

Impacts du feu et du pâturage sur les paramètres édaphiques dans une savane à *Heteropogon contortus* (région de Sakaraha)

RAKOTOARIMANANA Vonjison ¹, GROUZIS Michel ²

1. CNRE/IRD, BP. 1739 – 101 Antananarivo, Madagascar

2. IRD, BP. 434 – 101 Antananarivo, Madagascar

Résumé

*Une expérimentation factorielle sur le rôle du feu et du pâturage a été conduite dans la région de Sakaraha, sud-ouest de Madagascar. L'objectif a été d'évaluer les effets conjugués ou séparés du feu appliqué selon trois modalités (sans feu, feu précoce, feu tardif) et du pâturage (protégé, non protégé) sur l'évolution des paramètres édaphiques d'une savane à *Heteropogon contortus* et *Poupartia caffra*.*

Les résultats correspondant aux 3 années d'expérimentation montrent que la grande majorité des paramètres chimiques (C, N, Ca, Mg, CEC) ne sont pas affectés par les traitements à l'exception du P, du Na et du K dont les teneurs sont augmentées par le feu. Par contre, les valeurs des indicateurs physiques, notamment la perméabilité, sont diminuées à la fois par le feu et le pâturage. Les changements des propriétés physiques du sol sont plus importants que ceux des propriétés chimiques. La phytomasse herbacée et le recouvrement de la végétation permettent d'expliquer les effets du feu et du pâturage sur les propriétés physico-chimiques du sol.

Mots clés : Savane, Feu, Pâturage, Paramètres édaphiques

Abstract

*An experimental study of the effects of fire and grazing was carried out in the Sakaraha area (S. W. Madagascar). The objective of this work was to evaluate the combined or separate effects of fire and grazing on soil parameters of a *Heteropogon contortus*-*Poupartia caffra* dominated savanna. Three burning treatments (no burning, early burning and late burning) and two grazing treatments (grazed, ungrazed) were compared.*

A three-year study showed that the majority of the chemical parameters (C, N, Ca, Mg, CEC) were not affected by the burning and grazing treatments except for the contents of P, Na and K which were increased by fire. Whereas, fire and grazing treatments led to a significant decrease of the value of the physical parameters, mainly the permeability. The change of the physical properties are more important than the change of the chemical properties. Herbaceous phytomass and vegetation cover have allowed to explain the effects of fire and grazing on soil properties.

Key words : Savanna, Fire, Grazing, Soil parameters

1. Introduction

Les savanes occupent à Madagascar environ 70 % du territoire (Morat, 1973) et assurent l'essentiel de l'alimentation des troupeaux dans les systèmes d'élevage extensif.

Chaque année, ces savanes sont soumises traditionnellement au feu en vue de renouveler les pâturages. A Madagascar, les feux de brousse embrasent annuellement plusieurs centaines de milliers d'hectares de formations herbeuses (ONE/INSTAT, 1994) : savanes herbeuses et arborées de l'Ouest et de l'Est, savanes herbeuses des Hautes terres et du Sud. En moyenne, 435 000 hectares ont été brûlés annuellement durant la période 1991–1995 (ONE, 1997).

Si l'influence du feu et du pâturage sur la dynamique de la végétation a été largement étudiée dans les savanes d'Australie tropicale (Lacey *et al.*, 1982), du Brésil (Coutinho, 1982), d'Afrique du Sud (Trollope, 1982 ; Frost & Robertson, 1987), du Zimbabwe (Kennan, 1971), de Madagascar (Granier, 1967), du Burkina Faso (Fournier *et al.*, 1999), de Côte-d'Ivoire (Monnier, 1968 ; Koffi, 1982 ; Menaut, 1993 ; Dauget & Menaut, 1992), l'étude de leur rôle sur les propriétés physico-chimiques du sol des savanes restent insuffisante (Christensen, 1973 ; Raison, 1979 ; Masse *et al.*, 1997).

C'est pourquoi nous avons mis en place une étude expérimentale sur l'influence du feu et du pâturage sur l'évolution d'un certain nombre des paramètres édaphiques (perméabilité, compacité, indices de fertilité) d'une savane à *Heteropogon contortus* (L.) P.Beauv. ex Roem. & Shult¹ dans la région de Sakaraha (sud-ouest de Madagascar), plus précisément une variante sèche de cette savane décrite par Morat (1973). Cette savane couvre une surface équivalente aux 2/3 de la région sud-ouest de Madagascar. C'est un ensemble physionomiquement varié qui possède en commun certaines analogies floristiques dont la principale est une strate graminéenne à base de *Heteropogon contortus*. La strate ligneuse est principalement constituée de *Poupartia caffra* H. Perrier, *Gymnosporia linearis* (L.f.) Loes, *Stereospermum euphorioides* DC.

2. Méthodes

2.1. Site d'étude

Le site d'étude se trouve dans la partie méridionale de la plaine sédimentaire du sud-ouest de Madagascar, au sud du village de Beba Manamboay (S 22°49'30'' et E 44°35'35'') et à une dizaine de kilomètres au nord de Sakaraha, dans la province de Toliary.

Les précipitations annuelles moyennes à Sakaraha, station météorologique la plus proche de notre site d'étude, s'élèvent à 854 mm et se répartissent sur 64 jours de pluies pour la période 1935-1999 (ORSTOM/DMH/CNRE, 1995 et Météorologie Nationale). Le cycle pluviométrique est caractérisé par une saison pluvieuse (novembre à mars) qui reçoit près de 90 % des précipitations et une longue saison sèche (avril-octobre) pendant laquelle les précipitations mensuelles sont inférieures à 50 mm. Le déficit hydrique climatique cumulé annuel atteint 476 mm (Cornet, 1974).

¹ Détermination cf. Flore complète de Madagascar et Bosser (1969)

Dans le tableau I sont rassemblées les variations mensuelles des précipitations des quatre années d'expérimentation et de la moyenne inter annuelle de la série 1935-1999.

Il apparaît tout d'abord que les précipitations des 4 années d'expérimentation sont largement excédentaires par rapport à la moyenne de la série 1935-1999 (en moyenne plus de 60 %). Le mois le plus pluvieux est le mois de janvier sauf en 1998 où c'est le mois de février.

L'année à saison pluvieuse la plus précoce est l'année 1998. Dès le mois de septembre, les précipitations sont supérieures à 50 mm mais elles restent moyennes à faibles jusqu'au mois de janvier. Les précipitations de décembre sont de 2 à 4 fois moins élevées que celles obtenues pour le même mois les autres années.

Tableau I : Variations mensuelles des précipitations
(P : Précipitations ; nj : nombre de jours)
des quatre années d'expérimentation et de la moyenne inter annuelle sur la série 1935-1999.

Mois	1997		1998		1999		2000		Moyenne (1935-1999)	nj
	P (mm)	nj	P (mm)	nj	P (mm)	nj	P (mm)	nj		
Juillet	0	0	0	0	0	0	0	0	4,9	1
Août	0	0	0	0	0	0	5,3	1	7,7	1
Septembre	0	0	82	5	0	0	0	0	9,4	1
Octobre	12,5	2	93	4	18,5	3	17,5	2	32,9	3
Novembre	25	3	122	7	201,1	7	197,3	7	79,1	6
Décembre	238	9	110	8	381,2	15	161	9	167,7	11
Janvier	427	21	334,3	20	727,6	19	762,8	21	219,4	13
Février	205	8	585,8	22	238,3	9	307,2	14	164,8	11
Mars	14,5	4	65,7	4	170,2	6	69,3	8	115,9	9
Avril	90,5	8	87,1	4	10,2	2	7,7	1	27,1	3
Mai	0	0	0	0	0	0	3,2	2	16,2	3
Juin	0	0	2,5	1	1,5	1	0	0	8,9	2
Total	1012,5	55	1482,4	75	1748,6	62	1531,3	65	854,2	64

L'année qui présente la saison pluvieuse la plus tardive est l'année 1999 puisque la station reçoit encore 170 mm au mois de mars contre moins de 14 à 70 mm pour les autres années. C'est la saison pour laquelle la répartition est la plus semblable à l'année moyenne (répartition normale) avec cependant des précipitations mensuelles supérieures.

Les précipitations de l'année 2000 sont les mêmes que celles de 1999 avec cependant un déficit en décembre.

L'année 1999 est donc la meilleure année du point de vue pluviométrique (répartition et la quantité des pluies).

La température moyenne du mois le plus froid (juillet) est de 18°C et celle du mois le plus chaud (janvier) est de 26,5°C, tandis que la moyenne annuelle des températures moyennes est de 23°C (Oldeman, 1991).

L'ensemble de ces données caractérise un climat de type sub-aride (Cornet, 1974 ; Fofifa, 1997).

La région appartient au paysage des « dômes sableux » dans le domaine de l'Isalo (Sourdat, 1977). Ces dômes sont des épandages de sables roux plus ou moins évolués et tronqués (Morat, 1973). Les sols sont du type ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés (Leprun, 2000). Ils sont généralement à texture sablo-argileuse à limoneuse et à structure massive à débit polyédrique anguleux. Ils présentent un enracinement faible mais avec une forte activité biologique par la présence de nombreuses termites.

2.2. Dispositif

Le dispositif expérimental (figure 1) a été mis en place en juillet 1997. Il consiste en une expérience factorielle organisée en blocs aléatoires complets avec parcelles divisées. Les facteurs étudiés et leurs modalités sont :

le feu à trois modalités : sans feu, feu précoce effectué en début de saison sèche (juillet) et feu tardif provoqué en fin de saison sèche (octobre) ;

le pâturage à deux modalités : pâturé et non pâturé.

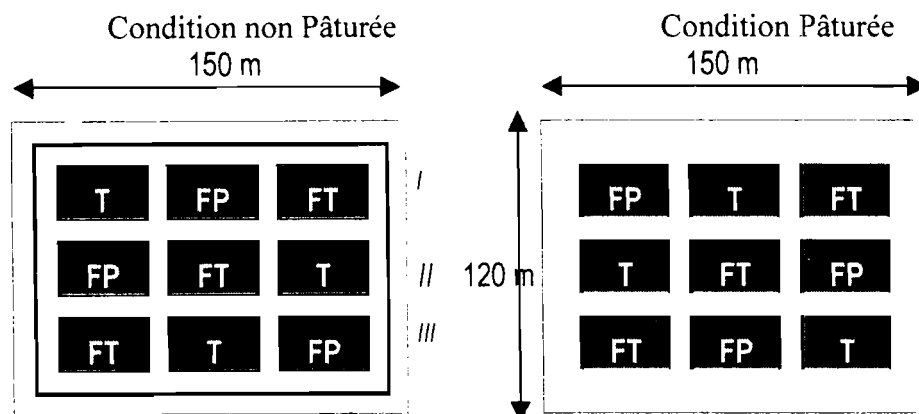


Figure 1 : Dispositif expérimental

T : Témoin sans feu ; FP : Feu précoce ; FT : Feu tardif ; I, II, III : blocs ;

- : Barbelés de protection ;
- : Parcelles élémentaires de dimension 30 m x 40 m ;
- : Pare-feux (10 m de large autour du dispositif, 5 m de large entre les parcelles élémentaires, entretenu chaque année)

La zone d'expérimentation a été divisée en deux essais suivant les niveaux du facteur pâturage. Dans chaque essai, trois blocs sont installés et dans chaque bloc trois parcelles élémentaires de 30 m x 40 m chacune, auxquelles ont été affectés de façon aléatoire (randomisation complète) les trois niveaux du

facteur feu. L'essai non pâturé est clôturé pour une protection intégrale contre l'influence des animaux. L'essai pâturé ne fait l'objet d'aucune restriction particulière.

Les observations ont été menées pendant trois années consécutives, au mois de juillet pour le feu précoce et au mois d'octobre pour le feu tardif.

2.3. Paramètres

2.3.1. Les propriétés physiques du sol

Perméabilité du sol

La mesure a été faite, avant la mise à feu, à l'aide d'un cylindre de 25 cm de long et de 10 cm de diamètre enfoncé à 5 cm dans le sol. Sur chaque parcelle, 10 mesures disposées en deux groupes, parallèles à la largeur de la parcelle et à 5 m de la bordure ont été réalisées. Le temps nécessaire à l'infiltration d'un litre d'eau a été mesuré. Les résultats sont exprimés par la vitesse d'infiltration (mm/s). Plus cette vitesse est grande, plus le sol est perméable.

Compacité du sol

La mesure a été faite, avant la mise à feu, à l'aide d'un pénétromètre (*Proctor Penetrometer ASTM D1558, Spring Type*) en appliquant une force équivalente à $8,4 \text{ kgf.cm}^{-2}$. La profondeur de pénétration est ensuite mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. Sur chaque parcelle élémentaire, 20 mesures disposées en deux groupes parallèles à la longueur de la parcelle ont été effectuées. Ces points se trouvent à 5 m de la bordure et sont espacés de 2 m. Plus la profondeur de pénétration est faible, plus le sol est compact.

2.3.2. Les propriétés chimiques du sol

Les analyses doivent permettre d'étudier l'évolution de la teneur en matières organiques (C, N) et minérales (Ca, Mg, K, Na, P) des sols sous l'effet du feu et du pâturage.

Un échantillon composite constitué de cinq prélèvements (4 coins + 1 central) de l'horizon de surface (0 – 10 cm), soit 3 répétitions par traitement feu, a été effectué dans chaque parcelle élémentaire après chaque mise à feu. La détermination des différents constituants dans l'échantillon composite a été réalisée selon les méthodes d'analyses utilisées par le laboratoire de Radioisotopes d'Antananarivo :

Les matières organiques sont dosées selon la méthode décrite par Walkley et Black (1934) :

* le carbone est oxydé par du bicarbonate de potassium en milieu sulfurique à froid,

* l'azote est dosé selon la méthode de Kjeldahl : minéralisation, distillation, fixation par H_2SO_4 concentré, dosage avec NaOH.

Les bases échangeables (Ca, Mg, Na, K) sont dosées selon la méthode de chlorure de cobaltihexamine.

Le phosphore assimilable est dosé par colorimétrie selon la méthode Olsen.

2.4. Traitements des données

Des analyses de variance ont été réalisées à l'aide du logiciel STAT-ITCF pour tester les effets du feu et du pâturage sur les paramètres édaphiques. Dans le cas où l'effet est globalement significatif, l'interprétation s'achève par l'application du test de Newman-Keuls.

3. Résultats

3.1. Les paramètres physiques

3.1.1. Variations annuelles

Perméabilité

Les variations de la perméabilité de l'horizon de surface en fonction du feu et du pâturage, sont données dans le tableau II.

Tableau II : Influence du feu et du pâturage sur la perméabilité de l'horizon de surface du sol, mesurée à l'infiltromètre ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$).

Les moyennes suivies d'une ou des même(s) lettre(s) constituent un groupe statistiquement homogène selon le test de Newman-Keuls. Les lettres en minuscule comparent le facteur feu tandis que celles en majuscule comparent le facteur pâturage. Les indications suivantes concernent la signification statistique des résultats : NS : non significatif ; S : significatif ($p \leq 0,05$) ; HS : hautement significatif ($p \leq 0,01$).

Facteurs étudiés	1997		1998		1999		2000	
	Protégé	Non protégé	Protégé	Non protégé	Protégé	Non protégé	Protégé	Non protégé
Témoin	0.20 (aA)	0.19 (aA)	0.19 (aA)	0.13 (aB)	0.24 (aA)	0.15 (aB)	0.24 (aA)	0.15 (aB)
Feu précoce			0.14 (aA)	0.12 (aB)	0.14 (bA)	0.09 (bB)	0.14 (bA)	0.11 (bB)
Feu tardif	0.15 (bA)	0.13 (bA)	0.17 (aA)	0.10 (aB)	0.17 (bA)	0.08 (bB)	0.16(bA)	0.10 (bB)
Probabilité :								
Théorique	0.05		0.05		0.05		0.05	
Feu	0.00 HS		0.26 NS		0.00 HS		0.02 S	
Pâturage	0.59 NS		0.00 HS		0.00 HS		0.01 S	
Interaction	0.98 NS		0.39 NS		0.65 NS		0.16 NS	

Au cours de la première année (1997), le feu tardif diminue significativement ($p=0.00$) la perméabilité quelles que soient les conditions de pâturage. Le pâturage n'a aucun effet.

Après la deuxième année (1998), l'effet feu n'est pas significatif. Par contre, l'effet pâturage est hautement significatif : la perméabilité étant plus élevée en conditions protégées qu'en conditions non protégées quel que soit le type de feu.

A la troisième année d'observation (1999), l'effet feu devient hautement significatif quelles soient les conditions de pâturage. En conditions protégées, la perméabilité la plus élevée est enregistrée dans la parcelle témoin et la plus faible après un feu précoce. En conditions non protégées, la perméabilité de surface est comparable dans le cas des feu précoce et feu tardif.

L'effet pâturage est hautement significatif quel que soit le type de feu et l'année considérée à l'exception de l'année 1997. La perméabilité est plus élevée en conditions protégées qu'en conditions non protégées.

Les résultats de la quatrième année confirment ceux de la troisième année d'expérimentation.

Compacité

Les résultats relatifs à la compacité du sol sont consignés dans le tableau III.

Tableau III : Influence du feu et du pâturage sur la compacité de l'horizon de surface du sol, mesurée au pénétromètre (mm).

Facteurs étudiés	1997		1998		1999		2000	
	Protégé	Non protégé	Protégé	Non protégé	Protégé	Non protégé	Protégé	Non protégé
Témoin	33.27 (aA)	32.78 (aB)	25.57 (aA)	26.98 (aA)	23.29 (aA)	25.05 (aA)	28.98 (aA)	25.09 (aB)
Feu précoce			27.21 (aA)	26.59 (aA)	28.93 (aA)	25.30 (aA)	36.16 (aA)	21.40 (aB)
Feu tardif	28.67 (bA)	26.23 (bB)	21.41 (bA)	21.24 (bA)	22.34 (bA)	19.22 (bA)	34.04 (aA)	27.44 (aB)
Probabilité :								
Théorique	0.05		0.05		0.05		0.05	
Feu	0.00 HS		0.00 HS		0.00 HS		0.64 NS	
Pâturage	0.00 HS		0.86 HS		0.19 NS		0.01 S	
Interaction	0.03 S		0.79 NS		0.17 NS		0.36 NS	

Dès la première année d'expérimentation (1997), le feu tardif et le pâturage augmentent significativement ($p=0.00$) la compacité du sol.

Au cours de la deuxième année d'expérimentation (1998), la compacité du sol est significativement plus élevée ($p < 0.01$) dans les parcelles soumises au feu tardif par rapport aux traitements feu précoce et témoin. Le sol de surface y est environ 1,25 fois plus compact. Le pâturage n'a pas eu d'effet sur la compacité du sol au cours de cette année.

Les résultats obtenus au cours de la troisième année (1999) sont tout à faits comparables à ceux obtenus au cours de la deuxième année.

Par contre, après la quatrième année d'expérimentation, la compacité du sol est déterminée par le seul effet pâturage ($p \leq 0.01$). La compacité du sol est environ 1,34 fois plus élevée sous pâturage.

3.1.2. Les variations des moyennes inter annuelles

Le tableau IV présente les variations de la moyenne interannuelle de la compacité et de la perméabilité du sol de surface en fonction des différents traitements.

Tableau IV : Variations de la moyenne interannuelle de la compacité et de la perméabilité du sol de surface en fonction des différents traitements.

	Sans feu		Feu précoce		Feu tardif	
	Protégé	Non Protégé	Protégé	Non protégé	Protégé	Non protégé
Perméabilité	0.21	0.15	0.14	0.10	0.16	0.10
Compacité	27.77	27.47	30.76	24.43	26.61	25.18

Sur la base des moyennes interannuelles, le feu a tendance à diminuer la perméabilité quelles que soient les conditions de pâturage. Par ailleurs, la perméabilité est plus forte en conditions protégées qu'en conditions non protégées.

A l'exception du feu précoce en conditions protégées, le feu a tendance à augmenter la compacité du sol. La compacité du sol a cependant tendance à être plus élevée en conditions non protégées qu'en conditions protégées.

3.2. Paramètres chimiques

3.2.1. Les variations annuelles

Matière organique, carbone, azote, C/N

La matière organique et le carbone total étant deux paramètres interdépendants, seuls les résultats des analyses de variance relatifs à la matière organique, à l'azote, et au C/N en fonction des traitements feu et pâturage sont présentés dans le tableau V.

Tableau V : Influence du feu et du pâturage sur les teneurs en matière organique (MO), en azote et sur le rapport C/N de l'horizon de surface

Les moyennes repérées par une même lettre constituent un groupe statistiquement homogène, au seuil de probabilité 0.05, selon le test de Newman-Keuls. Les indications suivantes concernent la signification

statistique des résultats : NS : non significatif ; S : significatif ($p \leq 0,05$) ; HS : hautement significatif ($p \leq 0,01$).

	MO (t.ha ⁻¹)			N (t.ha ⁻¹)			C/N		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999	1997	1998	1999
Protégé									
Témoin	24.4 (a)	25.2 (a)	17.6 (a)	0.95 (a)	0.83 (a)	0.54 (a)	15 (a)	18 (a)	19 (a)
Feu précoce		23.4 (a)	20.8 (a)		0.73 (a)	0.58 (a)		19 (a)	20 (a)
Feu tardif	22.9(a)	18 (b)	19.9 (a)	1.11 (a)	0.83 (a)	0.66 (a)	12 (a)	12 (b)	17 (a)
Non protégé									
Témoin	21.6 (a)	17.4 (b)	17.6 (a)	0.79 (a)	0.81 (a)	0.63 (a)	14 (b)	12 (b)	16 (a)
Feu précoce		24.6 (a)	19.4 (a)		0.81 (a)	0.68 (a)		18 (a)	17 (a)
Feu tardif	26.4 (a)	25 (a)	22.4 (a)	0.96 (a)	0.88 (a)	0.74 (a)	16 (b)	17 (a)	18 (a)
Probabilité									
Théorique	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05(S)	0.05
Feu	0.31 (NS)	0.11 (NS)	0.06 (NS)	0.07 (NS)	0.27 (NS)	0.20 (NS)	0.13 (NS)	0.53 (NS)	0.75 (NS)
Pâturage	0.82 (NS)	0.90 (NS)	0.77 (NS)	0.10 (NS)	0.43 (NS)	0.11 (NS)	0.03 (S)	0.00 (HS)	0.10 (NS)
Interaction	0.07 (NS)	0.00 (HS)	0.42 (NS)	0.97 (NS)	0.63 (NS)	0.99 (NS)	0.13 (NS)		0.35 (NS)

Le feu ne présente pas d'effet significatif sur la matière organique au cours de la première année d'expérimentation (1997).. En conditions protégées, le feu, notamment le feu tardif, entraîne la diminution de 28 % des teneurs en matière organique. En conditions non protégées, la teneur en matière organique augmentent de 30 % sous l'effet du feu. Au cours de la troisième année d'observation, les différences observées ne sont pas significatives au seuil de probabilité 5 %.

Le pâturage n'a pas d'effet significatif sur la matière organique au cours de la première année d'expérimentation (1997). Au cours de la deuxième année (1998), le pâturage entraîne une régression de 31 % de la teneur en matière organique des parcelles témoins et augmentation de cette teneur de 28 % dans les parcelles soumises au feu tardif. Les différences observées ne sont pas significatives au cours de la troisième année (1999).

Des différences hautement significatives attribuables à l'interaction des facteurs feu et pâturage sur la teneur en matière organique sont détectées dès la deuxième année de mesure (1998).

Le feu et le pâturage ne présentent aucun effet sur la teneur en azote du sol de surface.

L'effet du feu et du pâturage sur le rapport C/N reflète exactement les résultats obtenus sur la matière organique, en raison d'un écart de liaison C - MO et des résultats concernant l'azote.

Les bases échangeables (Ca, Mg, Na, K)

Dans le tableau VI sont présentés les résultats concernant l'évolution du Ca ++ et du Mg++ de l'horizon de surface des savanes à *Heteropogon contortus* en fonction des traitements.

Tableau VI : Influence du feu et du pâturage sur les teneurs en calcium (Ca++) et en magnésium (Mg++) de l'horizon de surface.

Signification des lettres identique au tableau V.

	Ca ⁺⁺ (t.ha ⁻¹)			Mg ⁺⁺ (t.ha ⁻¹)		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999
Protégé						
Témoin	0.79 (a)	0.70 (a)	0.62 (a)	0.14 (a)	0.12 (a)	0.11 (a)
Feu précoce		0.85 (a)	0.92 (a)		0.14 (a)	0.15 (a)
Feu tardif	0.89 (a)	0.81 (a)	0.94 (a)	0.14 (a)	0.14 (a)	0.13 (a)
Non protégé						
Témoin	0.86 (a)	0.73 (a)	0.68 (a)	0.15 (a)	0.13 (a)	0.11 (a)
Feu précoce		0.78 (a)	0.69 (a)		0.13 (a)	0.11 (a)
Feu tardif	0.92 (a)	0.80 (a)	0.90 (a)	0.15 (a)	0.15 (a)	0.15 (a)
Probabilité						
Théorique	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Feu	0.21 (NS)	0.12 (NS)	0.06 (NS)	0.97 (NS)	0.12 (NS)	0.13 (NS)
Pâturage	0.37 (NS)	0.71 (NS)	0.40 (NS)	0.45 (NS)	0.64 (NS)	0.70 (NS)
Interaction	0.73 (NS)	0.64 (NS)	0.35 (NS)	0.97 (NS)	0.47 (NS)	0.21 (NS)

Le feu et le pâturage n'ont pas d'effet significatif sur les teneurs en Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ de l'horizon de surface du sol au seuil de probabilité 5 %.

Dans le tableau VII sont rapportés les résultats concernant l'évolution du K⁺ et du Na⁺ de l'horizon de surface de sol des savanes à *Heteropogon contortus* en fonction des traitements.

Tableau VII : Influence du feu et du pâturage sur les teneurs en potassium (K⁺) et sodium (Na⁺) de l'horizon de surface.

Signification des lettres identique au tableau V.

	K ⁺ (t.ha ⁻¹)			Na ⁺ (t.ha ⁻¹)		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999
Protégé						
Témoin	0.09 (a)	0.06 (b)	0.05 (b)	0.11 (a)	0.10 (a)	0.04 (b)
Feu précoce		0.08 (ab)	0.13 (a)		0.10 (a)	0.12 (a)
Feu tardif	0.08 (a)	0.10 (a)	0.08 (ab)	0.10 (a)	0.10 (a)	0.08 (b)
Non protégé						
Témoin	0.08 (a)	0.06 (b)	0.09 (ab)	0.11 (a)	0.09 (a)	0.04 (b)
Feu précoce		0.08 (ab)	0.05 (b)		0.10 (a)	0.14 (a)
Feu tardif	0.09 (a)	0.09 (a)	0.09 (ab)	0.11 (a)	0.10 (a)	0.07 (b)
Probabilité						
Théorique	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Feu	0.56 (NS)	0.01 (S)	0.51 (NS)	0.39 (NS)	0.51 (NS)	0.00 (HS)
Pâturage	0.76 (NS)	0.67 (NS)	0.50 (NS)	0.82 (NS)	0.31 (NS)	0.60 (NS)
Interaction	0.25 (NS)	0.70 (NS)	0.00 (HS)	0.52 (NS)	0.98 (NS)	0.81 (NS)

Le feu n'a pas d'effet significatif sur la teneur en K⁺ à l'exception de la deuxième année (1998) où il augmente cette teneur quelles que soient les conditions de pâturage.

Le pâturage n'a pas d'effet sur la teneur en K⁺ quelle que soit l'année considérée.

L'interaction feu - pâturage a un effet hautement significatif sur la teneur en K⁺ seulement au cours de la troisième année de mesure (1999).

L'effet du feu sur la teneur en Na⁺ de l'horizon de surface du sol ne se manifeste qu'en 1999. La teneur en Na⁺ est 2 à 3,5 fois plus élevée suivant le type de feu appliqué aussi bien en conditions protégées qu'en conditions non protégées.

Le pâturage n'a pas d'effet sur la teneur en Na⁺ de l'horizon de surface du sol.

Phosphore assimilable

Le tableau VIII rassemble les résultats relatifs à la teneur en phosphore du sol.

Les différences entre traitements ne deviennent significatives ($p \leq 0,01$) qu'après la troisième année d'expérimentation. La teneur en phosphore assimilable de l'horizon de surface est plus élevée dans les parcelles soumises au feu. L'augmentation de cette teneur est 2 fois plus importante en conditions protégées.

Le pâturage n'a pas d'effet sur la teneur en phosphore assimilable de l'horizon de surface du sol.

Tableau VIII : Influence du feu et du pâturage sur la teneur en phosphore (P) de l'horizon de surface.

Signification des lettres identique au tableau V.

	P (t.ha ⁻¹)		
	1997	1998	1999
Protégé			
Témoin	0.007 (a)	0.008 (a)	0.006 (b)
Feu précoce		0.009 (a)	0.012 (a)
Feu tardif	0.010 (a)	0.011 (a)	0.011 (a)
Non protégé			
Témoin	0.007 (a)	0.008 (a)	0.007 (b)
Feu précoce		0.008 (a)	0.008 (a)
Feu tardif	0.008 (a)	0.011 (a)	0.009 (a)
Probabilité			
Théorique	0.05	0.05 (NS)	0.05
Feu	0.18 (NS)	0.11 (NS)	0.00 (HS)
Pâturage	0.44 (NS)	0.67 (NS)	0.21 (NS)
Interaction	0.69 (NS)	0.77 (NS)	0.14 (NS)

3.2.2. Les variations des moyennes interannuelles

Nous ne présentons ici (Tableau IX) que la synthèse des résultats des constituants présentant des différences significatives imputables à l'effet du feu et du pâturage pendant les trois années d'observation. Ce sont la matière organique, le phosphore, le K⁺, le Na⁺.

3.2.2. Les variations des moyennes interannuelles

Nous ne présentons ici (Tableau IX) que la synthèse des résultats des constituants présentant des différences significatives imputables à l'effet du feu et du pâturage pendant les trois années d'observation. Ce sont la matière organique, le phosphore, le K⁺, le Na⁺.

Tableau IX : Variations de la moyenne interannuelle des teneurs en matière organique (MO), potassium (K⁺), sodium (Na⁺) et phosphore assimilable (P ass) dans l'horizon de surface en fonction des différents traitements.

	Sans feu		Feu précoce		Feu tardif	
	Protégé	Non Protégé	Protégé	Non protégé	Protégé	Non protégé
MO (t.ha ⁻¹)	22.4	18.9	22.1	22	20.27	24.6
K ⁺ (t.ha ⁻¹)	0.066	0.077	0.105	0.065	0.087	0.09
Na ⁺ (t.ha ⁻¹)	0.083	0.08	0.11	0.12	0.093	0.093
P ass (t.ha ⁻¹)	0,007	0.007	0.01	0.008	0.011	0.009

En conditions protégées, le feu, notamment le feu tardif, a tendance à diminuer la teneur en matière organique. Par contre, en conditions non protégées, la teneur en matière organique augmente sous l'effet du feu et notamment du feu tardif. Globalement, les feux augmentent les teneurs en K⁺, en Na⁺ et en P du sol de surface quelles que soient les conditions de pâturage.

Le pâturage a tendance à diminuer la teneur en matière organique des parcelles témoins mais à augmenter celle des parcelles de feu tardif. Il augmente la teneur en K⁺ des parcelles témoins. Par contre, il la diminue dans le cas du feu précoce. Il n'a presque pas d'effet sur cette teneur dans le cas de feu tardif. Le pâturage n'a pas d'effet sur la teneur en Na⁺ et cela quels que soient les traitements feux. Dans les parcelles soumises au feu, la teneur en phosphore assimilable est moins élevée en conditions non protégées.

4. Discussion

4.1. L'effet du feu

Le feu diminue la perméabilité de surface, confirmant ainsi les résultats obtenus en zone soudanienne par Dembélé (1996) sur le sol limoneux, Masse *et al.* (1997) et Mando *et al.* (2001). Le feu diminue le recouvrement de la litière sur pied. Les parcelles brûlées n'ont plus aucun couvert protecteur contre les pluies et le ruissellement. Ce phénomène favorise la formation de croûte de battance recouverte d'une pellicule noirâtre (algues bleues ou Cyanophycées) et une dégradation de la porosité rendant le sol imperméable à ce niveau (Masse *et al.*, 1997 ; Mando *et al.*, 2001).

En général, le feu a tendance à augmenter la compacité du sol. Ces résultats corroborent à ceux trouvés par Dembélé (1996) dans les jachères en zone soudanienne nord. Après 3 à 4 ans seulement de jachères, il a détecté un effet significatif du feu sur la compacité du sol ; elle est plus élevée dans les parcelles soumises au feu tardif que dans celles soumises aux deux autres traitements (sans feu et feu précoce). Dembélé (1996), Rakotoarimanana *et al.* (2001), Rakotoarimanana (2002) interprètent de telles différences en se basant sur le recouvrement de la végétation. Un faible recouvrement de végétation induit par le feu correspond à une faible quantité d'organismes vivants dans le sol (racines, bactéries, termites, vers), ce qui entraîne une porosité faible et accroissant la compacité.

L'effet du feu sur la teneur en matière organique du sol de surface dépend des conditions de pâturage. En conditions protégées, le feu a tendance à diminuer cette teneur. Cette diminution est en relation avec la diminution de la phytomasse herbacée dans les parcelles soumises au feu tardif en conditions protégées. Par contre, en conditions non protégées, la teneur en matière organique du sol de surface augmente. Cette augmentation est probablement due, pour une part, aux déjections des animaux, et pour une autre part à l'accroissement de la production de la phytomasse herbacée dans les parcelles soumises aux feux et surtout au feu tardif en conditions non protégées (Rakotoarimanana *et al.*, 2001, Rakotoarimanana, 2002).

Notre résultat s'oppose aux observations de Masse *et al.* (1997) qui, dans les jachères en zone soudanienne du Mali, constatent qu'en conditions non protégées, la teneur en carbone et donc celle de la matière organique dans la fraction granulométrique grossière sont significativement plus élevées dans les parcelles non soumises au feu que celles soumises au feu tardif. Selon ces auteurs, la dynamique du carbone dans les sols tropicaux à texture grossière est liée à la fraction débris végétaux (20 à 2000 μm). Avant les premières pluies, les parcelles sans feu présentent un couvert végétal important constitué des résidus de la saison de croissance précédente qui vont enrichir la fraction débris végétaux en carbone. Par contre, le feu tardif limite l'accumulation de phytomasse herbacée.

Le feu augmente les teneurs en phosphore, K^+ , Na^+ quelles que soient les conditions pâturages. Des résultats comparables ont été trouvés par Van de Vijver *et al.* (1999) dans la savane de l'est Africain (Nord Tanzanie).

Ces résultats seraient imputables :

- à l'augmentation des teneurs cendres qui ont tendance à alcaliniser le sol (Christensen, 1973, 1977; Boerner, 1982 ; Frost & Robertson, 1987)
- à l'augmentation du taux de minéralisation (Dhillon & Anderson, 1993 ; Hobbs & Schimel, 1984 ; Hulbert, 1988 ; Singh, 1993, Sharrow & Write, 1977) par augmentation des températures (Knapp & Scastedt, 1986 ; Raison, 1979 ; Savage, 1980) ou par réduction du rapport C/N (Frost & Robertson, 1987).
- au rajeunissement et changement lié à la composition des tissus de plantes (Frost & Robertson, 1987 ; Gill, 1974 ; Kauffman *et al.*, 1994).

D'autre auteur (Raison, 1979) n'a pas trouvé d'évolution sur les caractéristiques analytiques du sol sur 0 à 10 cm sous l'effet du feu.

A court terme, le feu peut avoir des impacts positifs sur la concentration des substances nutritives dans le sol. La combustion de la végétation et des litières provoque la libération des éléments minéraux échangeables dans les cendres. L'incorporation des cendres dans le sol enrichit celui-ci immédiatement après le passage du feu. Cependant, ces éléments ne restent pas toujours accumulés dans cette couche superficielle après le passage du feu. Quand les premières pluies arrivent, des quantités élevées de ces éléments sont emportées avec le ruissellement et constituent des pertes. Il existe aussi le phénomène de lessivage qui entraîne une bonne partie de ces éléments vers la profondeur. Ces phénomènes sont aggravés par l'absence ou l'insuffisance du couvert végétal après le passage du feu. C'est ainsi qu'à long terme avec une fréquence élevée du feu, certains auteurs (Trabaud, 1994 ; Pivello & Coutinho, 1992, Coutinho, 1982 ; Lacey *et al.*, 1982) rapportent que le feu peut entraîner une perte significative des substances nutritives par volatilisation et érosion des cendres. La perte varie suivant l'élément considéré : par exemple, 12 % pour Mg et 93 % pour l'azote (Van de Vijver *et al.*, 1999). Ce phénomène est accentué par un déclin de production de la végétation (Kauffman *et al.*, 1993 ; Joergensen *et al.*, 1990 ; Vasconcellos, 1998).

On peut aussi se référer à la période de prélèvement pour expliquer ces différences de résultats. Dans notre cas, comme celui de Trabaud (1983) et Granier (1967), le prélèvement de sol est effectué juste après la mise à feu (30 jours au maximum) c'est-à-dire au moment où les cendres sont encore dans la partie superficielle du sol. Dans ce cas, on peut observer une teneur élevée en substances nutritives. Pour les autres auteurs, les prélèvements ont lieu jusqu'à 3 mois après la mise à feu ; la majeure partie des substances nutritives est déjà absorbée par les systèmes racinaires superficiels des herbacés (Trabaud, 1990 ; Ravaoarivivo, 1998) ou érodée ou lessivée ; les teneurs en substances nutritives peuvent donc paraître plus faibles.

4.2. L'effet du pâturage

Le pâturage diminue la perméabilité de surface du sol. Ce résultat corrobore celui de Masse *et al.* (1997), Mando *et al.*, (2001). Cette observation est à mettre en relation avec la phytomasse herbacée qui est significativement supérieure dans les parcelles en conditions protégées par rapport à celle des parcelles non protégées (Rakotoarimanana *et al.*, 2001, Rakotoarimanana, 2002). Cette phytomasse élevée engendrée par un recouvrement élevé constitué en partie par la litière favorise l'activité des décomposeurs (activité de la microfaune du sol) et améliore en conséquence la porosité et la perméabilité du sol.

La compacité du sol est augmentée par le pâturage. Ce résultat concorde avec celui de Dembélé (1996) pour qui dans les jachères, seul le pâturage présente un effet significatif sur la compacité du sol après deux ans d'abandon cultural. Ceci pourrait être dû à la différence observée au niveau de la phytomasse et du recouvrement de la végétation renforcée par le piétinement par le bétail en conditions non protégées. La phytomasse herbacée totale est significativement moins importante en conditions non protégées qu'en conditions protégées (Rakotoarimanana *et al.*, 2001 ; Rakotoarimanana, 2002). Le couvert végétal y est plus faible engendrant un développement racinaire faible réduisant la porosité et les activités biologiques dans le sol. Moins il y a de racines, plus le sol est compact.

L'effet du pâturage ne se manifeste que sur la teneur en phosphore qu'il diminue. L'effet du pâturage est peu probant sur les autres éléments. Il y a une forte variabilité interannuelle et l'observation nécessite une

durée beaucoup plus longue pour ces indicateurs chimiques. Ceci n'est pas le cas pour les jachères 3 à 4 ans en zone soudanienne dans lesquelles on observe une diminution de teneur de certains éléments (C, Mg, N, Ca, P) sous l'effet de pâturage (Masse *et al.*, 1997).

Une forte variabilité interannuelle a été observée pour certains paramètres. Cette caractéristique serait à mettre en relation avec la forte variabilité interannuelle des précipitations. Il a été démontré que les changements des propriétés physiques du sol sont plus importants que ceux des propriétés chimiques. Des résultats comparables ont été rapportés par Donfack *et al.* (2000), Masse *et al.* (1997). Rakotoarimanana (2002) montre que les éléments déterminants sont les paramètres physiques.

Ces résultats confirment ceux de Le Floc'h (2001) qui rapporte que la fiabilité et la sensibilité des paramètres peuvent varier dans le temps, certains étant mieux adaptés pour diagnostiquer des changements et perdant ensuite leur intérêt pour un diagnostic à des stades plus âgés.

Nous avons par ailleurs relaté que la phytomasse herbacée et le recouvrement de la végétation permettent d'expliquer les effets du feu et du pâturage sur les propriétés physico-chimiques du sol. Des résultats comparables ont été rapportés par Masse *et al.* (1997) dans la zone soudanienne du Mali.

Conclusion

Les résultats obtenus au cours des quatre années d'observation permettent de conclure que, les feux et le pâturage réduisent la perméabilité du sol. Par contre, ils augmentent la compacité.

L'effet du feu sur la teneur en matière organique du sol de surface dépend des conditions de pâturage. En conditions protégées, le feu diminue cette teneur, qu'il accroît par contre, en conditions non protégées. Pour les autres éléments (phosphore, potassium, sodium), le feu augmente leurs teneurs quelles que soient les conditions de pâturage. L'effet du pâturage ne se manifeste que par la diminution de la teneur en phosphore. Pour les autres éléments, l'effet du pâturage est encore peu probant, du fait d'une forte variabilité interannuelle des résultats.

En conclusion, une variabilité interannuelle difficile à interpréter affecte plusieurs paramètres physico-chimiques du sol de surface des savanes à *Heteropogon contortus* (sur l'état de surface, sur les éléments chimiques). Cependant, on peut avancer que les changements des propriétés physiques du sol sont plus importants que ceux des propriétés chimiques.

Références bibliographiques

- Boerner, R. E. J., 1982.- Fire and nutrient cycling in temperate ecosystems. *BioScience* 32 : 187-191.
- Bosser, J., 1969.- *Graminées des pâturages et des cultures à Madagascar*. ORSTOM, Paris : 440 p.
- Christensen, N. L., 1973.- Fire and the nitrogen cycle in *Adenostoma* chaparral. *Science*, 181 : 66-68.
- Christensen, N. L., 1977.- Fire and soil-plant nutrient relations in a pine-wiregrass savanna on the coastal plain of north Carolina. *Oecologia* 31 : 27-44.

- Cornet, A., 1974.- *Essai cartographique bioclimatique à Madagascar*. Notice explicative n° 55, ORSTOM, Paris : 28 p.
- Coutinho, L. M., 1982.- Ecological effects of fire in Brazilian Cerrado. *In* : B. J. Huntley & B. H. Walker (Eds.). « *Ecology of tropical savannas* ». Ecological studies, 42, New York : 273-291.
- Dauget, J.M. & Menaut, J.C., 1992.- Evolution sur 20 ans d'une parcelle de savane boisée non protégée du feu dans la Réserve de Lamto (Côte d'Ivoire). *Candollea*, 47 : 621-630.
- Dembélé, F., 1996.- *Influence du feu et du pâturage sur la végétation et la biodiversité dans les jachères en zone soudanienne-nord. Cas des jeunes jachères du terroir de Missira (Cercle de Kolokani), Mali*. Institut d'Economie Rurale, Bamako, Mali. CEFECNRS, France : 179 p.
- Dhillon, S. S. & Anderson, R. C., 1993.- Growth dynamics and associated mycorrhizal fungi of little bluestem grass *Schyzachyrium scoparium* (Michx.) Nash on burned and unburned sand prairies. *New Phytol.* 123 : 77-91.
- Donfack, P., Amougou, A. & Kuoh, H. M., 2000.- Fonctionnement écologique des jachères courtes au Cameroun septentrional. Influence du feu sur la reconstitution de la fertilité des sols et de la végétation. *In* : Ch. Floret & R. Pontanier (Eds.). « *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagement, alternatives* ». Vol.1, John Libbey Eurotext, Paris : 369-377.
- FOFIFA / ANAE / CIRAD, 1997.- *Bilan et évaluation des travaux et réalisation en matière de conservation des sols à Madagascar. Atlas des cartes*. Projet de conservation des sols.
- Fournier, A., Floret, C. & Gnahoua, G.-M., 1999.- Végétation des jachères et succession post-culturelle en Afrique tropicale. *In* : Floret, Ch. & Pontanier, R. (Eds.). « *La jachère en Afrique Tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances* », John Libbey Eurotext, Paris, vol. 2 : 123-168.
- Frost, P.G.H. & Robertson, F., 1987.- The ecological effects of fire in savannas. *In* : Walker, B.H. (ed.). *Determinants of tropical savannas*. IUBS, Monograph series n°3 : 93-140.
- Gill, A. M., 1974.- Fire and the Australian flora : a review. *Aust. Forest*, 38 : 4-25.
- Granier, P., 1967.- *Le rôle écologique de l'élevage dans la dynamique des savanes à Madagascar*. Mémoire de Diplôme d'Etudes Supérieures, Université de Tananarive : 78 p.
- Hobbs, N. T. & Schimel, D. S., 1984.- Fire effects on nitrogen mineralization and fixation in mountain shrub and grassland communities. *J. Range Manage*, 37 : 402-405.
- Hulbert, L. C., 1988.- Causes of fire effects in tallgrass prairie. *Ecology*, 69 : 46-58.
- Joergensen, R. G., Brooks, P. C. & Jenkinson, D. S., 1990.- Survival of the soil microbial biomass at elevated temperatures. *Soil Biom. Biochem.*, 22 : 1129-1136.
- Kauffman, J. B., Sanford R. L. Jr., Cummings, D. L., Salcedo, I.H. & Sampaio, E.V.S.B., 1993.- Biomass and nutrient dynamics associated with slash fires in neotropical dry forest. *Ecology*, 74 : 140-151.
- Kauffman, J. B., Cummings, D. L. & Ward, D. E., 1994.- Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian cerrado. *J. Ecol.*, 82 : 519-531.
- Kennan, T.C.D., 1971.- The effects of fire on two vegetation types of Matopos. *Proceedings of the Annual Tall Timbers Fire Ecology Conference*, 11 : 53-98.
- Knapp, A. K. & Scastedt, T. R., 1986.- Detritus accumulation limits productivity of tallgrass prairie. *BioScience*, 36 : 662-667.
- Koffi, V.A., 1982.- *Etude de quelques facteurs de production d'herbe en savane guinéenne. Deux ans d'observation*. Bouaké, CRZ, Pât., Note Technique N° 10 : 26 p.
- Lacey, C. J., Walker, J. & Noble, J. R., 1982.- Fire in Australian tropical savannas. *In* : B. J. Huntley & B. H. Walker (Eds.). « *Ecology of tropical savannas* ». Ecological studies, 42, New York : 246-272.

- Le Floch, E., 2001. Introduction sur thème dynamique post-culturelle. In : S. Razanaka, M. Grouzis, P. Milleville, B. Moizo & C. Aubry (Eds.). « *Sociétés paysannes, transitions agraires et dynamiques écologiques dans le sud-ouest de Madagascar* ». Actes de l'atelier CNRE-IRD, Antananarivo : 355 – 357.
- Leprun, J.-C., 2000.- *Compte-rendu de mission à Madagascar*. Projet GEREM, 22/09-10/10/2000 : 8 p.+annexe.
- Mando, A., Zougmore, R., Zombré, P. N. & Hien, V., 2001.- Réhabilitation des sols dégradés dans les zones semi-arides de l'Afrique subsaharienne. In : Ch. Floret & R. Pontanier (Eds.). « *La jachère en Afrique tropicale* ». John Libbey Eurotext, Paris, vol.2 : 311-339.
- Masse, D., Dembélé, F., Le Floch, E. & Yossi, H., 1997.- Impact de la gestion des feux de brousse sur la qualité des sols des jachères de courte durée dans la zone soudanienne du Mali. In : G. Renard, A. Neef, K. Becker & M. von Oppen (Eds.). « *Soil fertility management in West African land use systems* ». Niamey, Niger : 115-121.
- Menaut, J. C., 1993.- Effet des feux de savane sur le stockage et l'émission du carbone et des éléments-traces. *Sécheresse* 4(4) : 251-264.
- METEOROLOGIE NATIONALE, 1976.- *ETP et bilan hydrique à Madagascar*. Ministères des Transports du Ravitaillement et du Tourisme, 154 p.
- Monnier, Y., 1968.- *Les effets des feux de brousse sur une savane préforestière de Côte-d'Ivoire*. Etudes éburnéennes, Abidjan : 260 p.
- Morat, P., 1973.- *Les savanes de sud-ouest de Madagascar*. Mémoires ORSTOM, n° 68, Paris : 235 p.
- OFFICE NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT, 1997.- *Environnement*. Bulletin statistique, n°1, 55 p.
- OFFICE NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT, INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE, 1994.- *Rapport sur l'état de l'environnement à Madagascar*. PNUD, Banque mondiale, Tananarive : 208 p.
- Oldeman, L.R., 1991.- *An agroclimatic characterization of Madagascar*. Technical Paper 21, ISRIC-FOFIFA-IRRI. Annexe I. *Agroclimatic databaule of Madagascar*, ISRIC, Wageningen, 64 p.
- ORSTOM / DMH / CNRE, 1995.- Banque de données pluviométriques de Madagascar. Antananarivo, Madagascar.
- Pivello, V. R. & Coutinho, L. M., 1992.- Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in an open cerrado (Brazilian savanna). *J. Trop. Ecol.*, 8 : 487-497.
- Raison, R. J., 1979.- Modification of the soil environment by vegetation fires with particular reference to nitrogen transformations : a review. *Plant soil*, 51 : 73-108.
- Rakotoarimanana, V., Le Floch, E. & Grouzis, M., 2001.- Influence du feu et du pâturage sur la diversité floristique et la production de la végétation herbacée d'une savane à *Heteropogon contortus* (Région de Sakaraha). In : S. Razanaka, M. Grouzis, P. Milleville, B. Moizo & C. Aubry (Eds.). « *Sociétés paysannes, transitions agraires et dynamiques écologiques dans le sud-ouest de Madagascar* ». Actes de l'atelier CNRE-IRD, Antananarivo : 339-353.
- Rakotoarimanana, V., 2002.- *Feu, pâturage et dynamique des savanes à Heteropogon contortus* (L.) P. Beauv. ex Roem. & Shult. Dans le sud-ouest de Madagascar (Région de Sakaraha). Thèse de 3^{ème} cycle, Université d'Antananarivo : 177 p.
- Ravaoarivivo, N., 1998.- *Impacts des feux de végétation sur les faciès forestiers dans la région de Beparasy*. DEA, Université d'Antananarivo : 62 p.
- Savage, M. J., 1980.- The effect of fire on the grassland microclimate. *Herb. Abstr.*, 50 : 589-603.
- Sharrow, S. H. & Write, H. A., 1977.- Effects of fire, ash and litter on soil nitrate, temperature, moisture and tobosa grass production in the Rolling Plains. *J. Range Manage.*, 30 : 266-270.
- Singh, R. S., 1993.- Effect of winter fire on primary productivity and nutrient concentration of a dry tropical savanna. *Vegetatio*, 106 : 63-71.

- Sourdat, M., 1977.- *Le sud-ouest de Madagascar. Morphogenèse et pédogenèse*. Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris :212 p.
- Trabaud, L., 1983.- The effects of different fires regimes on soil nutrient levels in *Quercus coccifera* garrigue. In : F.T. Kruger, D. T., Mitchell & J. U. M.(Eds.). « *Mediterranean-type ecosystems : role of nutrients* ». Springer, Berlin Heidelberg, New York : 233-243.
- Trabaud, L. 1990. – Fire as an agent of plant invasion ? A case study in the French Mediterranean vegetation. In : Di Castri, F., Hansen, A.& Debussche, M. (eds.) « *Biological invasions in Europe and mediterranean basin* ». Kluwer Academic Press : 417-437.
- Trabaud, L., 1994.- The effect of fire on nutrient losses and cycling in a *Quercus coccifera* garrigue (Southern France). *Oecologia*, 99 : 379-386.
- Trollope, W. S. W., 1982.- Ecological effects of fire in South African savannas. In : Huntley, B. J. & Walker, B. H. (Eds.) « *Ecology of tropical savannas* ». New York : 292-306.
- Vasconcellos, C. A., 1998.- Temperature effect on carbon biomass in soils from tropical and temperate regions. *Sci. Agric.*, 55 : 94-104.
- Vijver (Van de), C. A. D. M., Poot, P. & Prins, H. H. T., 1999.- Causes of increased nutrient concentrations in post-fire regrowth in an East African savanna. *Plant and soil*, 214 : 173-185.
- Walkley & Black, 1934.- *Methods of soil analysis*. 2nd édition, Madison, Wisconsin USA : 1159 p.