

Inflammabilité et émission de composés organiques volatils par des formations végétales méditerranéennes : implications dans les incendies de forêt

par Christine ROBLES, Claude PICARD, Suzanne GARZINO, Frédérique GIROUD, Nathalie KORBOULEWSKY, Nicolas RAFFALI et Gilles BONIN

Certains végétaux méditerranéens produisent et émettent des substances volatiles qui peuvent se retrouver en concentration très importante dans l'atmosphère, influençant ainsi fortement le risque d'inflammabilité des formations végétales et favorisant la propagation des incendies. Dans cet article les auteurs évaluent, à travers l'exemple du Romarin, cette concentration et l'influence de l'architecture de la végétation sur ce paramètre et sur l'inflammabilité du végétal.

Introduction

Les incendies de forêt constituent l'une des perturbations les plus récurrentes en régions méditerranéennes. En raison de la très forte biodiversité accompagnée d'un nombre élevé d'espèces végétales endémiques et de l'importante anthropisation de cette région, les conséquences des incendies de forêt s'expriment à la fois au niveau écologique et humain. Les moyens de lutte et de prévention face à cette perturbation constituent donc l'une des préoccupations majeures des gestionnaires des espaces naturels et des collectivités locales.

De nombreuses études visant à prévoir le comportement du feu ont été réalisées au cours de ces dernières décennies. Elles concernent principalement les facteurs physiques du milieu et les qualités combustibles des végétaux. En revanche, aucune étude n'a été réalisée sur l'influence des composés organiques volatils (COV) sur la propagation des incendies de forêts. En effet, on a démontré que certains végétaux

méditerranéens produisent et émettent des substances volatiles (OWEN *et al.*, 1997 ; PEÑUELAS & LLUSIÀ, 1999). L'implication de ces substances dans le budget global du carbone, la formation régionale des oxydants photochimiques tel l'ozone, les concentrations en CO et OH et les dépositions acides, a engendré un intérêt croissant pour l'étude des émissions biogéniques (STAUDT *et al.*, 1997). L'émission de ces composés volatils issus du métabolisme secondaire des végétaux est déterminée qualitativement par le génome. Elle pourrait être influencée, au moins quantitativement par les phases phénologiques et le contexte du groupement végétal dans l'espace. Ces composés émis par les végétaux sont principalement des terpénoïdes (monoterpènes et plus rarement sesquiterpènes) qui ont pour précurseur commun l'isoprène (LORETO *et al.*, 1996). Du fait de leur nature chimique, ces composés sont facilement inflammables. Nous avons émis l'hypothèse que ces composés volatils se retrouvent en concentrations relativement importantes dans l'air ambiant, à des périodes où les végétaux-sources sont eux-mêmes fortement inflammables. La conjugaison de ces deux effets est alors à même de provoquer des situations à fort potentiel d'inflammation. Les caractéristiques de la végétation (*eg.* architecture, conditions mésologiques) pourraient influencer la localisation de ces composés volatils à des secteurs

particuliers dans l'air ainsi que l'inflammabilité des végétaux. En effet, l'inflammabilité d'une plante dépend de sa composition chimique : les composés organiques ont un double rôle, celui de permettre la phase de démarrage de la combustion et celui d'accroître, par les substances volatiles hautement inflammables renfermées dans le végétal, l'intensité du feu en activant la flamme aux températures élevées (GALTIE, 1997). On peut par conséquent supposer que l'inflammabilité d'un végétal dépend également de son état écophysologique. Les études d'inflammabilité menées à ce jour ont toujours considéré les végétaux étudiés indépendamment des autres végétaux présents sur le même site. Aussi, il nous a paru intéressant de suivre également les principaux paramètres d'inflammabilité sur des sites présentant des conditions écologiques variées.

L'objectif de notre recherche est d'évaluer si les COV émis par les végétaux peuvent se retrouver en concentration mesurable dans l'air ambiant et sont donc susceptibles de favoriser la propagation des incendies de forêt. Dans ce contexte, nous avons également recherché si les conditions du milieu (et notamment l'architecture de la végétation) avaient une influence sur la présence et la concentration de ces composés gazeux et si l'inflammabilité des végétaux pouvait varier en fonction des caractéristiques du milieu.

Photo 1

(en bas, à gauche) :

Milieu ouvert
avec pluviomètre et barre
pour les prélèvements
de COV
Photo CEREN

Photo 2

(en bas, à droite) :

Milieu fermé
avec pluviomètre et barre
pour les prélèvements
de COV
Photo CEREN



Matériels et méthodes

Sites d'étude

L'étude a été réalisée dans le massif de Valabre (à proximité de Gardanne, Bouches du Rhône) sur deux sites différant notamment par l'architecture du groupement végétal. Ces deux sites, très proches géographiquement, sont représentatifs d'un même contexte bioclimatique et d'une même roche-mère calcaire. Une de ces stations est représentative d'un milieu ouvert avec une strate arbustive dominante (Cf. Photo 1). L'autre correspond à une couverture végétale plus évoluée, avec une strate arborescente constituée principalement de pins d'Alep (Cf. Photo 2). Dans ces groupements, le modèle végétal choisi pour cette recherche est le Romarin *Rosmarinus officinalis* L. Largement répandu en région méditerranéenne, il est caractéristique de certaines garrigues (milieux ouverts), mais se rencontre aussi fréquemment sous pinèdes de pin d'Alep (milieux fermés).

Stratégie d'échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé hebdomadairement du 1^{er} juillet 1999 au 31 novembre 1999, avec quelques prélèvements sporadiques en décembre. Sur chacun des ces deux sites, les prélèvements de COV ont été effectués à l'aide de cartouches ténax à deux hauteurs : 20 et 80 cm au-dessus des individus de romarin. Chacun des prélèvements est répété trois fois. Pour les tests d'inflammabilité et la teneur en eau, les pousses terminales des rameaux de l'année sont prélevées sur plusieurs romarins pour chacun des sites d'étude. En parallèle, l'intensité lumineuse, la température et l'hygrométrie de l'air, les vitesses moyennes et maximales du vent sont mesurées à chaque prélèvement. La pluviométrie est mesurée à l'aide d'un pluviomètre placé dans chacun des sites d'étude.

COV

L'identification des COV a été effectuée par chromatographie gazeuse (avec thermodésorption) et spectrométrie de masse. Leur quantification a été réalisée par chromatographie gazeuse à l'aide d'un thermodésorbeur et d'un détecteur à ionisation de flamme.

Paramètres d'inflammabilité

Les paramètres d'inflammabilité ont été mesurés à l'aide d'un épiradiateur. Ces paramètres sont les suivants :

- le délai d'inflammation (DI) est le délai qui s'écoule entre le dépôt de l'échantillon sur le disque de l'épiradiateur et l'apparition de la flamme. Au delà de 60 s, le test est déclaré négatif ;
- la durée de combustion (DC) est la durée pendant laquelle cette flamme reste visible ;
- l'intensité de combustion (INT) est une note qualitative codifiée et attribuée à chaque test positif. Elle résume l'impression de l'observateur quant à l'intensité de la combustion.

Ces mesures permettent d'élaborer les paramètres de synthèse : la moyenne des délais d'inflammation (MDI) et la moyenne des durées de combustion (MDC).

La teneur en eau est évaluée après séchage à l'étuve. Elle correspond au quotient par la masse fraîche de la différence entre la masse fraîche et sèche de l'échantillon.

Résultats et discussion

Comparaison des conditions météorologiques de chaque parcelle

La température et la vitesse du vent de la parcelle ouverte sont généralement plus élevées que celles de la parcelle fermée. En revanche, l'hygrométrie de l'air du milieu fermé est souvent supérieure à celle de la parcelle ouverte.

Composés organiques volatils émis dans l'atmosphère

Les analyses ont permis de mettre en évidence treize composés majoritaires. Ce sont essentiellement des monoterpènes comme l' α -pinène, le tricyclène, le camphène ... c'est-à-dire des composés présentant un point flash faible (30 à 50°C) et donc susceptibles de s'enflammer très facilement. On observe une variabilité temporelle de l'émission très importante (Cf. Fig. 1). Ainsi, l'émission totale est très importante au cours de la saison sèche estivale (juillet-août). En

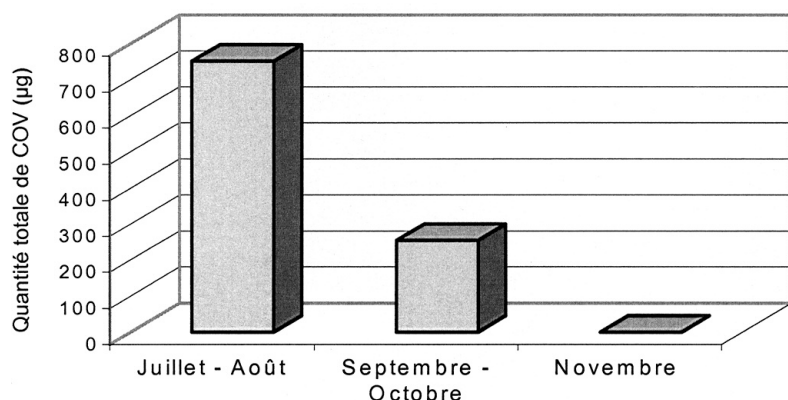


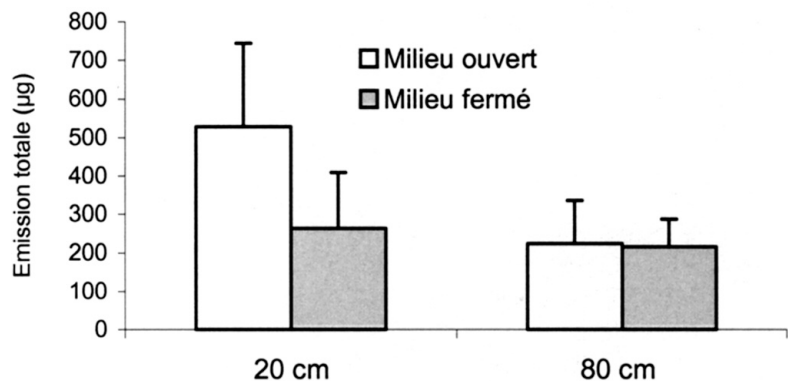
Fig. 1 :
Quantité totale de COV
en fonction de la date.

septembre-octobre, elle a nettement diminuée et de novembre à décembre, on retrouve seulement quelques traces de COV dans l'atmosphère.

De plus, pendant la saison sèche estivale, la quantité totale de composés secondaires émis est plus élevée en milieu ouvert qu'en milieu fermé. Cette différence provient presque exclusivement des prélèvements effectués à 20 cm (Cf. Fig. 2). En effet, en milieu ouvert, la quantité totale de COV prélevée à 20 cm est largement supérieure à celle prélevée à 80 cm, alors qu'en station fermée, les teneurs sont sensiblement égales.

Cette production et cette émission de COV par les végétaux, plus importantes en milieu ouvert qu'en milieu fermé, peut s'expliquer notamment par des différences dans l'ensoleillement et le degré hygrométrique de l'air. Cependant, en milieu ouvert, les COV semblent dissipés ou dégradés à des hauteurs relativement faibles alors qu'en milieu

Fig. 2 :
Quantité totale de COV
en fonction du site
de prélèvement et de la hauteur
de prélèvement pendant
la saison sèche estivale
(juillet-août).



fermé, les concentrations sont comparables aux deux hauteurs échantillonnées. La résilience et le maintien des COV en milieu fermé pourraient s'expliquer par l'architecture de la végétation et notamment par la présence de la strate arborée qui constitue un obstacle physique aux déplacements de l'air et à la pénétration de certaines radiations lumineuses susceptibles de dégrader les COV. Ces résultats suggèrent qu'en milieu fermé, durant la période estivale, il pourrait se former et se maintenir des poches de COV. Ces composés gazeux pourraient constituer un vecteur de feu pour la canopée de la strate arborescente.

Les 12 COV dosés présentent des variations spatio-temporelles diverses. Certains, comme le tricyclène, présentent, dans les deux milieux et pour les deux hauteurs, sensiblement, la même dynamique saisonnière (Cf. Fig. 3 et 4).

En revanche, d'autres comme l' α -pinène, présentent une dynamique saisonnière différente dans les deux milieux (Cf. Fig. 5 et 6).

La majorité des constituants, tel le bornéol, présente une dynamique saisonnière qui varie selon le milieu et la hauteur (Cf. Fig. 7 et 8). Pour ce composé, seules les variations entre le 19 juillet et 2 août sont comparables.

Ces résultats ont des implications importantes en terme de gestion du risque. Ils soulignent l'intérêt de prendre en compte, outre la quantité totale de composés émis, également la quantité relative de chacun d'eux, certains présentant des points flash plus faibles que d'autres. C'est le cas notamment de l' α -pinène qui présente un point flash plus faible que celui du bornéol (32°C contre 65°C).

Nous avons également étudié les relations entre les paramètres météorologiques et les COV à l'aide de matrice de corrélations. Il n'existe aucune corrélation commune aux deux milieux. Durant la saison sèche estivale, en milieu fermé, seule la relation positive luminosité-bornéol est significative ($r = +0,651^1$). En revanche, en milieu ouvert, il existe plusieurs relations significatives indiquées dans le Tab. I.

¹ - $r_{\text{limite}} = 0,543$ pour $p \leq 1\%$.

Le r_{limite} est le même pour toutes les corrélations.

Durant septembre-octobre, en milieu ouvert, une seule corrélation est significative. Il s'agit de la corrélation négative camphène-vitesse moyenne du vent ($r=-0,915$) déjà observée pendant la saison sèche estivale. Par contre, pour cette même période, en milieu fermé, plusieurs relations sont significatives (Cf. Tab. II). Pour ce milieu, il n'existe pas de relation significative linéaire commune aux deux saisons.

Ainsi, les facteurs météorologiques susceptibles de favoriser la présence et la concentration des COV dans l'atmosphère diffèrent selon le type de milieu et la période de l'année. Les facteurs de risque à prendre en compte dépendent donc du type de groupement végétal.

Inflammabilités et teneurs en eau des romarins

Les teneurs en eau du romarin évoluent globalement de façon similaire pour les deux milieux et ce, en fonction des précipitations (Cf. Fig. 9). En général, les teneurs en eau des romarins sous pinède sont plus élevées que celles des individus du milieu ouvert. Cependant, il y a deux exemples (entre le 5 et le 12 juillet d'une part et entre le 19 et le 26 juillet d'autre part) pour lesquels il y a augmentation des teneurs en eau des individus du milieu ouvert alors que celles des végétaux du milieu fermé continuent à décroître alors qu'il n'y a eu aucune pluie. Les relevés d'hygrométrie matinale : 55% le 12 juillet et 51% le 26 juillet indiquent une forte humidité nocturne dont seul le végétal du milieu ouvert aurait profité. Cela suggère que la présence de la canopée de pin d'Alep

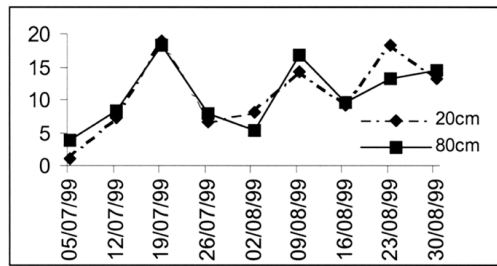


Fig. 3 :
Variations des quantités relatives (%) du tricyclène en milieu ouvert.

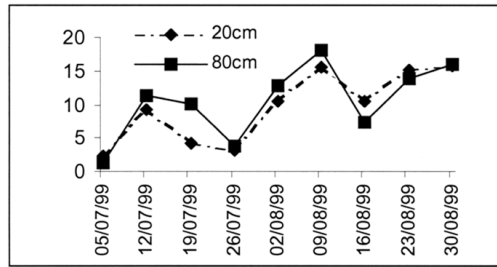


Fig. 4 :
Variations des quantités relatives (%) du tricyclène en milieu fermé.

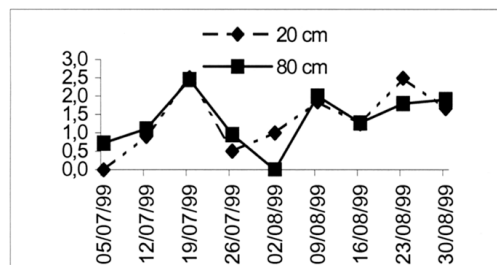


Fig. 5 :
Variations des quantités relatives (%) du α -pinène en milieu ouvert.

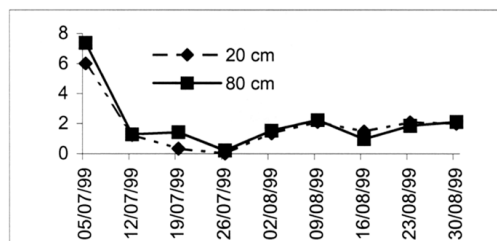


Fig. 6 :
Variations des quantités relatives (%) du α -pinène en milieu fermé.

	Linalool	Bornéol
Température	>0 ($r=0,897$)	>0 ($r=+0,587$)
Hygrométrie	<0 ($r=-0,778$)	
Vitesse moyenne du vent	<0 ($r=-0,576$)	

Tab. I :
Corrélations significatives pour le milieu ouvert durant juillet-août

	Tricyclène	α -pinène	Camphène
Température	>0 ($r=+0,846$)	>0 ($r=+0,825$)	
Vitesse moyenne du vent	>0 ($r=+0,922$)	>0 ($r=+0,882$)	
Luminosité			<0 ($r=-0,828$)

Tab. II :
Corrélations significatives pour le milieu fermé pour septembre-octobre

Fig. 7 :
Variations des quantités relatives (%) du bornéol en milieu ouvert.

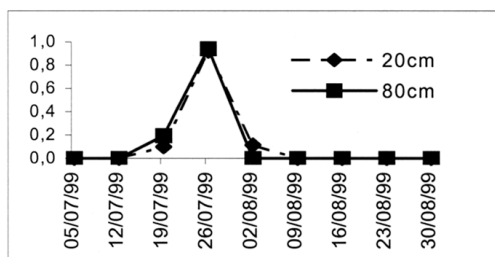
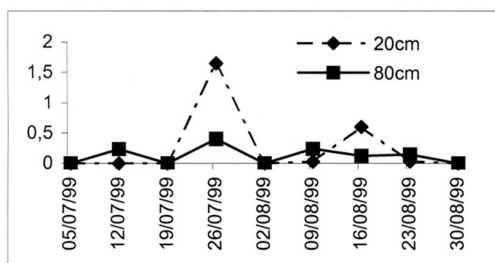
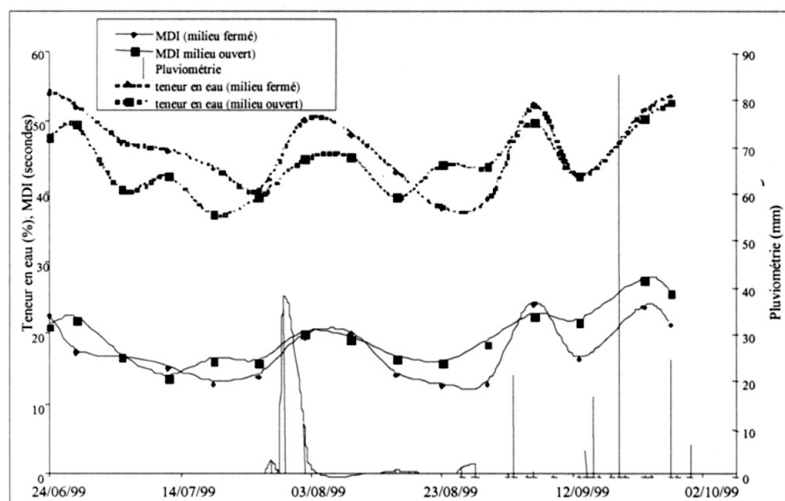


Fig. 8 :
Variations des quantités relatives (%) du bornéol en milieu fermé.



limite l'humidité nocturne au niveau de la strate arbustive. Les faibles pluies de la mi-août engendrent une augmentation de la teneur en eau du romarin uniquement pour les individus du milieu ouvert ce qui peut s'expliquer par une différence de pluviométrie de 33% environ de moins en milieu fermé par rapport au milieu ouvert. En revanche les pluies plus intenses de la semaine suivante provoquent une augmentation de la teneur en eau des individus des deux milieux.

Fig. 9 (ci-dessous) :
Teneurs en eau et MDI des romarins des deux sites d'études.



Les MDI (moyennes des délais d'inflammation) des romarins des deux milieux évoluent également en fonction des précipitations et de leur teneur en eau (Cf. Fig. 9). Durant la saison sèche estivale, on observe d'ailleurs des corrélations significatives entre la teneur en eau des romarins et les MDI (Cf. Fig.10). Les coefficients de corrélation sont de 0,896 ($p < 1\%$) pour le milieu fermé et de 0,77 ($p < 1\%$) pour le milieu ouvert.

Ces relations sont caractéristiques du site d'étude. Ainsi, pour une même teneur en eau, les végétaux ne présentent pas le même délai d'inflammabilité. Par exemple, une teneur en eau de 47% correspond à un délai d'inflammation de 17 secondes pour les romarins du milieu fermé et de 21 secondes pour les romarins du milieu ouvert. Les romarins du milieu fermé sont donc plus inflammables que ceux du milieu ouvert. Jusqu'à présent, la plus grande inflammabilité du végétal était relié à son état de stress hydrique. Or dans cette étude, la plus grande inflammabilité du romarin est obtenue sous couvert de pins d'Alep pour les végétaux présentant la teneur en eau la plus élevée. Il faut donc envisager d'autres paramètres susceptibles d'influencer l'inflammabilité du végétal indépendamment de sa teneur en eau.

Conclusion

Cette étude a donc permis de mettre en évidence durant la saison sèche estivale la présence en quantités importantes de COV émis par les végétaux au dessus des formations végétales méditerranéennes. L'architecture de la végétation joue un rôle dans la résilience et la concentration de ces composés dans l'air ambiant. Il semblerait que les milieux fermés permettent la création de poches de COV ce qui pourrait favoriser la propagation des incendies au niveau des strates supérieures. Par ailleurs, le romarin est plus facilement inflammable dans ce type de milieu qu'en milieu ouvert, ce qui montre que les milieux fermés correspondent à des situations plus délicates au plan des potentialités d'inflammation.

Ces résultats ont d'importantes implications dans la gestion des écosystèmes naturels et en termes de prévention des incendies de forêt. Des investigations complémentaires

sont actuellement en cours. Elles visent à élargir l'étude à d'autres espèces végétales en recherchant également les facteurs écologiques favorisant l'émission de COV et à vérifier, *in situ*, l'existence de la poche de gaz, ce qui pourrait permettre sur le long terme de compléter les cartes de risques d'inflammabilité des formations végétales méditerranéennes sur la base de ces nouveaux résultats.

C.R. et al.

Bibliographie

Galtie J.F., 1997. *Approche hiérarchique, modélisation et gestion prévisionnelle du risque incendie en région méditerranéenne*. Thèse de doctorat Université de Toulouse.

Loreto F., Ciccioli P., Cecinato A., Brancaleoni E., Frattoni M., Fabozzi C. and Tricoli D., 1996. Evidence of the photosynthetic origin of monoterpenes emitted by *Quercus ilex* L. leaves by ¹³C labeling. *Plant Physiology*, 110 : 1317-1322.

Owen S., Boissard C., Street R.A., Duckham S.C., Csiky O. and Hewitt C.N., 1997. Screening of 18 Mediterranean plant species for volatile organic compound emissions. *Atmospheric Environment*, 31 : 11-17.

Peñuelas J. and Llusà J., 1999. Seasonal emission of monoterpenes by the Mediterranean tree *Quercus ilex* in field conditions : Relations with photosynthetic rates, temperature and volatility. *Physiologia Plantarum*, 105 : 641-647.

Staudt M., Bertin N., Hansen U., Seufert G., Ciccioli P., Foster P., Frenzel B. and Fugit J.L., 1997. Seasonal diurnal patterns of monoterpene emissions from *Pinus pinea* L. under field conditions. *Atmospheric Environment*, 31 : 145-156

Résumé

La prévention des incendies de forêt constitue une des préoccupations principales des gestionnaires et des scientifiques. L'objectif de notre recherche est d'évaluer si les composés organiques volatils (COV) émis par les végétaux peuvent se retrouver en concentration importante dans l'atmosphère et ainsi favoriser la propagation des incendies. Nous avons également recherché l'influence de l'architecture de la végétation sur cette concentration et les paramètres d'inflammabilité. L'étude a été réalisée dans le massif de Valabre (Bouches-du-Rhône) sur deux sites : un milieu ouvert et un milieu fermé, avec pour modèle végétal *Rosmarinus officinalis* L.

Durant l'été, les COV sont présents en quantité importante dans l'air au-dessus des deux formations végétales. La concentration totale en COV est plus élevée en milieu ouvert qu'en milieu fermé. Cependant, en milieu ouvert, les COV semblent dissipés à des hauteurs faibles. En septembre-octobre, cette concentration diminue fortement et devient presque nulle en novembre-décembre. Les COV présentent une variabilité spatio-temporelle très importante qui peut s'expliquer notamment par les facteurs du milieu. Les paramètres d'inflammabilité du romarin varient en fonction de leur teneur en eau

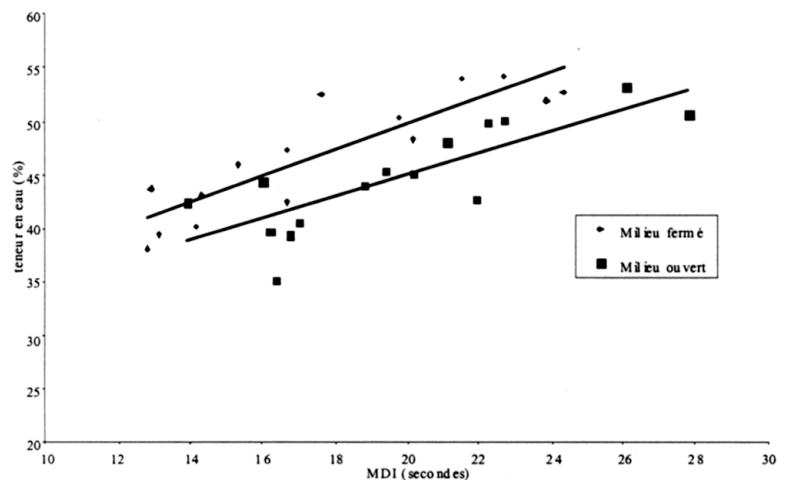


Fig. 10 (ci-dessus) :
Corrélations pour les deux sites de prélèvement entre la teneur en eau et le MDI

Remerciements

Ces recherches ont été financées par le ministère de l'Agriculture et de la pêche (DERF) dans le cadre du GIS-Incendie. Les auteurs remercient M. Joseph Sergi pour sa gracieuse traduction en italien.

Christine ROBLES
Suzanne GARZINO
Nathalie
KORBOULEWSKY
Gilles BONIN
Institut méditerranéen d'écologie et paléoécologie, UMR 6116, Laboratoire de biosystématique et écologie méditerranéenne, Université de Provence, avenue Escadrille Normandie Niemen, case 421 bis, 13397 Marseille Cedex 20

Claude PICARD
Frédérique GIROUD
Nicolas RAFFALI
CEREN - Centre d'essais et de recherche de l'Entente interdépartementale en vue de la protection de la forêt et de l'environnement 13120 Gardanne

et donc des précipitations. Durant l'été, la relation entre délai d'inflammation et teneur en eau est caractéristique du site. Ainsi, pour une même teneur en eau, les romarins du milieu fermé sont plus inflammables que ceux du milieu ouvert.

Ces résultats ont d'importantes implications dans la gestion des écosystèmes et dans la prévention des incendies. Ils pourraient permettre sur le long terme de compléter les cartes de risques d'inflammabilité des formations végétales méditerranéennes.

Summary

Inflammability and emission of Volatile Organic Compounds by Mediterranean ecosystems : role in forest fires.

Forest fire control is one of the main concern of managers and scientists. The aim of our study was to evaluate if the volatile organic compounds (VOC) emitted by plants can be found in high concentrations in the atmosphere, thus favouring fire propagation. We also studied the influence of plant architecture on this concentration and, also, inflammability parameters. The study was carried out in the Valabre area (Bouches du Rhône, South-eastern France) on *Rosmarinus officinalis* L. at two sites : an open and a closed ecosystem.

During the summer, there were high concentrations of VOC in the air in both ecosystems. The total concentration of VOC was higher in the open than in the closed ecosystem. However, in the open ecosystem, VOC seemed to disperse at rather low height. In September-October, this concentration decreased greatly and reached nearly zero in November-December. The VOC showed a very high spatio-temporal variability, which can be explained above all by environmental factors.

Inflammability parameters of rosemary varied according to its water content and, therefore, to rainfall. During the summer, the relationship between inflammation delay and water content was site-dependent. Thus, for the same water content, rosemary in the closed ecosystem was more inflammable than that in the open ecosystem.

These results are of importance for ecosystem management and forest fire control. They can be used to perfect maps of inflammability risks in Mediterranean ecosystems.

Riassunto

Infiammabilità ed Emissione di Composti Organici Volatili da formazioni vegetali mediterranee : implicazioni negli incendi di foresta

La prevenzione degli incendi di foresta costituisce una delle preoccupazioni principali dei gestori e degli scientifici. L'obiettivo della nostra ricerca è di valutare se i composti organici volatili (C.O.V.) emessi da vegetali possano ritrovarsi in concentrazione notevole nell'atmosfera e quindi favorire la propagazione degli incendi. Abbiamo anche ricercato l'influsso dell'architettura della vegetazione su questa concentrazione ed i parametri d'infiammabilità. Lo studio è stato realizzato nel Massiccio di Valabre (provincia delle Bocche del Rodano - Francia) su due siti : un ambiente aperto ed un ambiente chiuso, con per modello vegetale *Rosmarinus officinalis* L.

Durante l'estate i C.O.V. sono presenti in quantità notevole nell'aria al di sopra delle due formazioni vegetali. La concentrazione totale in C.O.V. è più alta in un ambiente aperto che in un ambiente chiuso. Tuttavia, in un ambiente aperto, i C.O.V. sembrano dispersi a basse quote. A settembre - ottobre, questa concentrazione diminuisce molto e diventa quasi inesistente a novembre - dicembre. I C.O.V. presentano una variabilità spaziotemporale molto importante che può spiegarsi particolarmente dall'azione dei fattori dell'ambiente. I parametri d'infiammabilità del rosmarino variano in funzione del loro tenore acquoso e quindi delle precipitazioni. Durante l'estate il legame tra il ritardo d'infiammazione ed il tenore acquoso è caratteristico del sito. Così per un tenore acquoso uguale, i rosmarini dell'ambiente chiuso sono più infiammabili di quelli dell'ambiente aperto.

Questi risultati hanno conseguenze importanti nella gestione degli ecosistemi e nella prevenzione degli incendi. Essi potrebbero permettere a lunga scadenza di completare le mappe dei rischi d'infiammabilità delle formazioni vegetali mediterranee.