

La gestion du combustible pour la prévention des feux : les méthodes de traitement réduisent-elles efficacement l'aléa incendie ?

par Anne GANTEAUME et Arthur BOSCHET

Réduire la biomasse et les continuités du combustible figure parmi les meilleurs moyens de prévention du risque lié au feu de forêt. Plusieurs méthodes de traitement de la biomasse sont utilisées : broyage mécanique, brûlage dirigé, fauchage mécanique ou manuel. Ces traitements sont-ils tous efficaces ? Si oui, quelle est la durée leur efficacité ? Cette étude apporte des réponses à ces questions, dont certaines assez surprenantes.

Introduction

Le développement dans les années 1980 des incendies de forêt en région méditerranéenne française a amené la collectivité publique à développer une importante politique de prévention des incendies en complément des efforts qui étaient engagés en matière de lutte (CURT & FRÉJAVILLE, 2018). En effet, à la suite de la déprise agricole au cours du XX^e siècle, la recolonisation du milieu par la forêt, d'abord sous forme de friche ou d'embroussaillage autrefois entretenus par les troupeaux, a entraîné une accumulation de combustible considérable responsable de l'intensification des feux de forêt. Parallèlement, l'augmentation de la fréquentation des massifs par le public et l'accentuation du mitage des espaces forestiers par les habitations, entraînant une augmentation des surfaces d'interfaces habitat-forêt, ont engendré un accroissement du nombre de départs de feux dans ces zones (CHAPPAZ & GANTEAUME, 2022). La politique de prévention des incendies de forêt s'est fondée, entre autres, sur le traitement du combustible : soit par son éradication (cloisonnement des massifs par la mise en œuvre de coupures de combustible pare-feu, remises en cultures agricoles, etc.), soit par la réduction du combustible (traitements mécaniques et manuels, brûlage dirigé, sylvo-pastoralisme). Les ruptures dans la continuité du couvert forestier ainsi créées avaient pour but de

ralentir la progression des incendies et d'en diminuer l'intensité et l'ampleur. Ces traitements ont aussi pour effet de faciliter la lutte contre les incendies, notamment en facilitant l'accès, la circulation et l'engagement des moyens de lutte. Les coupures de combustible dans les massifs ne concernent cependant qu'un faible pourcentage de la superficie forestière (moins de 10%, et en général plutôt voisin de 3 à 5 % selon les départements ; GUIDE TECHNIQUE DES ÉQUIPEMENTS DFCI – Bouches-du-Rhône, 2023) mais le traitement de la végétation concerne aussi des linéaires de réseaux importants (e.g. 1700 km de pistes DFCI sans compter les coupures de combustible et 12 631 km de bord de route à faucher dans les Bouches-du-Rhône, www.insee.fr, 2022).

Il existe différentes méthodes de traitement du combustible qui peuvent être combinées dans le temps et qui sont fonction du type de végétation, du terrain, des enjeux à défendre, etc. Les intervalles de retour des traitements dépendent principalement de la

capacité de repousse du type de végétation ciblée. Ces traitements de réduction du combustible ont pour conséquences : 1.– la production de résidus ou rémanents (hormis avec le brûlage dirigé et le sylvo-pastoralisme) qui varie d'un traitement à l'autre et qui peut être laissée sur place ou exportée, 2.– une végétation post-traitement qui est variable avec une repousse de la végétation différente (principalement liée à l'adaptation des espèces à la perturbation : rejet ou germination activée par le passage du feu), etc. Les principales méthodes de traitement de la végétation utilisées en France pour la défense des forêts contre les incendies (DFCI) sont présentées dans le tableau I.

Concernant la réglementation pour la prévention des incendies, le Code forestier prévoit, par exemple dans l'article L.134-6, l'obligation légale de débroussaillage (OLD). Elle impose au propriétaire de tout bâtiment situé dans une zone exposée au risque d'incendie (notamment localisé dans les interfaces habitat-forêt, i.e. située à

Tab. I :
Les principales méthodes
utilisées pour la gestion
du combustible
pour la DFCI en France.

Méthodes de traitement de la végétation	Moyens utilisés	Végétation cible	Intervalle de retour
Broyage mécanique véhiculé	Engins agricoles ou forestiers équipés de broyeurs pour réduire la densité de végétation ligneuse basse et au sol, laissant ou non sur place les rémanents de coupe.	Ligneux principalement	3 ans en moyenne
Débroussaillage mécanique manuel	Utilisation d'une débroussailluse manuelle ou à couteaux broyeurs pour réduire la densité de végétation ligneuse basse et au sol tant que les parties ligneuses ne sont pas trop importantes.	Ligneux principalement	3 ans en moyenne
Brûlage dirigé	Technique de débroussaillage qui consiste à créer un feu de surface de faible à moyenne intensité et qui dépend des conditions météo du jour, du type de végétation du chantier et des objectifs ayant été fixés.	Ligneux et/ou herbacées	3 ans en moyenne
Fauchage mécanique	e.g. épareuse : adaptation du broyage mécanique plus orientée sur la fauche des herbacées de bord de route.	Herbacées	Une à plusieurs fois par an
Fauchage manuel	Utilisation d'une débroussailluse manuelle type rotofil ou tondeuse.	Herbacées	Une à plusieurs fois par an
Sylvo-pastoralisme (souvent combiné dans le temps aux autres méthodes pour l'entretien des parcelles traitées)	Pâturage en forêt avec divers types d'animaux : caprins et ovins mais aussi bovins, équins, camélidés, etc.	Ligneux ou herbacées	Une à plusieurs fois par an

moins de 200 m d'un espace naturel) de maintenir un espacement entre les arbres et de réduire les matières végétales combustibles (herbe, broussaille, branchage, feuille, etc.). Elle s'applique à un rayon de 50 m (et jusqu'à 100 m sur arrêté municipal dans certaines conditions) autour de sa construction, ainsi que sur 10 m de part et d'autre des voies d'accès. Le long des réseaux d'infrastructures (routes, voies ferrées, lignes électriques), le débroussaillage réglementaire s'effectue sur 20 m de part et d'autre des réseaux. Comme les coupures de combustible dans les massifs, les OLD permettent de réduire l'impact des incendies, de protéger la forêt, les biens et les personnes mais aussi de faciliter la lutte, en assurant une rupture de continuité horizontale et verticale de la couverture végétale.

Cependant, malgré la mise en place de cette réglementation pour la prévention des incendies de forêt, les départs de feux sont les plus nombreux le long des réseaux et dans les interfaces habitat-forêt (GANTEAUME & LONG-FOURNEL, 2015 ; CHAPPAZ & GANTEAUME, 2022). Les mégots de cigarette restent la principale cause de départ de feux involontaire en bord de route (Cf. Fig. 1), sans que l'on observe de diminution dans le temps (Cf. Fig. 2). À noter que le peu de départs de feux et les faibles surfaces brûlées dus aux mégots de cigarette le long des réseaux dans les Bouches-du-Rhône avant les années 2000 est principalement dû au manque d'investigation des causes de départs de feux avant 1997. Après cette date des cellules d'investigation des causes ont été créées, diminuant la proportion des départs de feux de cause inconnue (GANTEAUME & GUERRA, 2018).

Le maintien, voire l'augmentation, des départs de feux en bords de route malgré l'application des OLD, soulève des questions sur l'efficacité des traitements. Par ailleurs, l'efficacité de ces méthodes de traitement sur la réduction de l'aléa incendie (probabilité d'éclosion et intensité) n'a jamais été étudiée en région méditerranéenne française (hormis un aperçu dans CURT *et al.*, 2007) et les travaux passés, principalement espagnols (MARINO *et al.*, 2010, 2011 ; MADRIGAL *et al.*, 2012), ont concerné le traitement par brûlage dirigé et broyage mécanique avec ou sans export des rémanents de broyage sur l'inflammabilité d'un seul type de végétation (lande à *Ulex europaeus*).

Dans le cadre de la prévention des incendies de forêt à court et long termes, il est

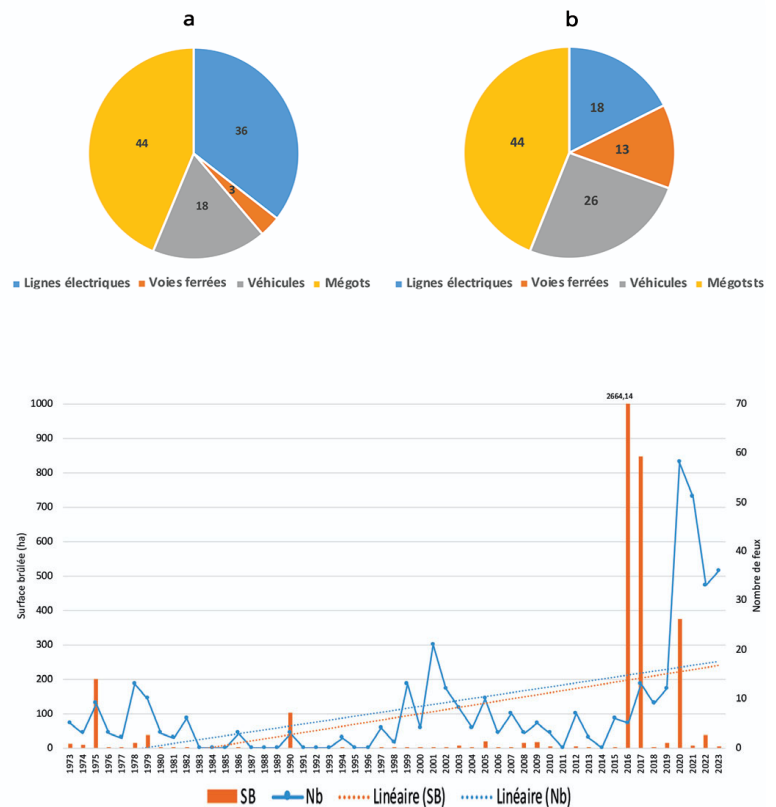
La défense des forêts contre les incendies (DFCI)

La mission DFCI, pilotée par l'Office national des forêts (ONF), met en œuvre les plans de protection de la forêt contre l'incendie (PPFCI), souvent établis à l'échelle du département pour guider l'action collective, et les plans de massifs qui sont la déclinaison par massif du PPFCI. Ces plans définissent les outils de programmation d'aménagement et d'entretien des massifs, issus du Code forestier.

indispensable de mieux connaître comment les mécanismes de mise à feu s'opèrent en fonction des différents types de combustibles résultant des traitements (les rémanents et les arbres/arbustes restants). Le type de résidu dépend à la fois du type de végétation originellement en place ainsi que du type de traitements utilisés, qui va lui-même affecter la composition et la structure de la végétation, et donc le risque ultérieur d'incendie. L'objectif de ce travail a donc été de mesurer et vérifier l'effet de différents traitements sur l'inflammabilité de la végétation traitée, et ce, à différentes dates après le traitement. En effet, il était également nécessaire d'évaluer l'intervalle de retour dans chaque type de traitement nécessaire pour conserver un effet atténuateur sur le risque incendie.

Fig. 1 (ci-dessous) : Principales causes connues des ignitions en lien avec les réseaux d'infrastructures (%) dans le Var (a) et les Bouches-du-Rhône (b).

Fig. 2 (en bas) : Evolution du nombre de départ de feux (Nb) et des surfaces brûlées (SB) dus aux mégots de cigarette dans les Bouches-du-Rhône. Source : Base de données des incendies de forêt (<https://bdiff.agriculture.gouv.fr>, 2024).



Méthodologie

Le plan d'échantillonnage et la méthode de prélèvement

Pour étudier l'effet de différents types de traitement du combustible sur l'inflammabilité de la végétation résiduelle, les prélèvements de végétation ont été réalisés le long des pistes DFCI dans quatre massifs (Alpilles, Côte Bleue, Grand Caunet, Sainte Baume) ou en bords de route des Bouches-du-Rhône (D7N près d'Aix-en-Provence) (Cf. Fig. 3), en été, pour être dans les conditions environnementales correspondant à la saison des feux.

Les méthodes de traitement de la végétation étudiées dans ce travail sont parmi les plus utilisées dans la région : le broyage mécanique (sans rémanent), le brûlage dirigé (pas de rémanent produit), le fauchage mécanique à l'épaveuse (avec rémanents et comparé à une modalité sans rémanent) et le fauchage manuel au rotofil (avec rémanents). Deux types de végétation sont concernés par ces méthodes :

- la garrigue à *Quercus coccifera* (ou chêne kermès) sous pinède en bord de piste DFCI pour le broyage mécanique et le brûlage dirigé (deux sites de prélèvements pour le brûlage dirigé et trois pour le broyage ont été sélectionnés (Cf. Fig. 3), afin de considérer la variabilité spatiale du territoire) ;

- les herbacées (graminées) pour le fauchage mécanique (ici le brome, *Bromus erectus*, 100%) et le fauchage manuel avec le

rotofil (ici le faux-millet, *Oloptum miliaecum*, 95% en mélange avec *Dactylis glomerata*) en bords de route.

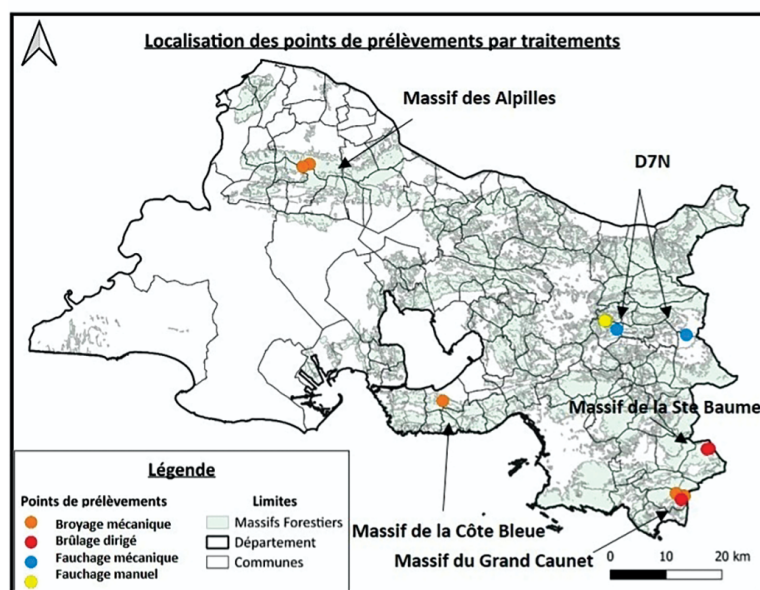
En plus des modalités de traitement sur une végétation cible, le plan d'échantillonnage prend également en compte différents intervalles de retour du traitement annuel (sauf pour le fauchage, mécanique ou manuel, car ces traitements ont lieu annuellement, voire plusieurs fois par an) : T0- l'année du traitement (1 à 8 mois après le traitement en fonction des types), T1- dans la 2^e année après le traitement (20 à 21 mois après le traitement en fonction des types) et T2- dans la 3^e année le traitement (31-32 mois après le traitement en fonction des types). Les zones traitées sont comparées à une zone témoin (végétation non traitée), choisie de par sa proximité avec la zone traitée (généralement au-delà de la bande débroussaillée) pour être dans des conditions environnementales similaires. Au total 400 échantillons ont été prélevés : 30 échantillons dans chacune des deux modalités de fauchage (mécanique ou manuel) deux mois après le traitement (T0) et 90 pour le brûlage dirigé et le broyage mécanique (30 dans chaque intervalle de retour T0, T1, T2) ainsi que 30 échantillons témoin dans chaque modalité.

Le prélèvement des échantillons de végétation traitée ou témoin s'est effectué de façon à perturber le moins possible la structure du combustible (litière + partie aérienne de la végétation). Les échantillons sont placés dans des barquettes en aluminium (30x23 cm pour le chêne kermès, 24x15 cm pour les herbacées) et transportés directement au laboratoire pour être stockés dans une chambre climatique afin d'éviter une trop grande perte hydrique. Les échantillons sont brûlés le jour suivant, exceptées les herbacées qui doivent être brûlées le jour même car leur contenu hydrique diminue très rapidement après la coupe. Trois échantillons par modalité sont également conservés pour la mesure du contenu hydrique et de la densité apparente de la végétation, notamment.

Mesure de l'inflammabilité de la végétation post-traitement : des protocoles de brûlage adaptés à la source d'ignition

Deux types d'expériences sont réalisés en laboratoire en fonction de la phase du comportement du feu que l'on veut étudier (igni-

Fig. 3 :
Carte des sites de prélèvement en fonction des traitements étudiés dans le département des Bouches-du-Rhône.



tion et propagation). Le montage du banc de brûlage est identique pour les deux protocoles.

Protocole relatif à l'ignition

L'ignition est réalisée grâce à un brandon incandescent (cube de *Pinus sylvestris* de 2x2x1 cm) que l'on dépose au centre de l'échantillon afin d'étudier le départ du feu (protocole adapté de GANTEAUME *et al.*, 2011). Ce protocole vise à simuler l'ignition par mégot de cigarette jeté en bord de route (ou de piste) (Cf. Fig. 4.1). Cette expérience est reproduite au maximum deux fois par échantillon si l'ignition n'a pas lieu au premier essai. Ce protocole nécessite une source de vent (à 9,8 km/h) tout le long de l'essai. Les enregistrements des variables d'inflammabilité sont lancés à partir du moment où le brandon incandescent est déposé sur l'échantillon.

Protocole relatif à la propagation du feu

On cherche ici à étudier la propagation du feu avec un front de flamme que l'on obtient en enflammant une ligne d'alcool positionnée dans la largeur de l'échantillon (Cf. Fig. 4.2) ou de la frisure de bois pour les témoins ligneux (du fait de leur grande taille). Il est sensé simuler l'arrivée depuis la forêt du front de flamme sur la zone débroussaillée. A la différence du protocole précédent, aucune source de vent n'est utilisée et l'ignition est déclenchée volontairement afin d'obtenir 100% d'ignition dans chaque cas. Comme précédemment, l'allumage est synchronisé avec le début des enregistrements.

Pour les échantillons de végétation traitée (ligneux et herbacées) et d'herbacées témoin, les expériences sont réalisées en laboratoire. Le dispositif de brûlage des échantillons (ou banc de brûlage) utilisé en laboratoire (Cf. Fig. 5) est constitué d'une balance enregistrant la perte de masse au cours du brûlage qui est protégée de la chaleur par une plaque syporex sur laquelle est positionné l'échantillon. Des fluxmètres mesurant les flux total et convectif reçus sont placés à 10 et 40 cm de hauteur et à 20 cm à droite de la barquette. Sur le même alignement et aux mêmes hauteurs, des thermocouples viennent mesurer la température émise par les flammes au centre de l'échantillon. A l'arrière du banc, est placée une règle graduée visible depuis l'appareil photo placé à 1m devant le banc qui enregistre l'ensemble des brûlages. Les enregistrements vidéo permettent de valider la hauteur et la vitesse de propagation des flammes. A droite, à 70 cm



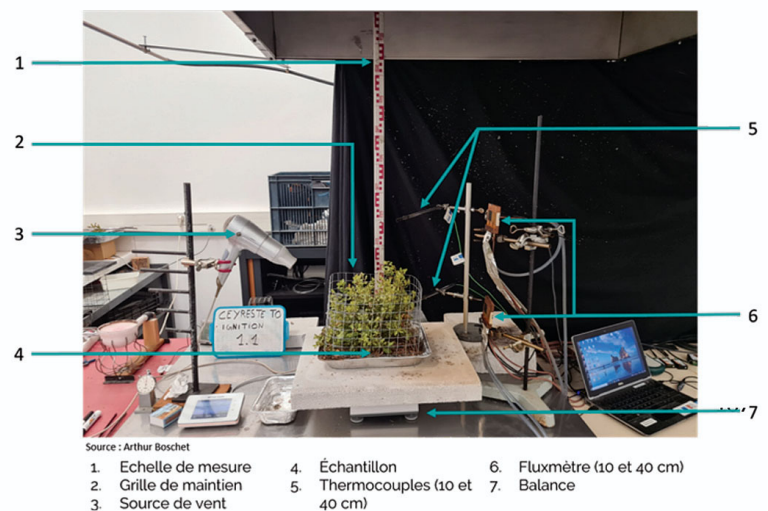
Fig. 4 (ci-dessus) :
Illustration des deux
protocoles de brûlage :
1 – ignition,
2 – propagation.

de haut et incliné à 45°, se trouve la source de vent qui souffle vers le centre du banc (uniquement utilisée lors du protocole « ignition », voir ci-dessus). Sur le côté, un chronomètre permet de mesurer le délai d'ignition et durée d'inflammation. Pour procéder aux brûlages, les échantillons sont placés dans une grille de maintien positionnée sur la barquette.

Du fait de la taille trop importante des échantillons de végétation ligneuse témoin, le banc de brûlage est déplacé en extérieur (Cf. Fig. 6). La mise en place est identique à l'exception d'un fluxmètre et d'un thermocouple rajoutés à 1m de hauteur (hauteur moyenne de la végétation). Concernant l'allumage, nous avons utilisé de la frisure de bois pour assurer l'ignition. Il faut aussi s'assurer que le vent ne dépasse pas 1 km/h pour être dans des conditions similaires au laboratoire.

Au cours des brûlages, différentes variables sont enregistrées (ou calculées *a posteriori*) correspondant aux composantes de l'in-

Fig. 5 (ci-dessous) :
Dispositif de brûlage
des échantillons utilisés
en laboratoire.



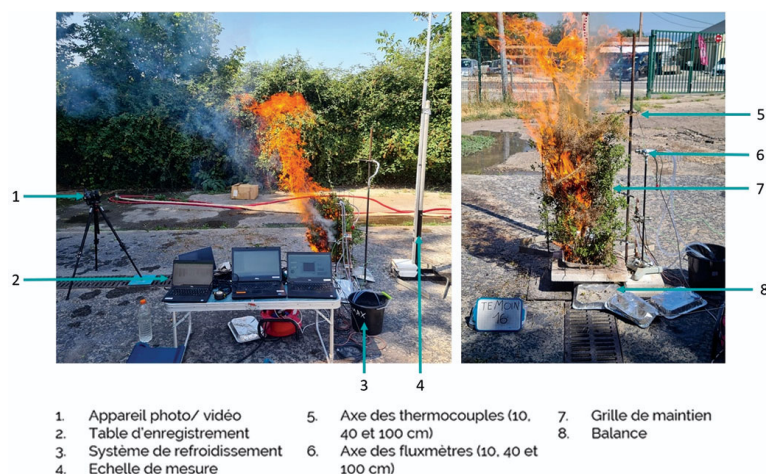


Fig. 6 :
Dispositif de brûlage
en extérieur
pour la végétation
ligneuse témoin.

flammabilité : capacité à s'enflammer ou ignitabilité (1 & 2 ; uniquement pour l'ignition au brandon puisque, pour le protocole avec la ligne d'alcool/frisure de bois, l'ignition est systématique), durabilité des flammes (3) et combustibilité (4-5) d'après ANDERSON (1970) :

1) Fréquence d'ignition (%) : pourcentage des tests d'ignition réussis par rapport au nombre de tests total.

2) Délai d'ignition (s) : temps mesuré avec un chronomètre à partir du moment où on dépose le brandon sur l'échantillon jusqu'à apparition de la première flamme (cela peut être vérifié ou confirmé grâce à la vidéo de l'essai).

3) Durée d'inflammation (s) : temps s'écoulant entre l'apparition des flammes et leur extinction, mesuré avec un chronomètre (peut être vérifiée ou confirmée grâce à la vidéo de l'essai).

4) Propagation du feu (nombre de côtés de l'échantillon atteints par les flammes) : elle est constatée visuellement à la fin de chaque brûlage.

5) Hauteur de flamme maximum (cm) : impossible à mesurer précisément lors des essais de brûlages, il faut donc mesurer les hauteurs de flamme grâce à la vidéo des essais et à la règle graduée située derrière les échantillons.

6) Température maximum à 10 et 40 cm de hauteur (°C) : extraite de l'enregistrement des thermocouples. Pour les témoins ligneux, la température à 1 m de hauteur a également été enregistrée.

7) Flux total maximum à 10 et 40 cm ($W.m^{-2}$) : les fluxmètres enregistrent une tension en Volt (V) qu'il faut convertir en watt (W).

8) Vitesse de propagation ($m.s^{-1}$) : grâce à la vidéo, il est possible de déterminer la distance parcourue par le feu même si le front de flamme n'atteint pas l'extrémité de l'échantillon et le temps qu'il a fallu aux flammes pour parcourir cette distance.

9) Intensité du front de flamme ($kW.m^{-1}$) : la puissance du front de flamme est calculée à l'aide de l'équation de Byram : Intensité = Masse du combustible consumée X Chaleur spécifique de l'espèce X Vitesse de propagation. Les coefficients de chaleur spécifique de l'espèce sont : $19\,253\,J.g^{-1}$ pour le chêne kermès ; $18\,707\,J.g^{-1}$ pour le brome (et le faux-millet).

Différentes co-variables, pouvant aussi influencer directement ou indirectement l'inflammabilité, sont également relevées d'une part au niveau de la végétation de l'échantillon avant brûlage et d'autre part pour le site de prélèvement. Pour la végétation des échantillons prélevés, les co-variables prises en compte sont :

- le contenu hydrique (FMC, %) : il s'agit de la proportion d'eau dans les feuilles de la végétation post-traitement. Il est possible de la calculer simplement à l'aide de la formule : $FMC = 100 \times [(poids\ frais - poids\ sec) / poids\ sec]$. Pour obtenir les différents poids, il faut peser un sous-échantillon de végétation (5 g) après prélèvement pour obtenir le poids frais, puis après le passage à l'étuve à $60^{\circ}C$ pendant 48 heures pour obtenir le poids sec ;

- la densité apparente ($kg.m^{-3}$) : il s'agit du poids de végétation par volume d'échantillon ;

- l'épaisseur de litière (cm) : c'est la hauteur maximum de résidus végétal mort au sol, mesurée avec un réglet ;

- la proportion d'aiguilles dans la litière (%) : c'est une estimation visuelle de ce que représente la quantité d'aiguilles (particules les plus inflammables) dans la litière par rapport aux autres particules ;

- la hauteur de feuilles mortes (cm ; uniquement pour les herbacées de bord de route) : il s'agit de la partie de la végétation coupée ou non n'étant plus verte (généralement à la base de la tige des herbacées) et donc plus combustible.

Ces co-variables ont un effet direct sur les variables de l'inflammabilité car elles sont des caractéristiques propres de la végétation.

Lorsque plusieurs sites sont prospectés pour un même traitement (brûlage dirigé ou

broyage mécanique), les co-variables de site prises en compte sont (Cf. Tab. II) :

- l'exposition : orientation du site de prélèvement. Dans notre cas les sites de prélèvements ont principalement une exposition sud ou sud-est ;

- l'altitude (m) : élévation du site de prélèvement par rapport au niveau de la mer ;

- la moyenne des précipitations sur les trois derniers mois (mm) : moyenne des précipitations enregistrées par les stations météo les plus proches des sites de prélèvement sur les trois derniers mois depuis la date de prélèvement ;

- la moyenne des températures sur les 30 derniers jours (°C) : moyenne des températures enregistrées par les stations météo les plus proches des sites de prélèvement sur les 30 derniers jours depuis la date de prélèvement ;

- la date de prélèvement : date à laquelle a eu lieu le prélèvement de la végétation ;

- le massif correspondant au site en général (prenant ainsi en compte d'autres co-variables non mesurées).

Les co-variables de sites ont un effet indirect sur les variables de l'inflammabilité puisqu'elles n'interviennent pas directement lors des brûlages, mais plus sur la végétation en amont. Par exemple les précipitations et l'exposition vont influencer sur la croissance de la végétation, végétation dont ensuite les caractéristiques propres vont influencer l'inflammabilité.

Analyses statistiques

Etant donné que les co-variables enregistrées sur la végétation et le site peuvent avoir un effet sur l'inflammabilité, il a été nécessaire de s'en affranchir statistiquement quand cela était le cas, de façon à ne mesurer que l'effet du traitement.

Pour chaque méthode de traitement de la végétation, on a d'abord recherché si le type de traitement avait un effet significatif (réduction ou augmentation) sur l'inflammabilité (via les différentes variables mesurées) en comparant les données obtenues sur la végétation traitée à celles du témoin. Puis l'effet de l'intervalle de retour (T0, T1, T2) sur l'inflammabilité a été testé pour le brûlage dirigé et le broyage mécanique.

Résultats et discussion

L'effet de la réduction de la biomasse végétale sur la diminution de l'inflammabilité de la végétation post-traitement varie en fonction de la méthode utilisée et de la végétation ciblée.

Les résultats ont montré que brûlage dirigé et broyage mécanique diminuent significativement l'inflammabilité. En effet, si l'on considère les résultats globaux sur le broyage mécanique (BM), sans prendre en compte la variation temporelle, le traitement

Tab. II :

Co-variables des sites de prélèvement pour le broyage mécanique et le brûlage dirigé.

Sites	Modalités	Intervalles de retour	Exposition	Altitude (m)	Température (°C)	Précipitation (mm)	Date de prélèvement
Alpilles 1	Broyage	T0	Sud-Ouest	260	25,014	137,7	12/07/2023
Alpilles 2	Broyage	T1	Sud-Ouest	240	26,221	131,9	25/07/2023
Alpilles 2	Broyage	T2	Sud-Ouest	240	19,109	48,9	15/07/2024
Grand Caunet 1	Broyage	T0	Sud-Ouest	350	25,019	44,6	19/07/2023
Grand Caunet 2	Broyage	T1	Sud	430	25,229	135,4	07/09/2023
Grand Caunet 2	Broyage	T2	Sud	430	18,343	430	18/07/2024
Côte Bleue 1	Broyage	T1	Sud	200	25,261	90,3	08/09/2023
Côte Bleue 1	Broyage	T2	Sud	200	18,815	31,2	04/07/2024
Grand Caunet 3	Brûlage dirigé	T0	Sud-Ouest	380	24,933	44,6	26/07/2023
Sainte Baume 1	Brûlage dirigé	T1	Sud	620	25,465	169,6	11/08/2023
Sainte Baume 1	Brûlage dirigé	T2	Sud-Ouest	610	25,229	135,4	17/08/2023
Sainte Baume 2	Brûlage dirigé	T1	Sud	620	22,7	85	08/07/2024
Sainte Baume 2	Brûlage dirigé	T2	Sud-Ouest	610	22,9	83	10/07/2024
Alpilles	Témoin	Témoin	Sud-Ouest	260	25,408	108,7	24/08/2023
Grand Caunet	Témoin	Témoin	Sud	430	24,538	28,4	23/08/2023
Côte Bleue	Témoin	Témoin	Sud	200	25,634	62,7	22/08/2023
Sainte Baume	Témoin	Témoin	Sud-Ouest	610	21,401	68,3	30/07/2024

diminue significativement la hauteur de flamme, le flux de chaleur reçu aux deux hauteurs et l'intensité du front de flamme, essentiellement du fait de la diminution de la hauteur et donc de la biomasse de la végétation (e.g. Fig. 7a). Par ailleurs, l'effet dans le temps est conservé pour le flux (e.g. Fig. 7b) et l'intensité (jusqu'à T2), jusqu'à T1 pour la hauteur de flamme et à T1 seulement pour la température à 10 cm. Cependant le BM présente une fréquence d'ignition au brandon (5,3% contre 0%), seulement significative à T0, dû principalement à la structure de la végétation, et une propagation des flammes plus importante (seulement à T1 et T2) que dans le témoin ce qui pourrait s'expliquer par une plus grande quantité de litière qu'à T0. Pour les autres paramètres, le traitement n'induit pas de changement. Selon les types de broyage et de végétation, des rémanents peuvent être laissés au sol ou exportés, ce qui peut influencer sur l'inflammabilité. MARINO *et al.* (2010), comparant le broyage mécanique avec ou sans résidus de broyage dans les peuplements d'*Ulex europaeus*, ont montré que le nettoyage des placettes après traitement produisait des particules de combustible très fines moins inflammables que celles géné-

rées par le concassage de la végétation traitée et laissée sur place.

Pour ce qui est du brûlage dirigé (BD), la majorité des paramètres d'inflammabilité mesurés ont été effectivement diminués par le traitement (hauteur de flamme, température et flux total de chaleur à 10 et 40 cm, intensité du front de flamme, et vitesse de propagation) du fait de la diminution de la hauteur et de la biomasse de la végétation, et ce, quel que soit l'intervalle de retour (e.g. Fig. 8). Il n'y a pas d'augmentation de l'inflammabilité due au traitement et ceci témoigne d'un effet positif du traitement sur le moyen terme. Cette tendance a également été observée dans les peuplements d'*Ulex europaeus* traités par brûlage dirigé (MADRIGAL *et al.*, 2012). Cependant, à plus long termes, MARINO *et al.* (2011) ont montré que l'aléa dans ces peuplements augmentait significativement à partir de la troisième année suivant le traitement. Ces auteurs ont également montré que les particules fines (repousse d'herbacées) peuvent entraîner une augmentation de l'aléa dans les années suivant le traitement ; ce type de combustible doit donc être contrôlé, notamment en combinant un entretien des placettes brûlées par du sylvo-pastoralisme.

Fig. 7 :
Effet du broyage
mécanique (a)
et de l'intervalle de retour
de ce traitement (b) sur
le flux total reçu à 10 cm.

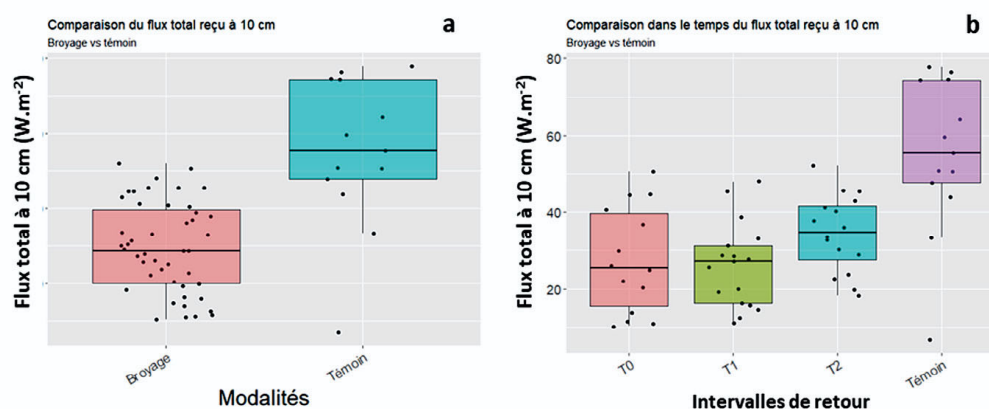
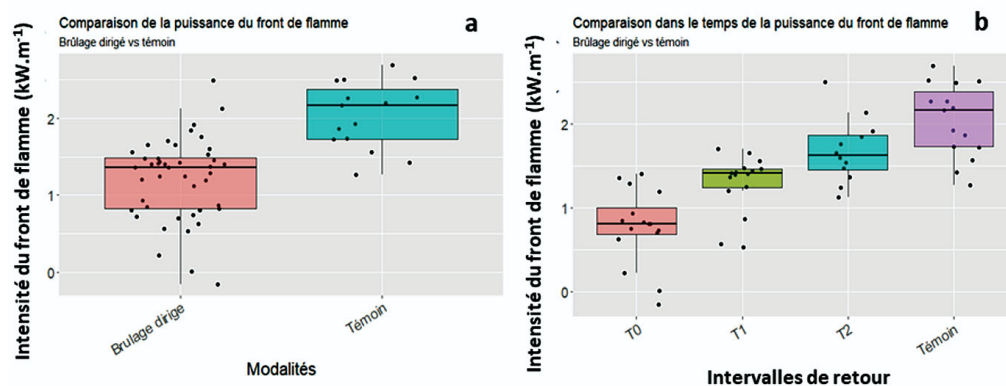
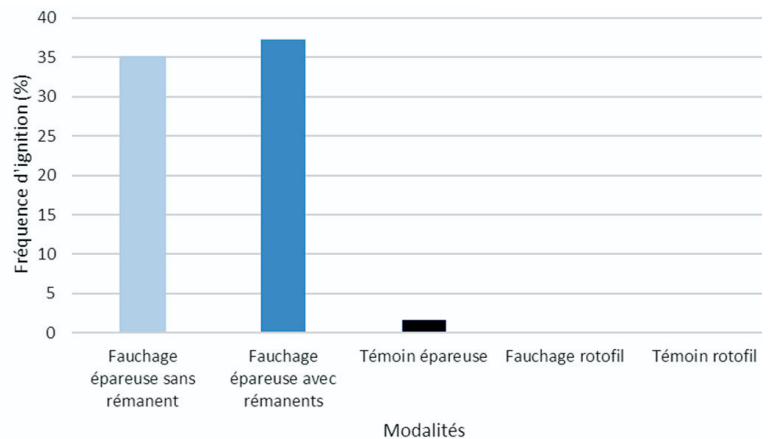


Fig. 8 :
Effet du brûlage dirigé (a)
et de l'intervalle de retour
de ce traitement (b)
sur l'intensité du front
de flamme.



Des résultats surprenants pour le fauchage mécanique de la végétation herbacée !

Pour le fauchage mécanique des herbacées de bords de route avec ou sans rémanents, la seule variable réduite par le traitement est la température à 40 cm (du fait de la réduction de la hauteur de la végétation traitée). Étonnamment, la hauteur de flamme, le flux total à 10 cm, la vitesse de propagation (Cf. Fig. 10), l'intensité du front de flamme et surtout la fréquence d'ignition (Cf. Fig. 9) sont plus importantes dans la végétation traitée que dans le témoin. Ce qu'il faut retenir du fauchage des herbacées de bord de route à l'épaveuse (avec ou sans rémanents), c'est que le risque d'ignition est accru après traitement. En effet, la surface de contact avec le brandon incandescent est bien plus importante dans cette végétation que dans celle du témoin. Dans ce dernier, la structure de la végétation est composée essentiellement d'une juxtaposition de tiges verticales qui n'est pas favorable à un bon contact avec le brandon qui ne peut tomber à plat (Cf. Fig. 11a). De plus, les rémanents de coupe laissés sur place constituent un tapis continu d'herbacées très sèches propices à la propagation du feu (Cf. Fig. 11b). Même en



absence de rémanents (Cf. Fig. 11c), la végétation fauchée résiduelle forme aussi un tapis continu composée de la base des tiges et des feuilles, elles aussi très sèches en période estivale, conditions favorables à un risque accru d'ignition.

Pour le fauchage manuel des herbacées de bord de route (ou dans les interfaces habitat-forêt) au rotofil, le traitement réduit effectivement la propagation des flammes, les flux reçus et l'intensité du front de flamme (Cf. Fig. 12). Cependant, la température à 10 cm est augmentée du fait de la concentration de

Fig. 9 :

Comparaison de l'ignition au brandon incandescent entre les échantillons fauchés à l'épaveuse avec et sans rémanents, ainsi qu'au rotofil avec leurs témoins.

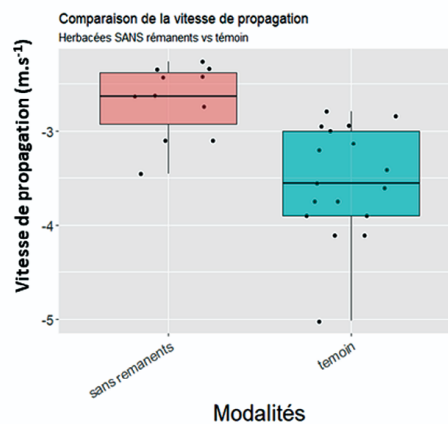
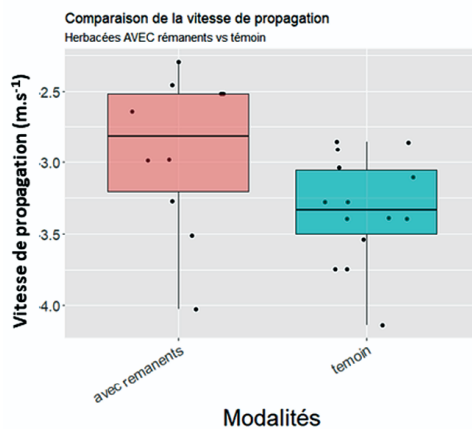


Fig. 10 :

Effet du fauchage mécanique à l'épaveuse avec (a) et sans rémanent (b) sur la vitesse de propagation des flammes.

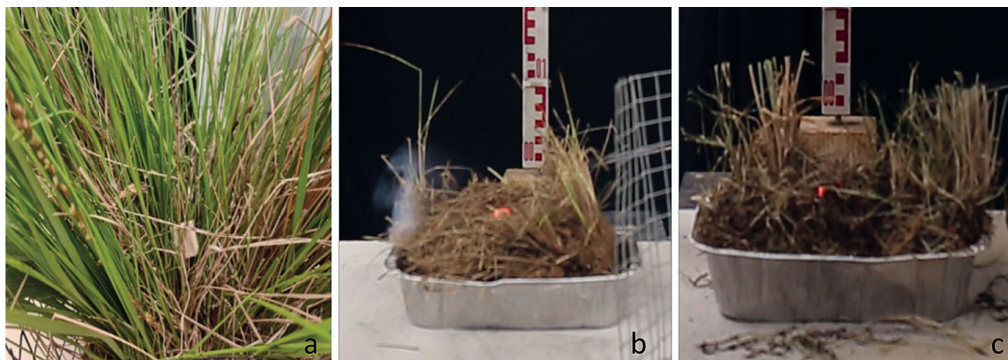


Fig. 11 :

Différence de surface de contact du brandon entre la végétation témoin (a) et la végétation fauchée mécaniquement avec (b) ou sans (c) rémanents. Le brandon offrant une surface de contact réduite dans la végétation du témoin, la fréquence d'ignition est plus faible que dans celles des deux autres traitements.

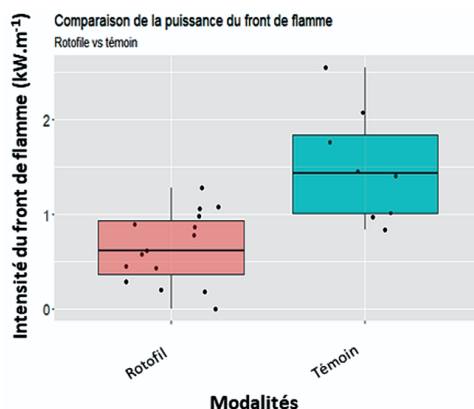


Fig. 12 :
Effet du fauchage manuel
au rotofil sur l'intensité
du front de flamme.

la biomasse au sol suite au fauchage. Comparé au fauchage mécanique à l'épaveuse, la fréquence d'ignition n'augmente pas suite au traitement (Cf. Fig. 10). En effet, la surface de contact des résidus avec le brandon est très faible car, même s'il tombe à plat, les rémanents ne le supportent que très peu, comme c'est le cas dans le témoin. Globalement la quantité de biomasse est diminuée pour une même surface et cette dernière est difficilement mobilisable par les flammes, limitant ainsi fortement l'inflammabilité. Le fauchage manuel au rotofil est donc plus efficace que le fauchage mécanique à l'épaveuse (avec ou sans rémanent) en termes de réduction de l'inflammabilité.

Laisser ou non les rémanents de fauche : tout dépend du type de fauchage

Dans le cas du fauchage mécanique à l'épaveuse, la biomasse sèche au sol (soit celle constituée par les rémanents de coupe, soit celle se trouvant à la base des tiges fauchées constituée majoritairement de feuilles mortes) permet également une meilleure propagation des flammes dans la végétation traitée. La vitesse de propagation des flammes accrue explique aussi une intensité des flammes plus importante malgré une biomasse consommée réduite. Concernant l'ignition au brandon, avec ou sans rémanents laissés sur place, la circulation de l'air est favorisée par rapport au témoin du fait de la réduction de la hauteur du combustible. En conséquence, le délai d'ignition diminue et la fréquence d'ignition (i.e. inflammabilité accrue) augmente selon l'intensité du flux d'air reçu par la végétation.

Le fauchage des herbacées à l'épaveuse et au rotofil réduisent dans les deux cas la quantité de biomasse disponible pour le feu aussi efficacement l'une que l'autre.

Cependant ces méthodes présentent des résultats diamétralement opposés puisque l'une est très efficace dans la réduction de l'inflammabilité (le fauchage au rotofil) alors que l'autre en augmente de nombreux paramètres (le fauchage à l'épaveuse). Pourtant ces deux méthodes sont fondamentalement assez similaires puisque l'on coupe la végétation à une certaine hauteur et que l'on laisse les rémanents sur place. L'explication de cette différence réside dans la structure des rémanents. En effet, après le passage de l'épaveuse, les rémanents forment un coussin plat, dense, uniforme, continu, les tiges fauchées suivant la même orientation ce qui permet une surface de contact avec le brandon plus importante. Cette structure du combustible traité facilite la propagation du feu conduisant également à une intensité du feu plus élevée. À l'inverse, les rémanents du rotofil sont plus éparpillés les uns par rapport aux autres avec peu de continuité, une structure moins dense, les tiges fauchées, soufflées lors du passage de l'engin, présentant des orientations différentes. La structure du combustible ainsi traitée entraîne une diminution de la surface de contact avec le brandon (comme dans le cas du témoin). Les flammes ont donc plus de mal à se propager du fait du manque de continuité de combustible.

Conclusion et perspectives

Les expériences réalisées dans ce travail ont montré que, dans les conditions testées, le brûlage dirigé se positionne comme le traitement le plus efficace dans les massifs car il diminue le plus de paramètres d'inflammabilité (fréquence d'ignition, délai d'ignition, température, etc.). Cet effet bénéfique du brûlage dirigé est effectif jusqu'à T2. Cela indique un effet bénéfique supplémentaire du brûlage dirigé à moyen terme. Le broyage mécanique est également efficace mais moins que le brûlage dirigé et ses effets sont moins durables dans le temps. Les points négatifs du broyage mécanique sont surtout une fréquence d'ignition plus importante après le traitement et une propagation des flammes plus élevée à T1 et T2 (due à plus de biomasse disponible comparé à T0).

Ces résultats nous indiquent qu'il faudrait favoriser le brûlage dirigé, cette méthode étant plus performante sur la réduction immédiate de l'inflammabilité et ses effets

plus persistants dans le temps. Cependant, c'est une méthode qui a une fenêtre d'application très restreinte dans l'hiver car très dépendante des conditions météorologiques. Son application dans les espaces protégés est également problématique car ce traitement peut avoir un impact sur la biodiversité, notamment sur la faune peu mobile (ou en hibernation à cette période). Enfin c'est un traitement qui dispose encore d'une relative mauvaise image auprès du grand public car très associé à la crainte d'un feu qui pourrait s'échapper et au possible effet nocif des fumées sur la santé. Le broyage mécanique, quant à lui, permet de traiter d'énormes surfaces rapidement et est applicable toute l'année, hors saison estivale des feux. Il est particulièrement recommandé lors d'une première ouverture des milieux avant que d'autres traitements puissent être appliqués (brûlage dirigé, sylvo-pastoralisme). Il est cependant beaucoup plus coûteux pour sa réalisation.

Pour la gestion des herbacées de bord de route, la méthode très utilisée du fauchage mécanique à l'épareuse n'est pas efficace pour la réduction de l'inflammabilité, même si les rémanents sont évacués. Si l'on souhaite néanmoins conserver ce type de fauchage, il faudrait laisser une végétation suffisamment haute, capable d'intercepter efficacement les brandons (i.e. les mégots de cigarette) en réduisant la surface de contact entre ces brandons et la végétation en place. Cet effet peut être également obtenu en réalisant le fauchage plus tôt dans l'année pour que la végétation ait suffisamment repoussé au moment de la saison des feux. Souffler les rémanents au moment du passage de l'épareuse permettrait aussi de favoriser une disposition hétérogène des rémanents (peu propice à l'ignition et la propagation du feu) comme c'est le cas lors du passage du rotofil. L'application du rotofil devrait être donc favorisée quand cela est possible, cependant, comme cette méthode demande plus de temps et de main d'œuvre, elle ne concernera sans doute que de petites surfaces à enjeux.

Néanmoins, des mesures d'inflammabilité sur le terrain, où la météo, la topographie et les conditions locales de combustible peuvent aussi influencer sur le comportement du feu, sont nécessaires pour valider ces résultats en laboratoire. De même, l'efficacité à long terme de ces traitements mérite d'être aussi étudiée.

A.G., A.B.

Bibliographie

- Chappaz F, Ganteaume A. 2022. Role of land-cover and WUI types on spatio-temporal dynamics of fires in the French Mediterranean area. *Risk analysis*, 43(5), 1032-1057. DOI: 10.1111/risa.13979.
- Curt T, Ganteaume A, Alleaume S, Borgniet L, Jappiot M, Lampin C, Chandio O. 2007. Vegetation flammability and ignition potential at road-forest interfaces (Southern France). IVth International Wildland Fire Conference, 14-17 mai 2007, Séville (Espagne).
- Curt T, Fréjaville T. 2018. Wildfire Policy in Mediterranean France: How Far is it Efficient and Sustainable? *Risk analysis*, 38(3), 472-488. DOI: 10.1111/risa.12855.
- Ganteaume A, Long-Fournel M. 2015. Driving factors in fire density can spatially vary at the local scale in south-eastern France. *International Journal of Wildland Fire*, 24, 650-664. <http://dx.doi.org/10.1071/WF13209>.
- Ganteaume A, Guerra F. 2018. Explaining the spatio-seasonal variation of fires by their causes: The case of south-eastern France. *Applied Geography*, 90, 69-81.
- Ganteaume A, Jappiot M, Lampin-Maillet C, Curt T, Borgniet L. 2011. Effects of vegetation type and fire regime on flammability of undisturbed litters in Southeastern France. *Forest Ecology and Management*, 261, 2223-2231.
- Guide technique des équipements DFCI – Bouches-du-Rhône, 2023. Rapport Préfecture des Bouches-du-Rhône-DDTM13. 37p.
- Madrigal J, Marino E, Guijarro M, Hernando C, Díez C. 2012. Evaluation of the flammability of gorse (*Ulex europaeus* L.) managed by prescribed burning. *Annals of Forest Science*, 69(3), 387-397.
- Marino E, Madrigal J, Guijarro M, Hernando C, Díez C, Fernández C. 2010. Flammability descriptors of fine dead fuels resulting from two mechanical treatments in shrubland: a comparative laboratory study. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 314-324.
- Marino E, Guijarro M, Hernando C, Madrigal J, Díez C. 2011. Fire hazard after prescribed burning in a gorse shrubland: implications for fuel management. *Journal of Environmental Management*, 92, 1003-1011.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du RMT AFORCE. Les auteurs remercient les casernes de Meyrargues et d'Aubagne (SDIS 13) pour la mise à disposition d'un espace sécurisé pour le brûlage des échantillons de végétation témoin ainsi que les Forestiers-Sapeurs du Conseil départemental 13, la cellule de brûlage dirigé du SDIS 13, les Agents de protection de la forêt méditerranéenne de l'ONF, le Parc naturel régional des Alpilles et l'Entente Valabre pour leur mise à disposition des bases de données de traitement du combustible et leur aide dans la réalisation du plan d'échantillonnage.

Anne GANTEAUME*
Arthur BOSCHET
Aix Marseille Univ,
INRAE, UMR RECOVER
Aix-en-Provence

* Auteur
de correspondance :
anne.ganteaume@inrae.fr

Résumé

La gestion du combustible pour la prévention des feux : les méthodes de traitement réduisent-elles efficacement l'aléa incendie ?

Le sud de la France est particulièrement impacté par les incendies. L'un des meilleurs moyens de prévention de ce risque est la réduction de la biomasse et des continuités du combustible grâce à différentes méthodes de traitement comme le broyage mécanique et le brûlage dirigé ciblant les ligneux bas (chêne kermès) dans les massifs ou le fauchage mécanique ou manuel en bord de route, notamment, ciblant les herbacées. Mais ces traitements réduisent-ils efficacement l'inflammabilité, i.e. l'ignition et la propagation du feu, de la végétation post-traitement ? Pour répondre à cela, l'inflammabilité d'échantillons de végétation traitée a été comparée à celle de végétation témoin (non traitée), pour chaque méthode de traitement. Les échantillons ont également été prélevés à différents intervalles de temps après traitement (jusqu'à deux ans) afin d'évaluer si l'efficacité se maintient entre deux traitements. Il ressort de ce travail que le broyage mécanique, et plus particulièrement le brûlage dirigé, réduisent efficacement l'inflammabilité notamment dans le temps. Contrairement au fauchage manuel au rotofil, le fauchage mécanique, avec ou sans rémanents de coupe laissés *in situ*, conduit à une augmentation globale de l'inflammabilité, ce qui est l'effet inverse de celui attendu.

Summary

In wildfire prevention, managing potential fuel: are specific treatment methods actually effective in reducing the risk of wildfire?

The south of France is particularly affected by forest fires. One of the best ways of attenuating this risk is to reduce the amount of the fuel biomass as well as its unbroken continuity, using different treatment methods. These include mechanical shredding and prescribed burning targeting low-growing woody species (kermes oak) in forest massifs, or mechanical or manual mowing along roadsides, particularly targeting herbaceous species. But do these methods efficiently reduce the flammability, i.e. the ignition and fire spread, of post-treatment vegetation? To answer this question for each treatment method, the flammability of samples of treated vegetation was compared with that of control vegetation (untreated). Samples were also collected at different time intervals after treatment (up to two years) in order to assess whether the efficacy was maintained between two treatments. The results of this work show that the mechanical shredding and, more specifically, prescribed burning are effective in reducing flammability, particularly over time. Unlike manual mowing, mechanical mowing, with or without residues left *in situ*, leads to an overall increase in flammability, which is the opposite of the expected effect.

Resumen

El sur de Francia es especialmente propenso a los incendios forestales. Una de las mejores maneras de prevenir este riesgo es reducir la biomasa y la continuidad del combustible utilizando diversos métodos de tratamiento, como la trituración mecánica y la quema prescrita para las especies leñosas bajas (*Quercus coccifera*) en los macizos forestales, o la siega mecánica o manual en los bordes de las carreteras para las especies herbáceas. Pero, ¿reducen eficazmente estos tratamientos la inflamabilidad, es decir, la ignición y propagación del fuego, de la vegetación posterior al tratamiento? Para responder a esta pregunta, se comparó la inflamabilidad de muestras de vegetación tratada con la de la vegetación de control (no tratada), para cada método de tratamiento. También se tomaron muestras a diferentes intervalos de tiempo tras el tratamiento (hasta dos años) para evaluar si la eficacia se mantenía entre tratamientos. Los resultados de este trabajo demuestran que la trituración mecánica, y más concretamente la quema prescrita, son eficaces para reducir la inflamabilidad, sobre todo con el paso del tiempo. A diferencia de la siega manual con rotocultor, la siega mecánica, con o sin tala dejada *in situ*, provoca un aumento global de la inflamabilidad, que es el efecto contrario al esperado.