

# Effets des feux de forêt sur la matière organique du sol

J.L. Rubio, E. Gimeno-García, V. Andreu

Centro de Investigaciones sobre Desertificación -CIDE (CSIC, Universitat de València, Generalitat Valenciana).  
Apartado Oficial. 46470 Albal (Valencia). Tel.: 96-122 05 40. Fax: 96-126 39 08. E-mail: Jose.l.rubio@uv.es

## *Résumé*

La littérature scientifique abonde en résultats contradictoires concernant l'effet des feux de forêt sur la matière organique des sols (MOS) : pertes dans certains cas, gains dans d'autres. La réponse au feu dépend de facteurs comme : l'intensité du feu, la température atteinte, la durée de passage du feu, les conditions climatiques au moment du feu, le type et la quantité de combustible disponible, l'état du sol, etc. Les horizons supérieurs du sol sont les plus riches en matière organique, ce sont aussi ceux qui subissent les premiers, et avec l'intensité la plus importante, l'impact des feux.

Un dispositif expérimental a été aménagé sur la station de la Concordia (Lliria, Valence, Espagne) pour préciser ces effets en zone méditerranéenne. Le site, situé sur un versant, présente une couverture arbustive sclérophylle typique ; le sol est un Leptosol Rendzique (FAO-UNESCO, 1988). Le dispositif expérimental comportait neuf parcelles. Des feux expérimentaux ont été conduits sur six de ces parcelles et la quantité de combustible a été partiellement contrôlée pour obtenir deux intensités de feu différentes (trois parcelles par traitement) ; les trois autres parcelles servant de témoin.

Les valeurs moyennes de température mesurées à la surface du sol furent de 439°C et 232°C pour les deux intensités de feu, avec des températures excédant 100°C pendant respectivement 36 minutes et 17 minutes. On a noté une augmentation de 8091 kg ha<sup>-1</sup> de matière organique et de 76,12 kg ha<sup>-1</sup> kg de N pour le feu d'intensité modérée, mais une diminution de 942,5 kg ha<sup>-1</sup> de matière organique et de 58,0 kg ha<sup>-1</sup> de N total pour le feu d'intensité forte. La diminution importante en matière organique et en azote total après un feu violent est considérée comme la conséquence des températures élevées et de leur durée qui favorisent la volatilisation, la combustion et la minéralisation de la MOS. Inversement, les augmentations notées sur les parcelles soumises à un feu modéré sont attribuables à la faible combustion de la matière organique, en raison la brièveté des températures élevées à la surface de sol, ainsi qu'au dépôt de résidus végétaux partiellement brûlés.

Cette tendance s'est poursuivie jusqu'aux premières pluies d'automne, soit quatre mois après le feu. Ensuite, et jusqu'à la fin de la période d'étude (hiver 2000), l'effet de l'érosion hydrique fut plus important sur les parcelles brûlées que sur le témoin.

## *Extended summary*

Soil surface horizons are the richest in organic matter (SOM) and the ones that first and with more intensity receive the impact of fire. The resulting general trend of SOM response depends on fire severity. The abundant scientific literature on this issue shows results apparently contradictory indicating losses in SOM content in some cases and gains in others. The variability in response to fire is mainly the result of different factors affecting forest fires like: fire intensity, temperature residence time on soil, climatic conditions at the time of fire, fuel load and type, previous soil conditions, etc. As a general trend, an increase in SOM could be found in fires of low intensity owing to the incorporation to the soil surface of vegetation residues partially burned or because accumulation of charred materials after the fire. In the case of high intensity fire a net loss of surface SOM through volatilisation and

direct combustion is usually the result. Fire not only modifies the amount of SOM but also its composition and its chemical transformation. Pyrolysis, distillation of volatile constituents and mineralization, with the consequent release of nutrients, are processes linked to fire intensity.

In order to investigate the above impacts and factors of forest fires, a Permanent Field Experimental Station was constructed in La Concordia (Liria, Valencia, Spain) to provide information on the dynamic of soil properties, water erosion rates and vegetation recovery, before and after the impact of controlled forest fires. Results of the role of fire intensity on SOM evolution are presented in this paper.

The Experimental Station is on a hillside with a sclerophyllous shrub cover typical of semi-arid Mediterranean areas regenerated after a previous wildfire occurred in 1978. The soil is a Rendzic Leptosol (FAO-UNESCO, 1988). The experimental set-up consists of nine plots, each 20 m long by 4 m wide, with similar morphology, slope gradient, rock outcrops, soil and vegetation cover. Experimental fires were made on six of these plots in which the fuel was partially controlled to obtain two different fire intensities (three plots for each treatment). The other three plots were used as control. Results give mean values of soil surface temperature of 439°C and 232°C for each fire treatment (Table 1), with temperatures exceeding 100°C lasting for 36 minutes and 17 minutes, respectively.

The most notable difference observed as consequence of fires was the decrease of organic matter (942.5 kg ha<sup>-1</sup>) and total N (58.0 kg ha<sup>-1</sup>) for the high intensity plots, whereas for the moderate fire plots there was an increase in 8091 kg ha<sup>-1</sup> organic matter and 76.12 kg ha<sup>-1</sup> total N (Figure 1). The important decrease in the organic matter and total nitrogen contents after the intense fire was a consequence of the elevated temperatures as well as their duration, which enhance the volatilisation, combustion and mineralization of SOM. On the other hand, the increase in their contents for moderate-fire plots was attributable to the low combustion of the organic matter due to the short duration of high temperatures on the soil surface and to the deposition of partially burnt plant residues.

This trend was observed until the first autumn rains, four months after fire (Figure 2). From this season to the end of the studied period (winter 2000), the effect of water erosion revealed higher erosion rate on burned plots than in control ones. The temporal evolution of SOM shows that for this period its content was always lower in the burned plots than in control, and there were still appreciable differences in SOM content between the two fire intensity treatments (Figure 3).

## Introduction

La plupart des recherches sur les émissions de carbone et d'autres produits chimiques vers l'atmosphère par les feux de forêt se sont intéressés à des feux de canopées ou d'abattis détruisant beaucoup de biomasse. Cependant, dans de nombreux écosystèmes méditerranéens, des feux d'intensité variable, courant à la surface du sol, peuvent aussi consommer des quantités variables de matière organique du sol (MOS). Ils auront aussi comme conséquence des émissions de carbone vers l'atmosphère et pourront de plus favoriser une perte importante de MOS par érosion hydrique agissant sur les écosystèmes brûlés.

Les horizons supérieurs du sol sont les plus riches en matière organique, ce sont aussi ceux qui subissent les premiers, et avec l'intensité la plus importante, l'impact des feux. L'impact d'un feu sur la MOS dépendra surtout de sa puissance. La littérature scientifique, abondante sur ce sujet, comporte des résultats contradictoires : pertes de MOS dans certains cas, gains dans d'autres. La réponse au feu dépend de facteurs tels que : l'intensité du feu, la température atteinte, la durée de passage du feu, les conditions climatiques au moment du feu, le type et la quantité de combustible disponible, l'état du sol, etc. D'une façon générale, on note une augmentation de MOS pour des feux de faible intensité qui permettent, après leur passage, l'incorporation de résidus végétaux partiellement brûlés ou l'accumulation de matériel carbonisé en surface du sol. Dans le cas de feux de forte intensité, une perte de MOS en surface par volatilisation et combustion directe est habituellement enregistrée. Le feu modifie non seulement la quantité de MOS, mais également sa composition et ses transformations chimiques ultérieures. La pyrolyse, la distillation de composés volatils et la minéralisation, avec pertes d'éléments nutritifs, sont des processus liés à l'intensité des feux.

## Matériels et méthodes

### Parcelles expérimentales et traitements feux

Afin de préciser l'impact des paramètres listés ci-dessus, une station expérimentale permanente a été installée à La Concordia (Lliria, Valence, Espagne) pour réaliser un suivi dynamique des propriétés du sol, de l'érosion hydrique et de la régénération du couvert végétal, après passage de feux contrôlés. Seuls les résultats montrant le rôle de l'intensité du feu sur l'évolution de la MOS sont présentés dans cet article.

La station expérimentale, située sur le versant d'une colline, présentait une couverture végétale en cours de régénération depuis le passage d'un feu spontané en 1978. Le sol est un Leptosol Rendzique (FAO-UNESCO, 1988) développé sur calcaire jurassique. Ce sol de profondeur variable, mais toujours inférieure à 40 cm, présente une forte charge en pierres ( $\approx 40\%$ ), un bon drainage, une texture sablo-limoneuse et un pH alcalin (7,4). La végétation arbustive sclérophylle présente sur la station, qui correspond à l'association à *Rhamno lycioidis* - *Quercetum cocciferae*, est typique des zones méditerranéennes semi-arides. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 400 mm avec deux maxima, en automne et au printemps, et une période sèche, de juin à septembre. La température moyenne mensuelle varie de 13,3°C en janvier à 25,8°C en août.

Le dispositif expérimental comportait neuf parcelles, de 20 m de long par 4 m de large chacune ; homogènes au point de vue morphologie, pente, affleurements rocheux, sol et couverture végétale. Les parcelles, orientées parallèlement à la pente, étaient limitées par des briques. Au pied de chaque

parcelle, un collecteur de 2 m de large connecté à un réservoir 1500 l a permis de récolter les écoulements et les sédiments produits lors de chaque événement pluvieux. À l'intérieur du grand réservoir, un autre plus petit (30 l) a facilité la récolte des sédiments.

Des feux expérimentaux ont été conduits sur six de ces parcelles et la quantité de combustible a été partiellement contrôlée pour obtenir deux intensités de feu bien différentes (trois parcelles par traitement). Ainsi, des quantités variables de combustible, prélevées sur les arbustes du voisinage, ont été ajoutées pour obtenir ces deux intensités de feu. Un premier traitement consistait en un ajout de 2 kg de biomasse par m<sup>2</sup> (traitement F1). Le second a consisté en un ajout de 4 kg de biomasse par m<sup>2</sup> (traitement F2). Cette biomasse a été répartie uniformément sur les parcelles. Les trois autres parcelles ont servi de témoin.

Pour mesurer les températures à la surface de sol et la durée de leur action, des peintures thermosensibles et des thermocouples ont été employés. Six thermocouples (de type K Inconel 600-isolés) ont été installés par parcelle au niveau du sol selon des lignes parallèles, orientées dans le sens de la pente, distantes entre elles de 3 m. À partir de ces mesures, une évaluation de la durée pendant laquelle la température a dépassé 100°C a pu être faite directement. Nous avons choisi cette valeur de 100°C car elle nous a semblé représenter un seuil à partir duquel s'opèrent des changements importants liés à l'évaporation de l'eau.

Pour visualiser la distribution spatiale des températures à la surface du sol, une gamme de vingt-quatre peintures thermosensibles a été utilisée (Crayons Omega Stik), couvrant toutes les températures entre 100°C et 677°C, avec un incrément d'environ 25°C. Elles ont été appliquées sur des tiges de fer, chacune étant ensuite recouverte par une tige identique, mais non peinte, pour la protéger des cendres et des flammes, le système étant maintenu par deux fils de fer. Avant un feu expérimental, on a disposé une tige par mètre carré (soit un total de 80 tiges par parcelle) le côté peint étant en contact avec le sol. Juste après que le passage du feu, les tiges ont été relevées et lues.

Nous avons allumé les feux les 20 et 21 juin 1995. Les caractéristiques climatiques, notamment celles des différents événements pluvieux, ont été suivies grâce à des enregistrements par capteurs situés à proximité des parcelles. Après installation des thermocouples, des peintures thermosensibles et égalisation des apports de biomasse sur les parcelles, une petite quantité de gasoil a été répandue au bas des parcelles et le feu allumé.

### **Prélèvements et analyses de sols**

Avant les feux, 36 échantillons de sol représentant la couche 0-5 cm (4 par parcelle) ont été prélevés. En raison de la distribution de la végétation en taches irrégulières, deux micro-environnements ont été distingués pour ces prélèvements : sous canopée ou au centre d'ouvertures. Seules des ouvertures dont la plus petite dimension était de taille supérieure à 0,5 m ont été échantillonnées, les ouvertures situées moins de 1 m d'arbustes ont été exclues. La litière a été retirée avant prélèvement. Les points de prélèvement ont été repérés de telle sorte qu'ils puissent être re-échantillonnés après passage du feu. Deux heures après passage du feu, quatre échantillons de sol ont été prélevés par parcelle.

Pendant la première année qui a suivi le feu, 36 autres échantillons sol ont été prélevés aux mêmes points de façon saisonnière (été 1995, automne 1995, hiver 1995, printemps 1996 et été 1996). Les années suivantes, de l'été 1996 à l'hiver 2000, un prélèvement de sol a été effectué pour seulement deux saisons (été et hiver).

Les échantillons ont été séchés à l'air, tamisés pour éliminer le matériel de diamètre > 2 mm, et stockés jusqu'à l'analyse dans des boîtes hermétiques en plastique. Le contenu de matière organique a été déterminé par oxydation au bichromate de potassium (Jackson, 1958). L'azote total a été déterminé par analyseur automatique de type Micro-Kjeldahl en utilisant la méthode de Bremner (Black *et al.*, 1965). La quantité de sédiments produite par chaque événement pluvieux a été déterminée pour chaque parcelle. Les mêmes méthodes que celles décrites pour les échantillons de sol ont été appliquées pour analyser la matière organique et l'azote total des sédiments récoltés.

## Résultats et discussion

Sur les différentes parcelles, la progression du feu a été en général parfaitement uniforme. En tenant compte des températures à la surface de sol, des durées pendant lesquelles une  $T > 100^\circ\text{C}$  a été relevée, et de l'observation de la couleur des cendres sur le terrain (noires pour F1 et le blanches pour le F2), les traitements F1 et F2 peuvent bien être considérés comme représentant respectivement une intensité du feu modérée et forte. Pour le traitement correspondant à l'intensité forte, on a enregistré au sol des températures  $> 100^\circ\text{C}$  pendant 36'22" ; mais seulement pendant 17'45" pour l'intensité modérée. Les températures moyennes atteintes à la surface de sol pour les intensités de feu forte et modérée furent respectivement de  $439^\circ\text{C}$  et de  $232^\circ\text{C}$ . Le tableau 1 permet de comparer les températures moyennes au sol par parcelle telles qu'elles ont été mesurées par les deux méthodes : thermocouples et peintures thermosensibles. Il y a des différences statistiquement significatives entre les valeurs de la température pour les différents traitements. D'autre part, les valeurs obtenues par les deux méthodes ne présentant pas de différences statistiquement significatives peuvent donc être considérées comme semblables.

**Tableau 1.** Températures moyennes au sol (en  $^\circ\text{C}$ ) mesurées avec les peintures thermosensibles et les thermocouples aux mêmes points ( $n = 6$ ) sur les parcelles de La Concordia et valeurs moyennes mesurées avec les peintures thermosensibles ( $n=80$ ) pour chaque traitement

Traitement	Parcelle	Moyenne T ( $^\circ\text{C}$ ) ( $n=6$ )		Moyenne T ( $^\circ\text{C}$ ) **
		Peintures	Thermocouples	Peintures ( $n= 80$ )
F1 (biomasse $2 \text{ kg m}^{-2}$ )	2	301,0	347,3	239,9 a
	6	266,3	381,8	239,5 a
	7	209,5	- *	217,5 a
F2 (biomasse $4 \text{ kg m}^{-2}$ )	1	516,6	451,5	417,8 b
	4	546,8	629,5	448,1 b
	8	453,5	500,3	434,9 b

\* pas de données, les thermocouples de la parcelle 7 étant tombés en panne pendant le feu expérimental

\*\* les moyennes, qui ne sont pas suivies de la même lettre, présentent des différences significatives selon le test de Tukey ( $P < 0.05$ )

Les résultats montrent que les variations du taux de MOS suite à un feu sont principalement liées à son intensité (valeurs maximum des températures et durée des fortes températures). Juste après le feu, on note qu'une intensité forte du feu entraîne une diminution de la MOS, tandis qu'une intensité modérée favorise une augmentation (Fig. 1 & 2). Prenant en compte la densité apparente du sol sur les 5 premiers centimètres ( $0,725 \text{ g cm}^{-3}$ ), des calculs de stock moyen de MOS immédiatement avant et juste après le feu ont été réalisés. Les différences de stocks représentent des pertes ou des gains de MOS dus à la combustion (Fig. 1). On a ainsi estimé une diminution de  $942,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de MOS et de  $58,0 \text{ kg ha}^{-1}$

de N total de sur les parcelles soumises à un feu de forte intensité ; mais une augmentation en 8091 kg ha<sup>-1</sup> de MOS et de 76,12 kg ha<sup>-1</sup> N total sur celles soumises à un feu modéré (Fig. 1).

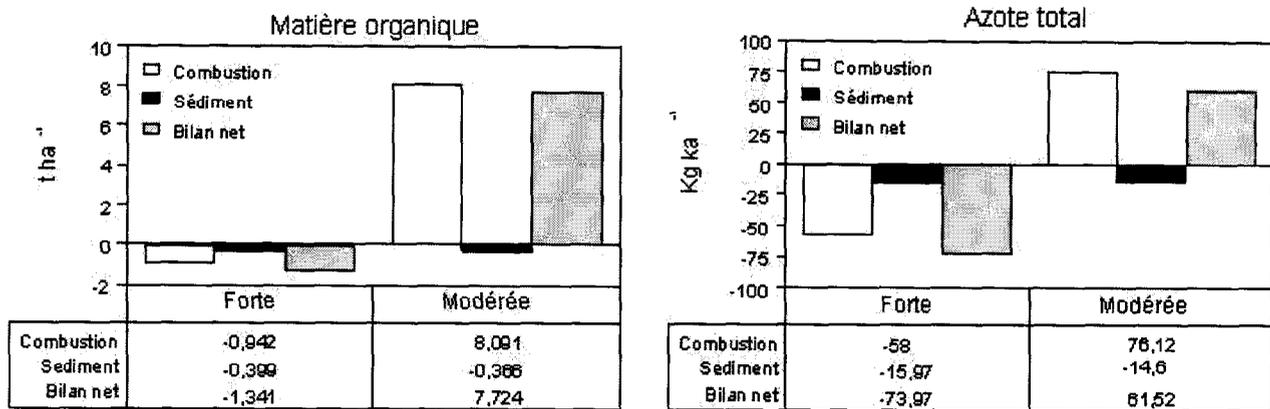


Figure 1. Gains et/ou pertes moyennes en matière organique et en d'azote total à La Concordia dus, d'une part au processus de combustion, d'autre part aux pertes dans les sédiments érodés. Bilan net pour le système-sol.

La diminution importante en matière organique et en azote après un feu violent est la conséquence des températures élevées, et de leur durée, qui favorisent la volatilisation, la combustion et la minéralisation de la MOS. Inversement, les augmentations notées sur les parcelles soumises à un feu modéré sont attribuables à la faible combustion de la matière organique en raison la brièveté des températures élevées à la surface de sol, ainsi qu'au dépôt de résidus végétaux partiellement brûlés comme cela a déjà été décrit par Andreu *et al.* (1996) ainsi que par Giovannini et Lucchesi (1997).

La figure 2 illustre l'évolution de la teneur en MOS pendant la première année qui a suivi le feu. On peut observer que du début des pluies (120 jours après le feu) à la fin de cette première année, la teneur en MOS a diminué progressivement sur les parcelles brûlées. À la fin de cette période, il subsistait des différences notables dans les teneurs entre les deux traitements ainsi qu'avec le témoin. Ceci est dû à l'érosion hydrique. Les feux les plus intenses ont eu pour conséquence un ruissellement plus important et une perte en terre plus importante sur les parcelles concernées comme cela a déjà été signalé par Gimeno-García *et al.* (2000). Dans les parcelles soumises à un feu modéré, le ruissellement moyen était de 12,1 l m<sup>-2</sup> (soit 6 fois plus que sur le témoin), et les sédiments recueillis représentèrent 0,33 kg m<sup>-2</sup> (soit 46 fois plus que sur le témoin). Sur les parcelles soumises au feu de forte intensité un ruissellement moyen de 15,4 l m<sup>-2</sup> et une perte en terre de 0,41 kg m<sup>-2</sup> ont été enregistrés. Ces valeurs représentent environ 1,2 fois celles mesurées sur les parcelles soumises à un feu modéré. Les sédiments accompagnant le ruissellement lors des événements érosifs ont été analysés pour déterminer les pertes de MOS liées à l'érosion hydrique. Les données indiquent des pertes de MOS par érosion de 399 kg ha<sup>-1</sup> pour F2 et de 366 kg ha<sup>-1</sup> pour F1, entre juin 1995 et décembre 1996 (Figure 1). Ces chiffres sont en accord avec les données publiées par plusieurs auteurs (Soto *et al.*, 1995 ; Andreu *et al.*, 1996 ; Giovannini et Lucchesi, 1997), et confirment que les processus se produisant dans le sol et que l'accroissement des taux d'érosion et des pertes en éléments nutritifs sont liés principalement à l'intensité du feu.

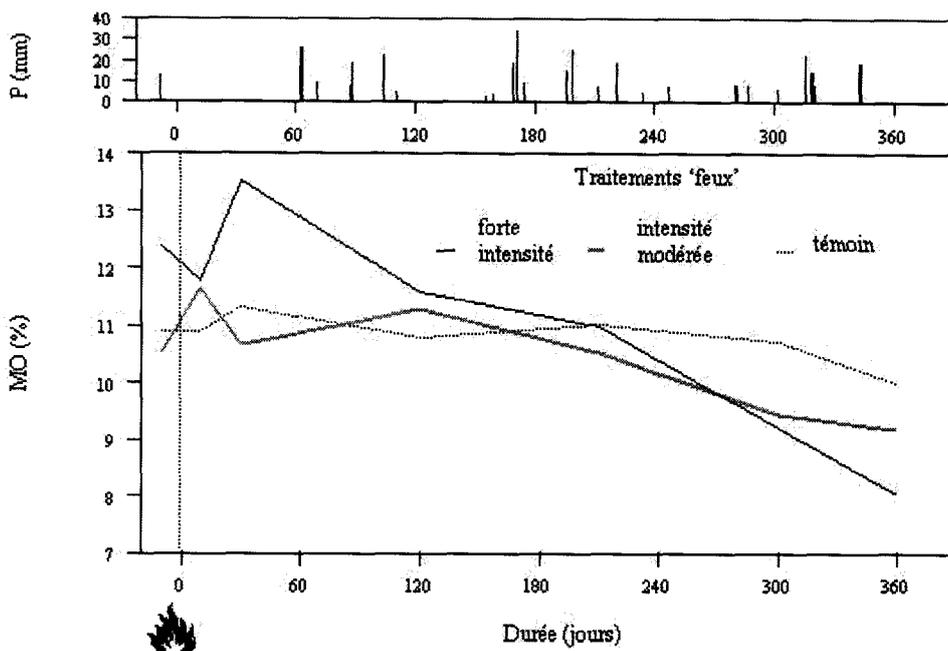


Figure 2. Évolution de la teneur en MOS pendant la première année suivant le feu et distribution des précipitations (P) pour cette période.

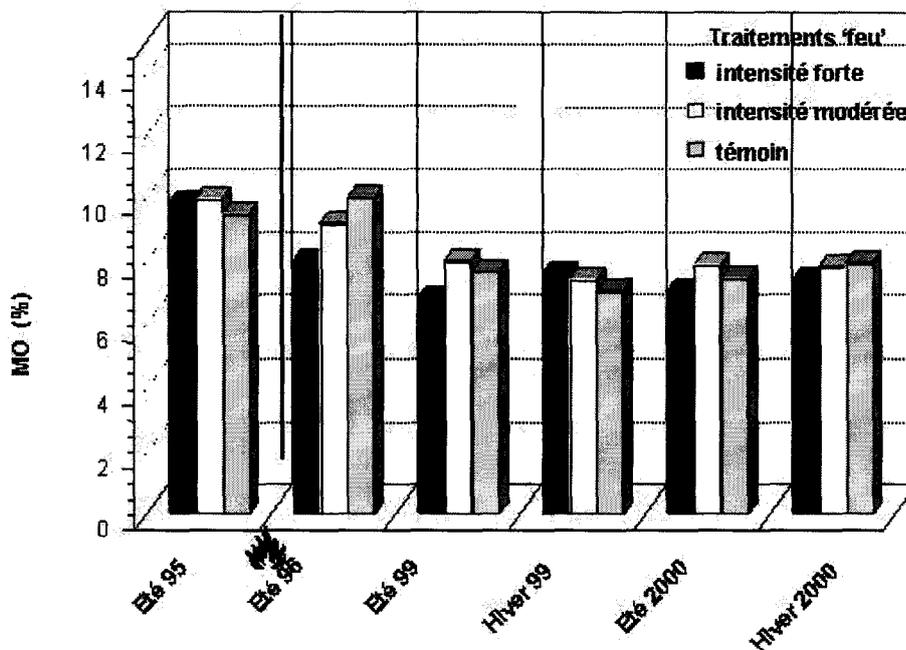


Figure 3. Evolution de la teneur moyenne en MOS pour les différents traitements 'feu' entre le premier prélèvement de sol avant feu et l'hiver 2000

De l'été 1996 à la fin de la période étudiée (hiver 2000), l'évolution au cours du temps de la teneur en MOS montre une diminution pour tous les traitements feu. Les différences observées entre traitements après la première année s'atténuent progressivement les années suivantes (Figure 3). Lors du dernier prélèvement de sol (hiver 2000) on n'a observé aucune différence significative entre les teneurs en MOS des parcelles brûlées et du témoin. Ceci pourrait indiquer la disparition des effets du feu sur la MOS, cependant, l'étude de l'érosion hydrique sur cette période indique toujours un taux d'érosion plus élevé sur les parcelles brûlées que sur le témoin.

## Conclusions

Les effets du feu sur la matière organique du sol en conditions méditerranéennes ont été suivis pendant six ans. Juste après un feu d'intensité modérée, une augmentation de MOS a été notée, augmentation due à l'incorporation, à la surface de sol des résidus de végétaux partiellement brûlés ou à l'accumulation de matériaux carbonisés. Dans le cas d'un feu de forte intensité, une perte nette en MOS par volatilisation et combustion directe a été enregistrée.

Les calculs de bilans ont fait apparaître une perte nette de 1,34 t ha<sup>-1</sup> de MOS pour les feux intenses que ce soit sous forme de combustion directe ou par érosion hydrique, tandis qu'un gain net de 7,72 t ha<sup>-1</sup> était noté sur les parcelles soumises à un feu d'intensité modérée. Les pertes et les gains en N total ont suivi la même tendance.

Des feux d'intensité forte ou modérée ont un impact important sur l'écosystème, impact particulièrement marqué pendant les premiers mois qui suivent le feu. Avec le temps, les différences entre parcelles soumises à des feux de forte ou de moyenne intensité s'estompent progressivement.

## Références

- Andreu, V., Rubio, J.L. and Cerni, R. 1996.** Postfire effects on soil properties and nutrient losses. *International Journal of Wildland Fire*, 6, 53-58.
- Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Ensminger, L.E. and Clark, F.F. 1965.** *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* American Society of Agronomy, Madison, WI.
- FAO-UNESCO. 1988.** *Soil map of the World 1:5 000 000. Revised legend.* Roma, FAO.
- Gimeno-García, E., Andreu, V. and Rubio, J.L.. 2000.** Changes in soil organic matter, nitrogen, phosphorous and cations in soil as a result of fire and water erosion in a Mediterranean landscape. *European Journal of Soil Science*, 51: 201-210.
- Giovannini, G. and Lucchesi, S. 1997.** Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities. *Soil Science*, 162: 479-486.
- Jackson, M.L. 1958.** *Soil chemical analysis.* Prentice Hall Inc., London.
- Soto, B., Basanta, R., Pérez, R. and Díaz-Fierros, F. 1995.** An experimental study of the influence of traditional slash-and-burn practices on soil erosion. *Catena*, 24: 13-23.

**RESEAU  
EROSION**



**Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION**

**Pour citer cet article / How to cite this article**

Rubio, J. L.; Gimeno-Garcia, E.; Andreu, V. - Effets des feux de forêt sur la matière organique du sol, pp. 72-79, Bulletin du RESEAU EROSION n° 23, 2004.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : [beep@ird.fr](mailto:beep@ird.fr)