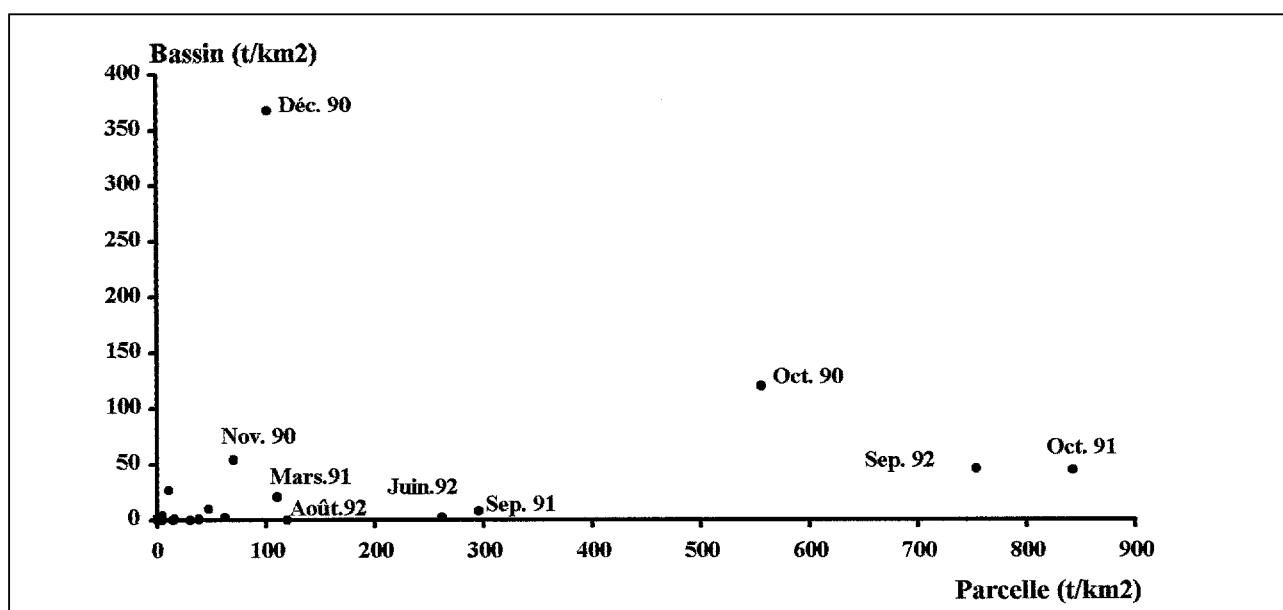
La relation entre les exportations solides du bassin versant et celles de la parcelle expérimentale est extrêmement lâche (figure 2).

Cela résulte en partie de la différence de longueur des surfaces soumises à l'érosion, et donc du temps nécessaire aux particules mobilisées pour atteindre un chenal d'évacuation (gouttière de la parcelle ou ruisseau) avant l'arrêt du ruissellement sur les versants. La parcelle, très courte, est extrêmement sensible aux fortes intensités, même (voire surtout) lorsque les averses sont brèves ; alors que le bassin versant subit une érosion d'autant plus forte que les épisodes pluvieux durent suffisamment longtemps pour que les écoulements de surface se concentrent sur les versants et rejoignent les thalwegs. Les conséquences du changement d'échelle sont particulièrement sensibles en octobre 1990 : érosion de 556 t/km² sur la parcelle et de 120 t/km² sur le bassin versant - pour une succession de très nombreuses petites averses - et en décembre 1990 : érosion de 102 t/km² sur la parcelle et de 368 t/km² sur le bassin versant, avec près de 80 mm de pluie en une très grosse averse le 9 décembre. Il faut en outre tenir compte de l'hétérogénéité de la revégétalisation : en 1991-92 et 1992-93, en dépit des travaux de l'ONF, la parcelle expérimentale était beaucoup moins bien protégée par le couvert végétal que le reste du bassin versant. De ce fait, l'effet d'échelle a joué de façon encore plus spectaculaire, et les différences entre les taux d'érosion sur bassin et sur parcelle sont devenues considérables.

La comparaison des dépôts relevés dans les thalwegs en août 1992 et en août 1993 (Béguin, 1993) met en évidence l'élimination des stocks constitués après l'incendie. Une part

Figure 2 - Relation entre les pertes solides mensuelles du bassin versant du Rimbaud et de la parcelle expérimentale incendiée (septembre 1990 - septembre 1992).

Figure 2 - Relationship between monthly solid losses from the Rimbaud drainage basin and the experimental burnt plot.



importante (plusieurs dizaines de tonnes) des exportations solides réalisées par le bassin versant en 1992-93 provenait de cette évolution. En août 1993, très peu de sédiments restaient dans les thalwegs. Seules subsistaient les accumulations créées par l'ONF. Leur évacuation est rendue pratiquement impossible par leur volume, qui oblige les ruisseaux à emprunter d'autres voies, et par le fait qu'elles sont armées par de nombreux troncs.

Les crues d'octobre et de novembre 1990, bien qu'elles aient présenté à deux reprises des débits supérieurs à 5,5 m³/s (le 3 octobre et le 25 novembre), ont transporté essentiellement des matériaux peu grossiers (tableau 8). 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 m³/s) 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 de ruissellement concentré, notamment dans la partie amont des drains élémentaires encombrée de matériaux colluviaux.

Ni les dépôts dans le thalweg ni les échantillons mélangeant les sédiments récupérés dans les eaux prélevées par le préleveur automatique ne permettent de se faire une idée très précise de la granulométrie des matériaux exportés. Les résultats obtenus indiquent cependant une exportation sélective des limons, de l'argile et du carbone organique par rapport à la terre fine d'un échantillon représentatif (mélangeant 17 prélèvements) des sols du bassin versant (tableau 9).

Si l'on compare les dépôts prélevés dans le seuil en décembre 1990 et les sédiments récupérés au cours du même mois dans les eaux du ruisseau en crue, on constate que le rapport Refus à 2 mm/Sables grossiers est moins élevé dans le dépôt (1,67 ; contre 2,62). Pourtant la taille des trous de la crépine et la position du préleveur deux mètres au-dessus du

Tableau 8 - Caractères physiques des matériaux solides exportés du bassin versant du Rimbaud.

Table 8 - Physical characteristics of solid materials exported from the Rimbaud drainage basin.

	Dép. fin Nov. 1990	Prél. aut. Sep.-Nov. 90	Dép. gros. Dec. 1990	Prél. aut. Dec. 1990	Prél. aut. Mar.-Mai 90	Prél. aut. 1991-92
> 2 mm	0,2	0,2	23,5	12,9	1,4	0,0
Terre fine :						
SG	2,7	2,0	61,6	21,5	8,6	2,2
SM	32,0	4,8	26,9	22,6	21,2	4,3
SF	52,6	18,2	8,5	23,4	23,3	10,6
LG	3,1	10,0	0,9	8,8	8,8	8,4
LF	5,4	40,0	1,3	23,9	23,9	39,7
A	4,2	25,0	0,8	14,2	14,2	34,8
C (< 2 mm)	1,8	16,6	0,5	7,6	11,8	10,0

Les données sont exprimées en % du poids du matériel séché à l'air. Dép. fin : dépôt fin. Dép. gros. : dépôt grossier. Prél. aut. : préleveur automatique d'échantillons. > 2 mm : matériaux minéraux > 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 µm). LF : limons fins (2 - 20 µm). A : argile (< 2 µm). C : carbone organique (Anne).

Tableau 9 - Caractères physiques moyens de la terre fine des sols (horizon A₁₂) du bassin versant du Rimbaud.

Table 9 - Mean physical characteristics of the fine material of soil (horizon A₁₂) in the Rimbaud drainage basin.

SG	SM	SF	LG	LF	A	C
20,6	20,1	28,4	5,5	13,4	12,0	3,0

Les teneurs sont exprimées en % du poids du matériel séché à l'air. 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 µm). LF : limons fins (2 - 20 µm). A : argile (< 2 µm). C : carbone organique (Anne).

point de prélèvement empêchaient l'aspiration de beaucoup de graviers et des cailloux. Le piégeage des sables grossiers dans le seuil de la station ayant été forcément moins efficace que celui des éléments > 2 mm, il faut voir dans la composition granulométrique des sédiments récupérés par le préleveur, la conséquence de la position de la prise d'eau 30 cm au-dessus de la base du déversoir triangulaire : les eaux aspirées présentaient une charge particulièrement forte en éléments graveleux. De ce fait, l'erreur possible sur la quantification des exportations de produits solides liée à la position de la prise d'eau, est certainement assez faible.

Les pertes d'éléments nutritifs

Nous ne disposons pas d'analyses chimiques des matériaux transportés par le Rimbaud. Il est cependant possible d'estimer grossièrement les pertes de cations basiques échangeables et d'azote total à partir des mesures des transports solides à l'exutoire du bassin versant et des analyses (physiques et chimiques) des sédiments de la parcelle expérimentale. En 1990-91, les exportations de ces éléments à l'échelle du bassin versant auraient atteint approximativement : 3,0 t/km² pour le calcium ; 0,21 t/km² pour le magnésium ; 0,26 t/km² pour le potassium ; 0,03 t/km² pour le sodium ; et 2,4 t/km² pour l'azote. Ce que l'on sait de la granulométrie des transports solides (tableau 8), garantit une bonne fiabilité à ces valeurs. A titre de comparaison, la même année, les exportations en solution ont représenté : 5,3 t/km² de calcium ; 1,7 t/km² de magnésium ; 0,9 t/km² de potassium ; 5,6 t/km² de sodium ; et 0,7 t/km² d'azote (Martin, 1995). En 1991-92, du fait de la modestie de l'érosion hydrique, les pertes de cations échangeables et d'azote total liées aux transports solides ont considérablement diminué.

CONCLUSION

L'incendie du bassin versant du Rimbaud a provoqué une accentuation considérable de l'érosion hydrique. Alors qu'elle était très faible sous couvert végétal, elle a atteint plusieurs centaines de tonnes/km² en 1990-91 : 579 t/km² sur le bassin versant et 883 t/km² sur la parcelle expérimentale.

En 1991-92, les travaux réalisés par l'ONF n'ont pas empêché une forte diminution de l'érosion du bassin versant (76 t/km²), en raison d'une relative sécheresse et de la reprise végétale. Sur la parcelle expérimentale, encore peu revégétalisée, les fortes intensités des pluies de septembre, octobre et juin ont permis des exportations annuelles de 1634 t/km². La différence d'échelle joue ici un rôle considérable : l'érosion d'une parcelle de 12 m de long est beaucoup plus directement influencée par l'intensité des averses que celle d'un bassin versant où la durée des précipitations est un facteur important de l'organisation des écoulements sur les versants et de leur

arrivée jusqu'aux thalwegs.

En 1992-93, la différence s'est maintenue entre la parcelle (835 t/km²) et le bassin versant (73 t/km²). Et pourtant les valeurs mesurées à l'exutoire du bassin intègrent la purge des matériaux abandonnés dans les drains au cours de la première année après l'incendie.

Avec le développement d'un couvert végétal plus dense et la protection apportée par une amorce de pavage, les pertes solides de la parcelle sont tombées à 31 t/km² en 1993-94.

L'érosion subie par le bassin versant en décembre 1990 (368 t/km²), pour des précipitations assez modestes (138 mm) et des intensités de la pluie sans caractère exceptionnel (i.M : 8 mm/h ; i.Q3 : 23 mm/h ; i.6' : 48 mm/h), laisse imaginer les conséquences catastrophiques qu'engendreraient, après un incendie, des précipitations d'automne aussi abondantes que celles d'octobre 1976 (565 mm), octobre 1979 (495 mm) et octobre 1987 (413 mm), ou aussi violentes que celles du 13 septembre 1968 (88 mm/h pendant 75 minutes, débit en pointe de crue du ruisseau du Rimbaud supérieur à 15 m³/s).

REMERCIEMENTS

Les recherches ont bénéficié du soutien scientifique et logistique du Groupement d'Aix-en-Provence du Cemagref, et de l'aide financière du MRE, de la Région PACA et de la Communauté Européenne (programme DM2E). Nous sommes reconnaissants à Michel Icole (LGQ-CEREGE, Aix-en-Provence) pour les dosages du carbone total par pyrolyse, et à Philippe Allée pour ses conseils et sa participation au curage du seuil de la station limnigraphique en 1992.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Béguin E., 1992 - érosion mécanique après l'incendie de forêt du massif des Maures de 1990 : exemple du bassin versant du Rimbaud. Mém. Maîtrise, Univ. Aix-Marseille II, 50 p.
- Béguin É., 1993 - érosion mécanique après l'incendie du massif des Maures. Le bassin versant du Rimbaud. Mém. DEA, Univ. Aix-Marseille I, 40 p.
- Brochot S. et Meunier M., 1996 - Un modèle d'érosion des torrents en crue (ETC). Ingénieries, EAT, n° 6, p. 9-18.
- 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, édit. Wiley, Chichester, p. 269-288.
- Dumas J., 1965 - Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. III, n° 4, p. 307-333.
- 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.
- Lavabre J., 1988 - Les programmes Spline isovtr et interg. Édit. Cemagref, Aix-en-Provence, 8 p. + annexes.
- Lavabre J., Sempere-Torres D. et Cernesson F., 1993 - Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. Journal of Hydrology, vol. 6, n° 2, p. 121-132.

- Lukey B.T., Sheffield J., Bathurst J.C., Lavabre J., Mathys N. 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 Doct. État, Univ. Paris I, 935 p.
- Martin C., 1989 - Dégradation d'un sol défriché à la station de Lambert (massif des Maures, Var, France). *Rev. Géomorph. dyn.*, t. XXXVIII, p. 17-29.
- Martin C., 1995 - Les conséquences hydrochimiques de l'incendie de forêt d'août 1990 dans le massif des Maures. *Ann. Géo.*, n° 581/582, p. 182-187.
- Martin C., Béguin É. et Bernard-Allée Ph., 1992 - Premières observations sur les phénomènes d'érosion mécanique dans le bassin versant du Rimbaud après l'incendie d'août 1990. *Ét. Géogr. Phys.*, n° XXI, p. 29-33.
- Martin C., Bernard-Allée Ph., Béguin É., Levant M. et 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.*, n° 5, p. 438-447.
- Martin C., Lavabre J., Travi Y., Gimenez H., Quillard J., Daniel M. et Chevalier Y., 1994 - Comportement impulsionnel du ruisseau du Rimbaud à la suite d'un incendie de forêt : l'exemple de la crue du 27 septembre 1992. *Ét. Géogr. Phys.*, n° XXIII, p. 13-14.
- Puech C., Viné P. et Leibreich J., 1994 - évolution comparée entre variations d'écoulement et couvert végétal suite à incendie. *Réal Collobrier 1990-1993. Actes du Workshop final du projet européen DM2E, Barcelone (1994)*, édit. Cemagref, Aix-en-Provence, 11 p.
- Ramade F., 1987 - Les catastrophes écologiques. édit. McGraw Hill, Paris, 318 p.
- Travi Y., Lavabre J., Blavoux B. et Martin C., 1994 - Traçage chimique et isotopique (Cl-, 180) d'une crue d'automne sur un petit bassin versant méditerranéen incendié. *Jour. Sci. Hydrol.*, vol. 39, n° 6, p. 605-619.
- Vega J.A. et Diaz-Fieros F., 1987 - Wildfire effects on soil erosion. *Ecologia Mediterranea*, t. XIII, n° 4, p. 119-125.

Wischmeier W.H. et Smith D.D., 1960 - An universal soil-loss estimating equa-

tion to guide conservation farm planing. 7th Intern. Congr. Soil Sci.,

vol. I, p. 418-425.