

PROGRAMME GECОВI

Quel type de gestion du combustible pour quel type de végétation dans quel type d'interface

RAPPORT TECHNIQUE

Mars 2025



Anne Ganteaume, INRAE RECOVER

Arthur Boschet, INRAE RECOVER

Maxime Cailleret, INRAE RECOVER

Table des matières

Présentation du projet (enjeux, objectifs)	4
Bilan des activités : fonctionnement du comité de suivi, intérêt de la collaboration (plus-value, difficultés rencontrées...), déroulement des étapes de travail	5
Fonctionnement du comité de suivi.....	5
Déroulement des étapes de travail	5
Déroulement de la phase technique du projet GECOVl.....	5
Les actions de communication (voir dossier de communication)	6
Phase 1 : Impact du traitement du combustible sur l'inflammabilité de la végétation résiduelle	9
1. Introduction.....	10
2. Description de la méthode de travail	11
2.1 Sélection des méthodes et plan d'échantillonnage :	11
2.2. Protocole de prélèvement :	13
2.2.1. Prélèvement de végétation ligneuse :	13
2.2.2. Protocole de prélèvement des herbacées :	13
2.3. Protocoles de brûlage.....	14
2.3.1. Montage du dispositif de brûlage	14
2.3.2. Les différents protocoles de brûlage :	17
2.4. Les variables mesurées.....	17
2.4.1. Variables d'inflammabilité.....	17
2.4.2. Variables extérieures prises en compte	18
2.4.3. Analyses statistiques	21
3. Résultats	21
3.1. Sélection des covariables	21
3.2. Analyse de l'effet des traitements sur l'inflammabilité	22
3.2.1. Broyage mécanique (BM)	22
3.2.2. Brûlage dirigé (BD).....	24
3.2.3. Fauchage mécanique (épareuse) des herbacées de bords de route	28
3.2.4. Fauchage manuel (rotofil) des herbacées de bords de route (RTF)	30
4. Discussion	33
4.1. En ce qui concerne le traitement du combustible dans les massifs.....	33
4.1.1. Broyage mécanique	33
4.1.2. Brûlage dirigé.....	34
4.2. En ce qui concerne le traitement du combustible en bords de route	34
4.2.1. Fauchage mécanique des herbacées de bord de route :	34
4.2.2. Fauchage manuel des herbacées de bords de route	35

4.2.3. Une différence cruciale	36
5. Conclusions et perspectives	37
Phase 2 : Impact du traitement du combustible sur la diversité floristique forestière et sur la santé des peuplements arborés	39
1. Description de la méthode de travail	40
1.1. Plan d'échantillonnage	40
1.2. Caractérisation des conditions stationnelles et du peuplement	40
1.3. Estimation de la santé des arbres	41
1.4. Estimation de la diversité floristique.....	42
1.5. Analyse statistique des données	43
2. Résultats	43
2.1. Caractéristiques des placettes étudiées.....	43
2.2. Santé des arbres	47
2.3. Diversité floristique	47
3. Discussion	50
3.1. Santé des arbres	50
3.2. Diversité floristique	51
4. Conclusions et perspectives	52
Synthèse des sujets pour lesquels des études ou recherches complémentaires seraient nécessaires	53
ANNEXES RAPPORT TECHNIQUE	54
Bibliographie Rapport technique	54
Bibliographie Rapport de stage Master 2.....	56
Comités de suivi du projet GECOVl	58

Présentation du projet (enjeux, objectifs)

Comme la plupart des zones méditerranéennes dans le monde, le sud-est de la France est une région très touchée par les incendies de forêt, notamment dans les interfaces habitat-forêt et réseau-forêt (réseau=infrastructures de transport, d'électricité). L'augmentation conjointe de l'urbanisation et des activités humaines en interface habitat-forêt ainsi que l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes, résultant du changement global en cours, sont susceptibles de modifier considérablement le régime de feu actuel, notamment en termes de fréquence et d'intensité. En effet, il a été montré que l'imbrication croissante des milieux naturels et des constructions issues du processus de périurbanisation (interfaces habitat-forêt) ainsi que les nombreuses interfaces réseaux-forêt induisaient une augmentation significative du risque d'éclosion de feux (Lampin-Maillet, 2009 ; Ganteaume et Long-Fournel 2015). Dans les Bouches du Rhône, par exemple, les zones d'interfaces habitat-forêt ne représentent que 15% du département mais concentrent plus de 45% des ignitions ; et 72% des départs de feu sont localisés le long des réseaux routiers (Ganteaume & Long-Fournel 2015). Dans ces interfaces, les causes sont principalement humaines, directement (négligence et malveillance) ou indirectement (accidentelles), avec des sources diverses allant des mégots de cigarette aux travaux de nettoyage des bords de route (engins de fauchage et de débroussaillage, feux dirigés, travaux des particuliers, etc.) (Ganteaume & Guerra 2018).

Suite aux incendies catastrophiques de 1990 et de 2003 qui ont fortement touché les zones d'interfaces, la réglementation sur le traitement du combustible a été renforcée dans le sud-est de la France pour réduire la probabilité d'occurrence et de propagation du feu par diminution de la biomasse et des continuités de combustible (code forestier, arrêtés préfectoraux sur l'obligation légale du débroussaillage : OLD). Différentes méthodes de traitement du combustible (mécaniques utilisant divers types d'engins, brûlage dirigé ou pastoralisme) sont utilisées par les services de l'Etat ou par les particuliers en fonction du type d'interface et de végétation concerné. Dans les interfaces habitat-forêt, le traitement mécanique peut permettre la création de zone tampon autour des habitations en diminuant l'impact du feu et peut donc servir de solution temporaire, notamment quand le brûlage dirigé ne peut être appliqué. Le long des réseaux routiers/pistes DFCI, outre la diminution des éclosions et de la propagation du feu, la gestion de la végétation aura aussi pour objectif la mise en sécurité des pompiers lors de leurs interventions.

Cependant, peu de travaux ont été réalisés pour évaluer l'efficacité de ces méthodes de traitement de la végétation sur la réduction du risque d'incendie (diminution de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux), en Espagne notamment mais aucun en France. De plus, cette évaluation du risque incendie est généralement effectuée avec une vision à court terme sans prendre en compte l'évolution de la santé de la végétation restante qui influence la quantité de combustible vivante et sec (et donc le risque incendie) à moyen terme, ni en considérant d'autres services rendus par la forêt comme la diversité floristique qu'elle héberge.

Il existe donc une réelle lacune scientifique dans ce domaine en France où il reste à identifier les effets réels des principales méthodes de traitements utilisées sur le comportement du feu, mais également si les mesures prises dans les OLD en termes de surface à traiter et de structure de la végétation traitée sont efficaces en matière de diminution du risque d'incendie sans pour autant réduire la santé des arbres/arbustes restants, ni la biodiversité.

En effet, dans le cadre de la prévention des incendies de forêt à court et long termes, il est 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). L'hypothèse de départ de ce travail est que le type et la structure de la végétation, les conditions abiotiques du milieu résultant des traitements de la végétation, mais aussi la fréquence de retour de chaque traitement, influencent l'ignition et la propagation du feu dans les interfaces habitat-forêt et réseaux-forêt.

Bilan des activités : fonctionnement du comité de suivi, intérêt de la collaboration (plus-value, difficultés rencontrées...), déroulement des étapes de travail

Fonctionnement du comité de suivi

Le comité de suivi du projet GECОВI a été composé de façon à rassembler des personnes de différents horizons touchant à la gestion du combustible et de la prévention des incendies. Outre les personnes impliquées dans le projet : Anne GANTEAUME, Arthur BOSCHET et Maxime CAILLERET (INRAE), Hubert D'AVEZAC (Agence MTDA) et Rémi CHAPPAZ (Aix-Marseille Université), le comité de suivi a réuni :

- Jean LADIER (ONF)
- Marion TOUTCHKOV (ONF DFCI)
- Ondine LE FUR (SGZDS SUD DPFM)
- Vincent PASTOR (SDIS 13)
- Jonathan BAUDEL (PNR Alpilles)
- Haimad Baudriller-Cacaud (CNPF)

Léa Houpert de l'ADEME était aussi présente lors des réunions.

Durant la période, deux réunions du comité de suivi (voir Annexes) ont été organisées (Annexe, une première lors de la première année (20/11/2023) et une lors de la deuxième année (11/06/2024).

L'intérêt d'une telle collaboration était de bénéficier de l'expérience de chacun sur les différents aspects étudiés dans le projet GECОВI.

Déroulement des étapes de travail

Déroulement de la phase technique du projet GECОВI

Le travail de collecte des données s'est effectué sur deux années, avec une phase printanière pour les relevés de végétation et une phase estivale pour les prélèvements de combustible à brûler. Une grande partie de la première année a été consacrée à la mise en place du plan d'échantillonnage (recherche des données sur les différents traitements du combustible et vérifications terrain).

Entre chaque phase, le travail a consisté à traiter les données obtenues, faire les présentations dans les différentes actions de communications prévues dans le cadre du projet (Séminaire de médiation scientifique et colloque de restitution ; voir dossier communication) et celles qui s'y sont rajoutées (différents congrès et webinaire AFORCE, voir dossier communication).

Les actions de communication (voir dossier de communication)

Le séminaire de médiation scientifique

7 mai 2024 à Lamanon en partenariat avec le Parc naturel régional des Alpilles, le master de médiation scientifique d'AMU et l'association Les petits débrouillards

Public cible : Professionnels de la gestion du risque (ONF, SDIS, CCFF), élus des communes de PNR des Alpilles, grand public, scolaires (annexe 10)

Nombre de participants (annexe 11) : 35 personnes + 6 classes de l'école de Lamanon : 120 élèves avec les CE2, CM1 et CM2 engagé depuis 2 ans sur la forêt fait école.

Le mardi 7 mai 2024 s'est tenu à la Maison du temps libre de Lamanon (13) le séminaire de médiation scientifique organisé par INRAE en partenariat avec le Master Médiation scientifique d'Aix-Marseille-Université (AMU), l'association « les petits débrouillards » et le Parc Naturel Régional (PNR) des Alpilles dans le cadre du programme de recherche GECovi. Le thème de ce rassemblement était de communiquer sur la gestion du risque incendie de forêt par le débroussaillage au travers de la présentation vulgarisée des résultats obtenus dans le cadre de GECovi et lors d'autres projets d'INRAE plus généralement en lien avec le risque incendie.

D'un côté, des professionnels de la gestion du risque incendie et des forêts, mais aussi des représentants des communes du PNR des Alpilles se sont réunis pour assister à la présentation orale des résultats scientifiques ou de posters suivis d'un temps de discussion. De l'autre, les enfants de l'école primaire de Lamanon ont pu participer à différents ateliers sur la thématique de la prévention du risque incendie et du débroussaillage mis en place par les étudiants du Master médiation scientifique d'AMU en partenariat avec l'association « Les Petits débrouillards ». Les élèves ont également pu assister à une reconstitution d'expériences de brûlage de végétation en laboratoire menées dans le cadre du programme GECovi.

Le colloque de restitution

14 novembre 2024 au Tholonet

Public cible : Institutionnels, gestionnaires du feu, de la forêt et des espaces protégés, propriétaires forestiers, bureaux d'études et associations environnement, laboratoires de recherche.

Nombre de participants (annexe 13): 61 personnes dont 2 en visioconférence.

Le colloque de restitution du projet GECovi « Réduction du risque incendie : quel type de gestion du combustible pour quel type de végétation, dans quel type d'interface », porté par l'Unité EMR RECOVER à l'INRAE et soutenu par le RMT AFORCE dans le cadre de son appel à projets 2022, s'est tenu le jeudi 14 novembre au Tholonet (site INRAE).

La matinée a été consacrée aux restitutions des résultats issus de ce projet : i) Impact des différentes mesures de traitement du combustible sur l'inflammabilité et ii) Impact du traitement du combustible sur la biodiversité végétale et l'état sanitaire des peuplements arborés, suivies de leur discussion avec le public.

Une table ronde s'est tenue après-midi sur la thématique « Conciliation entre protection de la nature et prévention des incendies de forêt : quels compromis dans la mise en œuvre des obligations légales

de débroussaillage ? » et a suscité de nombreux débats. Elle rassemblait des personnes issues de la DPFM, DREAL PACA, ONF DFCI, DIRMED, SDIS 13, INRAE URFM (réseau coupure de combustible) et de bureaux d'études spécialisés en biodiversité et DFCI (Annexe 14).

Webinaire RMT AFORCE :

17 juin 2024 par visio-conférence

Public cible : Membre du réseau RMT AFORCE lié à la forêt, son exploitation, sa gestion ainsi que la prévention et la gestion des incendies.

Webinaire organisé par le RMT Aforce pour passer en revue et présenter à l'ensemble de ses membres les projets en cours, terminer récemment ou qui se termineront bientôt. Une présentation rapide (environ 5 minutes) du projet GECovi a été réalisée avec un point sur ce qui avait été fait, l'intérêt de ce projet et à qui les résultats profiteraient.

Intervention 33eme rencontre nationales du réseau de l'emploi intégré du feu :

21 novembre 2024

Public cible : Professionnels de l'utilisation du feu (feu tactique, contre-feu...), la lutte contre le feu, Chercheurs sur le feu et son impact et Institutionnels.

Nombre de participants : environ 200 personnes

Chaque année a lieu les rencontres nationales des équipes de brûlages dirigés, accompagné d'experts de la recherche. Ce rassemblement est l'occasion de discuter de l'emploi du feu en général, de faire des retours d'expérience sur son utilisation, du développement de son utilisation et des effets du feu sur l'environnement ou encore son acceptation sociale. C'est dans ce cadre que nous participons à une table ronde afin de présenter les résultats de l'étude sur l'inflammabilité de la végétation après traitement mais en concentrant le discours sur la modalité du brûlage dirigé.

Intervention médiation Chercheurs INRAE – Enseignants :

15 mai 2024

Public cible : Enseignants niveau collège, lycée et lycée agricole.

Nombre de participants : 20

Le 15 mai 2024 à l'initiative du service médiation scientifique de l'INRAE Avignon, une journée de médiation scientifique a été organisée auprès d'enseignants de collège, lycée et lycée agricole afin qu'ils puissent constituer des projets de travail sur la thématique de l'environnement à travers de nombreux sujets. Ainsi une présentation vulgarisée des résultats du projet GECovi ainsi qu'un contexte sur la prévention du risque incendie ont été présentés.

7eme congrès international sur le comportement du feu et le combustible :

15 avril 2024 – 19 avril 2024

Public : Chercheurs internationaux sur le risque incendie.

Nombre de participants : 100 – 150 personnes sur le site de Tralee.

Congrès international organisé par l'International Association of Wildland Fire sur 3 sites Tralee – Ireland, Boise – USA and Camberra - Australia. Avec pour thématique : « le combustible, le feu et la fumée : évoluer pour relever le défi du climat », ce congrès a rassemblé de nombreux chercheurs internationaux du risque incendie feu de forêt, sa prévention et sa gestion. A l'occasion d'une session de présentation de poster le mardi 16 avril 2024 un poster résumant le contexte, le travail effectué jusqu'à présent et les résultats de la partie inflammabilité du projet GECOVl a pu être présenté et a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs.

Phase 1 : Impact du traitement du combustible sur l'inflammabilité de la végétation résiduelle

1. Introduction

De par un climat sec en été, les zones méditerranéennes (dont le sud de la France) sont particulièrement touchées par les incendies avec des milliers d'hectares qui brûlent chaque année (Dupuy et al. 2020). Ce risque est particulièrement présent dans les zones d'interfaces avec la forêt, que ce soit l'interface habitat-forêt ou bien avec différents réseaux tels que les routes, les lignes électriques, etc. qui constitue l'interface réseaux-forêt. En effet, on observe que quasiment un départ de feux sur deux se produisent en zone d'interface habitat-forêt et que les routes sont les principaux lieux d'éclosions des feux (>80%) en zone d'interface réseau-forêt (Chappaz & Ganteaume, 2021).

En réponse à ce risque, une importante réglementation et de nombreuses initiatives ont été mise en place pour prévenir et lutter contre les incendies et cela particulièrement après de grands événements marquant tel que les grands feux de 1989 et 1990. L'une de ces méthodes de prévention du risque incendie, très importante dans la stratégie française est le traitement du combustible. Cela consiste à réduire la biomasse combustible et briser les continuités de végétation tant horizontales que verticales pour endiguer ou ralentir la propagation et l'intensité du feu. Pour ce faire il existe différentes méthodes de traitement du combustible, qui peuvent être combinées dans le temps et qui sont utilisées en fonction : du type de végétation, du type de terrain, des enjeux à défendre, etc., avec des intervalles de retour propres à chacune.

On compte parmi ces méthodes :

- **Le broyage mécanique véhiculé** : Utilisation de différents engins agricoles ou forestiers équipés de broyeurs pour réduire la densité de végétation aérienne basse et au sol laissant ou pas sur place les rémanents de coupe. Participe également à l'élagage.
- **Le fauchage mécanique** : adaptations du broyage mécanique plus orienté sur la coupe des herbacées de bord de route.
- **Le débroussaillage mécanique manuel** : Utilisation d'une débroussailleuse manuelle ou à couteaux broyeurs pour réduire la densité de végétation aérienne basse et au sol tant que les parties ligneuses ne sont pas trop importantes.
- **Le 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.
- **Le pastoralisme** : Ensemble des activités d'élevage valorisant par un pâturage extensif les ressources fourragères spontanées des espaces naturels. Il est possible de faire du pastoralisme avec toutes sortes d'animaux : chèvres, moutons, vaches, lamas, alpacas, etc.

D'autres méthodes existent mais sont généralement peu employées ou désuètes au vu des enjeux environnementaux.

Cependant, l'efficacité de ces méthodes de traitement sur la réduction de l'aléa incendie n'a que rarement été étudiée et les travaux passés se sont plus concentrés sur la réponse de la végétation après brûlage dirigé. L'un des objectifs de ce projet GECIVI est de mesurer et vérifier l'effet de différents traitements sur l'inflammabilité de la végétation

2. Description de la méthode de travail

2.1 Sélection des méthodes et plan d'échantillonnage :

Après entretien avec différents acteurs (Conseil départemental 13 – direction de la forêt ; SDIS 13 ; ONF, etc.) du domaine de la prévention du risque incendie et de la gestion du débroussaillage, et après la prospection sur le terrain pour identifier des zones débroussaillées, il a été décidé de travailler sur les méthodes de traitement du combustible les plus fréquemment utilisées dans les Bouches du Rhône (mais aussi ailleurs dans le monde) et pour lesquelles nous avons le plus de données.

Ces méthodes sont (Fig. 1): le **broyage mécanique** (BM), le **brûlage dirigé** (BD), le **fauchage manuel** avec le rotofil (RT) ainsi que le fauchage mécanique des herbacées de bord de route à l'épareuse. Lors du fauchage, les rémanents de coupe sont laissés sur place (FA), mais nous avons voulu également tester une modalité sans rémanent (FS) pour le fauchage mécanique afin de voir si l'effet sur l'inflammabilité variait.



Figure 1 : Méthodes de traitement du combustible sélectionnées.

Deux types de végétation sont concernés par ces différentes méthodes de traitement du combustible :

- La garrigue à *Quercus coccifera* (ou chêne kermès) sous pinède en bord de piste DFCI dans les massifs forestiers pour le broyage mécanique et le brûlage dirigé.
- Les herbacées pour le fauchage mécanique de bord de route (spécifiquement le brome, *Bromus erectus*) et le fauchage manuel avec le rotofil (*Oloptum sp.*).

Pour chacune des modalités de traitement prises en compte dans le plan d'échantillonnage (Fig. 2), plusieurs sites de prélèvements ont été sélectionnés, afin de considérer la variabilité spatiale, et un certain nombre d'échantillons ont été collectés sur ces sites (10 ou 15 échantillons si 3 ou 2 sites sont sélectionnés). Pour chaque site de prélèvement dans de la végétation traitée, on prend systématiquement en compte un site de prélèvement de végétation témoin (i.e. non traité) à côté ou très proche pour être dans des conditions environnementales similaires. On obtient au total 30 échantillons à brûler pour chaque modalité ainsi que 30 échantillons témoin.

Afin d'approfondir l'étude, l'impact de l'intervalle de retour du traitement a également été pris en compte (sauf pour le fauchage mécanique ou manuel car ces traitements ont lieu annuellement, voire plusieurs fois par an). Ainsi pour le broyage mécanique et le brûlage dirigé, plusieurs intervalles de retour ont été étudiés (sachant que les traitements sont généralement refaits tous les 3 ou 4 ans) :

- T0 – l'année du traitement,

- T1 – 1 an après le traitement,
- T2 – 2 ans après le traitement.

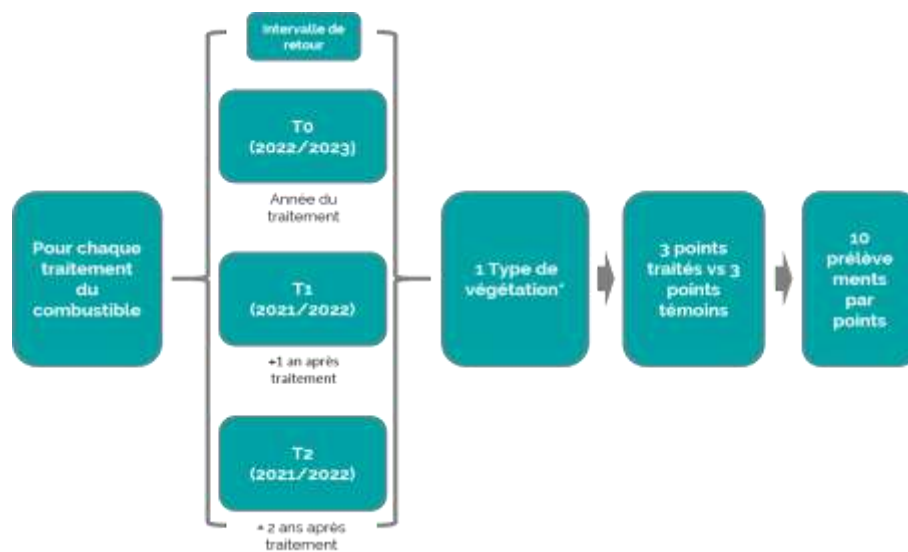


Figure 2 : Plan d'échantillonnage du projet GECOVl partie inflammabilité.

Pour chaque modalité et chaque intervalle de retour, 30 échantillons de végétation ont été récoltés et brûlés.

Les prélèvements de végétation ont été réalisés dans différents massifs (le long des pistes DFCI) ou bords de route des Bouches du Rhône (Alpilles, Côte bleue, Grand Caunet, Sainte Baume et D7N) (Fig. 3).

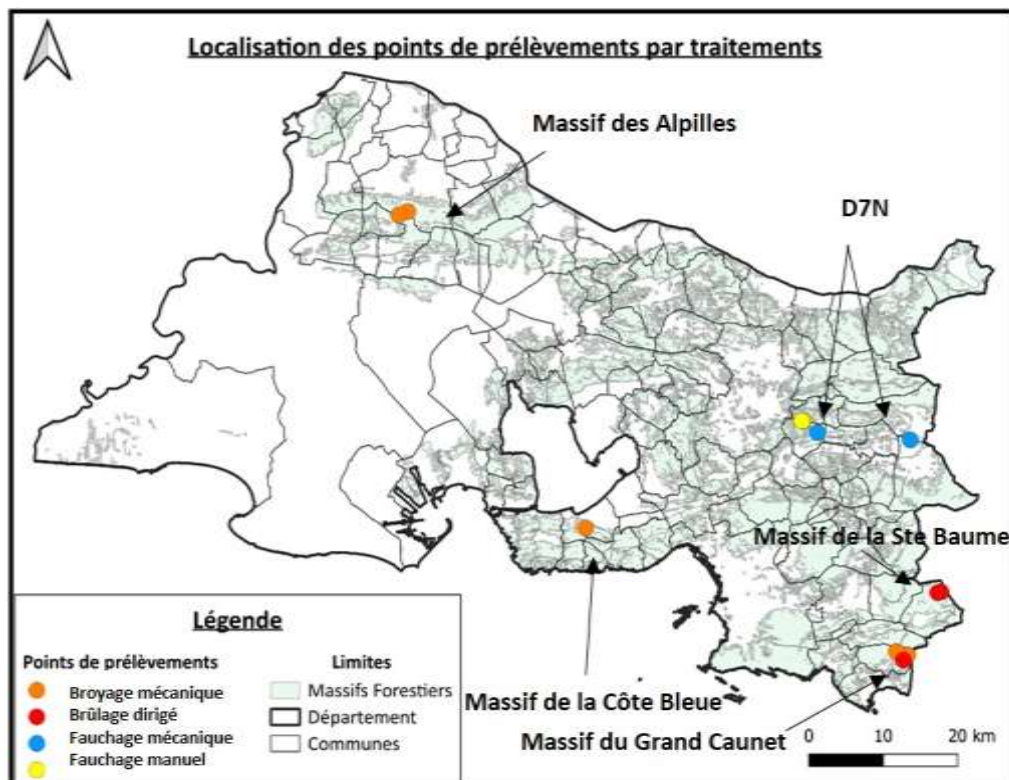


Figure 3 : Carte des sites de prélèvement des modalités étudiées

2.2. Protocole de prélèvement :

2.2.1. Prélèvement de végétation ligneuse :

Pour les prélèvements de végétation ligneuse (chêne Kermès) traitée, les barquettes d'échantillonnage en aluminium (30*23 cm) sont réparties aléatoirement sur de la végétation continue et l'on vient couper à ras du sol l'ensemble de la végétation puis l'on vient prélever la litière en dérangeant la structure le moins possible avec une pelle plate (Fig. 4). On place ensuite la litière dans une barquette avec la végétation coupée par-dessus et on range le tout dans une boîte de transport.

Pour la végétation témoin, la méthode de prélèvement est similaire sauf que les branches coupées sont regroupées en fagots au vu de leur taille.



Figure 4 : Photos de prélèvement de végétation ligneuse traitée (gauche) et de végétation témoin (droite)

Une fois rentrés au laboratoire, on conserve les échantillons dans une chambre climatique réglée sur 20°C et 60 % d'humidité afin de limiter les pertes en humidité de la végétation jusqu'à la session de brûlage le lendemain. Cela ne s'applique cependant pas à la végétation témoin qui a été prélevée et brûlée le jour même pour des raisons logistiques.

On conserve également trois échantillons pour mesurer différents paramètres de la végétation avant brûlage. Ainsi, avec le premier, on réalise une mesure du contenu hydrique de la végétation (FMC) en pesant au moins 5g de végétation de l'échantillon puis en le conservant 48h à 60 °C. A la fin des 48h, on mesure le poids sec et on détermine le contenu hydrique de la végétation ($FMC = \frac{\text{poids frais} - \text{poids sec}}{\text{poids sec}} \times 100$). Avec les deux autres échantillons, on mesure différents traits de la végétation pouvant affecter l'inflammabilité : la hauteur de la végétation, la densité apparente de la végétation traitée, la proportion d'éléments inférieurs à 2 mm et supérieur à 2 mm dans la litière après en avoir mis quelques grammes de côté (au moins 10 g). On réitère les mesures de contenu hydrique de la végétation le lendemain avant le début de la session de brûlage et à la fin de cette dernière.

2.2.2. Protocole de prélèvement des herbacées :

Pour la végétation herbacée, on place l'emporte-pièce ou moule à la taille des barquettes sur les herbacées puis on vient l'enfoncer dans le sol à l'aide d'un maillet (Fig. 5). On dégage la terre devant le côté ouvert du moule puis on extrait l'échantillon à l'aide d'une truelle que l'on vient passer en dessous. Enfin on place l'échantillon dans une barquette (24*15 cm). A la différence des ligneux, les herbacées doivent être brûlés le jour même car le contenu hydrique diminue très rapidement après la

coupe. Trois échantillons sont également conservés pour la mesure des différents paramètres de la végétation échantillonnée.



Figure 5 : Photo de prélèvement de végétation herbacée.

2.3. Protocoles de brûlage

Le montage du banc expérimental ainsi que du protocole de brûlage sont inspirés et dérivés de protocoles réalisés dans des études antérieures (e.g. Ganteaume et al 2009, Marino et al 2012 ; Romero & Ganteaume, 2021).

2.3.1. Montage du dispositif de brûlage

Pour les échantillons de végétation traitée (ligneux et herbacées) (Fig. 6) et pour les herbacées témoin, le banc de brûlage utilisé en laboratoire (Fig. 7) est constitué d'une balance enregistrant la perte de masse au cours du brûlage, protégée de la chaleur par une plaque syporex. 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. Les fluxmètres sont refroidis en continu. 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 devant le banc à environ 1m qui enregistrera l'ensemble des brûlages. Cela permettra de valider par vidéo la hauteur de flamme et la vitesse de propagation. A droite à 70 cm de haut et incliné à 45°, se trouve une source de vent qui souffle vers le centre du banc à une vitesse de 9.8 km/h (uniquement utilisée lors du protocole « ignition », voir ci-dessous). Sur le côté, un chronomètre permet de mesurer le délai d'ignition et durée d'inflammation.



T0 (environ 10 cm de haut)
Broyage : Densité de végétation = 25,1 kg/m³
Bûlage dirigé : Densité de végétation = 3,12 kg/m³



T1 (environ 20 cm de haut)
Broyage : Densité de végétation = 4,21 kg/m³
Bûlage dirigé : Densité de végétation = 3,1 kg/m³



T2 (environ 30 cm de haut)
Broyage : Densité de végétation = 6,5 kg/m³
Bûlage dirigé : Densité de végétation = 6,5 kg/m³



Témoin non traité (environ 95 cm de haut)
Densité de végétation = 34,4 kg/m³



Échantillon **AVEC** rémanents
Densité de végétation = 31,2 kg/m³



Échantillon **SANS** rémanents
Densité de végétation = 6,2 kg/m³



Échantillon témoin non traité
Densité de végétation = 1,4 kg/m³



Échantillon traité au rotatif
Densité de végétation = 9,7 kg/m³



Échantillon témoin non traité
Densité de végétation = 1,27 kg/m³

Figure 6 : Exemples d'échantillons de végétation brûlée en laboratoire ou en extérieur : 1^{ère} ligne : Echantillons de *Quercus cocci-fera* prélevés à différents intervalles de retour après traitement et le témoin ; 2^{ème} ligne : Herbacées de bord de route fauchées à l'épaveuse avec ou sans rémanents de coupe et le témoin ; 3^{ème} ligne : Herbacées de bord de route fauchées au rotatif et le témoin



Figure7 : Banc de brûlage en laboratoire.

Pour les échantillons de végétation ligneuse témoin, le banc de brûlage est déplacé en extérieur (Fig. 8) pour s'adapter à la taille des échantillons (trop hauts pour être brûlés en laboratoire). La mise en place est identique à l'exception d'un fluxmètre et d'un thermocouples rajoutés à 1m de hauteur. 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.



Figure 8 : Banc de brûlage en extérieur

Pour procéder aux brûlages, les échantillons sont placés dans une grille de maintien positionnée sur la barquette.

2.3.2. Les différents protocoles de brûlage :

Deux types d'expériences différentes sont réalisées en laboratoire en fonction de la phase du comportement du feu que l'on veut étudier. Le montage du banc de brûlage est identique pour les 2 protocoles.

2.3.2.1. Protocole relatif à l'ignition

Pour ce premier protocole, l'ignition est réalisée grâce à un brandon incandescent (cube de *Pinus sylvestris* de 2*2*1 cm) que l'on dépose au centre de l'échantillon, afin d'étudier le départ du feu. Le but de ce protocole est ainsi de simuler l'ignition par mégot de cigarette jeté en bord de route (ou de piste) avec du vent, également pour simuler le passage des voitures (Fig. 9.1). Cette expérience est reproduite au maximum 2 fois par échantillon sauf si l'ignition a lieu au premier essai.

Ce type d'expérience nécessite une source de vent (9.8 km/h) tous le long de l'essai. Les enregistrements vidéo, de perte de masse et de température émise sont lancés à partir du moment où le brandon incandescent est déposé sur l'échantillon (l'enregistrement des flux est réalisé en continu). On relève le temps où les flammes s'éteignent pour avoir la durée d'inflammation et on arrête le chronomètre et les autres appareils de mesure une fois la combustion avec flamme de l'échantillon terminée.

2.3.2.2. Protocole relatif à la propagation du front de flamme :

Pour le deuxième protocole, on cherche à étudier la propagation du feu avec un front de flamme déjà établi que l'on obtient en enflammant une ligne d'alcool positionnée dans la largeur de l'échantillon (Fig. 9.2) ou de la frisure de bois pour les témoins ligneux. Il est sensé simuler l'arrivée depuis la forêt du front de flamme sur la zone débroussaillée. La grande différence de ce protocole est qu'il n'y a pas de source de vent utilisé et que l'ignition est déclenchée volontairement.

L'allumage est synchronisé avec le début des enregistrements de la vidéo, de perte de masse et de température émise.



Figure 9 : Illustration des 2 protocoles de brûlage : 1 – ignition, 2 – propagation

2.4. Les variables mesurées

2.4.1. Variables d'inflammabilité

Au cours des brûlages différentes variables sont enregistrées (ou calculées à posteriori) correspondant aux composantes de l'inflammabilité : capacité à s'enflammer ou ignitabilité (1 & 2), durabilité des flammes (3) et combustibilité (4-9) d'après Anderson (1970) :

- **1. Fréquence d'ignition (%)** : Pourcentage des tests d'ignition réussis par rapport au nombre de tests total. L'ignition avec la ligne d'alcool est systématique (100% d'ignition).
- **2. Délai d'ignition (s)** : Normalement mesuré avec un chronomètre à partir du moment où on dépose le brandon ou qu'on allume la ligne d'alcool lors de l'essai mais cela peut être vérifié ou confirmé grâce à la vidéo de l'essai.
- **3. Durée d'inflammation (s)** : Normalement mesurée avec un chronomètre lors de l'essai mais cela peut être vérifiée ou confirmée grâce à la vidéo de l'essai.
- **4. Propagation du feu (par nombre de côtés de la barquette atteints par les flammes)** : Constatée visuellement à la fin de chaque brûlage. Difficilement vérifiable à la vidéo.
- **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)** : Simplement extraite de l'enregistrement des thermocouples situé à 10 et 40 cm au-dessus de l'échantillon. Pour les témoins ligneux, la température à 1m 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). Pour ce faire il faut suivre la formule : (tension* 1000000) / coefficient du fluxmètre.
- **8. Vitesse de propagation (m/s)** : Grâce à la vidéo, il est possible de déterminer la distance parcourue par le feu même si elle n'atteint pas l'autre bord de la barquette (L=30 cm) et le temps qu'il a fallu aux flammes pour parcourir cette distance. Un simple calcul de vitesse est appliqué pour obtenir la vitesse de propagation.
- **9. Puissance du front de flamme (kW/m)** : La puissance du front de flamme est calculée à l'aide de l'équation de Byram : Puissance = Masse du combustible consommée * Chaleur spécifique de l'espèce * vitesse de propagation. Les coefficients de chaleur spécifique de l'espèce sont : 19 253 J/g pour *Quercus coccifera* ; 18707 J/g pour le Brome (et Oloptum).

2.4.2. Variables extérieures prises en compte

Différentes covariables sont également relevées notamment au niveau de la végétation de l'échantillon avant brûlage et du site de prélèvement (Fig 10). Ces co-variables peuvent en effet avoir un effet sur l'inflammabilité dont il faudra s'affranchir de façon à ne mesurer que l'effet du traitement. Pour ce faire, un modèle linéaire multivarié, codé sur le logiciel Rstudio, est appliquée à chacune des variables d'inflammabilité avec les covariables en facteurs explicatifs (excepté pour la propagation qui est exprimée en nombre de côtés de la barquette atteints qui lui est traité par un modèle linéaire généralisé ou GLM car la variable n'est pas continue). Les co-variables n'ayant pas



Figure 10 : Les différentes catégories de co-variables prises en compte dans l'étude

un effet significatif sont supprimées du modèle. Pour chaque variable d'inflammabilité, les résidus de la distribution dans les modèles ainsi obtenus – i.e. la proportion des données non affectée par la co-variable - sont ensuite extraits et utilisés dans les analyses statistiques visant à évaluer l'effet du traitement sur chaque variable ainsi traitée.

Pour la végétation des échantillons prélevés, les covariables prises en compte sont :

- **Contenu hydrique (FMC, %):** Il s'agit de la proportion d'eau dans les feuilles de la végétation résiduelle. Il est possible de la calculer simplement à l'aide de la formule : $FMC = 100 * ((\text{Poids frais} - \text{poids sec}) / \text{Poids sec})$. Pour obtenir les différents poids, il faut peser la végétation d'un échantillon après prélèvement pour obtenir le poids frais, puis la mettre dans une étuve à 60°C pendant 48 heures puis repeser la végétation sèche pour obtenir le poids sec.
- **Densité apparente (kg/m³):** Il s'agit du poids de végétation résiduelle par mètre cube. Pour la calculer il faut mesurer le volume occupé par la végétation d'un échantillon ($V = \text{surface} * \text{hauteur}$), puis peser cette végétation. On peut ensuite appliquer la formule : $\text{Densité apparente} = \text{Poids} / \text{Volume}$
- **Epaisseur de litière (cm) :** c'est la hauteur maximum de résidus végétal mort au sol constituant la litière de la végétation, 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.
- **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).

Ces covariables ont un effet direct sur les variables de l'inflammabilité.

Lorsque plusieurs sites sont prospectés pour un même traitement (brûlage dirigé ou broyage mécanique), les covariables de site prises en compte sont (Tab. 1):

- **Exposition :** Orientation du site de prélèvement. Dans notre cas les sites de prélèvements ont principalement une exposition sud ou sud-est.
- **Altitude (m) :** Elévation du site de prélèvement par rapport au niveau de la mer.
- **Moyenne des précipitations sur les 3 derniers mois (mm) :** Moyenne des précipitations enregistrées par les stations météo les plus proches des sites de prélèvement sur les 3 derniers mois depuis la date de prélèvement.
- **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.
- **Date de prélèvement :** date à laquelle a eu lieu le prélèvement de la végétation.
- **Le site en général** (prenant ainsi en compte d'autres covariables non mesurées)

Les covariables 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 précipitation et l'exposition vont influencer sur la croissance de la végétation, végétation dont ensuite les caractéristiques propres vont influencer l'inflammabilité.

Tableau 1 : Covariables des sites de prélèvement pour le broyage mécanique et le brûlage dirigé.

Cova-riables	Modali-tés	Fré-quences	Localisa-tion	Exposi-tion	Altitude	Moyenne des tem-pératures (30 jours)	Moyenn e des précipi-tations (3 mois)	Date de prélève-ment
Site AL 1	Broyage	T0	Alpilles	Sud-Ouest	260	25,014	137,7	12/07/2023
Site AL 2	Broyage	T1	Alpilles	Sud-Ouest	240	26,221	131,9	25/07/2023
Site AL 2	Broyage	T2	Alpilles	Sud-Ouest	240	19,109	48,9	15/07/2024
Site GC 1	Broyage	T0	Grand Caunet	Sud-Ouest	350	25,019	44,6	19/07/2023
Site GC 2	Broyage	T1	Grand Caunet	Sud	430	25,229	135,4	07/09/2023
Site GC 2	Broyage	T2	Grand Caunet	Sud	430	18,343	430	18/07/2024
Site CB 1	Broyage	T1	Côte Bleue	Sud	200	25,261	90,3	08/09/2023
Site CB 1	Broyage	T2	Côte Bleue	Sud	200	18,815	31,2	04/07/2024
Site GC 3	Brûlage dirigé	T0	Grand Caunet	Sud-Ouest	380	24,933	44,6	26/07/2023
Site SB 1	Brûlage dirigé	T1	Sainte Baume	Sud	620	25,465	169,6	11/08/2023
Site SB 1	Brûlage dirigé	T2	Sainte Baume	Sud-Ouest	610	25,229	135,4	17/08/2023
Site SB 2	Brûlage dirigé	T1	Sainte Baume	Sud	620	22,7	85	08/07/2024
Site SB 2	Brûlage dirigé	T2	Sainte Baume	Sud-Ouest	610	22,9	83	10/07/2024
Témoin AL	Témoin	Témoin	Alpilles	Sud-Ouest	260	25,408	108,7	24/08/2023
Témoin GC	Témoin	Témoin	Grand Caunet	Sud	430	24,538	28,4	23/08/2023

Témoin CB	Témoin	Témoin	Côte Bleue	Sud	200	25,634	62,7	22/08/2023
Témoin SB	Témoin	Témoin	Sainte Baume	Sud-Ouest	610	21,401	68,3	30/07/2024

2.4.3. Analyses statistiques

Les analyses ont été effectuées avec le logiciel Statgraphics – 19. Pour chaque méthode de traitement de la végétation, des ANOVAs à un facteur ont été réalisées sur les jeux de données de résidus obtenus pour chacune des variables d’inflammabilité, sauf si aucune des covariables n’influçait la variable d’inflammabilité. Une première ANOVA prend les différentes variables d’inflammabilité en facteur à expliquer et la modalité de l’échantillon en facteur explicatif (méthode de traitement et témoin). Une deuxième ANOVA prendra cette fois l’intervalle de retour de chaque traitement en facteur explicatif. Un test des étendues multiples suivis d’un test de Fischer permet de mettre en avant les différences entre la modalité et le témoin ou les différentes fréquences et le témoin.

Dans le cas où la distribution des données ne suit pas une loi normale, il est possible de les transformer par une relation logarithmique ou par racine carré pour remplir les conditions de normalités. Si les données ne sont toujours pas normales de cette façon, un test non paramétrique (Kruskal-Wallis) est appliqué (comparaisons de médianes et non de moyennes). Dans cette situation, pour mettre en évidence les différences entre la modalité et le témoin ou entre les différents intervalles et le témoin, un test de Bonferroni est réalisé.

3. Résultats

3.1. Sélection des covariables

Pour le broyage mécanique (Tab. 2), les covariables ayant un effet significatif sur la majorité des variables d’inflammabilité (8/9) sont le site, le contenu hydrique de la végétation et l’exposition du site (toutes avec des effets plus ou moins marqués selon les variables d’inflammabilité sur lesquelles elles jouent). La date de prélèvement, l’altitude, la quantité de précipitations et densité de végétation affectent de 5 (pour la dernière citée) à 7 variables (pour la première), avec des effets plus ou moins marqués selon la variable, voire faibles (la date et la densité). Ensuite, la proportion d’aiguilles, l’épaisseur de litière, et la température n’affectent aucune (la première) ou 3 variables (les deux dernières) mais avec des effets plus ou moins marqués selon la variable considérée. En majorité, ces co-variables ont un effet positif sur des variables mesurées (augmentant donc l’inflammabilité, hormis les précipitations qui dans l’ensemble ont un effet négatif). L’effet site est significatif pour les variables de l’inflammabilité (sauf pour la durée d’inflammation), avec des effets généralement faibles (sauf pour la température à 10 cm et le flux à 40 cm pour lesquels les coefficients sont très élevés pour l’ensemble des sites), augmentant ou diminuant l’inflammabilité selon les sites et les variables.

Pour le brûlage dirigé (Tab. 3), l’épaisseur de litière, la date de prélèvement (coefficients très faibles) et l’exposition du site affectent de 4 (la dernière covariable) à 7 (la première) variables d’inflammabilité sur les 9 mesurées, avec des effets généralement faibles à très faibles (sauf pour l’épaisseur de litière qui présente des coefficients de magnitude variable selon la variable considérée). La densité de végétation (coefficients de très faible à moyen et majoritairement négatifs), la température des 30 derniers

jours (coefficients de très faible à très fort et majoritairement positifs), la proportion d'aiguilles (coefficient très faible) et les précipitations (coefficient très faible) n'affectent qu'une (les deux dernières covariables) ou 3 variables (les deux premières covariables). En majorité, ces covariables augmentent l'inflammabilité. L'effet site est significatif sur 5 des variables d'inflammabilité, avec un effet fort pour la durée d'inflammation et le flux à 40 cm, augmentant ou diminuant l'inflammabilité selon les sites et les variables (sauf pour la température à 10 cm pour laquelle tous les sites ont un effet négatif et à l'inverse pour la puissance du front de flamme).

A noter que le contenu hydrique et l'altitude ne présentent pas d'effet significatif sur l'inflammabilité, quelle que soit la variable considérée et que la propagation est la seule variable d'inflammabilité qui n'est affectée par aucune covariable.

3.2. Analyse de l'effet des traitements sur l'inflammabilité

3.2.1. Broyage mécanique (BM)

Tous les résultats concernant le broyage mécanique sont présentés dans le Tab. 7.

Les tests sur l'ignition au brandon pour le broyage mécanique ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les fréquences d'ignition de la végétation traitée (5,3 %) et le témoin (0 %) ($KW = 1,96198$; $P = 0,161298$). Cependant, l'intervalle de retour affecte significativement la fréquence d'ignition ($F = 8,31$; $P < 0,0001$) où la fréquence d'ignition pour T0 (13,7 %) est clairement plus grande que celles pour le témoin, T1 et T2 (entre 2,9 % et 0 %). Ensuite, il n'y a pas de différences entre T1, T2 et le témoin. Cette similarité dans les fréquences d'ignition avec le témoin se retrouve également pour l'ignition à l'alcool pour la modalité en général et les différents intervalles de retour (100% d'ignition dans tous les cas).

La durée d'inflammation des échantillons traités n'est pas significativement différente de celle des témoins, que ce soit concernant la modalité de traitement en général ($F = 0,00$; $P = 0,9592$) ou bien les intervalles de retour ($F = 2,66$; $P = 0,0567$).

Le BM n'entraîne pas de différence significative avec le témoin pour la propagation des flammes si l'on considère uniquement la modalité de traitement ($KW = 0,0023304$; $P = 0,961$). En revanche, si l'on s'intéresse aux intervalles de retours, il y a bien une différence significative ($KW = 9,71036$; $P = 0,0211949$) mais seulement entre T1 et T2 où T1 a une propagation significativement plus faible que T2.

La hauteur de flamme est quant à elle significativement réduite par le BM ($F = 41,05$; $P < 0,0001$) mais également pour les différents intervalles de retour ($F = 17,36$; $P < 0,0001$) puisque T0 présente les valeurs de hauteur les plus faibles, la hauteur de flamme pour T1 est supérieure à celle pour T0, celle pour T2 est supérieure à T1 et le témoin est supérieur à celles pour T0, T1 et T2.

La température maximum à 10 cm et à 40 cm n'est pas significativement différente du témoin (respectivement, pour 10 cm : $F = 1,31$; $P = 0,2542$ et pour 40 cm : $F = 0,02$; $P = 0,8885$).

Le BM réduit significativement le flux total reçu à 10 cm ($F = 34$; $P < 0,0001$) (Fig. 11) mais également à 40 cm ($F = 43,93$; $P < 0,0001$). Pour le flux total reçu à 10 cm, il y a une différence significative concernant les intervalles de retour ($F = 12,69$; $P < 0,0001$) où T0 et T1 présentent des valeurs similaires, le flux pour T2 est supérieur à celui de T0 et T1 et le flux pour le témoin est supérieur à ceux de T0, T1 et T2 (Fig. 12).

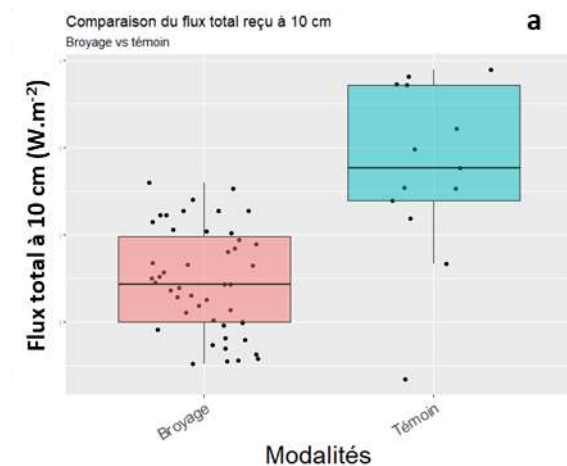


Figure 11 : Différence de flux total maximum reçu à 10 cm entre le broyage et le témoin

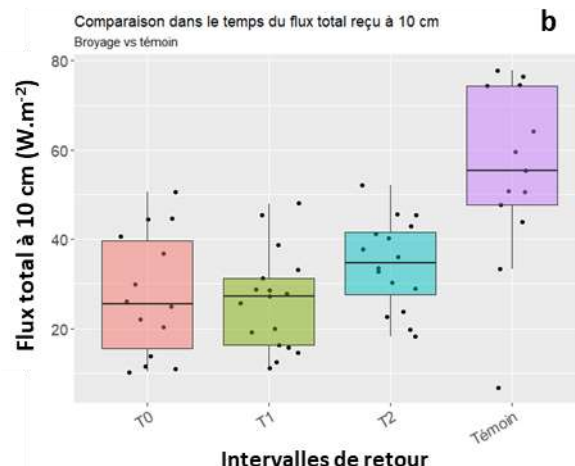


Figure 12 : Variations du flux total maximum reçu à 10 cm pour le broyage mécanique dans le temps

Pour le flux total reçu à 40 cm, il y a également une différence significative concernant les intervalles de retour ($F = 15,51$; $P < 0,0001$) où T0 présente les valeurs de flux les plus faibles, alors que le flux pour T1 est supérieur à celui obtenu pour T0, T2 est supérieur à T1 et le témoin étant supérieur à toutes (T0, T1 et T2).

La vitesse de propagation des flammes n'est pas significativement différente entre les échantillons traités par BM et les témoins ($F = 0,27$; $P = 0,6047$) et ne présente également pas de différences significatives dans le temps ($F = 0,20$; $P = 0,8956$).

L'intensité du front de flamme est significativement réduite par le BM ($F = 17,73$; $P = 0,0001$) (Fig. 13) et cela également dans le temps ($F = 11,06$; $P = 0,0001$) où la puissance pour T1 est la plus faible, les valeurs pour T0 et T2 sont plus significativement plus élevées que T1 et enfin le témoin présente des valeurs bien supérieures à celles obtenues pour T1, T0 et T2 (Fig. 14).

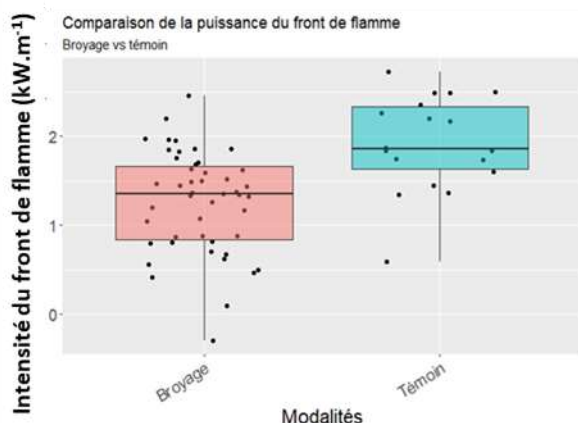


Figure 13 : Différence de puissance du front de flamme entre le broyage et le témoin

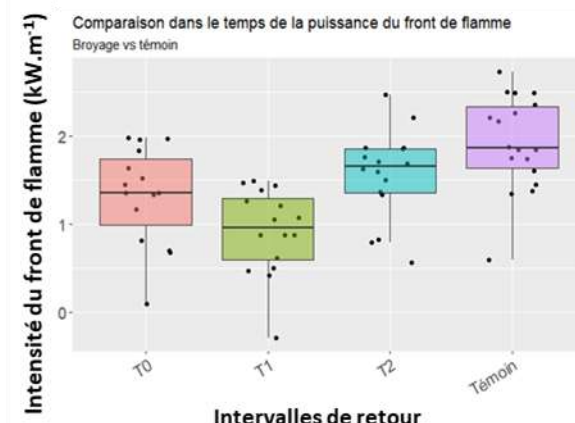


Figure 14 : Variations de la puissance du front de flamme pour le broyage mécanique dans le temps

3.2.2. Brûlage dirigé (BD)

Tous les résultats concernant le brûlage dirigé sont présentés dans le Tab. 8

Les tests pour l'ignition au brandon ont montré que le brûlage dirigé n'a pas d'effet significatif sur la fréquence d'ignition par rapport au témoin (1,1 % vs 0 %) ($KW = 0,38$; $P = 0,535$) et cela quel que soit l'intervalle de retour considéré ($T0 = 1,6$ % ; $T1 = 1,6$ % et $T2 = 0$ % vs 0 %) ($KW = 1,61$; $P = 0,66$). Cette similarité dans les fréquences d'ignition avec le témoin se retrouve également pour l'ignition à l'alcool pour la modalité en général et les différents intervalles de retour (100% d'ignition dans tous les cas).

Le brûlage dirigé n'influe pas sur la durée d'inflammation de la végétation par rapport au témoin ($F = 0,25$; $P = 0,62$) et cela pour n'importe quel intervalle de retour ($F = 0,33$; $P = 0,805$).

La propagation des flammes est significativement réduite par le BD par rapport au témoin ($KW = 8,41821$; $P = 0,004$). Il y a aussi une différence selon les intervalles de retour ($KW = 34,3383$; $P < 0,0001$) puisque à $T0$, la propagation est bien inférieure à celles de $T1$, $T2$ et du témoin qui eux ont des valeurs relativement similaires.

La hauteur de flamme après le BD est significativement plus faible que celle pour le témoin ($F = 32,32$; $P < 0,0001$). Il y a également des différences significatives concernant les intervalles de retour ($F = 11,79$; $P < 0,0001$) ; $T0$, $T1$ et $T2$ présentent des valeurs faibles mais pas significativement différentes les unes des autres. La hauteur de flamme pour le témoin est significativement plus élevée que celles pour $T0$, $T1$, et $T2$.

Le BD réduit significativement la température mesurée à 10 cm ($F = 13,46$; $P < 0,0001$) et à 40 cm ($F = 4,78$; $P = 0,032$). Concernant les intervalles de retour, pour la température maximum mesurée à 10 cm, il y a bien des différences significatives ($F = 13,46$; $P < 0,0001$) où $T2$ présente les valeurs les plus faibles, $T1$ est supérieur à $T2$, le témoin est supérieur à $T1$ (et donc aussi $T2$) et enfin, $T0$ est supérieur à tout le reste ($T2 < T1 < \text{Témoin} < T0$). Pour la température maximum mesurée à 40 cm, là aussi, il y a bien une différence significative ($F = 6,38$; $P = 0,0008$). Ainsi, $T2$ a les valeurs les plus faibles, $T0$ est supérieur à $T2$; $T1$ et le témoin présentent des valeurs supérieures à $T0$, mais qui ne sont pas significativement différentes l'une de l'autre.

Les flux de chaleur maximum reçus à 10 cm et 40 cm sont significativement réduits par le BD ($F = 18,31$; $P = 0,0001$ et $F = 60,32$; $P < 0,0001$, respectivement). Il y a également une différence significative concernant les intervalles de retour pour le flux total à 10 cm ($F = 3,21$; $P = 0,031$), où le flux pour $T1$ est le plus faible, $T0$ et $T2$ ne présentent pas de différence significatives et le témoin présente des valeurs supérieures à celles de l'ensemble des intervalles de retour. L'intervalle de retour présente aussi un effet significatif sur le flux total maximum reçu à 40 cm ($F = 19,68$; $P < 0,0001$) où les valeurs pour $T0$, $T1$ et $T2$ ne sont pas significativement différentes mais sont toutes très significativement inférieures à celle pour le témoin (Fig. 15 et 16).

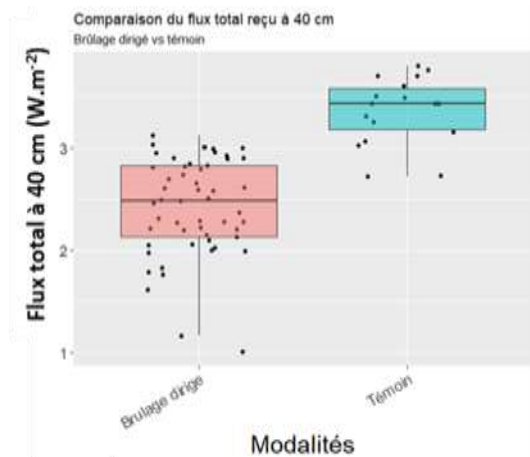


Figure 15 : Différence de flux total maximum reçu à 40 cm entre le brûlage dirigé et le témoin

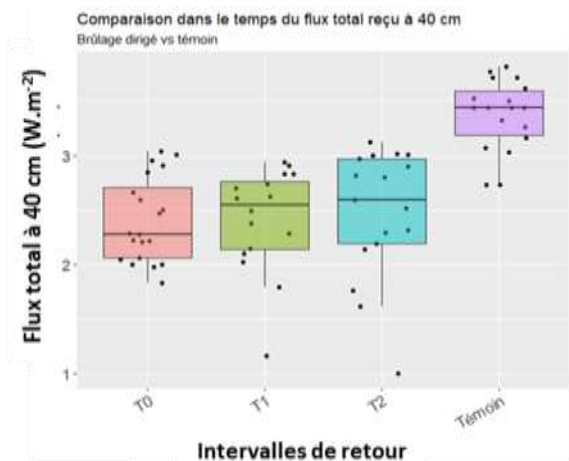


Figure 16 : Variations du flux total maximum reçu à 40 cm pour le brûlage dirigé dans le temps

La vitesse de propagation des flammes n'est pas significativement affectée par le BD ($F = 2,50$; $P = 0,1196$) et ne présente également pas de différences significatives dans le temps ($KW = 1,81$; $P = 0,61$).

L'intensité du front de flamme est significativement réduite par le BD ($F = 29,49$; $P < 0,0001$) (Fig. 17) et cela également concernant les intervalles de retour ($F = 27,22$; $P < 0,0001$) (Fig. 18) puisque la puissance pour T0 est la plus faible, celle pour T1 plus faible que celles pour T2 et pour le témoin, ce dernier présentant les valeurs de puissance significativement les plus élevées.

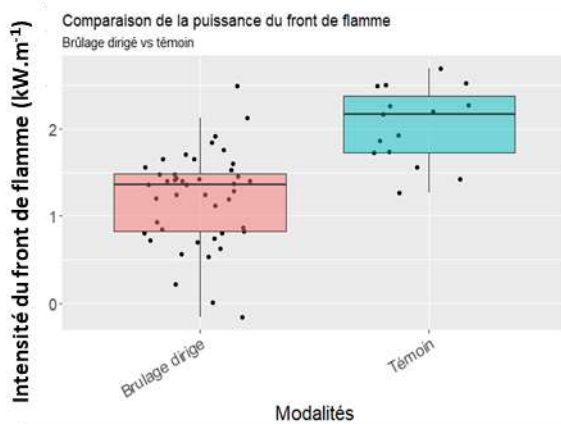


Figure 17 : Différence d'intensité du front de flamme entre le brûlage dirigé et le témoin

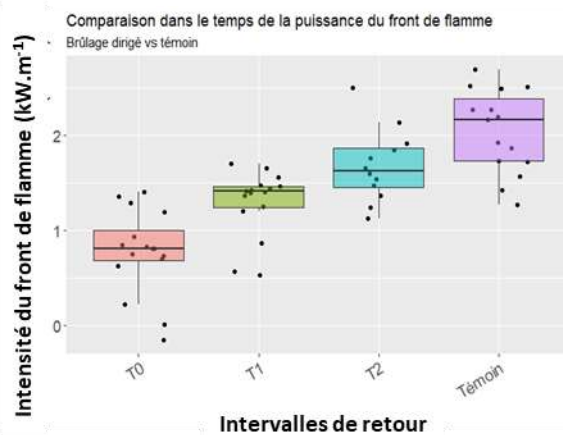


Figure 18 : Variation dans le temps de l'intensité du front de flamme pour le brûlage dirigé

Tableau 7 : Résultats des ANOVAs mettant en évidence l'effet du broyage mécanique sur l'inflammabilité (Ignition à la ligne d'alcool = 100 % ; NS = non significatif, **significativité des tests** : * si p entre 0.05 et 0.01, ** si p entre 0.01 et 0.001, *** si p entre 0.001 et 0.0001 et **** si p<0.0001)

BROYAGE MECANIQUE	Fréquence d'ignition brandon (%)	Durée inflammation	Propagation	Hauteur de flamme	Température maximum à 10 cm	Température maximum à 40 cm	Flux total à 10 cm	Flux total à 40 cm	Vitesse de propagation	Intensité du front de flamme
Comparaison modalité et témoin	NS	NS	NS	Transformation par racine carré : BM < Témoin ****	NS	NS	Transformation par racine carré : BM < Témoin ****	Transformation par racine carré : BM < Témoin ****	NS	Log transformés : BM < Témoin ****
Comparaison intervalle de retour et témoin	T0 > T1, T2 et Témoin ****	NS	T1 < T2 *	Transformation par racine carré : T0 < Témoin **** T1 < Témoin **** T2 < Témoin ****	NS	NS	Transformation par racine carré : T0 < Témoin **** T1 < Témoin **** T2 < Témoin ****	Transformation par racine carré : T0 < Témoin **** T1 < Témoin **** T2 < Témoin ****	NS	Log transformés : T0 < Témoin **** T0 < Témoin * T1 < Témoin **** T2 < Témoin ****

Significativement plus petit que le témoin	Pas de différence significative	Significativement plus grand que le témoin
--	---------------------------------	--

Tableau 8 : Résultats des ANOVAs mettant en évidence l'effet du brûlage dirigé sur l'inflammabilité (Ignition à la ligne d'alcool = 100 % ; NS = non significatif, significativité des tests : * si p entre 0.05 et 0.01, ** si p entre 0.01 et 0.001, *** si p entre 0.001 et 0.0001 et **** si p<0.0001)

Brûlage Dirigé	Fréquence d'ignition brando	Durée inflammation	Propagation	Hauteur de flamme	Température maximum à 10 cm	Température maximum à 40 cm	Flux total à 10 cm	Flux total à 40 cm	Vitesse de propagation	Intensité du front de flamme
Comparaison modalité et témoin	NS	NS	NS	BD < Témoin **	Transformation par racine carré BD < Témoin ****	Transformation par racine carré BD < Témoin **	Transformation par racine carré BD < Témoin ****	Transformation par racine carré BD < Témoin ****	NS	Log transformées BD < Témoin ****
Comparaison intervalle de retour et témoin	NS	NS	T0 < T2 * T0 < Témoin *	Transformation par racine carré T0 < Témoin **** T1 < Témoin **** T2 < Témoin ****	Transformation par racine carré T0 > T1 * T0 > T2 * T1 > T2 * T2 < Témoin *	Transformation par racine carré T0 > T2 * T1 > T2 * T2 < Témoin ***	Log transformées T0 < Témoin * T1 < Témoin *	Log transformées T0 < Témoin **** T1 < Témoin **** T2 < Témoin ****	NS	Log transformées T0 < Témoin **** T0 < T1 * T1 < Témoin **** T2 < Témoin ****

Significativement plus petit que le témoin

Pas de différence significative

3.2.3. Fauchage mécanique (épareuse) des herbacées de bords de route

3.2.3.1. Avec rémanents (FAR)

Tous les résultats concernant le fauchage mécanique à l'épareuse avec rémanents sont présentés dans le Tab. 9.

L'ignition au brandon dans les herbacées fauchées mécaniquement avec rémanents est plus importante que pour le témoin ($KW = 24,396$; $P < 0,0001$) avec 37.3% d'ignition contre 1.6 % (Fig. 19). L'ignition à la ligne d'alcool étant systématique, il n'y a donc pas de différences d'ignition entre la végétation traitée et le témoin.

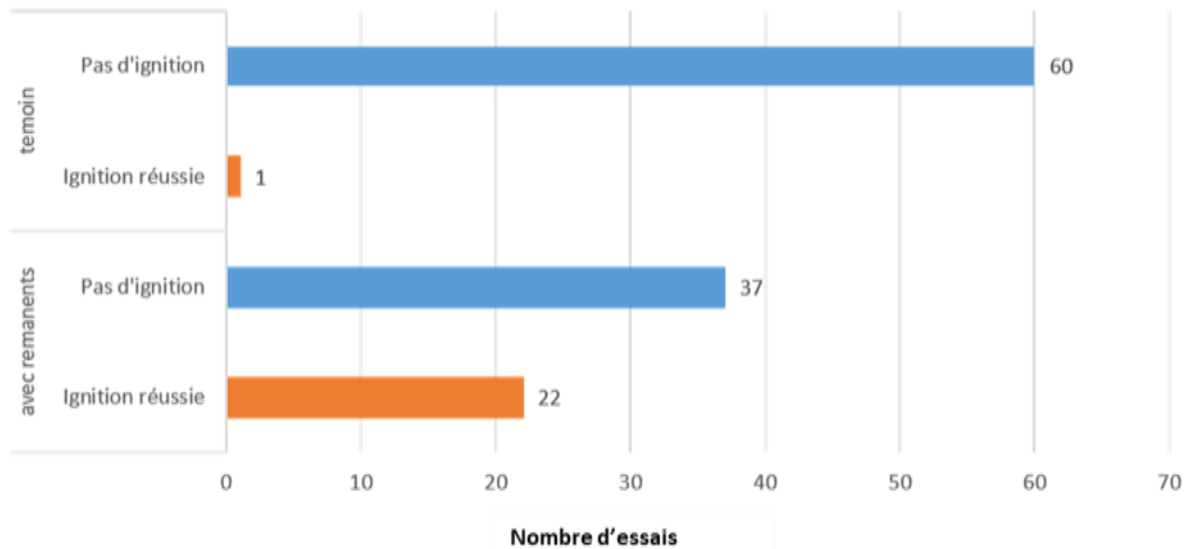


Figure 19 : Comparaison de l'ignition au brandon incandescent entre les échantillons fauchés à l'épareuse avec rémanents et le témoin

Le fauchage mécanique des herbacées de bord de route en laissant les rémanents de coupe a augmenté l'inflammabilité en augmentant la durée d'inflammation ($F = 8,35$; $P = 0,01$), la hauteur de flamme ($F = 11,29$; $P = 0,002$), la température maximum à 10 cm ($F = 8,46$; $P = 0,008$), le flux total à 10 cm ($F = 22,40$; $P < 0,0001$), la vitesse de propagation ($F = 9,71$; $P = 0,005$) et l'intensité du front de flamme ($F = 24,82$; $P = 0,0001$).

Ne changent pas significativement du témoin, le délai d'ignition ($KW = 0,0483264$; $P = 0,83$), la propagation ($KW = 0,587677$; $P = 0,44$), et la température maximum à 40 cm ($F = 1,27$; $P = 0,27$).

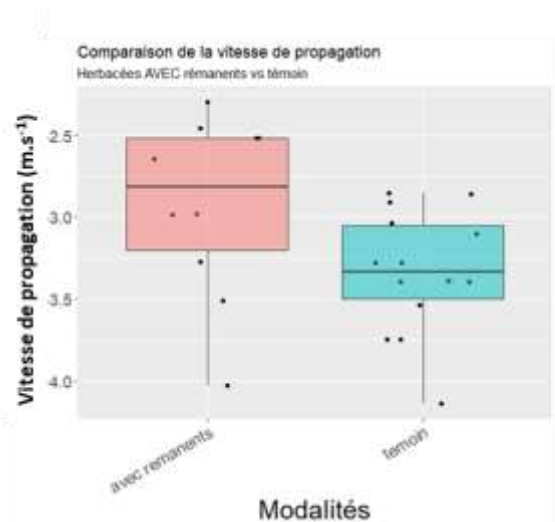


Figure 20 : Différence de vitesse de propagation entre fauchage mécanique avec rémanents de coupe et le témoin

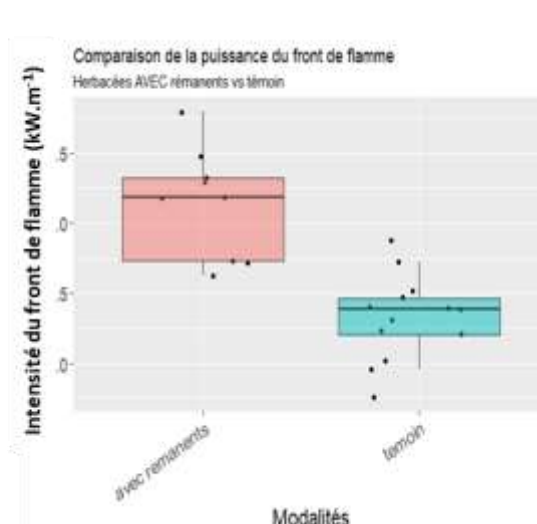


Figure 21 : Différence d'intensité du front de flamme entre fauchage mécanique avec rémanents de coupe et le témoin

3.2.3.2. Sans rémanents (FSR)

Tous les résultats concernant le fauchage mécanique à l'épareuse sans rémanents sont présentés dans le Tab. 9.

L'ignition au brandon dans les herbacées fauchées mécaniquement sans rémanents est plus importante que celle dans le témoin ($KW = 49,0268$; $P < 0.0001$) avec 65% d'ignition contre 1.6 % (Fig. 22). Il n'y a pas de différence significativement entre les fréquences d'ignition à l'alcool et le témoin.

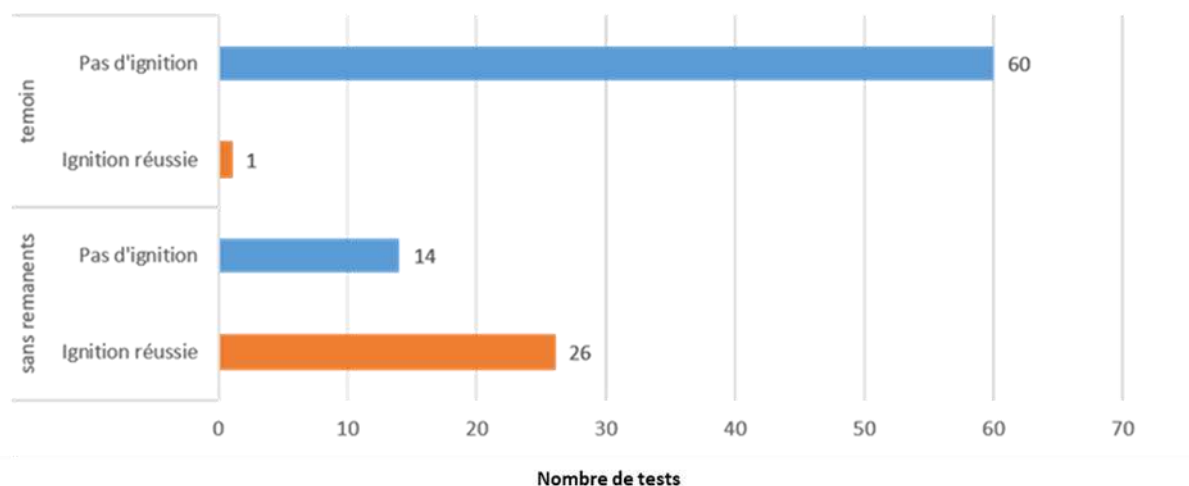


Figure 22 : Comparaison de l'ignition au brandon incandescent entre les échantillons fauchés à l'épareuse sans rémanent et le témoin.

Le fauchage mécanique des herbacées de bord de route en enlevant les rémanents de coupe a également augmenté l'inflammabilité en augmentant la durée d'inflammation ($F = 4,82$; $P = 0,04$), la propagation ($KW = 8,31$; $P = 0,004$), la température maximum à 10 cm ($F = 609$; $P = 0,021$), le flux total à 10 cm ($F = 13,70$; $P = 0,001$) et la vitesse de propagation ($F = 16,43$; $P = 0,0004$).

Ne change pas significativement du témoin, le délai d'inflammation ($KW = 0,26$; $P = 0,61$), la hauteur de flamme ($KW = 0,88$; $P = 0,35$), la température maximum à 40 cm ($F = 4,11$; $P = 0,60$) et l'intensité du front de flamme ($F = 0$; $P = 1$).

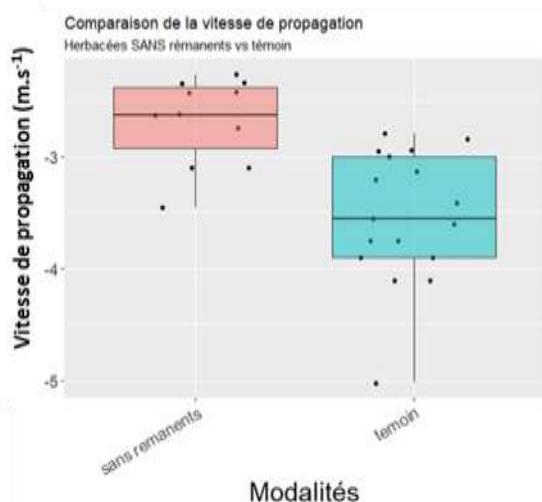


Figure 23 : Différence dans la vitesse de propagation entre tauchage mécanique sans résanants de coupe et le témoin

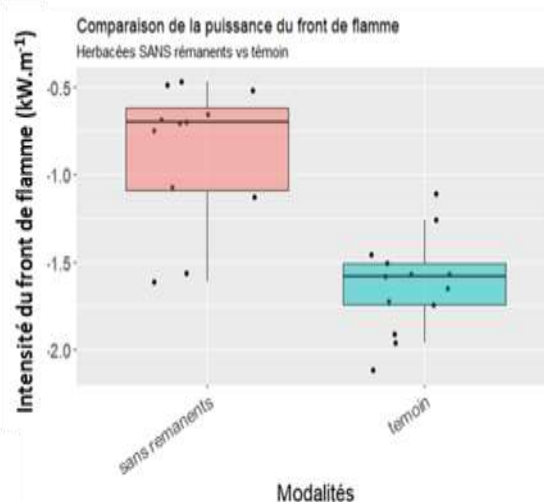


Figure 24 : Différence d'intensité du front de flamme entre tauchage mécanique sans résanants de coupe et le témoin

3.2.4. Fauchage manuel (rotofil) des herbacées de bords de route (RTF)

Tous les résultats concernant le fauchage manuel au rotofil sont présentés dans le Tab. 10

Il n'y a pas de différence significative des fréquences d'ignition au brandon et à la ligne d'alcool entre le traitement au rotofil et le témoin (respectivement 0 % vs 0 % et 100 % vs 100 %, respectivement).

Le traitement au rotofil réduit significativement de nombreuses variables de l'inflammabilité comme la propagation ($KW = 5,62$; $P = 0,018$), le flux total à 10 cm ($F = 12,17$; $P = 0,002$) (Fig. 25) et 40 cm ($F = 21,30$; $P = 0,0001$) ainsi que la puissance du front de flamme ($F = 18,10$; $P = 0,0004$) (Fig. 26).

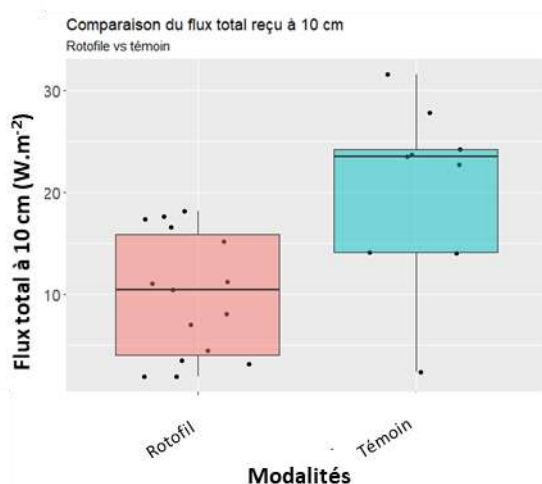


Figure 25 : Différence dans la vitesse de propagation entre fauchage manuel au rotofil et le témoin

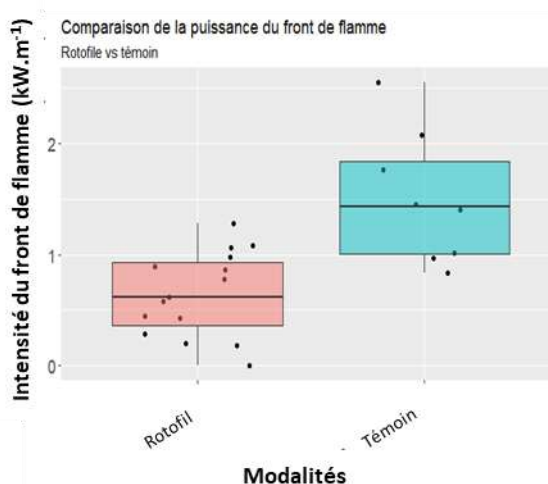


Figure 26 : Différence d'intensité du front de flamme entre fauchage manuel au rotofil et le témoin

Le traitement au rotofil n'a pas d'effet significatif sur la durée d'inflammation ($F = 1,56$; $P = 0,22$), la hauteur de flamme ($F = 0,21$; $P = 0,65$), la température maximum à 10 cm ($KW = 1,21$; $P = 0,27$) et à 40 cm ($KW = 0,09$; $P = 0,76$) et la vitesse de propagation ($F = 0,00$; $P = 0,99$).

Tableau 9 : Résultats des ANOVAs mettant en évidence l’effet du fauchage mécanique à l’épareuse (avec (FAR) et sans (FSR) rémanent) sur l’inflammabilité (Ignition à la ligne d’alcool = 100 % ; NS = non significatif, **significativité des tests** : * si p entre 0.05 et 0.01, ** si p entre 0.01 et 0.001, *** si p entre 0.001 et 0.0001 et **** si p<0.0001)

Significativement plus petit que le témoin			Pas de différence significative				Significativement plus grand que le témoin			
Fauchage mécanique	Fréquence d'ignition brandon	Délais d'inflammation	Durée inflammation	Propagation	Hauteur de flamme	Température maximum à 10 cm	Température maximum à 40 cm	Flux total à 10 cm	Vitesse de propagation	Intensité du front de flamme
Avec rémanents	FAR > Témoin ****	NS	FAR > Témoin ***	NS	Transformation par racine carré FAR > Témoin **	Transformation par racine carré FAR > Témoin **	NS	Transformation par racine carré FAR > Témoin ****	Données log transformées FAR > Témoin **	Transformation par racine carré FAR > Témoin ****
sans rémanents	FSR > Témoin ****	NS	FSR > Témoin *	FSR > Témoin **	NS	Transformation par racine carré FSR > Témoin *	NS	Données log transformées FSR > Témoin **	Données log transformées FSR > Témoin ***	NS

Tableau 10 : Résultats des ANOVAs mettant en évidence l'effet du fauchage manuel au rotofil (RTF) sur l'inflammabilité (Ignition au brandon = 0%, Ignition à la ligne d'alcool = 100 % ; NS = non significatif, **significativité des tests** : * si p entre 0.05 et 0.01, ** si p entre 0.01 et 0.001, *** si p entre 0.001 et 0.0001 et **** si p<0.0001).

Significativement plus petit que le témoin				Pas de différence significative						
Fauchage manuel	Fréquence d'ignition brandon	Durée inflammation	Propagation	Hauteur de flamme	Température maximum à 10 cm	Température maximum à 40 cm	Flux total à 10 cm	Flux total à 40 cm	Vitesse de propagation	Puissance du front de flamme
Rotofil	NS	NS	RTF < Témoin *	NS	NS	NS	Transformation par racine carré RTF < Témoin **	Transformation par racine carré RTF < Témoin ****	NS	Données log-transformées RTF < Témoin ***

4. Discussion

Il ressort de ce travail que les différentes méthodes de traitement du combustible testées affectent l'inflammabilité, certaines fois de façon attendue et convenue (diminution de l'inflammabilité par le broyage mécanique ou le brûlage dirigé), mais d'autres fois de façon contre intuitive et à l'opposé de l'effet recherché (augmentation de l'inflammabilité par le fauchage mécanique des herbacées). Il convient maintenant d'essayer de comprendre pourquoi.

4.1. En ce qui concerne le traitement du combustible dans les massifs

4.1.1. Broyage mécanique

L'efficacité du broyage mécanique sur la réduction de l'inflammabilité est due à plusieurs choses. La première est la réduction de la hauteur de la végétation par le broyeur qui entraîne par exemple une diminution de la hauteur de flamme puisqu'il existe une relation empirique entre la hauteur de flamme et la hauteur de la végétation ($HF=3*HV$). On observe d'ailleurs cette croissance de la hauteur de flammes quand on compare cette variable aux trois intervalles de retour du traitement, avec une légère mais constante augmentation entre les années.

Un autre effet du broyage mécanique est la réduction de la quantité de biomasse combustible disponible pour les flammes. De ce fait, lors d'un incendie, les flammes seront moins intenses lorsqu'elles passeront dans une zone broyée, car il y aura moins de combustible disponible. Cela diminue également la puissance du front de flamme. En effet, la quantité de biomasse consommée est l'une des variables entrant dans le calcul de la puissance par la formule de Byram.

Le BM, est donc une méthode efficace et stable dans le temps sur de nombreux paramètres (Fig. 27)., si ce n'est la forte ignition de la végétation l'année où le traitement a eu lieu (T0). Ceci pourrait s'expliquer par une quantité de litière inflammable plus importante et une densité de végétation plus forte.

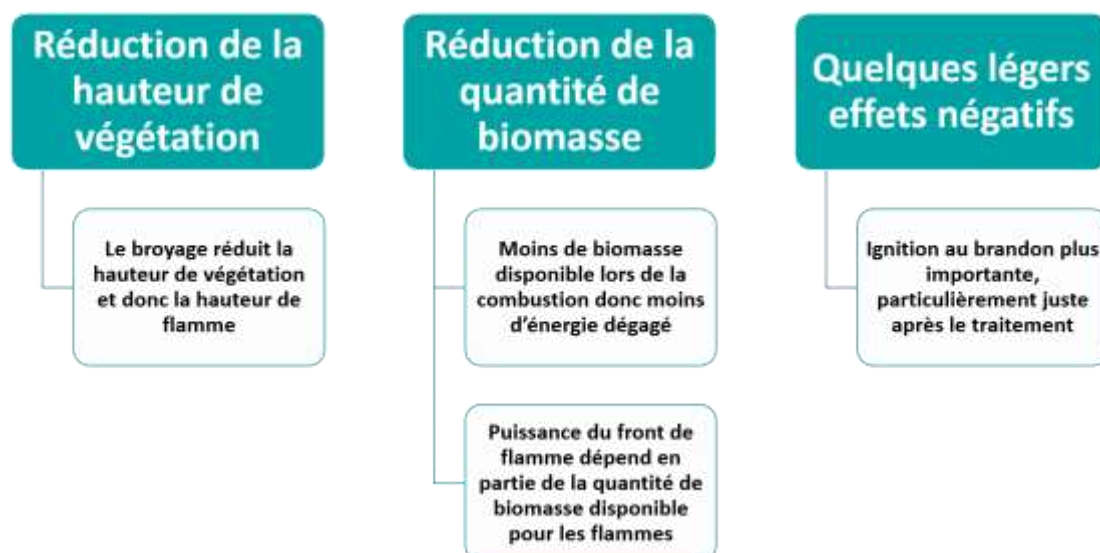


Figure 27 : Bilan des effets du broyage mécanique sur la végétation après traitement

4.1.2. Brûlage dirigé

Le brûlage dirigé est également un traitement du combustible très efficace et même plus que le broyage mécanique sur certains paramètres et dans le temps. Pour les points communs, le BD réduit la hauteur de végétation réduisant par conséquent la hauteur de flamme ; le BD entraîne lui aussi une diminution de la biomasse combustible disponible pour les flammes, donc comme expliqué précédemment cela entraîne une réduction de l'énergie dégagée par les flammes et de la puissance du front de flamme. Par ailleurs, le BD a un effet à court terme avec une propagation plus faible l'année où le traitement a eu lieu (T0). Cela peut s'expliquer par une litière très éparse et peu abondante, moins propice à la diffusion des flammes. Enfin, le BD a également un effet sur le long terme puisque les températures maximales émises à 10 et 40 cm sont toujours diminuées 2 ans après le traitement (T2).

On ne constate aucune différence d'ignition au brandon entre la végétation traitée par brûlage dirigé et la végétation témoin avec une très faible fréquence d'ignition. En revanche les ignitions à la ligne d'alcool sont systématiques pour le brûlage dirigé et le témoin. Le BD n'a cependant pas d'effet sur la durée d'inflammation, ni sur la vitesse de propagation des flammes plutôt dépendante de la force du vent.

Globalement, le BD est une méthode efficace pour la diminution de l'inflammabilité et est très stable dans le temps (Fig. 28).

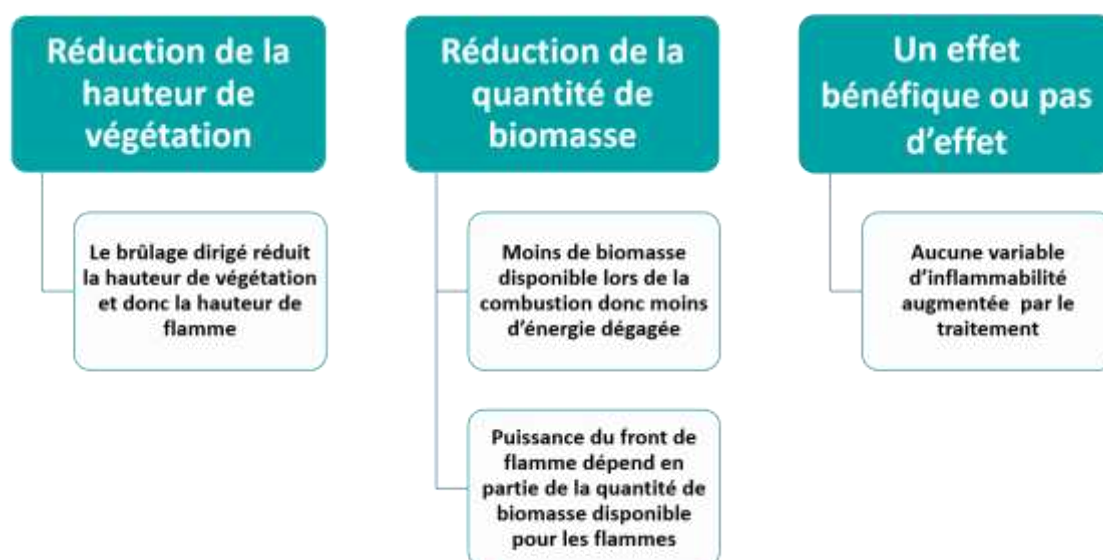


Figure 28 : Bilan des effets du brûlage dirigé sur la végétation après traitement

4.2. En ce qui concerne le traitement du combustible en bords de route

4.2.1. Fauchage mécanique des herbacées de bord de route :

Le fauchage des herbacées de bord de route avec ou sans rémanents de coupe laissés sur place n'influence pas le délais d'inflammation et la température maximum à 40 cm. Cela s'explique par une concentration des flammes à faible hauteur et que lors de la combustion des témoins, les parties supérieures de la végétation brulaient plus difficilement.

De son côté, le fauchage des herbacées de bord de route sans rémanents n'influe pas sur la hauteur de flamme et la puissance du front de flamme car le combustible a été en partie retiré et la biomasse

restante est concentrée sur une plus faible hauteur. En revanche, le point le plus négatif est que ces deux méthodes de traitement du combustible ont un effet positif sur de nombreuses variables ce qui contribue à **l'augmentation globale de l'inflammabilité**. En effet, la fréquence d'ignition au brandon est plus importante après traitement (avec ou sans rémanents) car la surface de contact entre le brandon incandescent et la végétation résiduelle est bien plus élevée qu'avec la végétation témoin. Dans la végétation traitée, le brandon peut bien plus facilement tomber à plat sur le tapis végétal formé par les rémanents ou par les tiges fauchées très court ce qui permet une meilleure diffusion de la chaleur et produire une ignition. Au contraire, dans la végétation témoin, le brandon va être coincé dans les parties hautes et encore verte de la végétation ce qui entraîne une mauvaise diffusion de la chaleur et donc très peu d'ignitions (Fig. 29). Par ailleurs, les rémanents de coupe laissés sur place constituent un tapis d'herbacées très sèches propices au feu et, lorsqu'on les enlève, on ne laisse que la litière de la végétation et les feuilles mortes à la base des tiges coupées, elles aussi très sèches en période estivale. C'est la combinaison de cette surface de contact plus importante sur de la végétation sèche qui est à l'origine des fréquences d'ignition plus élevées. Cette biomasse sèche permet également une meilleure propagation des flammes dans la végétation traitée.

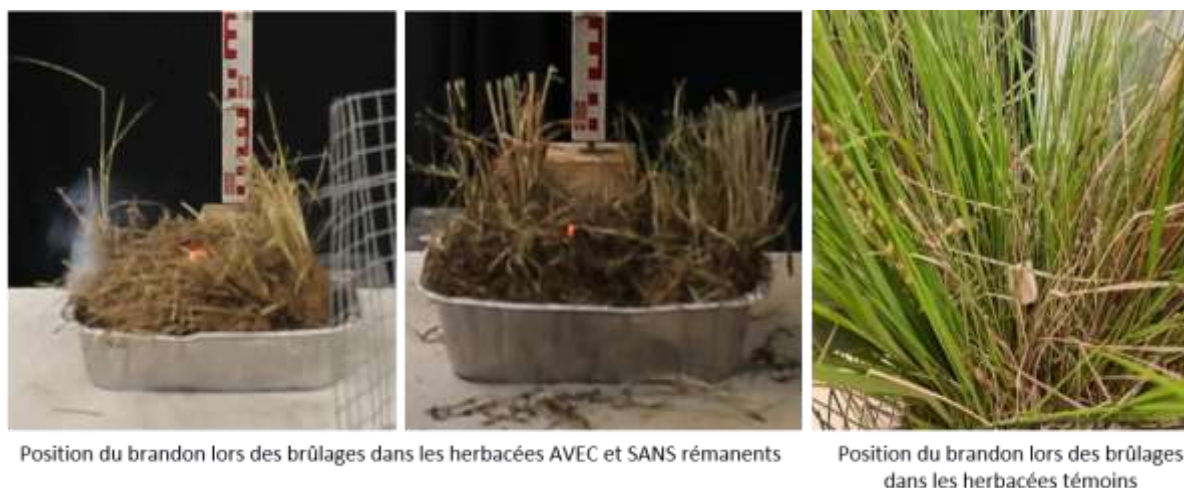


Figure 29 : Différence de surface de contact du brandon entre la végétation fauchée mécaniquement avec (gauche) ou sans (centre) rémanents et le témoin (droite)

De plus, dans les deux cas, les échantillons laissent beaucoup plus circuler l'air et sont bien plus exposés au vent ce qui augmente la vitesse de propagation des flammes qui dépend énormément du vent.

Enfin l'intensité des flammes est plus importante pour les herbacées de bord de route avec rémanents car elle dépend de la quantité de biomasse disponible mais également de la vitesse de propagation des flammes qui est beaucoup plus importante. Pour les herbacées de bord de route sans rémanents, le fait d'enlever cette biomasse permet de compenser l'augmentation de la vitesse de propagation et donc de ne pas augmenter l'intensité des flammes.

4.2.2. Fauchage manuel des herbacées de bords de route

Le fauchage manuel au rotofil présente de bons résultats dans la réduction de l'inflammabilité. L'ignition au brandon incandescent n'est pas possible (0%) à cause de la très faible surface de contact du brandon avec les rémanents car même si le brandon tombe à plat, les rémanents qui sont dispersés (ne formant donc pas un tapis épais comme avec l'épareuse) ne supportent que très peu le brandon

comme c'est le cas avec la végétation témoin (Fig. 30). Globalement la quantité de biomasse est diminuée pour une même surface ce qui diminue la puissance du front de flammes et leur intensité. Cette biomasse peu dense et très discontinue est aussi difficilement mobilisable par les flammes, limitant ainsi fortement la propagation.



Position du brandon lors des brûlages dans les herbacées traitées au rotofil



Position du brandon lors des brûlages dans les herbacées témoins

Figure 30 : Différence de surface de contact du brandon entre la végétation fauchée manuellement au rotofil (gauche) et le témoin (droite)

4.2.3. Une différence cruciale

Le fauchage des herbacées à l'épaveuse et au rotofil réduit dans les deux cas la quantité de biomasse disponible sur une surface aussi efficacement l'une que l'autre (passage d'une végétation sur pied à une végétation coupée au sol). Cependant ces méthodes présentent des résultats diamétralement opposés concernant leur effet sur l'inflammabilité puisque l'une est très efficace dans la réduction de l'inflammabilité (rotofil) alors que l'autre généralement l'augmente (le fauchage mécanique à l'épaveuse). Pourtant ces méthodes sont fondamentalement assez similaires puisque l'on coupe la végétation à une certaine hauteur et que l'on laisse les rémanents sur place. Mais c'est justement dans la structure de ces rémanents que réside la différence (Fig. 31).

Après le passage de l'épaveuse, les rémanents forment un coussin plat, dense, uniforme, continu et suivant la même orientation. Cela entraîne une surface de contact avec le brandon plus élevée et donc une plus forte inflammabilité, comme vu précédemment. À l'inverse, les rémanents du rotofil sont plus éparpillés les uns par rapport aux autres avec peu de continuité, avec une structure moins dense et des orientations différentes. Cela entraîne une diminution de la surface de contact entre le brandon



Rémanents issus du fauchage mécanique



Rémanents issus du fauchage manuel

Figure 31 : Différence de structure des rémanents entre le fauchage mécanique à l'épaveuse et le fauchage manuel au rotofil

et la végétation résiduelle, et une mauvaise propagation des flammes du fait du manque de continuité, comme vu précédemment.

5. Conclusions et perspectives

Concernant le traitement du combustible dans les massifs, le brûlage dirigé ressort comme le traitement le plus efficace car il impacte négativement le plus de variables d'inflammabilité et la fréquence d'ignition au brandon est très faible voire nulle. Par ailleurs, l'effet bénéfique du brûlage dirigé sur certaines variables ne se révèle qu'à partir de T2, cela indique un effet bénéfique supplémentaire du BD à moyen termes (T2). De son côté, le broyage mécanique est également efficace mais impacte négativement moins de variables d'inflammabilité que le BD (elles sont d'ailleurs communes aux deux méthodes). Le BM présente cependant un point négatif qui est une fréquence d'ignition au brandon plus importante l'année du traitement (T0). Le BD et le BM ont un effet identique de réduction de l'inflammabilité dans le temps pour certaines variables qu'ils affectent en communs.

Idéalement et du point de vue de l'inflammabilité, il faudrait favoriser la réalisation de chantier de brûlages dirigés pour multiplier la surface traitée car plus performant sur l'instant et dans le temps. Cependant, c'est une méthode qui a une fenêtre d'application assez courte dans l'hiver car très dépendante de la météo. Par ailleurs son application dans les espaces protégés peut être problématique car le traitement peut impacter par exemple la faune à mobilité réduite en hibernation à cette époque. Enfin c'est un traitement qui a encore une relative mauvaise image auprès du grand public car très associé à la peur du feu.

Le broyage mécanique est une méthode qui couvre de larges surfaces rapidement et applicable toute l'année hors saison estivale des feux mais beaucoup plus coûteuse que le BD. Il faudra malgré tout composer avec cette dernière, même si moins efficace, le temps que plus de personnels soit formés à la réalisation de brûlage dirigé et que les institutions changent leur vision sur le brûlage. De plus, le BM est idéal pour ouvrir facilement les milieux avec une organisation minime pour que d'autres traitements, comme le pastoralisme, puissent être appliqués entre deux traitements. Le BD est également très efficace dans l'ouverture du milieu mais nécessite plus de préparation pour les raisons citées précédemment.

Pour le bord de route, la méthode utilisée actuellement (le fauchage des herbacées à l'épaveuse en laissant les rémanents sur place) n'est pas efficace en matière de réduction de l'inflammabilité, de même que l'alternative qui consiste à enlever les rémanents. Les deux méthodes présentent une fréquence d'ignition au brandon trop importante et contribuent globalement à augmenter l'inflammabilité ce qui est l'inverse de l'effet voulu. Le fauchage au rotofil est en revanche efficace dans la réduction de l'inflammabilité et ne permet pas d'ignition au brandon.

Si l'on souhaite conserver le fauchage à l'épaveuse en tant que traitement principal en bord de route, il faudrait modifier certaines choses. Par exemple, on pourrait aisément modifier la hauteur de passage de l'épaveuse pour laisser une végétation suffisamment haute pour limiter la surface de contact entre un objet incandescent type mégot de cigarette et les tiges. Le fauchage peut aussi être appliqué plus tôt dans l'année pour que la végétation ait suffisamment repoussé d'ici l'été, mais ceci pourrait entraîner des conflits de gestion par rapport à la biodiversité si le fauchage devait avoir lieu durant le printemps. L'application du fauchage manuel au rotofil doit être favorisé quand cela est possible, notamment quand les surfaces à traiter sont peu importantes (par exemple dans les interfaces habitat-forêt) ou dans les zones sensibles. Pour des zones à traiter étendues, cette méthode demande plus de temps et de mains d'œuvre.

Il conviendrait de poursuivre ce type de travail en passant à l'échelle spatiale supérieure (placette d'étude in-situ) en réalisant des brûlages dirigés sur végétation traitée par différentes méthodes et témoin, voire en effectuant des simulations du comportement du feu sur ces types de scénarios de traitement de la végétation.

Phase 2 : Impact du traitement du combustible sur la diversité floristique forestière et sur la santé des peuplements arborés

1. Description de la méthode de travail

1.1. Plan d'échantillonnage

Pour chacune des 8 placettes suivies dans la partie 'inflammabilité' du projet - les placettes de prélèvement des herbacées sont exclues - nous avons installé 6 sous-placettes de 400m² : 3 dans chacune des 2 modalités étudiées : débroussaillée (en orange en Fig. 32 et pour toutes les figures ci-dessous) et témoin (en bleu). Celles-ci sont choisies pour être proches géographiquement et les plus homogènes possible en termes de conditions stationnelles (sol, exposition, pente) au sein et entre sous-placettes. Les coordonnées géographiques des sous-placettes ont été prises au GPS de précision.

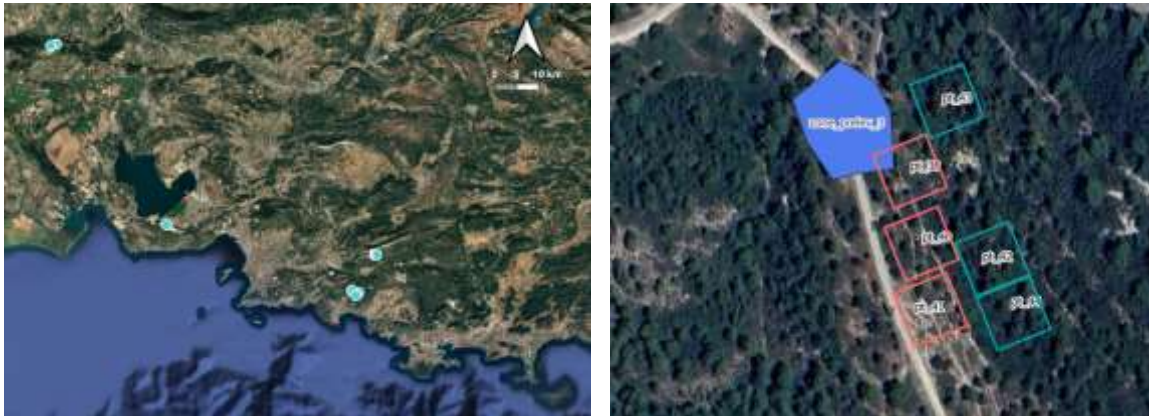


Figure 32: *Gauche* : Emplacement des 8 placettes étudiées : deux dans les Alpilles (AL), une sur la Cote Bleue (CB), deux sur la Ste-Baume (SB), et trois au Grand-Caunet (GC). *Droite* : Emplacement des trois sous-placettes débroussaillées (rectangles oranges) et témoins (rectangles bleus) de la placette AL-3. La zone bleue correspond à la zone de prélèvement du combustible.

1.2. Caractérisation des conditions stationnelles et du peuplement

Pour chaque sous-placette (Fig. 33), la topographie locale a été estimée visuellement (zone convexe, concave ou plate) pour estimer le rapport entre les pertes et les apports en eau par écoulement latéral. En complément, à partir du modèle numérique de terrain de l'IGN à une résolution de 25 m (BD ALTI[®]), nous avons calculé un indice topographique (TPI) qui quantifie ce rapport en prenant en compte l'altitude du centre de la placette et l'altitude des zones alentours dans un rayon de 100 m (Weiss 2001 ; Lemaire et al. 2022). La pente et l'exposition ont été relevées sur le terrain avec un clisimètre et une boussole, et ont été analysées de manière combinée, via l'utilisation de l'indice de radiation IKR (Becker & Geremia, 1984). Une valeur IKR supérieure à 1,05 correspond à une exposition chaude, tandis qu'une valeur inférieure à 0,95 indique une situation froide.

Concernant la caractérisation des conditions édaphiques, une fosse pédologique réalisée au centre de chaque sous-placette afin d'estimer les pourcentages d'argiles, limons et sables à 10cm de profondeur avec le test du boudin (voir [ici](#)), ce qui nous a permis de déterminer la texture du sol (par ex. Limon argilo-sableux) selon les classes de texture de Jamagne et al. (1977). Le pourcentage d'éléments grossiers a été estimé sur toute la profondeur de la fosse, et la profondeur du sol mesurée avec une tarière en 5 points de la sous-placette (fosse et les 4 coins). Ces informations de texture, de taux d'éléments grossiers, et la profondeur maximale du sol ont ensuite été utilisées pour estimer la réserve utile du sol (RU) à l'aide des fonctions de pédo-transfert de Jamagne et al. (1977). Un test à l'acide chlorhydrique a aussi été réalisé pour déterminer la nature carbonatée ou non du sol.

Afin de quantifier la densité du peuplement dans les strates arborées et arbustives, et d'estimer les conditions de lumière au sol, nous avons réalisé un inventaire dendrométrique en mesurant le diamètre à 130cm et en notant l'espèce et le statut (mort vs. vivant) de chaque arbre ou arbuste dont le diamètre est supérieur à 5cm. Ce relevé nous a permis d'estimer le nombre de tiges vivantes par hectare (#/ha), ainsi que la surface terrière du peuplement (m^2/ha). En complément, nous avons estimé le recouvrement de la végétation en % pour 5 strates : 0-0.5m, 0.5-3m, 3-6m, 6-10m, et >10m. Ces variables étant très souvent corrélées entre elles, nous avons effectué une analyse en composante principale (ACP) avec le logiciel libre R (R Core Team 2024) afin de les représenter, et d'analyser par la suite un nombre de variables plus réduit.



Figure 33 : Photos représentatives d'une sous-placette débroussaillée (gauche) et témoin. Exemple de la placette GC-6 située au Grand-Caunet.

1.3. Estimation de la santé des arbres

L'état de santé des pins d'Alep a été estimé à partir d'observations du déficit foliaire effectuées sur des arbres dominants selon le protocole du Département Santé des Forêts (DSF ; Goudet et al. 2018). Le houppier de chaque arbre a été observé visuellement par deux observateurs selon deux angles différents, en ne se focalisant que sur la partie non-soumise à la compétition intra-canopée ou entre arbres (houppier dit 'notable'). En utilisant comme référentiel un arbre sain pour lequel il est estimé qu'aucune partie du feuillage n'est manquant (déficit = 0%), nous estimons le pourcentage du feuillage manquant à partir des branches mortes ou manquantes, du manque de ramifications, et de la taille des aiguilles (Fig. 34). Par exemple, un arbre ayant des aiguilles d'une taille inférieure à 50% de la taille normale (phénomène de microphyllie), a une note de déficit foliaire automatiquement supérieure à 50%. Le diamètre et la hauteur de chaque arbre ont aussi été mesurés afin d'être pris en compte dans les analyses.

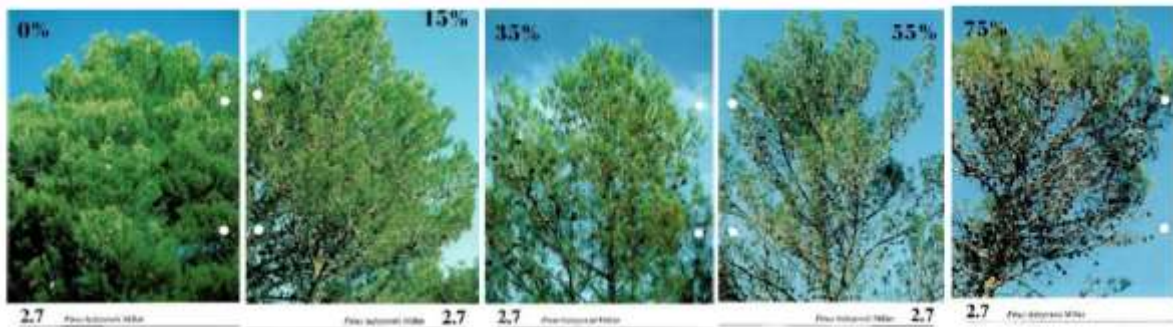


Figure 34 : Exemple de photos de référence du protocole DEPERIS pour estimer visuellement le déficit foliaire du pin d'Alep.

1.4. Estimation de la diversité floristique

La flore vasculaire a été inventoriée sur chaque sous-placette en Avril et Mai 2024 par les 2 mêmes observateurs. La présence et l'abondance de chaque espèce ont été notées en utilisant les coefficients de Braun-Blanquet (de 1 à 6 ; convertit ensuite en pourcentage de recouvrement : la note 1 étant 0.5% ; 2 : 3% ; 3 : 16.5% ; 4 : 37.5% ; 5 : 62.5% ; 6 : 87.5% ; Archaux et al. 2007).

A partir de ces relevés, nous avons estimé la richesse taxonomique en nombre d'espèces (*Nbsp*) par sous-placette, mais aussi la richesse fonctionnelle de chaque communauté. Les plantes dont le genre a été identifié mais pas l'espèce (par ex. individus sans fleurs ne permettant pas une détermination taxonomique précise, notées par exemple *Asperula sp.*) ont été pris en compte dans le calcul de la première variable, mais pas de la seconde puisqu'aucune valeur de trait ne peut leur être attribuée.

La richesse fonctionnelle (*Fric*) a été estimée à partir des coefficients d'abondance-dominance de Braun-Blanquet avec la librairie *vegan* (Oksanen et al. 2016) après standardisation par le nombre d'espèces. Nous envisagions initialement d'utiliser des données de traits fonctionnels issus de la base de données TRY (Kattge et al. 2020 ; par ex. LMA pour représenter la tolérance à l'ombre, ou le P50 pour la résistance à la sécheresse), mais celle-ci est trop incomplète pour nos espèces méditerranéennes, notamment pour les espèces annuelles. En conséquence, nous avons choisi d'utiliser les indices d'Ellenberg qui sont des estimations empiriques des niveaux de tolérance et des besoins de chaque espèce en lumière, humidité, température, nutriments, et du niveau d'acidité du sol (noté 'réaction'). Les valeurs vont de 1 à 9, les faibles valeurs indiquant une forte tolérance à l'ombre, à la sécheresse, au froid, et au manque de nutriments, et une présence sur sols acide. Comme les indices d'Ellenberg ont été principalement développés pour la flore des milieux tempérés et montagnards, ils sont peu disponibles pour les espèces méditerranéennes de notre intérêt. Nous avons ainsi utilisé les données de Tichy et al. (2023) qui combinent les informations d'Ellenberg, avec des valeurs similaires obtenues dans d'autres régions par d'autres naturalistes ou collectifs de chercheurs. Pour les 5 indicateurs mentionnés ci-dessus, 6% des informations restent manquantes. Ces données ont donc été complétées par une approche basée sur une analyse en composante principale avec la librairie *missMDA* (Josse & Husson 2016).

En complément de ces indices de diversité, nous avons étudié les changements de type de communauté en calculant les moyennes pondérées de la communauté pour ces différents indicateurs (CWM pour 'Community Weighted Mean') afin de voir si le débroussaillage a entraîné des modifications des niveaux de tolérance moyens de la communauté. Les (dis)similarités de composition floristique entre sous-placettes et notamment entre modalités témoin et débroussaillée ont été mis en avant par

la méthode d'ordination 'Non-Metric MultiDimensional Scaling' (NMDS) avec une matrice de dissimilarité des distances de Bray-Curtis (Oksanen et al., 2016).

1.5. Analyse statistique des données

Afin de détecter les facteurs associés au déficit foliaire du pin d'Alep, nous avons développé un modèle linéaire à effets mixtes avec la librairie *lme4* (Bates et al. 2015). Celui-ci inclut en effets fixes : la circonférence de l'arbre, sa hauteur, les caractéristiques du peuplement (axes 1 et 2 de l'ACP mentionnée plus haut), la réserve utile du sol, la pente, et la topographie locale (TPI). L'identifiant de la placette a été ajouté en effet aléatoire puisque nous avons de multiples observations par placette, et pour prendre en compte qu'une part de la variabilité de déficit foliaire entre sites n'est pas expliquée par les variables ci-dessus. Basé sur le critère d'AIC (Akaike Information Criterion), nous avons ensuite sélectionné et interprété le modèle le meilleur et le plus parcimonieux. Les parts de variance expliquées par le modèle (effets fixes et aléatoires) et par les effets fixes seuls ont été estimées en calculant les r^2 marginaux et conditionnels avec la librairie *MuMin* (Barton 2024).

Afin d'étudier l'effet du débroussaillage seul sur la santé des arbres et sur la diversité floristique, nous nous sommes focalisés sur la différence entre modalités en regroupant les sous-placettes. Cela permet d'enlever les variations entre massifs, mais en contrepartie nous n'avons que huit points, ce qui empêche le développement de modèles avec multiples variables explicatives et de modèles à effets mixtes. Nous nous sommes donc contenté d'analyses de variance (anova) et de tests non-paramétriques de Dunn afin de tester la significativité de l'effet traitement, et de modèles linéaires simples avec une seule variable explicative pour expliquer les variations de l'effet traitement entre placettes.

2. Résultats

2.1. Caractéristiques des placettes étudiées

Les placettes étudiées sont situées sur les massifs calcaires de Provence, et donc sur des roches calcaires karstiques, qui sont partiellement décarbonatées au Grand-Caunet (GC ; voir test HCl en Tab. 11). Les sols sont principalement à texture limono-argilo-sableuse ; la proportion de chaque élément évoluant entre sites, d'une dominance sableuse en GC-7-D à une dominance argileuse en GC-8-D (Tab. 11). Leur épaisseur – estimée manuellement à l'aide d'une tarière - est très faible, de ~25cm (AL-4) à ~55cm (GC-7), et est très associé à la forte présence des éléments qui limite le sondage (de 25% en GC-7 à 70% en AL-3 ; Tab. 11). La réserve utile du sol calculée à partir de ces informations est ainsi très faible (de 10 à 54mm) et sous-estimée par rapport aux valeurs réelles de quantité d'eau accessible pour les arbres ; elle est seulement représentative de la réserve hydrique en surface. Les placettes sont principalement orientées Sud, avec quelques variations entre massifs (exposition Sud-Est en GC, plutôt Sud-Ouest dans les Alpilles et sur la Ste-Baume. La pente varie aussi fortement entre sites, d'une situation plate en GC-6 à des pentes d'environ 30% en SB-1.

Au sein d'une placette, les zones échantillonnées en modalité débroussaillée et témoin affichent quelques différences notables malgré notre volonté de conserver des situations topographiques et édaphiques similaires. Les sous-placettes témoin sont situées sur des zones à plus forte pente que les zones débroussaillées (notamment en GC-7 et GC-8 ; Tab. 11) lié au fait que les routes ont souvent été créées sur des zones planes nécessitant moins de travaux de terrassement. Sur certaines placettes, le

sol y est plus profond (SB-1, SB-2 et AL-3), et les textures quelque peu différentes (Tab. 11). En admettant que la végétation était identique avant les travaux de débroussaillage, ceux-ci ont entraîné une diminution du nombre de tiges de diamètre > 5cm, sauf en SB-1. Cette diminution de la densité forestière en nombre d'individus ne s'accompagne pas nécessairement d'une baisse de la surface terrière (par ex. en GC-8) puisque les arbres restants peuvent avoir un gros diamètre. En prenant aussi en compte les variables de recouvrement de la végétation dans les 5 strates verticales, nous pouvons surtout noter que les zones débroussaillées sont caractérisées par l'abondance de la strate basse sous 0.5m, et la faible présence – voire l'absence – de la strate arbustive (0.5 à 3m ; Fig. 35). Quelque-soit le massif étudié, les peuplements en zone débroussaillée ont une structure similaire, dont seul le nombre d'arbres restants varie (axe 2 de l'ACP ; Fig. 35). Au contraire, les peuplements en zone témoin varient fortement en termes de couverture des strates arborées et arbustives.

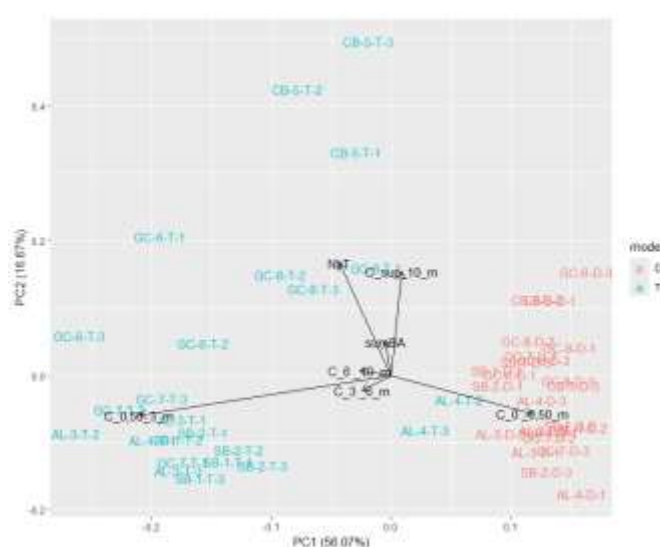


Figure 35 : Résultats de l'analyse en composantes principales mettant en évidence les (di)similarités des sous-placettes étudiées en modalité débroussaillée (orange) et témoin (bleu), selon la structure et densité de la végétation, représentés ici par le nombre de tiges par hectare (*NbT*), la surface terrière (*sumBA*), et le recouvrement (noté *C*) dans les strates 0-0.5m, 0.5-3m, 3-6m, 6-10m, et >10m.

Tableau 11 : Caractéristiques principales des placettes étudiées sur les massifs de la Sainte-Baume (SB), des Alpilles (AL), de la Côte Bleue (CB), et du Grand-Caunet (GC), en modalité débroussaillée (D) et témoin (T). Les valeurs sont moyennées pour les 3 sous-placettes de 400m².

		SB-1		SB-2		AL-3		AL-4		CB-5		GC-6		GC-7		GC-8	
		D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T
Traitement	Type	Brul		Brul		Broy		Broy		Broy		Broy		Broy		Brul	
	Année dernier passage	2022		2022		2022		2021		2021		2021		2022		2023	
	Fréquence (ans)	6		6		3		3		3		3		3		6	
Topographie	Altitude (m)	614	606	620	611	274	278	239	237	151	158	431	430	341	326	386	377
	Pente (%)	28	27	14	17	36	39	10	15	24	30	5	6	19	30	21	34
	Exposition (°)	254	255	219	226	236	236	231	253	150	164	211	185	181	171	219	241
Sol	Texture	LMS	LMS	LMS	LAS	LMS	LMS	LAS	LAS	LMS	LAS	LSA	LSA	SL	LS	ALS	LS
	Profondeur (cm)	21	33	23	32	28	35	26	25	33	32	33	31	52	55	27	25
	Test HCl	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	+	-	-	-	++	++

Peuplement	Surface terrière (m ² /ha)	19.9	10.2	7.6	10.1	4.2	10.8	8.3	12.1	10.9	22.4	14.8	13.8	4.8	16.6	19.5	12.9
	Nombre de tiges (#/ha)	8.3	7.3	5	14.7	4	16.3	10	14.7	6.7	76.3	13.7	33	1.3	15.7	7	11

Les types de traitement correspondent au brûlage dirigé (Brul) et au broyage (Broy). Concernant la texture des sols, L : Limon ; A : Argile ; S : Sable; M : Moyen (voir triangle des textures de Jamagne et al. 1977). Le test HCl montre une réaction forte (++) , faible (+) ou nulle (-)

2.2. Santé des arbres

Les pins d'Alep présentent un déficit foliaire élevé, de l'ordre de 44% en moyenne ; celui-ci étant plus important pour les arbres situés en zone témoin qu'en zone débroussaillée (48% vs. 40% ; $p < 0.001$). Cette différence n'est pas visible pour tous les sites (e.g., en GC-6 et AL-4) et est notamment marqué sur la Sainte-Baume (SB ; Fig. 36). Le meilleur modèle visant à expliquer les variations de déficit foliaire entre arbres n'inclut que la circonférence de l'arbre ; celle-ci montrant une relation significative négative ($p < 0.05$), c'est-à-dire que les arbres les plus gros ont un déficit foliaire plus faible, ceci quelque soit la modalité étudiée. Cependant cette variable a un très faible pouvoir prédictif (r^2 marginal du modèle = 0.03), et une grande partie de la variabilité provient des différences entre placettes (r^2 conditionnel = 0.58), le reste provenant donc de la variabilité entre arbres.

La différence de déficit foliaire entre modalités au sein d'une placette ne s'explique pas par des différences de structure du peuplement (axes de l'ACP Fig. 33), ni par des différences de topographie locale, mais seulement par la différence de réserve utile du sol en surface. Dans la plupart des sites étudiés, la RU est plus élevée dans les modalités témoin que débroussaillée, et plus cette différence est importante, plus les arbres en zone témoin sont plus défoliés que ceux en zone débroussaillée ($p < 0.01$; r^2 ajusté=0.71 ; Fig. 36).

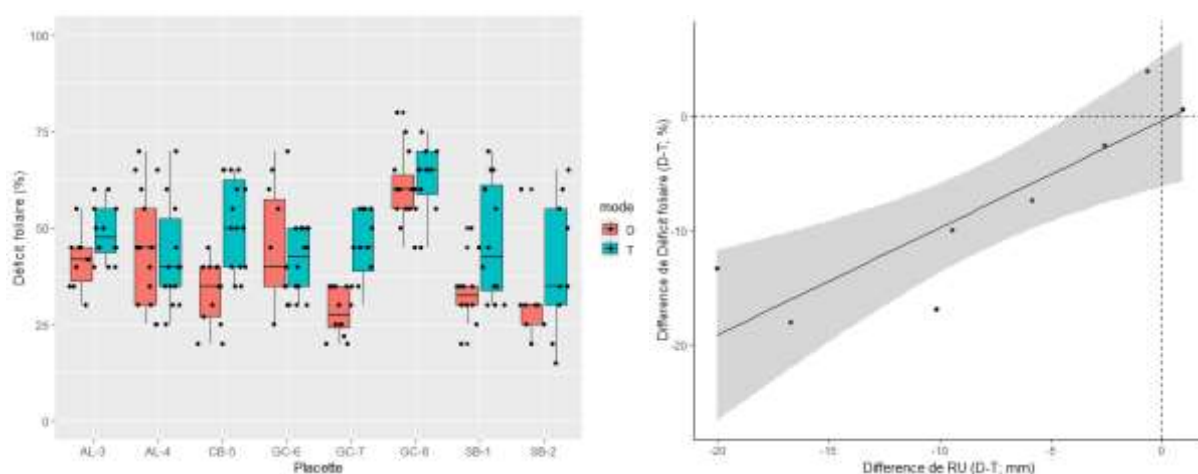


Figure 36 : *Gauche* : Valeurs de déficit foliaire observées sur chacune des placettes en différenciant les zones débroussaillées (rouge) des zones témoins (bleu). Chaque point représente un arbre. *Droite* : Relation entre la différence de déficit foliaire observé entre la modalité débroussaillée (D) et témoin (T) au sein d'une placette, et la différence de réserve utile du sol en surface (RU). Chaque point représente une placette. La meilleure RU des sols en zone témoin n'est pas causée par une profondeur de sol plus importante ou par une meilleure texture, mais par une combinaison des deux.

2.3. Diversité floristique

Au total 211 espèces différentes ont été inventoriées, avec une moyenne de 33 espèces répertoriées par placette de 400m². Sur ces 211 espèces, 150 ont été précisément identifiées au niveau du genre et de l'espèce, et leurs informations ont été utilisées pour estimer la richesse fonctionnelle.

La diversité floristique est probablement différente entre les différents massifs étudiés, mais l'échantillonnage suivi ici ne permet pas d'analyser ces différences de manière robuste. Par contre, la comparaison des sous-placettes débroussaillées et témoins au sein d'une même placette indique qu'il y a en moyenne plus d'espèces en zone débroussaillée (40 vs. 26 espèces; $p < 0.05$), mais avec une grande

variabilité entre sites étudiés : cela va d'un doublement du nombre d'espèces dans les Alpilles et sur la Côte Bleue (par ex. 47 vs. 21 espèces en CB-5), alors qu'il n'y a pas de différence notable sur la Sainte-Baume (Fig. 37). Les résultats sont similaires concernant la richesse fonctionnelle, même lorsqu'elle est standardisée par le nombre d'espèces présentes : celle-ci est en moyenne plus importante en zone débroussaillée ($p < 0.001$), tendance observée sur la plupart des placettes sauf sur la Sainte-Baume (Fig. 37). La variation de l'effet du débroussaillage sur la richesse spécifique et fonctionnelle entre placettes ne semble pas être associée au type de traitement effectué (brûlage dirigé vs. broyage), ni à la fréquence du traitement ou à la dernière année lorsque le traitement a été effectué (Tab. 11).

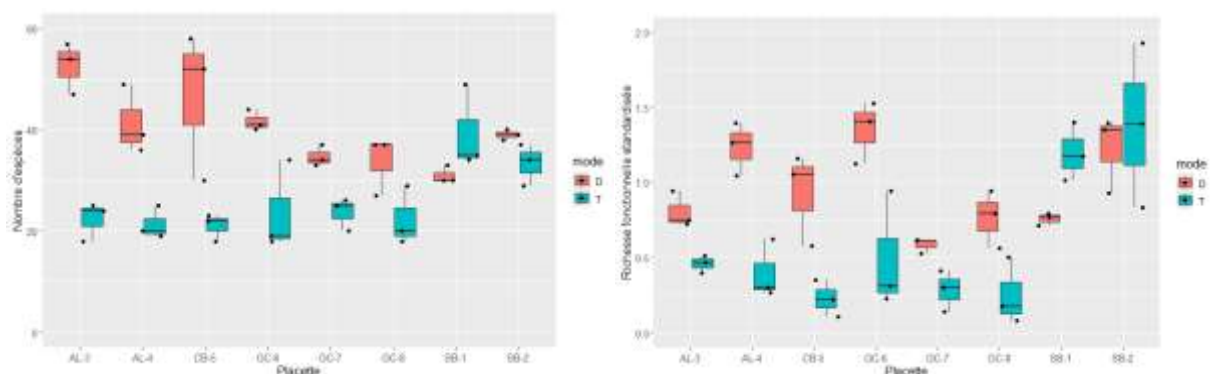


Figure 37 : Variation du nombre d'espèces inventoriées (Gauche) et de la richesse fonctionnelle standardisée (Droite) dans chacune des sous-placettes (points noirs) en fonction de la placette et de la modalité étudiée (débroussaillée D en rouge ; témoin T en bleu).

Ces changements de diversité floristique s'accompagnent de modifications de la composition de la communauté. En zone débroussaillée, la communauté est un peu plus héliophile qu'en zone témoin (CWM_L plus élevée) ; ceci est significatif en placette GC-7, alors que pour les autres placettes, la différence témoin-débroussaillée n'est pas significativement différente de zéro (Fig. 38). La communauté est aussi moins mésophile et nitrophile (i.e., demandeuse en humidité et en nutriments ; Fig. 38). Ce changement n'est pas significatif pour la plupart des placettes compte tenu de l'échantillonnage limité (3 répliquats par cas), et un effet inverse est observé pour le CWM_N des placettes CB-5 et GC-8, mais reste notable. Aucun effet significatif ni pertinent n'a été observé concernant le degré de thermophilie des plantes, alors que les résultats obtenus au sujet de la tolérance au niveau d'acidité du sol sont difficilement interprétables et probablement associés aux corrélations existantes entre traits. En effet les espèces situées sur les sols calcaires ('réaction' élevée) sont généralement plus héliophiles, et moins mésophiles et nitrophiles (Fig. 38).

L'augmentation du nombre d'espèces dans les placettes AL-3 à GC-8 (Fig. 35) s'explique par la présence en zone débroussaillée à la fois des espèces héliophiles de milieu ouvert (présentes en bas à droite de l'espace NMDS comme le panicaut champêtre *Eryngium campestre*; Fig. 37) et des espèces plus forestières et tolérantes à l'ombre (ex : l'érable de Montpellier *Acer monspessulanum* ou le buis *Buxus sempervirens*). Par exemple, sur la placette AL-4, les espèces présentes en zone débroussaillée recouvrent une grande partie de l'espace NMDS, alors que celles présentes en zone témoin sont seulement des espèces tolérantes l'ombre, associées à des valeurs négatives dans l'axe 1 de la NMDS (Fig. 39). A con-

trario, sur les placettes de la Sainte-Baume pour lesquelles aucune augmentation de la richesse spécifique n'a été observée, les zones débroussaillées – comme les zones témoin – sont seulement composées d'espèces tolérant l'ombre (Fig. 39).

Enfin, nous n'avons pas observé d'effet du débroussaillage sur la présence et l'abondance des espèces protégées. Sur les 150 espèces précisément identifiées, deux ont un statut de protection régionale : le liseron duveté (*Convolvulus lanuginosus*) présent au Grand-Caunet en GC-7), et le séneçon à fleurs de marguerite (*Senecio leucanthemifolius*) présent à la Ste-Baume en SB-1 et SB-2. Dans ces deux cas, les espèces ont été observées en zones débroussaillées et en zones témoin.

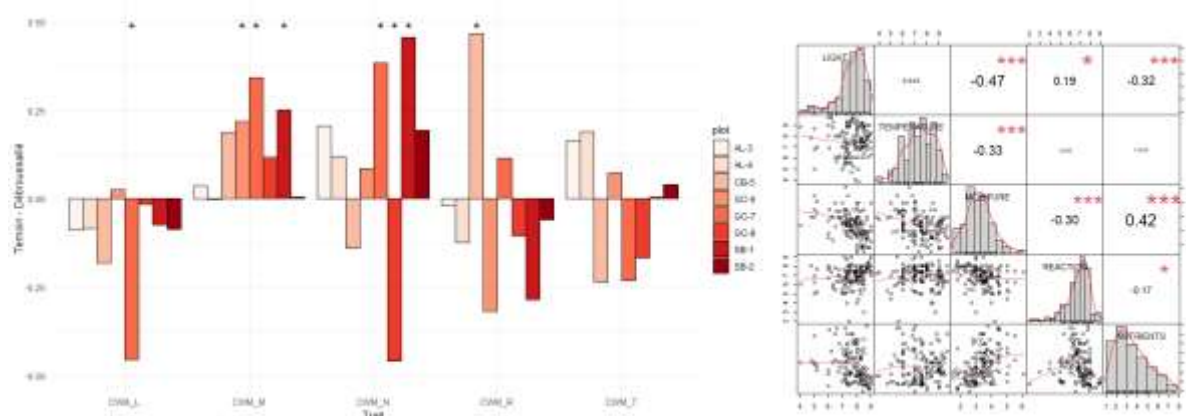


Figure 38 : Gauche : Modifications de la moyenne pondérée de la communauté des besoins en lumière (CWM_L), eau/humidité (CWM_M), nutriments (CWM_N) et température (CWM_T) des plantes, et du niveau d'acidité du sol (CWM_R). Les valeurs négatives indiquent des valeurs de CWM plus élevées en zone débroussaillée qu'en zone témoin. Les astérisques indiquent que la différence de CWM est significativement différente de zéro (test de Dunn ; $p < 0.05$). **Droite :** Matrice de corrélations entre les différents traits étudiés pour les espèces observées sur nos sites d'étude, au sujet des besoins en lumière (Light), température, eau/humidité (Moisture), nutriments (Nutrients) et du niveau d'acidité du sol (Reaction). Les coefficients de corrélation et leur significativité sont indiqués sur la partie haute-droite de la Figure ; avec * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$.

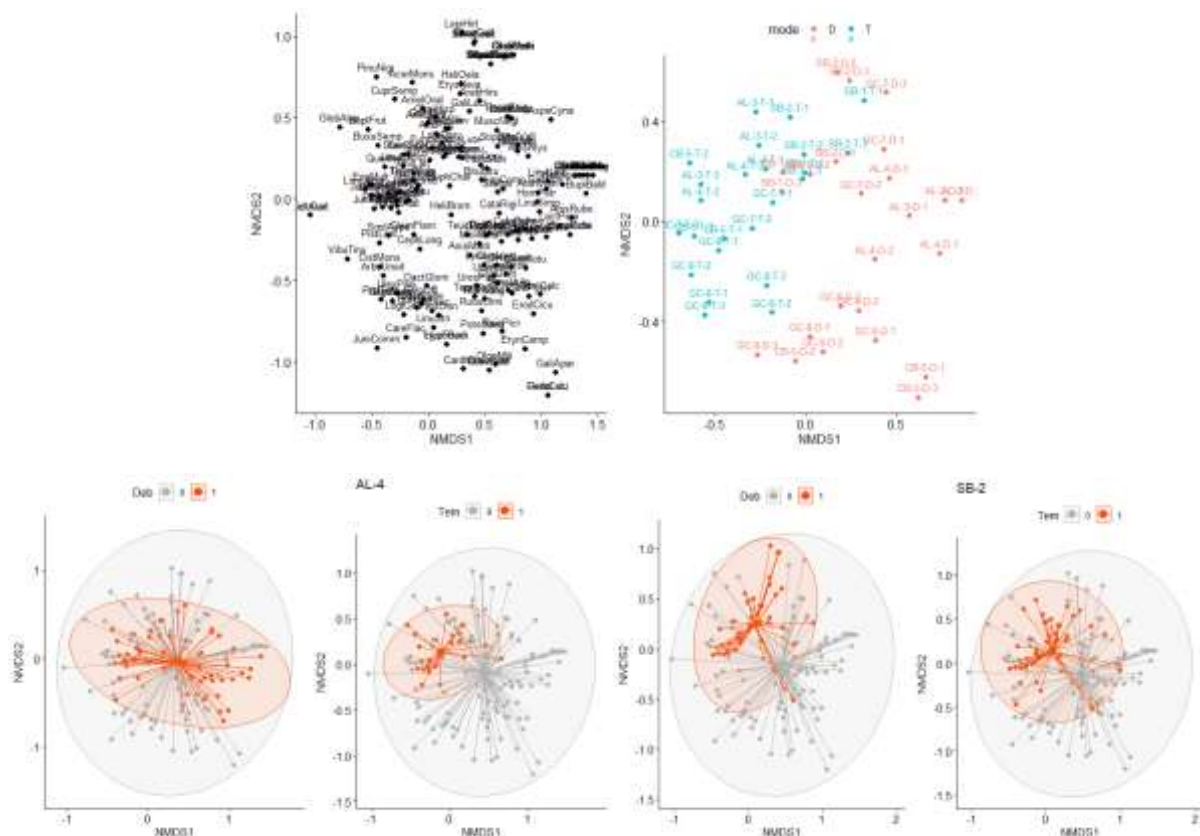


Figure 39 : Haut : Résultats de la méthode d'ordination NMDS basé sur les données de recouvrement des plantes vasculaires. Les codes en noir représentent les espèces nommées par les 4 premières lettres du genre suivies des 4 premières lettres de l'espèce (ex : *JuniComm* pour *Juniperus communis*), alors que les identifiants en bleu et orange indiquent les sous-placettes étudiées en zones témoin et débroussaillée, respectivement. Moins les parcelles sont dissemblables dans leur composition en espèces, plus elles sont proches dans l'espace NMDS. L'axe 1 est positivement relié au besoin de lumière des plantes ($p < 0.01$). L'axe 2 est négativement corrélé au besoin en humidité ($p < 0.01$), principalement causé par les différences de composition floristique entre massifs (plus de pluviométrie à la Sainte-Baume que sur la Côte-Bleue). **Bas :** Composition des sous-placettes débroussaillées (Deb) et témoin (Tem) des placettes AL-4 (gauche) et SB-2 (droite) selon l'emplacement des espèces qui la composent au sein de l'espace de la NMDS. Les espèces présentes sont en orange, celles absentes sont en gris. Chaque point représente une espèce dont l'emplacement dépend de ses coefficients d'abondance-dominance.

3. Discussion

3.1. Santé des arbres

Les valeurs de déficit foliaire obtenues sont dans les gammes de celles observées en région Sud : de l'ordre de 44% pour notre échantillonnage alors que la moyenne régionale est de 42% (GREC-SUD ; 2024). Ces valeurs restent cependant élevées puisque 38% des pins sont considérés comme dépérissant puisqu'ayant un déficit foliaire supérieur ou égal à 50%.

Les pins situés en zone débroussaillée ont un déficit foliaire moindre que ceux situés en zone témoin (40 vs. 48%), ce qui confirme que le brûlage dirigé ne cause pas de dommages physiologiques aux arbres (Duché & Rigolot 2004 ; Ferrat et al. 2021), et notamment aux pins d'Alep grâce à la capacité d'isolation thermique de leur épaisse écorce. L'hypothèse de l'impact positif de la réduction de la compétition pour les ressources (eau, nutriments, lumière) par suppression de la strate arbustive de 0.5m à 3m et d'une partie de la strate arborée sur la santé des arbres restants n'est pas confirmée par les

modèles statistiques, puisqu'aucun lien entre la structure du peuplement (axes de l'ACP en Fig. 33) et le déficit foliaire n'a été observé. De la même manière, cette absence de lien statistique indique que le changement du microclimat par ouverture du peuplement n'affecte pas négativement le houppier des arbres alors que ceux-ci sont plus exposés aux fortes températures et à la sécheresse de l'atmosphère (Prévosto et al. 2024). Si les pins ayant les plus gros diamètres sont les moins défoliés, cette relation n'explique pas non plus la différence entre zones traitées et témoin, puisqu'elle existe dans ces deux zones et que les gammes de diamètre échantillonnées sont les mêmes. Seules les différences de sol, et notamment de réserve utile (RU) de surface, expliquent la différence de déficit foliaire entre modalité débroussaillée et modalité témoin au sein d'une placette. Bien que nous ayons essayé d'effectuer l'échantillonnage en minimisant les différences de topographie et de sol entre traitements, il s'avère que les sols en zone témoin ont souvent une RU plus forte que les zones débroussaillées. Ceci peut s'expliquer par le fait que les chemins d'accès au sein des massifs ont souvent été réalisés sur des zones caillouteuses, et que la faible densité de la végétation dans les zones débroussaillées favorise l'érosion du sol, alors que la matière fine et la matière organique peut s'accumuler dans les zones témoins. Plus les sols en modalité témoin ont une RU élevée par rapport aux sols de la modalité débroussaillée, plus les arbres 'témoin' sont défoliés en comparaison à ceux de la zone débroussaillée. Ceci suggère un manque d'acclimatation des pins d'Alep poussant sur les sols les plus 'fertiles' aux conditions sèches, phénomène observé sur d'autres massifs en Provence (e.g., Ostle 2023). Dans ces conditions, les pins d'Alep donnent souvent la priorité à la croissance des feuilles et des branches plutôt qu'au développement du système racinaire (phénomène connu sous le nom de « structural overshoot »), ce qui les rend vulnérables lorsque les conditions climatiques deviennent plus sèches (Jump et al., 2017). Nous notons cependant que la relation inverse – plus de dépérissement dans les conditions sèches – est souvent observée, par exemple pour le chêne vert ou le pin sylvestre (Bec et al. 2020 ; Lemaire et al. 2022), ce qui invite à des analyses complémentaires à plus large échelle et multi-spécifiques.

3.2. Diversité floristique

Dans la plupart des sites étudiés, le débroussaillage entraîne une augmentation de la richesse spécifique. Ce résultat va dans le même sens que de nombreuses observations et expérimentations menées dans d'autres pinèdes méditerranéennes. Dans le département des Bouches-du-Rhône, sur sol calcaire, Loisel (1992) a mis en évidence un doublement du nombre d'espèces de la flore vasculaire dans des pare-feu par rapport aux zones témoins situées à proximité. De la même manière, une expérience menée en forêt de pin d'Alep à Barbentane au nord du massif des Alpilles a montré que le traitement de la végétation par broyage, brûlage ou scarification du sol, avait entraîné une augmentation du nombre d'espèces de 25 à 32-45 l'année suivante (Prévosto et al. 2011). Cette hausse de la diversité floristique est causée par l'apparition des espèces héliophiles en zone débroussaillée (Fig. 37) qui sont généralement moins demandeuses en eau et en nutriments (Fig. 36) que les espèces forestières qui sont présentes à la fois en zones témoin et débroussaillées. En effet, les espèces annuelles et herbacées sont souvent absentes des pinèdes dont le recouvrement est important et la lumière transmise au sol faible (Prévosto et al. 2011 ; Salvatore et al. 2012). Ceci explique pourquoi l'augmentation de la richesse spécifique en zone débroussaillée est accompagnée d'une hausse de la richesse fonctionnelle. Le cortège floristique évolue en devenant un peu plus héliophile – lié à l'ouverture du milieu – et moins mésophile et nitrophile – lié à une RU moindre en zone débroussaillée (Fig. 34).

Cet effet du débroussaillage n'est pas uniforme entre sites: il est important sur certains, par exemple dans les Alpilles ou sur la Côte-Bleue où le nombre d'espèces est doublé, alors qu'il n'apparaît pas sur la Sainte-Baume. Cette variation entre placettes ne semble pas être causée par le type de traitement réalisé, comme initialement attendu. En effet, le broyage, en ne retirant que les parties aériennes de la végétation préexistante, est vue comme une perturbation moins profonde que celle induite par le traitement par le feu, qui conduit à une proportion plus importante de sol nu offrant aux espèces rudérales des conditions favorables pour s'établir avec succès à partir de la banque de semences ou de propagules apportées de l'extérieur. Cependant, notre résultat est confirmé par l'expérimentation de Prévosto et al. (2011) qui n'a mis en évidence aucune différence de richesse spécifique entre modalités brûlage et broyage, alors que les placettes avec scarification du sol montraient une richesse plus élevée. D'une manière générale, le brûlage dirigé modifie peu la composition spécifique puisque les écosystèmes méditerranéens ont été souvent soumis aux incendies. Des différences de dominance peuvent être observée, par exemple les cistes peuvent être favorisés lorsque l'échauffement lève la dormance des graines accumulées dans les couches superficielles du sol (Duché & Rigolot 2004), mais cela n'a pas été précisément analysé ici.

Les variations de richesse spécifique/fonctionnelle entre placettes ne sont pas non plus expliquées par la durée depuis le dernier traitement (d'un à trois ans), bien qu'avec l'augmentation de la concurrence entre plantes pour les ressources et notamment pour la lumière et l'espace, l'effet du traitement se dissipe dans le temps principalement à cause de la diminution des possibilités d'établissement des plantes rudérales, ceci à l'échelle de quelques années (1 vs. 3 ans ; Prévosto et al. 2011), de la décennie (Navarro-Cano et al. 2024), ou du siècle (Fournier et al. 2020).

Il est fort probable qu'une partie de ces variations soit expliquée par l'année à laquelle la première opération de débroussaillage a été effectuée, mais cette information n'est pas disponible pour les sites étudiés. En effet, plus le peuplement a été débroussaillé pendant une période prolongée, plus la différence de composition floristique entre modalités doit être importante. De plus, il existe probablement un effet massif associé à la proximité aux sources de graines d'espèces rudérales : les placettes de la Sainte-Baume sont plus éloignées des espaces agricoles ou des garrigues méditerranéennes que les placettes des Alpilles, ce qui expliquerait pourquoi la flore des zones débroussaillées dans les Alpilles soit plus riche que celle de la Sainte-Baume.

4. Conclusions et perspectives

Compte tenu du peu de sites suivis (8 placettes ; 4 massifs), il est difficile de conclure sur les causes de variations entre placettes de l'impact du débroussaillage sur la santé des arbres restants et la diversité floristique. Cependant, notre étude montre qu'en moyenne, les pins d'Alep en zone débroussaillée sont moins défoliés qu'en zone témoin et que le débroussaillage a un effet positif sur la richesse spécifique et fonctionnelle de la flore vasculaire. Cette étude montre également l'intérêt de travailler par paires (modalité traitée vs. témoin), d'avoir des répliquats car il existe une forte hétérogénéité environnementale même à l'échelle locale d'un pare-feu ou d'une sous-placette de 400m², et de caractériser au mieux toutes les composantes de l'environnement local en termes de densité et structure du peuplement, et de conditions topographiques et édaphiques. Notre approche devrait ainsi être répliquée sur un échantillonnage plus conséquent, notamment au sein des massifs, afin de pouvoir donner des indications plus robustes aux gestionnaires de ces espaces naturels.

Synthèse des sujets pour lesquels des études ou recherches complémentaires seraient nécessaires

Concernant la phase 1, sur l'étude de l'impact des traitements de la végétation sur l'inflammabilité, les études complémentaires qui n'ont pu être réalisées dans le cadre de ce projet seraient :

- Etendre l'étude à d'autres types de traitement et d'autres types de végétation et mettre en évidence le rôle du traitement sur le changement de conditions du milieu au niveau du sol;
- Etude de la propagation du feu dans les zones traitées à plus large échelle (simulation du comportement du feu et vérité terrain par brûlage dirigé) ;

Concernant l'impact des traitements du combustible sur la diversité floristique forestière et l'état sanitaire de la strate arborée, les relevés effectués sur la période du projet n'ont pas été suffisamment nombreux pour dégager une tendance claire d'un effet du traitement. Une recherche complémentaire nécessiterait :

- Plus de sites échantillonnés : plus de massifs, et plus de placettes au sein des massifs ;
- Suivi à plus long terme de ces placettes.

Par ailleurs, des expérimentations pourraient être menées avant/après traitement dans un environnement est plus contrôlé notamment afin de vérifier si la date du débroussaillage (par ex. début de printemps vs. fin de printemps) a un impact.

On peut aussi rentrer plus dans les processus éco-physiologiques en recherchant l'impact des traitements sur le cycle des nutriments ou bien sur la germination des graines et la régénération des plantes.

ANNEXES RAPPORT TECHNIQUE

Bibliographie Rapport technique

- Anderson, H.E., 1970. Forest fuel ignitibility. *Fire Technol*, 6, 312–319. <https://doi.org/10.1007/BF02588932>
- Archaux, F., Bergès, L., & Chevalier, R. (2007). Are plant censuses carried out on small quadrats more reliable than on larger ones?. *Plant Ecology*, 188(2), 179-190.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., Christensen, R. H. B., Singmann, H., & Bolker, M. B. (2015). Package 'lme4'. *convergence*, 12(1), 2.
- Bartoń K (2024). MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.48.4, <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>
- Bec, R., Daubrée, J. B., Cailleret, M., & Vennetier, M. (2020). État des lieux du dépérissement de chêne vert en région méditerranéenne. *Forêt Entreprise*, 251, 36-40.
- Becker, M., & Geremia, F. (1984). Indices de climat lumineux selon la pente et l'exposition pour les latitudes de 40 à 50. *Bulletin d'écologie Paris*, 15(4), 239-252
- 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*;1–26. DOI: 10.1111/risa.13979. Hal-04234679v1
- Duché Y, Rigolot E. (2004) Equipement du territoire : le brûlage dirigé, bases scientifiques et réalisations. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 4, pp.36-40. hal-02673729
- Dupuy, J. L., Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., ... & Fernandes, P. (2020). Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review. *Annals of Forest Science*, 77, 1-24.
- Ferrat, L., Morandini, F., & Lapa, G. (2021). Influence of Prescribed Burning on a Pinus nigra subsp. Laricio Forest: Heat Transfer and Tree Vitality. *Forests*, 12(7), 915.
- Fournier, T., Fèvre, J., Carcaillet, F., & Carcaillet, C. (2020). For a few years more: reductions in plant diversity 70 years after the last fire in Mediterranean forests. *Plant Ecology*, 221(7), 559-576.
- Ganteaume, A., Lampin-Maillet, C., Guijarro, M., Hernando, C., Jappiot, M., Fonturbel, T., Pérez-Gorostiaga, P., Vega, J.A., 2009. Spot fires: fuel bed flammability and capability of firebrands to ignite fuel beds. *Int. J. Wildland Fire* 18, 951. <https://doi.org/10.1071/WF07111>
- Goudet, M., Saintonge, F.-X., Nageleisen, L.-M., 2018. Quantifier l'état de santé de la forêt, méthode simplifiée d'évaluation. *Dép. Santé For.* 1–6.
- Jamagne, M., Bétrémieux, R., Bégon, J. C., & Mori, A. (1977). Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bulletin Technique d'Information*, 324, 627-641.
- Josse, J., & Husson, F. (2016). missMDA: a package for handling missing values in multivariate data analysis. *Journal of statistical software*, 70, 1-31.
- Jump, A. S., Ruiz-Benito, P., Greenwood, S., Allen, C. D., Kitzberger, T., Fensham, R., ... & Lloret, F. (2017). Structural overshoot of tree growth with climate variability and the global spectrum of drought-induced forest dieback. *Global change biology*, 23(9), 3742-3757.
- Kattge, J., Bönsch, G., Díaz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., ... & Cuntz, M. (2020). TRY plant trait database—enhanced coverage and open access. *Global change biology*, 26(1), 119-188.
- Lemaire, J., Vennetier, M., Prévosto, B., & Cailleret, M. (2022). Interactive effects of abiotic factors and biotic agents on Scots pine dieback: A multivariate modeling approach in southeast France. *Forest Ecology and Management*, 526, 120543.
- Loisel R. - 1992. Incidences des différentes techniques de débroussaillage sur les écosystèmes forestiers et préforestiers méditerranéens. Commission des Communautés Européennes, 94pp.

- Marino, E., Hernando, C., Madrigal, J., Díez, C., Guijarro, M., 2012. Fuel management effectiveness in a mixed heathland: a comparison of the effect of different treatment types on fire initiation risk. *Int. J. Wildland Fire* 21, 969. <https://doi.org/10.1071/WF11111>
- Navarro-Cano, J. A., Goberna, M., Pérez-Valera, E., & Verdú, M. (2024). Decoupling of trait and species turnover in fire-prone Mediterranean plant communities. *Journal of Ecology*, 112(9), 2043-2056.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., ... & Wagner, H. (2016). *Vegan: community ecology package. Ordination methods, diversity analysis and other functions for community and vegetation ecologists.*
- Ostle, M., 2023. Determining the factors associated with *Pinus halepensis* forest decline in the Provence Mining Basin (BMP), France. MSc thesis. Sorbonne université.
- Prévosto, B., Bousquet-Mélou, A., Ripert, C., & Fernandez, C. (2011). Effects of different site preparation treatments on species diversity, composition, and plant traits in *Pinus halepensis* woodlands. *Plant Ecology*, 212, 627-638.
- Prevosto, B., Veuillen, L., Audouard, M., Lopez, J. M., & Cailleret, M. (2024). Le microclimat et les composantes du bilan hydrique dans les forêts méditerranéennes: rôle des strates de végétation. Application aux peuplements à pin d'Alep. *Forêt méditerranéenne*, 35(1), 53-62.
- R Core Team (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- Romero, B., Ganteaume, A., 2021. Effect of Fire Frequency on the Flammability of Two Mediterranean Pines: Link with Needle Terpene Content. *Plants* 10, 2164. <https://doi.org/10.3390/plants10102164>
- Salvatore, P., Mantia, T. L., & Rühl, J. (2012). The impact of *Pinus halepensis* afforestation on Mediterranean spontaneous vegetation: do soil treatment and canopy cover matter?. *Journal of forestry research*, 23, 517-528.
- Tichý, L., Axmanová, I., Dengler, J., Guarino, R., Jansen, F., Midolo, G., ... & Chytrý, M. (2023). Ellenberg-type indicator values for European vascular plant species. *Journal of Vegetation Science*, 34(1), e13168.
- Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In *Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA* (Vol. 200).

Bibliographie Rapport de stage Master 2

Abadie, J., Dupouey, J.L., Avon, C., et al. (2018) Forest recovery since 1860 in a Mediterranean region: drivers and implications for land use and land cover spatial distribution, *Landscape Ecol* vol, 33, p289–305

Abadie, J., Dupouey, J.L., et al., (2021), Historical ecology of Mediterranean forests: Land use legacies on current understorey plants differ with time since abandonment and former agricultural use, *Journal of Vegetation Science*, Vol 32 Num1

Bertrand, R., Lenoir, J., Piedallu, C., et al. (2011), Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 479(7374), 517-520

Bussotti, F. Ferrini, F., et al., (2014), The challenge of Mediterranean sclerophyllous vegetation under climate change: From acclimation to adaptation, *Environmental and Experimental Botany*, Vol 103, p80-98

Cateau, E., Larrieu, L., Vallauri, D., et al., (2015), Ancienneté et maturité : deux qualités complémentaires d'un écosystème forestier, *Comptes Rendus Biologies*, Vol 338, Issue 1, P 58-73

Conesa, A. et Hernández, R., (2014) *Comprehensive Analytical Chemistry*, Chapter 16 - Omics Data Integration in Systems Biology: Methods and Applications, Vol. 64, p 441-459

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., et al., (2018), Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean, *Nature Clim Change* 8, p 972–980

Cramer, W., Guiot, J., Marini, K., et al., (2021), Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future, Chapter 2 – Drivers of Change, *First Mediterranean Assessment Report*

Dai, A., (2013), Increasing drought under global warming in observations and models, *Nature Clim Change* 3, 52- 58

De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., et al, (2021). Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, vol 27, num 11, p2282

Delcourt, N., Farnet-Da Silva, A.M., et al., (2023), Land use legacy footprint in Mediterranean forest soils: An infrared spectroscopy approach, *Geoderma*, Vol 430

Forner, A., Valladares, F., and Aranda, I. (2018). Mediterranean trees coping with severe drought: Avoidance might not be safe. *Environmental and Experimental Botany* 155, 529-540.

Groupe de travail IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2021 The Physical Science Basis*, 6ème rapport

Gordo, O., Sanz, J.J., (2010), Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems, *Global change biology*, Vol 16, issue 3

Jamagne, M., Betremieux, R., Begon, J.C., Mori, A., (1977), Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bulletin Technique d'Information*, 324-325, p.627-641

Lemaire, J., Vennetier, M., Prévosto, B., Cailleret, M., (2022), Interactive effects of abiotic factors and biotic agents on Scots pine dieback: A multivariate modeling approach in southeast France, *Forest Ecology and Management*, Vol 526

- Médail, F., Diadema K., (2006), Biodiversité végétale méditerranéenne et anthropisation : approches macro et micro-régionales, *Annales de géographie*, 2006/5, n° 651, p. 618-640
- Ministère de la Transition écologique, (2021), Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde, Services des données et études statistiques (SDES)
- Milchunas, D.G., Lauenroth, W.K., (1995), Inertia in Plant Community Structure: State Changes After Cessation of Nutrient-Enrichment Stress, *Ecological applications* – Ecological society of America, Vol 5, Issue 2, p 452-458
- Mouillot, D., Bellwood, D.R., et al., (2013), Rare Species Support Vulnerable Functions in High Diversity Ecosystems, *PLoS Biology*, Vol 11, issue 5
- Ostle, M., Cailleret, M., et al., (2023), Determining the factors associated with *Pinus halepensis* forest decline in the Provence mining Bassin (BMP), *Mémoire de fin d'étude M2BEE*, réalisé dans l'équipe EMR INRAE PACA
- Pasho, E., Camarero, J. J., de Luis, M., et Vicente-Serrano, S. M. (2011). Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, p 1800-1811
- Pérez-Ramos, I., Volaire, F., Fattet, M., et al., (2013). Tradeoffs between functional strategies for resource-use and drought-survival in Mediterranean rangeland species. *Environmental and Experimental Botany*. Vol 87, p126-136.
- Prévosto, B., Bousquet-Mélou, A., Ripert, C. et al. (2011), Effects of different site preparation treatments on species diversity, composition, and plant traits in *Pinus halepensis* woodlands, *Plant Ecol* 212, 627–638
- Rago, M.M., Urretavizcaya, M.F., Lederer, N.S., et al. (2020), Plant community response to forest fuel management in Patagonian pine plantations. *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 3, p. 55.
- Suc, J.-P., (1984) Origin and evolution of the Mediterranean vegetation and climate in Europe, *Nature*, vol 307, p429 -432
- Temimi, M., Howarth, P.J., et Blindow, N., (2016), Impact of forest management on microclimate and energy balance: a review. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol 124(1-2)
- Tichý, L., Axmanová, I., (2023), Ellenberg-type indicator value for European vascular plant species, *Journal of Vegetation Science*, Vol 4, Issue 1
- Torras, O., Saura, S. (2008), Effects of silvicultural treatments on forest biodiversity indicators in the Mediterranean, *Forest Ecology and Management*, Vol. 255, Issues 8–9
- Vennetier, M., Ripert, C., Maille E., et al., (2008), A new bioclimatic model calibrated with vegetation for Mediterranean forest areas, *Ann. For. Sci.* 65, 711
- Vennetier, M., Ripert, C., (2009), Forest flora turnover with climate change in the Mediterranean region: A case study in Southeastern France, *Forest Ecology and management* 258S, p56-63
- Vennetier, M., Ripert, C., (2010), Impact du changement climatique sur la flore méditerranéenne : théorie et pratique, *Changement climatique et biodiversité*, Editions Vuibert, p75-87
- Vidal, J.P., Martin, E., et al. (2009), A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, *International Journal of climatology*, Vol 30, issue 11

Comités de suivi du projet GECOV1

- Feuille d'émargement du Premier comité de suivi (20/11/2023)



REUNION DU COMITE DE SUIVI DU PROGRAMME GECOV1

20/11/2023 à 14h00

Le Tholonet

Feuille d'émargement

Nom	Institut	Signature
LADIER Jean	ONF & APOCCE	
d'AVEZAC Hubert	Agence MTDA	
BAUDEZ Jonathan	PNR Apollon	
Bombelle Grand Haimut	CNPF PACA	
Chappaz reuui	RECOVER	
Boschet Arthur	Dubouant INRAE	
Le Fir Ordine	DPFM	
TOUCHKOV/Maïson	ONF OFCI	
FAVERY Annelle	INRAE	
GANTEAUME Anne	INRAE	
CHAUVERET Thérèse	INRAE	En visio

- Feuille d'émargement du Deuxième comité de suivi (11/06/2024)

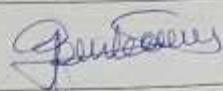
INRAE (Auvergne-Rhône-Alpes) MTDA AFORCE

REUNION DU COMITE DE SUIVI DU PROGRAMME GECVI

11/06/2024 à 13h30

Le Tholonet

Feuille d'émargement

Nom	Institut	Signature
GANTIERRE Anne	INRAE	
LADIER Jean	ONF	
DHERBECOURT Rémi (Hubert D'Arzouze excuse)	MTDA	
Boschet Arthur	INRAE	
Alexandre VELASCO	ONF (DFCI)	
Maxime Couilleret	INRAE	en video
Loa Fleuppert	ADENE	en video
Jonathan BAUDEL	PNR Mpillet	en video