

Synthèse sur la vulnérabilité des peuplements forestiers au feu

**Camille Revertegat¹, Éric Rigolot¹, Jean-Luc Dupuy¹, Sylvain Dupire²,
Marion Toutchkov³, Julien Ruffault¹, Philippe Deuffic⁴, Bernard Boutte⁵,
François Pimont¹**

¹ INRAE URFM, Avignon

² INRAE LESSEM, Grenoble

³ ONF DFCI, Avignon

⁴ INRAE ETTIS, Bordeaux

⁵ DSF, Avignon

Rapport final réalisé dans le cadre du projet AFORCE VULNEFEU



PREAMBULE

- Une synthèse pour qui ?

Cette synthèse a été conçue pour les gestionnaires forestiers, les propriétaires, les professionnels du feu et toute personne souhaitant approfondir ses connaissances sur la vulnérabilité des forêts face aux incendies. Dans le contexte du changement climatique, le phénomène va s'intensifier dans les zones déjà affectées et s'étendre vers de nouveaux territoires. Il est essentiel d'améliorer notre compréhension des mécanismes qui rendent les écosystèmes forestiers plus ou moins vulnérables face au feu, afin d'anticiper les dommages et d'adapter les pratiques de gestion en conséquence.

- Comment définir la vulnérabilité des peuplements ?

Dans le cas des incendies, une définition large de la vulnérabilité intègre la propension d'un peuplement forestier à subir des dommages et sa capacité à récupérer de ces dommages (Smit et Wandel 2006). Cette notion repose sur trois composantes principales : la combustibilité, la résistance et la résilience des arbres. La combustibilité se réfère à la facilité avec laquelle les arbres du peuplement et leur cortège associé (sous-bois) s'enflamment et à la quantité d'énergie libérée lors de leur combustion (l'inflammabilité est parfois distinguée de la combustibilité ; mais l'inflammabilité contribuant à la combustibilité, on ne retient ici que cette dernière notion, voir Annexe A). La résistance concerne la capacité des arbres à survivre lors d'un incendie. Enfin, la résilience se rapporte à l'aptitude des arbres et des peuplements à se reconstituer ou se régénérer après avoir été endommagés ou tués par le feu. Il est important de noter que cette définition adopte un certain point de vue en mettant l'accent sur ces trois aspects spécifiques de la vulnérabilité. En conséquence, la définition de la vulnérabilité peut s'éloigner du triptyque de concepts de risque du GIEC (aléa, enjeux exposés et vulnérabilité), notamment parce que la puissance du feu, qui dépend de la combustibilité du peuplement, est à la fois une composante de l'aléa et de la vulnérabilité.

- Les objectifs de la synthèse

L'objectif de ce document est de rassembler et synthétiser les connaissances actuelles sur la vulnérabilité des peuplements forestiers face aux incendies. Il vise à fournir des connaissances pratiques pour aider les forestiers à prendre des décisions éclairées et efficaces, particulièrement dans le contexte des changements climatiques. Il permet aussi de pointer les besoins d'approfondissement des connaissances pour des travaux de recherche à venir. Pour répondre à ces objectifs, cette synthèse est structurée en cinq grandes parties.

- **La première partie** propose une analyse de l'évolution des incendies en France et ses effets potentiels sur les écosystèmes afin de comprendre le rôle croissant des incendies dans les dynamiques et le fonctionnement des écosystèmes forestiers, en particulier dans le contexte du changement climatique.
- **La deuxième partie** approfondit la compréhension du comportement des feux de forêt. Elle explore les différents types d'incendies, les mécanismes de transfert thermique, les métriques de comportement du feu, ainsi que les facteurs principaux comme les conditions météorologiques, la topographie et le combustible. L'objectif est de fournir les outils nécessaires pour anticiper et comprendre les dynamiques du feu dans différents contextes.
- **La troisième partie** se concentre sur la réponse des peuplements forestiers face au feu, en analysant les effets directs et indirects des incendies sur les arbres ainsi que les caractères qui influencent leur vulnérabilité. Cette section vise à fournir les connaissances nécessaires à l'évaluation des risques pour les peuplements en fonction des caractéristiques des essences présentes et à adapter en conséquence les stratégies de gestion forestière.
- **La quatrième partie** expose les stratégies de gestion préventive des incendies mises en avant dans la littérature et appliquées sur le terrain, avec un accent sur la sylviculture préventive et la distribution spatiale des interventions. Elle présente des solutions pratiques pour atténuer les dommages liés aux incendies et renforcer la résilience des écosystèmes forestiers.
- **La cinquième partie** offre une conclusion générale ainsi que des perspectives d'études.

- Enfin, **la sixième partie** compile des fiches essences, synthétisant leurs vulnérabilités spécifiques au feu. Cette dernière section constitue un outil de référence pratique pour les forestiers, afin de faciliter l'application des connaissances dans des contextes variés.
- Les éléments méthodologiques sont décrits dans quatre annexes (voir sommaire).

SOMMAIRE

PARTIE 1 - CONTEXTE	7
1. Intensification et expansion des incendies	8
2. Impact écologique des changements de fréquence des incendies.....	13
PARTIE 2 - COMPRÉHENSION DES FEUX DE FORÊT	14
1. Mécanismes des incendies	15
2. Comportement des incendies	17
• Mode de transferts thermiques.....	17
o Convection.....	17
o Rayonnement.....	18
o Conduction	18
• Métriques du comportement du feu	19
• Caractéristiques post-incendie	20
• Morphologie d'un incendie	20
3. Types d'incendie.....	21
4. Facteurs principaux	22
• Les conditions météorologiques	22
o Indice Forêt Météo (IFM)	22
• La topographie.....	23
• Le combustible	24
PARTIE 3 - LES PEUPELEMENTS FORESTIERS FACE AU FEU	29
1. Effets des incendies sur les peuplements.....	30
• Mécanismes de la mortalité des arbres soumis au feu.....	30
• Effet du feu sur le feuillage.....	32
• Effet du feu sur le tronc	33
• Effet du feu sur les racines	35
• Effets indirects du feu.....	36
2. Traits fonctionnels et vulnérabilité.....	37
• Individu	37
Graines.....	37
Tronc.....	38
Houppier.....	38
• Peuplement	41
Strate arborée.....	41
Litière	41
3. Combinaisons de traits fonctionnels impactant la survie aux feux	42
La combustibilité	43

La résistance	44
La résilience	44
o Tolérance de l'individu (résilience par endurance)	44
o Persistance à l'échelle de la population (résilience par évacion)	44
o Persistance de l'essence dans le paysage.....	44
4. Vulnérabilité au feu par groupe d'essences.....	45
• Feuillus.....	45
Fagacées.....	45
o Les chênes (genre <i>Quercus</i>).....	45
o Autres Fagacées	47
Altingacées	48
• Conifères	48
Pinacées.....	48
o Les pins (genre <i>Pinus</i>).....	48
o Autres conifères.....	50
Cupressacées.....	51
PARTIE 4 - SYLVICULTURE ET GESTION PRÉVENTIVE DES INCENDIES	53
1. De quelle sylviculture préventive parle-t-on ici ?	54
2. Types d'interventions.....	56
• Le renfort DFCI	56
Les différentes opérations.....	57
• Mise en auto-résistance :.....	59
• Compromis entre éclaircie et maîtrise des strates basses	60
3. Effets attendus des interventions	62
PARTIE 5 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	63
2. Conclusion	64
3. Perspectives	65
PARTIE 6 - FICHES ESSENCES	69
BIBLIOGRAPHIE	130
ANNEXES	136
Annexe A : Les trois composantes de la vulnérabilité et liste des traits qui les caractérisent.....	137
Annexe B. Fiches de synthèse sur les feux et les combustibles	139
Annexe C. Questionnaire	141
Annexe D. Descriptif sommaire des méthodes utilisées.....	150

PARTIE 1

-

CONTEXTE

Évolution et écologie des incendies

1. INTENSIFICATION ET EXPANSION DES INCENDIES

Généralités

En France, les activités de feux observées au cours des cinquante dernières années et jusqu'à une période récente ont été orientées à la baisse, en raison principalement des progrès de la prévention et de la lutte. En effet, ceux-ci ont permis deux phases de baisses successives dans les années 1990, puis dans les années qui ont suivi la canicule de 2003, avec une réduction importante du nombre de feux supérieurs à 1 ha (Ruffault et al. 2015 ; Pimont et al. 2021). Ces politiques publiques, et en particulier l'attaque sur feux naissants, ont ainsi permis une forte réduction des surfaces brûlées, malgré des saisons exceptionnelles comme lors de l'année 2003. Cependant, depuis 2017, les surfaces brûlées repartent à la hausse (Durand et al. 2023). Plus généralement, la zone euro-méditerranéenne a été marquée par des feux hors normes, de par leur intensité, vitesse de propagation, durée et de par les surfaces brûlées (Ruffault et al. 2018; Duane, Castellnou, et Brotons 2021; Rodrigues et al. 2022).

Cette dégradation est fréquemment attribuée au changement climatique, qui induit une augmentation du danger météorologique d'incendie de forêt en Europe (Dupuy et al. 2020 ; Ruffault et al. 2020) et notamment en France (Chatry et al. 2010 ; Fargeon et al. 2020). En particulier, l'Indice Feu Météo (IFM), qui synthétise les effets du vent, de la température, de l'humidité relative et des précipitations, a augmenté sur le territoire d'environ 20% depuis les années 1990. La moitié de cette augmentation peut être formellement attribuée au changement climatique d'origine anthropique (Barbero et al. 2020). Elle se traduit notamment par la survenue de conditions météorologiques favorables à des feux extrêmes, comme celles observées lors de la canicule de 2003, qui sont devenues cinquante fois plus probables sur la période 2008-2017, qu'en 1960.

Les projections climatiques aident à anticiper les effets du changement climatique. Elles indiquent une intensification des feux dans les zones déjà exposées, avec une augmentation des événements extrêmes (Dupuy et al. 2020; M. Jones et al. 2022; Ruffault et al. 2020; van Mantgem et al. 2013). Parallèlement, on prévoit une extension spatiale du risque d'incendie vers de nouveaux territoires, notamment aux marges des zones historiquement touchées, ainsi qu'une montée en altitude dans les Alpes, les montagnes corses, et les Pyrénées (Cane et al. 2013; Dirnböck, Essl, et Rabitsch 2011; Dupire et al. 2019; Gottfried et al. 2012; Kohler et al. 2010; Pimont et al. 2023). La diversité des écosystèmes forestiers touchés par des incendies lors de l'été

2022 témoigne de la progression de ce danger vers des zones qui étaient auparavant relativement préservées (*Le Monde.fr* 2022).

Synthèse des études de la mission d'inspection Durand et al. (2023)

Les travaux scientifiques et techniques produits par Météo-France, ONF et INRAE en appui à cette mission ont permis de quantifier l'évolution du danger météo, de la sensibilité de la végétation et de l'activité des feux. Les trois études convergent sur l'intensification et l'expansion spatiale du danger -au sens large-, quelles que soient les métriques utilisées.

D'un point de vue quantitatif, le nombre de grands feux >100 ha pourrait tripler dans le Sud-Est de la France à la fin du 21^{ème} siècle et plus que doubler dans le massif landais. D'après les modèles, les surfaces brûlées auront déjà augmenté d'environ un quart en 2030 par rapport à la période 2001-2020 en moyenne. Ces augmentations se traduisent d'abord par une intensification de l'activité dans les territoires déjà concernés et par une expansion spatiale très importante des zones concernées, avec un doublement de la surface des territoires exposés en fin de siècle dans le Sud-Est et le Sud-Ouest. Ces expansions concernent essentiellement le Nord-Ouest de la zone Sud-Est (en particulier Haut-Languedoc, Causses, Cévennes et Monts d'Ardèche), l'arrière-pays provençal, les 2/3 nord des Landes et une partie de la Dordogne.

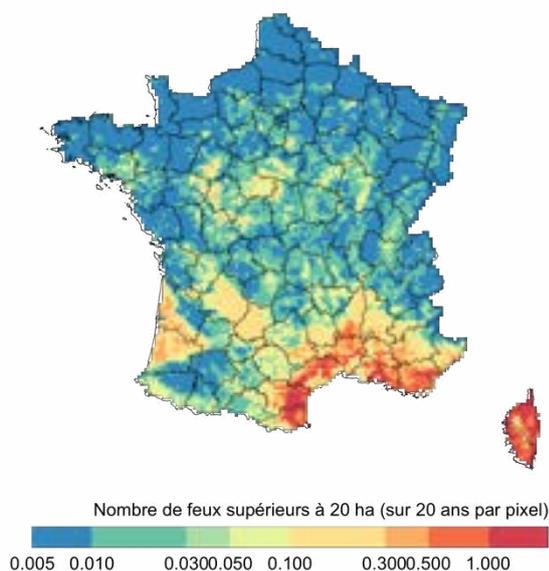
L'augmentation du niveau d'activité de feu va également se traduire par un allongement de la saison propice aux incendies. Dans le cas de la zone Sud-Est, ceci se traduira par un début plus précoce et une fin plus tardive, le cœur de la saison de feu passant par ex. de 40 jours (16 juillet-24 août) jusqu'à 94 jours en 2090 dans le scénario le plus pessimiste (16 juin-17 septembre). En zone Sud-Ouest, le niveau d'activité modéré serait atteint continûment entre la fin de l'hiver et l'automne en 2050, passant ainsi d'une saison de feu de niveau modéré de 176 jours pendant la période historique à 235 jours, entre le 23 février et le 15 octobre en fin de siècle dans le scénario le plus pessimiste.

En ce qui concerne le reste de la France, l'expansion se produit également autour de la zone Centre-Val de Loire, également fortement concernée par les incendies de forêt. Les augmentations relatives du nombre de feux > 20 ha pourront être particulièrement marquées dans certains départements aux marges de ces zones historiques, qui devraient ainsi connaître les changements les plus rapides. Pour plus de détails concernant ces études, on se référera à Pimont et al. (2023).

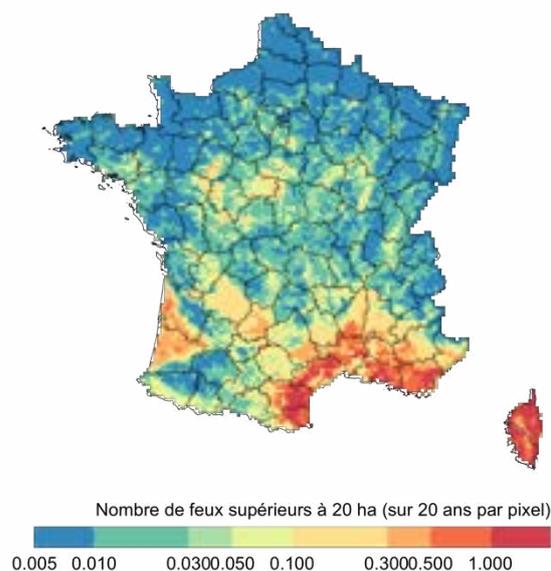
Projections des activités de feu selon la Trajectoire Nationale d'Adaptation au Changement Climatique

Les résultats de ces différentes études ont été produits pour 2 scénarios d'émission (RCP 4.5 et 8.5). Depuis, le gouvernement a choisi une trajectoire nationale d'adaptation de référence (TRACC). Pour le présent rapport, ces projections d'activité des feux >20ha ont été déclinées selon cette trajectoire sur une grille de 8 km (Figure 1.1) et à l'échelle départementale (Figure 1.2). Elles serviront de référence pour représenter la zone à risque actuelle et son expansion pour le présent rapport, notamment pour les fiches essences.

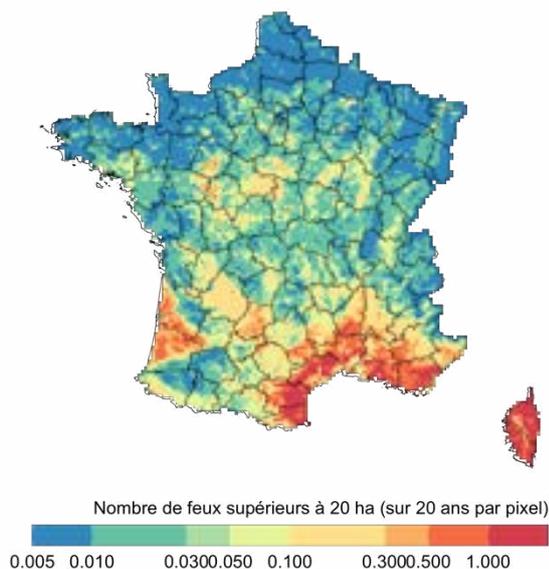
a) 2001-2020



b) TRACC 2030 (+1.5°C)



c) TRACC 2050 (+2.0°C)



d) TRACC 2090 (+3.0°C)

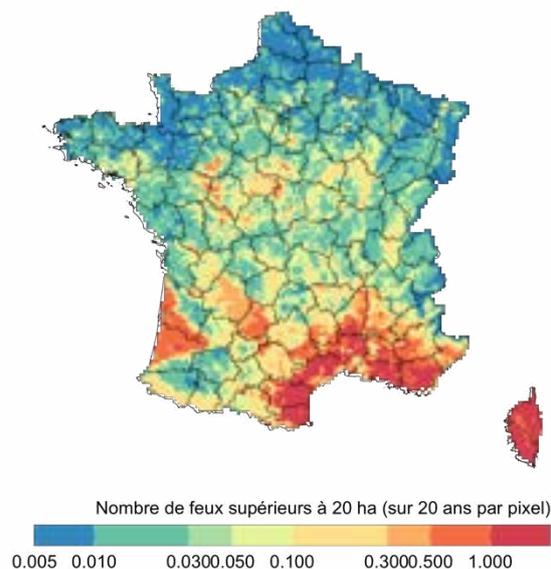


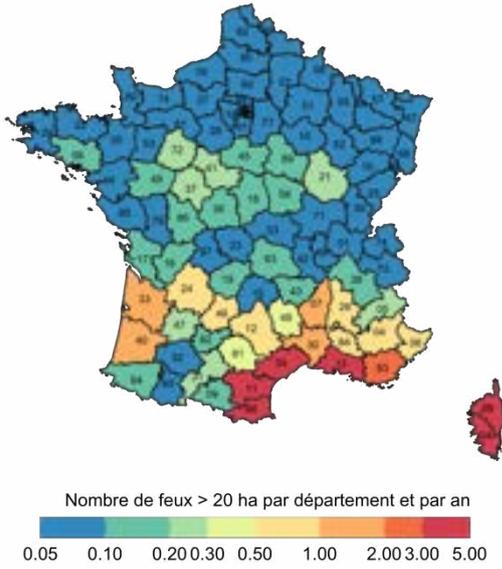
Figure 1.1. Projections du nombre de feux supérieurs à 20 ha selon la TRAAC (maille SAFRAN 8 km)

D'une manière générale, les projections modifient assez peu la hiérarchie entre territoires. Les départements les plus concernés par l'intensification sont les territoires historiques, et notamment ceux du Sud-Est et du Sud-Ouest : Dordogne (24), Gironde (33) et Landes (40), mais aussi l'Aveyron (12), le Lot (46), et le Tarn (81). Dans la moitié Nord, les départements les plus concernés sont l'Indre-et-Loire (37), le Loir-et-Cher (41), la Sarthe (72) et la Côte-d'Or (21). L'intensification générale se traduit par une expansion autour de la zone Sud-Est -Aveyron (12), Tarn (81), Haute-Loire (43), Ariège (09), Haute-Garonne (31), Isère (38) et même le Puy-de-Dôme (63) et l'Ain (01)- et de la zone Sud-Ouest -Lot (46), Pyrénées-Atlantiques (64), Charente (16), Haute-Garonne (31), Tarn-et-Garonne (82), Corrèze (19), Charente-Maritime (17) et Hautes-Pyrénées (65), conduisant à une moitié sud quasiment concernée dans son intégralité par des feux de forêt en 2090. La zone « Centre - Val de Loire » s'étend également, avec la montée en puissance progressive d'activité des feux dans les départements du Maine-et-Loire (49), du Cher (18), de la Vienne (86), du Loiret (45), de l'Indre (36) et de l'Yonne (89), joignant ainsi progressivement les deux zones historiquement exposées de la moitié sud. On notera enfin que la Bretagne est concernée avec le Morbihan (56), mais pas le Finistère (29), alors qu'un nombre important de feux > 20 ha a eu lieu en 2022, mais aussi en 1976 et 1996.

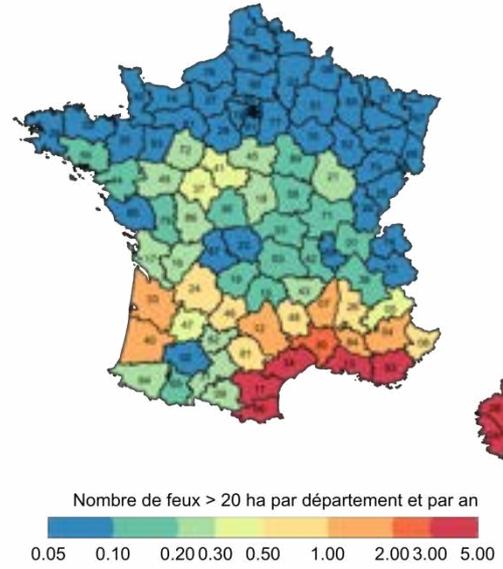
Un dernier point concerne les départements dans lesquels les changements attendus sont les plus rapides, c'est-à-dire ceux où l'augmentation relative est la plus forte en pourcentage. Ces départements sont les suivants : Aveyron (12), Lozère (48), Tarn (81), Haute-Loire (43), Ariège (09), Haute-Garonne (31) et Ain (01) ; dans la zone Sud-Ouest, il s'agit du Lot (46), des Pyrénées-Atlantiques (64), de la Haute-Garonne (31), de la Corrèze (19) et des Hautes-Pyrénées (65) ; dans la zone « Centre - Val de Loire », il s'agit du Cher (18) et de la Côte-d'Or (21). Les changements les plus rapides auraient donc lieu en périphérie des zones historiques.

A noter que **les feux de la saison 2022 n'ont pas été utilisés pour construire les modèles et les projections dans cette étude**, qu'il est prévu d'actualiser début 2025, ce qui pourrait induire des modifications dans les territoires fortement impactés en 2022.

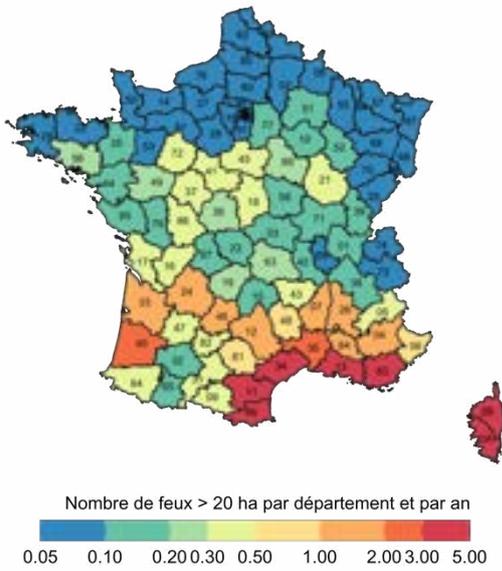
a) 2001-2020



TRACC 2030 (+1.5°C)



TRACC 2050 (+2.0°C)



TRACC 2090 (+3.0°C)

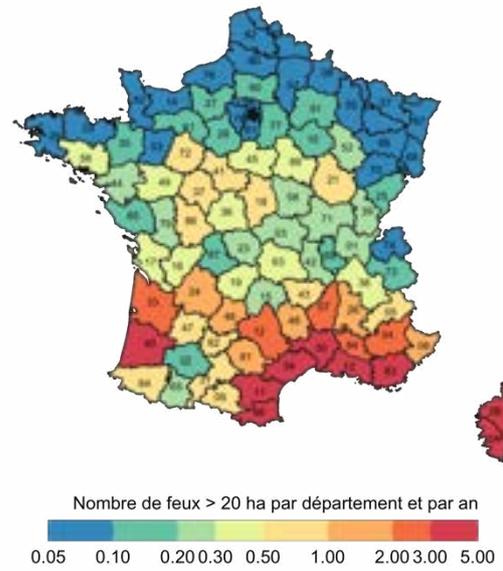


Figure 1.2. Projections du nombre de feux supérieurs à 20ha selon la TRAAC (par départements)

2. IMPACT ECOLOGIQUE DES CHANGEMENTS DE FREQUENCE DES INCENDIES

Les perturbations naturelles, telles que les incendies jouent un rôle essentiel dans la régulation des écosystèmes forestiers, favorisant l'hétérogénéité et la diversité (G. M. Jones et Tingley 2022; J. Keeley et al. 2011; J. Pausas et Keeley 2009; Turner et al. 1997). Cependant, lorsque la fréquence ou l'intensité de ces perturbations changent, en augmentant mais aussi en diminuant, cela peut entraîner des conséquences néfastes sur les écosystèmes. C'est ainsi qu'en Scandinavie, la politique de lutte systématique contre les feux aurait contribué à la mise en danger de plus de 2000 espèces (Östlund, Zackrisson, et Axelsson 1997). En effet, l'homogénéisation excessive des écosystèmes forestiers réduit la variabilité spatiale des ressources, qui est cruciale pour la structuration et la composition des écosystèmes (Kelly et Brotons 2017). A contrario, des feux de forêt trop fréquents peuvent considérablement altérer les écosystèmes en entraînant des dommages directs au sol, à la flore et à la faune, mais aussi des dommages à long terme du fait de l'érosion et de perturbations des dynamiques de régénération. Les feux impliquent également une perte importante de biomasse et une libération de CO₂ (Flannigan et al. 2009; Gongalsky et Persson 2013). C'est ce qui est à craindre en France, avec des impacts d'autant plus graves que l'intensité, la taille et la fréquence des feux augmenteront.

Les feux peuvent aussi participer à des cascades d'aléas responsables de mortalités pouvant se manifester de quelques mois à quelques années plus tard (Hood et al. 2018; Stephens et al. 2018; Whitman et al. 2019). Ces mortalités résultent d'interactions avec d'autres processus eux-mêmes liés au changement climatique, par exemple des processus météorologiques (sécheresses) ou biotiques (attaques d'insectes) (Maringer et al. 2020).

PARTIE 2

-

COMPRÉHENSION DES FEUX DE FORÊT

Mécanismes, comportement et facteurs

1. MECANISMES DES INCENDIES

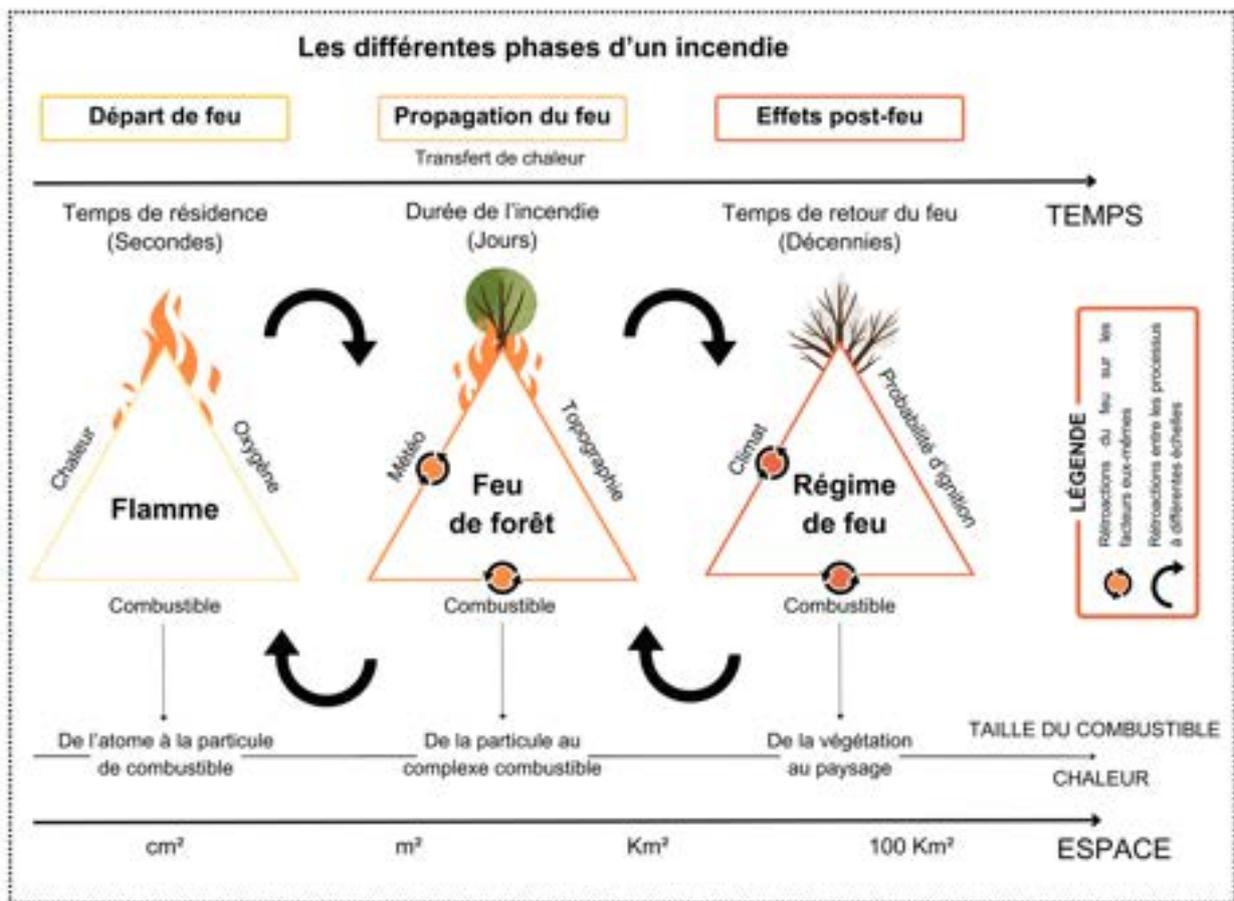


Figure 2.1. Représentation des facteurs dominants influençant le feu à l'échelle d'une flamme, d'un feu de forêt et d'un régime d'incendie. Il s'agit d'une extension du concept traditionnel du "triangle du feu", qui inclut ici les grandes échelles d'espace et de temps, les rétroactions du feu sur les contrôles eux-mêmes (petites boucles), ainsi que les rétroactions entre les processus à différentes échelles (flèches). Figure inspirée de Ganteaume, 2020; Massiau and Tiger, 2023; Moritz et al., 2005; Rego et al, (2021).

Un feu de forêt se produit lorsqu'un phénomène de combustion se propage à travers une zone végétalisée en consommant une partie de la matière végétale présente. Trois facteurs doivent être réunis pour qu'un feu démarre : une source de chaleur, un combustible (la matière qui brûle) et un comburant (l'oxygène de l'air) (**Fig. 2.1**). Le processus chimique du feu de forêt comporte 3 étapes (**Fig. 2.2**) : évaporation de l'eau contenue dans le combustible, émission de gaz inflammables par pyrolyse et enfin combustion des gaz.

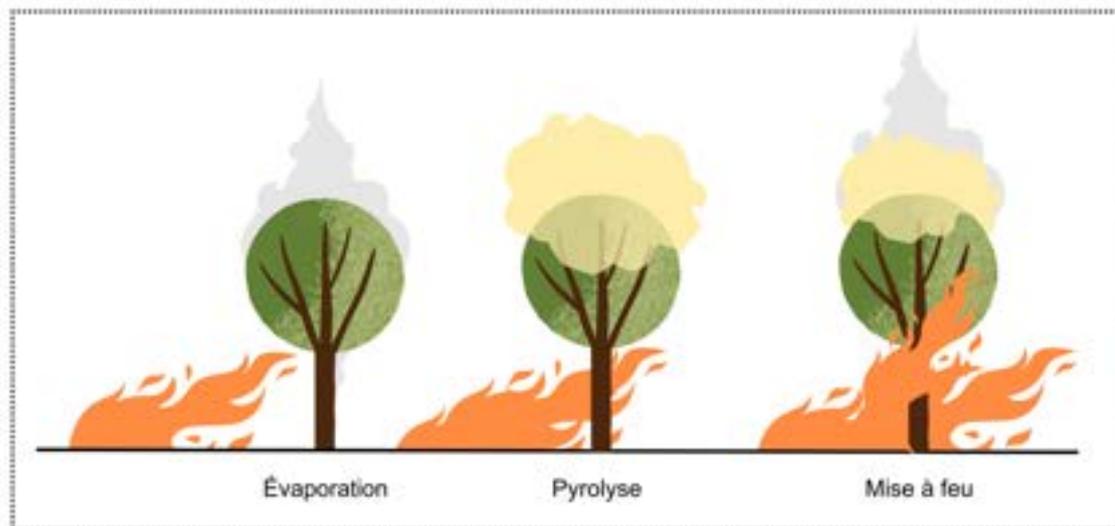


Figure 2.2. Les 3 étapes du processus chimique de feu de forêt.

L'ignition est donc le point de départ d'un incendie. La source peut être d'origine humaine, avec un point chaud initial (un mégot, des particules incandescentes de diverses origines) ou un foyer initial (feux domestiques, usages professionnels du feu lors de travaux agricoles ou forestiers, allumage volontaire) ou plus rarement d'origine naturelle, liée à un impact de foudre (A. Ganteaume, Jappiot, et Lampin 2012). 96% des feux de forêt en Europe, dont la source est connue, sont déclenchés par des activités humaines, soit par accident, soit intentionnellement (De Rigo et al. 2018).

Une fois éclos, le feu se propage. La propagation d'un feu de forêt se décompose en trois phases successives :

- la combustion du matériel végétal, qui s'accompagne d'une forte émission de chaleur
- le transfert de la chaleur émise vers le combustible en avant du front de flammes, par conduction, rayonnement thermique et convection ;
- l'absorption de la chaleur et l'inflammation du matériel végétal en avant du front de flammes et la progression du feu.

Trois facteurs influencent le comportement d'un feu de forêt (**Fig. 2.3**) : les conditions météorologiques au moment du feu, le complexe de combustibles et la topographie du milieu. Ces facteurs font varier l'intensité, la surface brûlée et la durée de l'incendie. Sur une zone géographique d'échelle régionale et un pas de temps long, le régime de feux est caractérisé par les gammes habituelles de fréquences, de dimensions, d'intensités et de saison des feux de forêt.

- Rayonnement

Il s'agit d'un transfert de chaleur par ondes électromagnétiques, dans toutes les directions. Le rayonnement est d'autant plus important que le panneau radiant généré par le front de flamme présente une surface importante. Il diminue avec le carré de la distance. Au fur et à mesure de son avancée, le front de flammes émet un rayonnement qui élève la température de la végétation environnante et la dessèche, contribuant ainsi à la progression du feu.

- Conduction

Ce mode de transfert de chaleur est très minoritaire dans la propagation des feux de forêt, à l'exception des feux d'humus ou de tourbière. La chaleur se propage par contact direct avec des matériaux combustibles. La conduction est le principal mode de transfert de chaleur au sein de l'écorce des arbres, entraînant l'échauffement et à la destruction potentielle des tissus sous-jacents, dont le phloème, le cambium et le xylème.

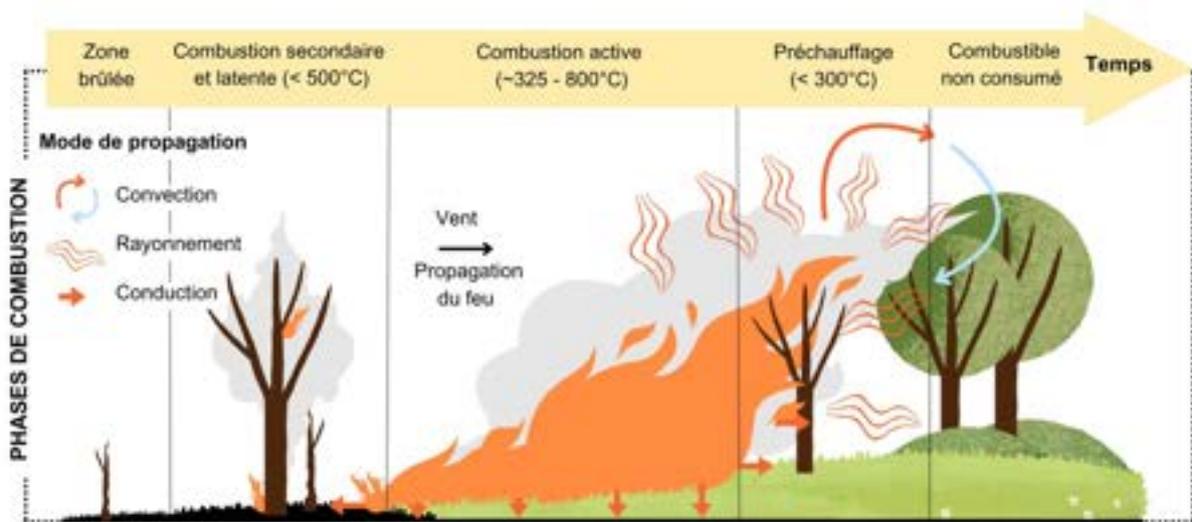


Figure 2.4. Étapes d'un incendie et gammes de températures associées, modes de propagation. Ces étapes et les modes de transfert associés jouent un rôle clé sur la vitesse de propagation.

- Métriques du comportement du feu

Intensité du feu (Puissance du front de flamme)

Le front de feu ou front de flammes est le domaine spatial dans lequel la combustion produit des flammes apparentes. C'est également la zone frontière entre le combustible non brûlé et le combustible brûlé, qui concentre l'essentiel de l'activité de l'incendie.

La puissance du front de feu est l'énergie libérée par unité de temps et par unité de longueur du front de feu. Elle est exprimée en kilowatt par mètre linéaire de front de feu (kW/m). Cette puissance est égale au produit de l'énergie dégagée par la combustion d'un mètre carré de végétation et de la vitesse de propagation du feu.

La formule de Byram permet de calculer cette puissance en fonction de la vitesse de propagation de l'incendie et de la quantité de combustible consommée. Plus le feu est rapide et plus la masse consommée est importante, plus le feu sera puissant. Il s'agit de la métrique principale permettant d'estimer l'intensité du phénomène. Elle est fortement corrélée avec la dimension des flammes.

$$Pf = PC \times M \times V$$

Où Pf : Puissance du front de flamme ($kW.m^{-1}$)

PC : Pouvoir calorifique du combustible présent ($kJ.kg^{-1}$)

M : Quantité de combustible consommée par le feu ($kg.m^{-2}$)

V : Vitesse de propagation ($m.s^{-1}$)

Temps de séjour des flammes

Le temps de séjour est la durée pendant laquelle le feu reste actif dans une zone donnée.

Dimension des flammes

C'est la taille des flammes. Observable directement sur le terrain, cette mesure permet d'estimer à vue d'œil la puissance du feu. Cette mesure est toutefois incertaine, car la hauteur de flamme varie rapidement et dépend de la hauteur du combustible brûlé.

- Caractéristiques post-incendie

Sévérité

La sévérité est une mesure quantitative des effets du feu sur l'écosystème. Elle se réfère à l'effet du feu sur la perte de biomasse (J. E. Keeley 2009). La sévérité dépend notamment de la puissance du feu et son temps de séjour en un point donné. Plus la puissance du front de flamme est élevée, plus les flux radiatifs et convectifs sont importants, ce qui génère des dommages aux arbres, notamment aux houppiers. Plus le temps de séjour est important, plus les dommages sont importants, affectant potentiellement les tissus internes des arbres et les racines superficielles.

La sévérité peut être évaluée de différentes manières :

- Le delta Normalized Burn Ratio (dNBR) est un indice basé sur l'imagerie satellite qui permet de quantifier l'impact des feux sur la végétation en comparant les données de réflectance dans le proche infrarouge et l'infrarouge court avant et après incendie.
- Le Composite Burn Index (CBI) est une mesure de terrain qui permet d'évaluer l'impact global des feux sur un écosystème en examinant leurs effets sur l'ensemble des strates végétales.

- Morphologie d'un incendie

Les termes utilisés pour caractériser la morphologie d'un incendie sont illustrés dans la **Figure 2.5**.

Le front de flammes représente la partie active du feu, qui avance en direction du vent ou en fonction de la topographie, brûlant le combustible.

- **La tête de feu** est la lisière de feu poussée par le vent ou conduite par la pente, ou une combinaison des deux. C'est la zone où le feu se propage le plus vite avec la puissance la plus élevée. La tête du feu s'élargit progressivement. L'essentiel de la surface brûlée est le résultat du passage de la tête du feu.
- **Les flancs** sont les axes de propagation latéraux du feu. Ils se déplacent beaucoup plus lentement que la tête du feu. Ils parcourent beaucoup moins de surface.
- **L'arrière** est la lisière de feu qui se propage à la recule (contre le vent et / ou la pente). Il est généralement peu actif et se déplace lentement

- **Une saute de feu** se produit lorsque des brandons - comme les morceaux d'écorce en combustion - sont transportés dans la colonne de convection de l'incendie pour se déposer à l'avant du front des flammes et allumer de nouveaux foyers.

La flamme est caractérisée par sa largeur, sa longueur, sa profondeur (**Fig. 2.5**) et sa température.

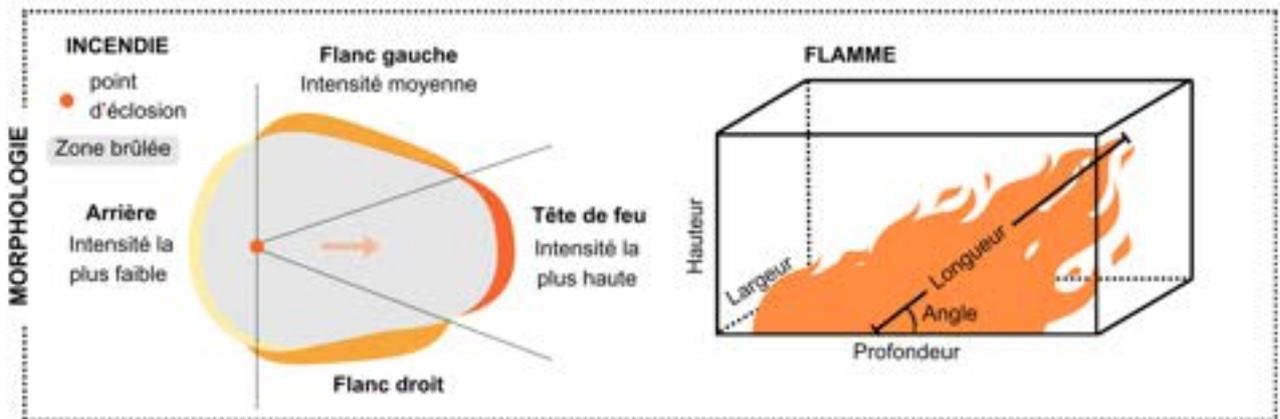
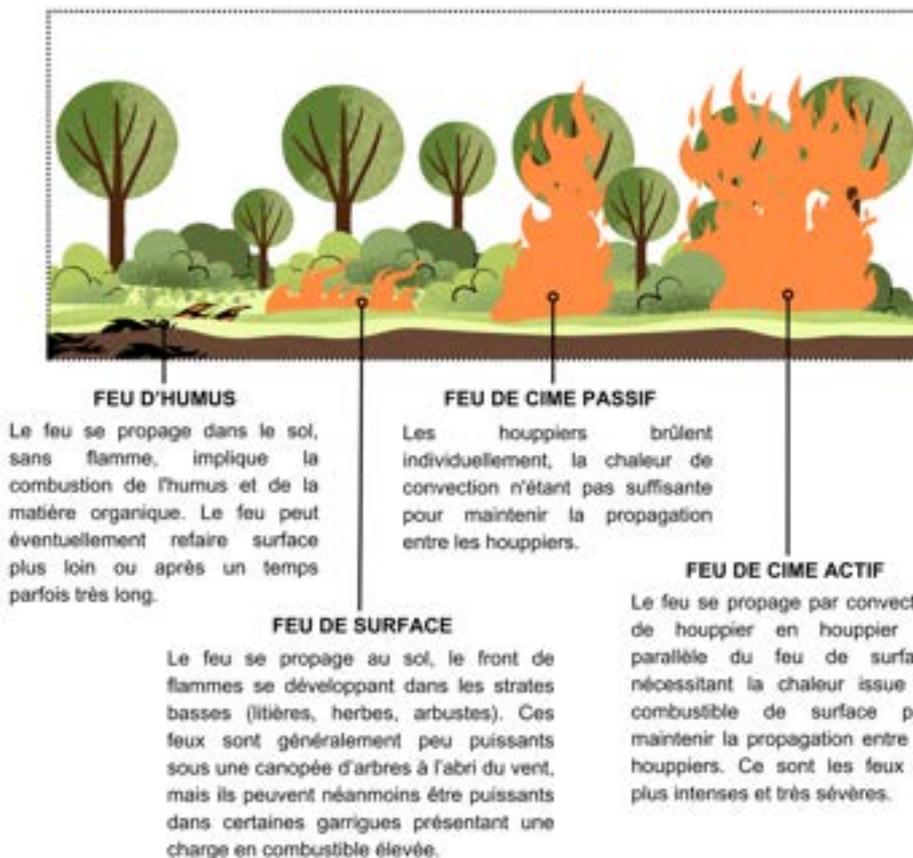


Figure 2.5. Morphologie d'un incendie et degré d'intensité associé à la zone (droite) et morphologie d'une flamme (gauche).

3. TYPES D'INCENDIE



Les feux peuvent être classés selon le type de végétation qu'ils consomment et leur mode principal de propagation. Cette classification permet de mieux comprendre leur comportement et leurs impacts sur la végétation. Les différents types de feux sont présentés sur la **Fig. 2.6**.

Figure 2.6. Types de feux

4. FACTEURS PRINCIPAUX

- Les conditions météorologiques

La météo est un facteur très variable, en particulier dans le temps, ce qui est à l'origine de la saisonnalité de feux et de la très grande variabilité dans les activités de feux observées d'une année à l'autre. Elle peut varier considérablement sur de courtes distances, souvent en fonction des gradients altitudinaux et dans une moindre mesure, de l'orientation des versants.

Les facteurs météorologiques les plus importants sont :

- Le vent : il favorise les transferts de chaleur convectifs et radiatifs, augmente l'efficacité de la combustion au travers du mélange turbulent et apporte de l'oxygène. Sous l'effet du vent, les flammes sont plus grandes, le feu se propage plus rapidement et l'incendie devient plus intense. Le vent assèche également les végétaux et accélère leur préchauffage et leur inflammation (Ghodrat et al. 2021).
- Radiation, sécheresse et chaleur : elles augmentent l'évaporation des sols et la transpiration des végétaux et diminuent leur teneur en eau ce qui favorise le risque d'inflammation.

- o Indice Forêt Météo (IFM)

L'indice Forêt Météo ou le Fire Weather Index (FWI), est un indice qui évalue le « danger météorologique » des feux de forêt (Wagner 1987). Ce danger influence les probabilités d'éclosion et le comportement des feux potentiels. Il peut être calculé quotidiennement à partir de plusieurs variables climatiques : la température, les précipitations, l'humidité de l'air et la vitesse du vent (**Fig. 2.8**). L'IFM augmente lorsque la température et la vitesse du vent augmentent, et lorsque les précipitations et l'humidité relative de l'air diminuent (Countryman 1972; Curt et al. 2022; Ferrand et Comes 2021).

C'est un indice composite, dont le calcul s'appuie sur plusieurs sous-indices, exprimant le niveau de dessèchement de la végétation selon plusieurs échelles de temps. Parmi eux, l'**indice du combustible léger (ICL)** indique la sécheresse subie par la végétation morte la plus fine (litière, etc...); il dépend surtout de l'humidité relative de l'air et de la température, et évolue rapidement avec ces paramètres. Combiné au vent, cet indicateur donne l'**indice de propagation initiale (IPI)**. Deux autres indices, l'**indice d'humus (IH)** et l'**indice de sécheresse (IS)** permettent de

quantifier la sécheresse au cours de la saison, dont dépend l'état de dessèchement du sol et de la végétation, et donc la quantité de combustible disponible. En effet, plus le combustible est sec, plus une part importante de celui-ci est consommée par le feu. Ces deux indices se combinent pour former l'**indice de combustible disponible (ICD)** (Durand et al. 2023).

Ces indices, initialement développés au Canada constituent de précieux indicateurs du danger météorologique. Des travaux récents ont permis de montrer qu'il s'agissait des meilleurs indices météorologiques disponibles pour prédire l'occurrence et la taille des feux sur le sud de la France (Castel-Clavera et al. 2025). Cependant, il s'agit d'indicateurs purement météorologiques, qui ne prennent pas en compte les autres facteurs jouant également un rôle important dans le comportement et l'activité des feux : type de végétation et état de dessèchement réel, topographie, activités humaines...

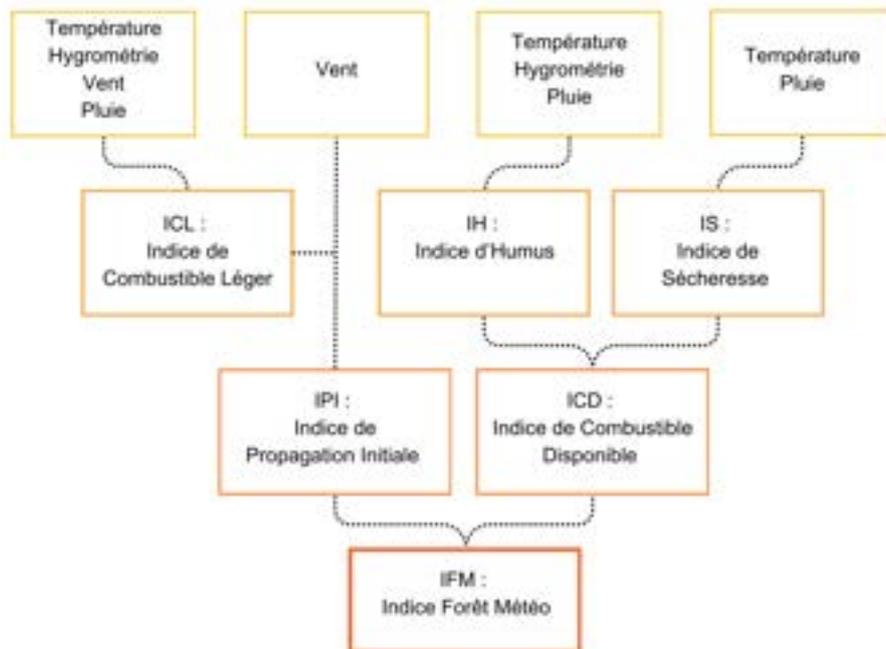


Figure 2.8. Détermination de l'Indice Forêt Météo (inspirée par Météo France).

- La topographie

L'exposition, la pente, l'altitude et le relief caractérisent la topographie d'un milieu. La topographie peut être considérée comme constante aux échelles de temps qui nous intéressent ici. En revanche, sur le plan spatial, la topographie peut changer sur de courtes distances, en particulier dans les régions montagneuses. Les variations topographiques peuvent entraîner un

changement brutal du comportement du feu au fur et à mesure de sa progression sur le terrain (**Fig. 2.9**) (Ferrand et Comes 2021).

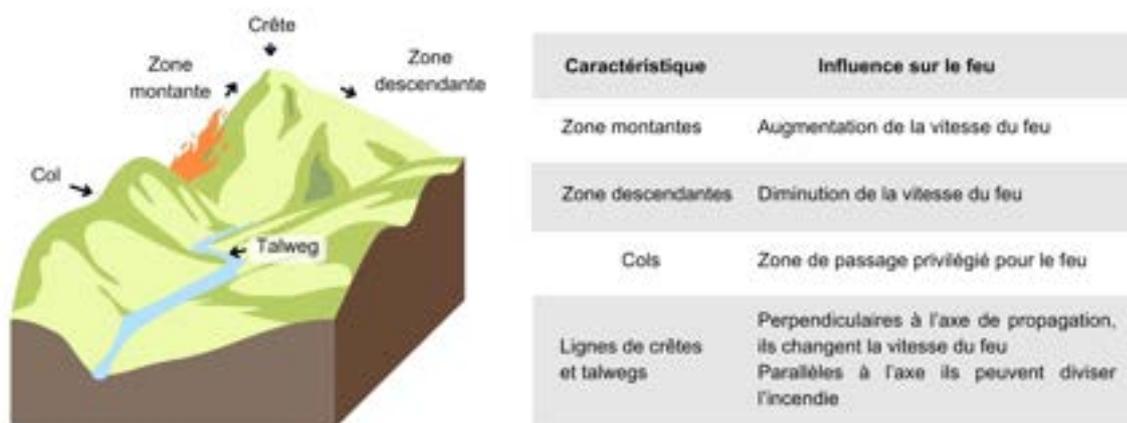


Figure 2.9. Impact du relief sur le comportement du feu. Adapté de Ferrand et Comes (2021).

Les gradients altitudinaux qui en résultent modifient de manière importante la météorologie locale, en influençant les températures, l'humidité relative de l'air, les précipitations et le vent. Ces changements induisent globalement une augmentation de la teneur en eau avec l'altitude, ce qui se traduit par une moindre propension des végétaux à brûler.

Enfin, l'exposition des versants constitue également un facteur influençant la propagation :

- En exposition sud, le rayonnement solaire est plus important, la végétation est généralement plus sèche et favorise la combustion.
- En exposition nord, le rayonnement solaire est plus faible, la végétation est généralement plus humide.

En pratique, pentes et expositions ont des effets significatifs sur l'occurrence des feux (par ex. Castel-Clavera et al., 2022).

- Le combustible

C'est la source d'énergie thermique et la force motrice des phénomènes liés au comportement du feu.

Le combustible forestier correspond à la biomasse, vivante ou morte, dans toutes les strates, pouvant brûler au passage d'un incendie. Au passage du front de flamme, il s'agit uniquement des parties mortes de quelques millimètres d'épaisseur, qui vont contribuer à la puissance du

front de flamme. Au-delà, le feu ne consomme le bois qu'après le passage du front de flamme et essentiellement si le bois est mort et sec.

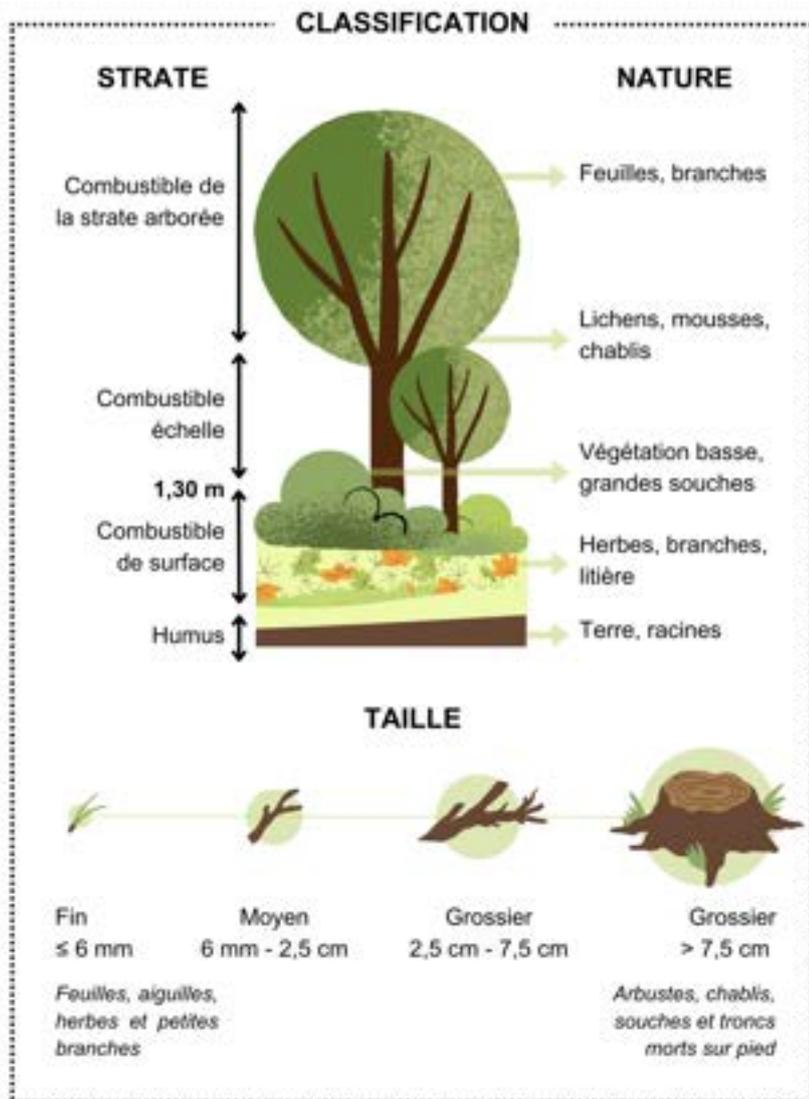
Toute espèce végétale, vivante ou morte, en fonction de son état et de sa teneur en eau, est susceptible de s'enflammer sous l'effet d'une source de chaleur.

La combustibilité désigne la capacité d'un complexe de combustible (strate, arbre, peuplement) à brûler et à alimenter la propagation du feu (Annexe A). Elle dépend de la quantité de combustible, de sa répartition, des propriétés de combustion du matériel végétal et de son état hydrique. Son évolution est donc influencée par les conditions environnementales, la phénologie des essences, l'âge du peuplement et les pratiques de gestion.

Propriétés physico-chimiques de combustion d'un matériel végétal

Elles indiquent l'aptitude d'un matériel végétal à brûler et incluent la facilité d'ignition du combustible (**l'inflammabilité**), la proportion de biomasse susceptible de brûler (**le taux de consommation du combustible**) dont dépendra la **puissance** du feu (l'énergie libérée pendant la combustion) et enfin, la durée de la combustion (**temps de séjour**). La combustibilité est décrite comme la somme de ces 4 composantes :

- **Inflammabilité** : Capacité d'un combustible à s'enflammer. On peut définir cette composante comme le temps nécessaire à l'inflammation d'un combustible soumis à une source de chaleur. Plus spécifiquement, l'inflammabilité peut être considérée comme la température minimum ou le flux de chaleur requis pour l'ignition d'une plante ou d'un échantillon de plante -généralement sec- (White et Zipperer 2010)
- **Taux de consommation du combustible** : Mesure indiquant à quel point la biomasse de la plante est consommée par le feu, c'est la proportion de biomasse brûlée.
- **Puissance** : Énergie libérée par la combustion par unité de temps, qui dépend de l'énergie totale contenue dans un échantillon de végétation et de sa capacité à brûler rapidement et à engendrer de fortes températures. La puissance par mètre linéaire de front de feu s'exprime en kW/m et dépend du combustible et des facteurs météorologiques (voir section 2).
- **Temps de séjour** : Mesure décrivant combien de temps le feu continue de brûler avec ou sans source de chaleur externe. Il dépend des caractéristiques du combustible et des facteurs météorologiques (voir section 2).



Classification des combustibles
(Barrows 1951; Miller et al. 2013; Peterson et al. 2005; Prichard et al. 2021)

Les combustibles peuvent être classifiés selon la strate à laquelle ils se trouvent, leur nature et leur taille (**Fig. 2.10**) :

Figure 2.10. Classification du combustible.

La quantité de combustible peut être décrite à l'aide de différentes mesures, principalement grâce à sa masse, son volume et son recouvrement (**Fig. 2.11**)

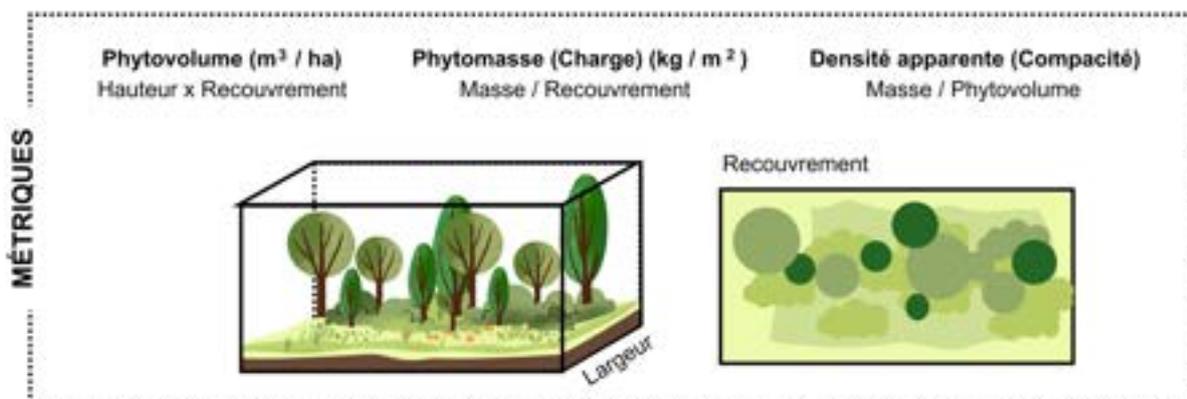


Figure 2.11. Métriques utilisées pour caractériser le combustible.

Différentes métriques peuvent être mesurées afin de caractériser le combustible (Fig. 2.11)

Phytomasse combustible (ou Charge) : Quantité de combustible consommée par le feu, exprimée en poids sec par unité de surface au sol. Elle est proportionnelle au recouvrement, à la hauteur et à la densité apparente (ou compacité). Elle s'exprime en kg/m² ou tonnes/ha.

La puissance du front de flammes est directement proportionnelle à la phytomasse combustible effectivement consommée par le feu selon la formule de Byram. Plus il y a de biomasse fine présente dans un écosystème, plus la dangerosité de l'incendie potentiel est élevée, augmentant ainsi la vulnérabilité des enjeux exposés.

Teneur en eau : Proportion d'eau contenue dans le combustible. Les combustibles humides sont moins inflammables que ceux qui sont secs, car l'eau contenue doit préalablement être évaporée avant l'ignition de la matière sèche, ce qui consomme une partie de l'énergie disponible. La teneur en eau des combustibles est fortement influencée par les conditions météorologiques, en particulier la température, l'humidité de l'air et les précipitations. On distingue celle des parties mortes et celle de la végétation vivante. La première peut varier en quelques heures lorsqu'il s'agit d'éléments fins (litière superficielle en particulier) et est caractérisée par l'indice de combustible léger (ICL). En revanche, la teneur en eau de la végétation vivante et de la litière plus profonde, dont les dynamiques sont liées aux conditions de sécheresse du sol, varient donc plutôt à l'échelle de la semaine (avec l'indice d'humus IH), voire du mois (avec l'indice de sécheresse IS). La teneur en eau influence à la fois sur la vitesse de propagation et le taux de consommation du combustible.

Composition : Composition en essences d'un complexe de combustibles. La composition des essences présentes peut également influencer le comportement du feu. Certaines essences peuvent être plus inflammables et combustibles que d'autres en raison de leur structure et de leurs caractéristiques physiologiques et chimiques.

Structure : Configuration spatiale du peuplement forestier, comprenant la hauteur ou l'épaisseur de la couche de combustible, la densité globale ou la compacité, l'arrangement (continuité verticale et horizontale), la couverture et le nombre de couches impliquées (sol, surface, échelle, et couronne). La manière dont les combustibles sont répartis influe sur la

propagation du feu. Une structure continue verticalement et ou horizontalement favorise la propagation du feu. La continuité verticale joue notamment un rôle clé pour le passage du feu en cime, qui est facilité lorsque la distance entre le bas de la canopée et le haut de la strate arbustive est plus faible. Une classification de la vulnérabilité au feu de cime a d'ailleurs pu être déterminée par (Piqué et al. 2011) et illustrée dans la **fig. 2.12** .

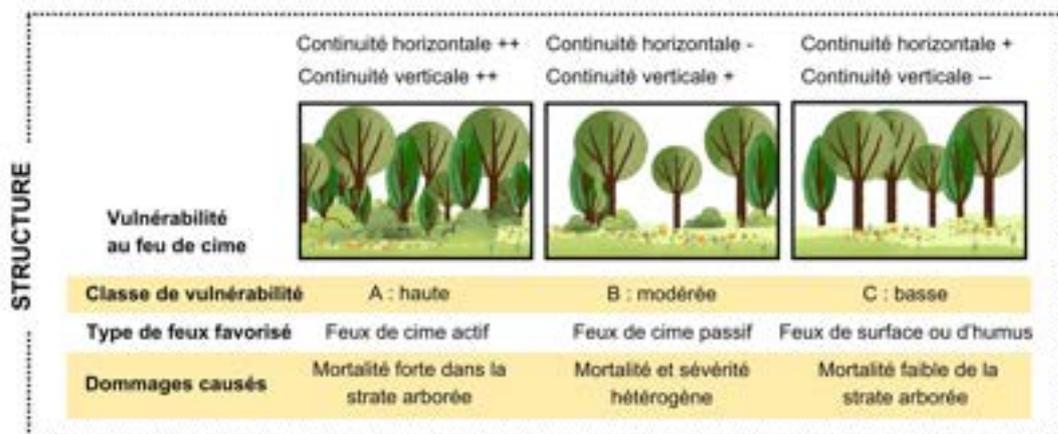


Figure 2.12. Classes de vulnérabilité au feu de cime selon la structure du combustible. On notera que certains feux d'humus peuvent induire de la mortalité racinaire et ainsi faire augmenter le taux de mortalité.

PARTIE 3

-

LES PEUPLEMENTS FORESTIERS FACE AU FEU

*Mécanismes de la mortalité, caractéristiques chimiques et morphologiques,
et réponses associées*

1. EFFETS DES INCENDIES SUR LES PEUPELEMENTS

- Mécanismes de la mortalité des arbres soumis au feu

Les mécanismes sont illustrés et résumés dans la **Fig. 3.1**. La température de flamme dans un feu de forêt atteint couramment les 1000 °C, ce qui dépasse très largement la température létale des cellules de l'arbre, voisine de 60 °C pour une exposition de l'ordre d'une minute (Pimont et al. 2014). Les cellules qui survivent sont donc soit très éloignées de la flamme, soit bien protégées.

Parmi les effets immédiats, l'impact du passage d'un feu sur un peuplement se traduit généralement par un roussissement foliaire plus ou moins marqué, pouvant aller jusqu'à la consommation totale du feuillage, une carbonisation partielle ou totale des branches et de l'écorce, et un échauffement voire une carbonisation des racines superficielles. Ces différents symptômes visuels ont été définis comme suit (Varner et al. 2021) :

Damage total du houppier : Part du houppier (branchage et feuillage) tuée ou endommagée par le feu. Le damage total comprend le roussissement et sa consommation par le feu :

- **Roussissement du houppier** : Portion apparaissant brune ou rouge quelques jours après le feu.
- **Consommation du houppier** : Portion qui est soit consommée lors de la combustion, soit carbonisée.

Ces différentes catégories de dommages peuvent s'échelonner dans le houppier, et leurs proportions relatives conditionnent la survie de l'arbre. Le roussissement, la mortalité du feuillage sans combustion et la consommation par le feu du feuillage résultent de l'exposition à des environnements thermiques respectivement de plus en plus extrêmes. Après le passage du feu, les feuilles roussies se dessèchent en quelques semaines pour certaines essences, voire en quelques mois pour d'autres. La mortalité de la couronne, peut s'accompagner d'un phénomène de marcescence (feuilles partiellement consommées mais restant attachées), qui peut persister des mois, voire des années après le feu. La mortalité des bourgeons est difficile à estimer avant la saison de croissance suivante, bien que cet effet soit le plus déterminant sur le plan

physiologique pour l'avenir de l'arbre. La consommation de la couronne est le dommage le plus visible, avec des branches et des bourgeons soit complètement consommés, soit visiblement carbonisés.

La combinaison de ces dommages peut entraîner la mortalité des arbres, soit de manière immédiate, soit de manière différée.

La strate arbustive, en tant que principal vecteur de la propagation du feu, est généralement détruite en premier lieu avec la strate herbacée lorsqu'elle est présente. Au sein de la strate arborée, la mortalité est variable selon la puissance du feu et la gravité des dommages, qui dépendent en partie de la résistance de l'essence concernée. Les dommages à l'origine de la mortalité concernent le feuillage, les bourgeons, les graines, et les cambiums du tronc, des branches et du système racinaire. Ils se combinent entre eux pour induire la mortalité.

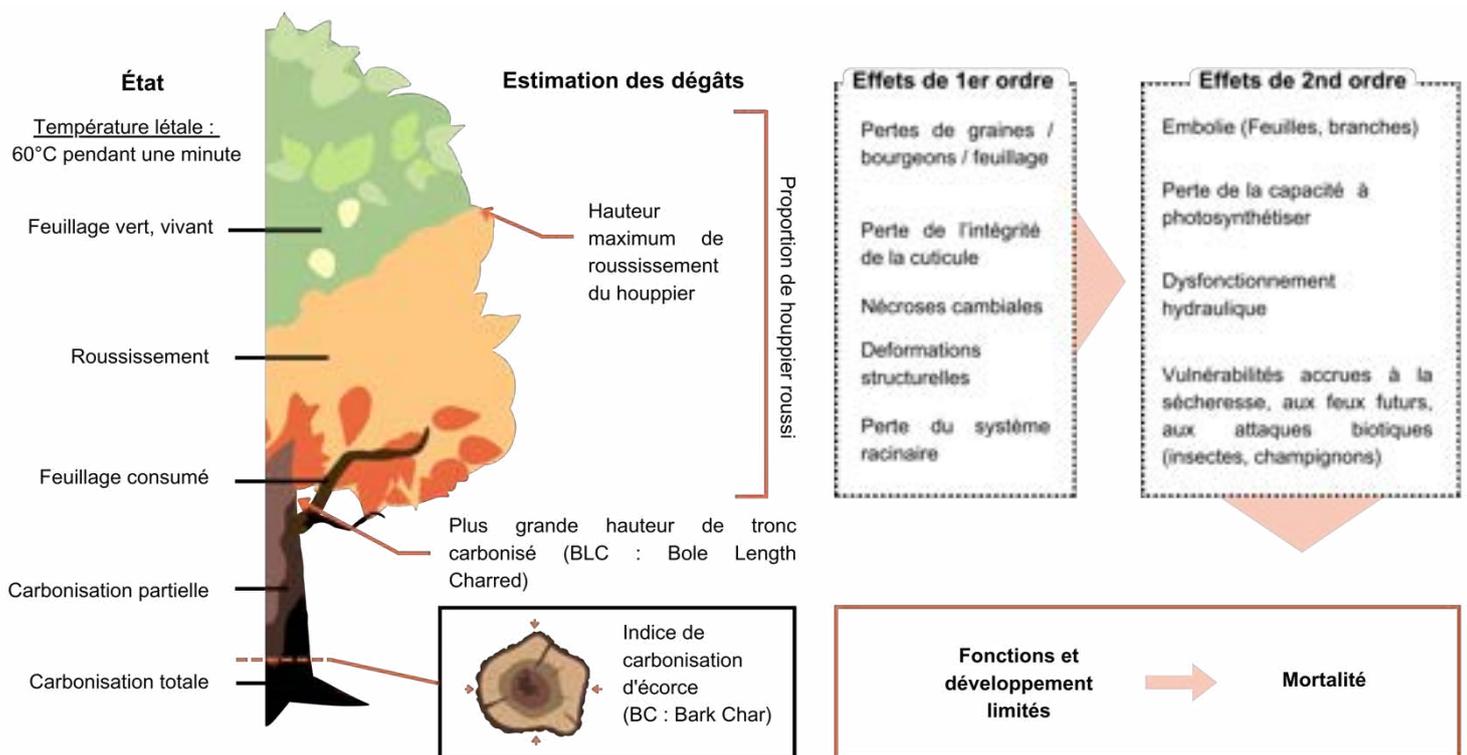


Figure 3.1. Résumé des effets d'un incendie sur un arbre, état post-feu, métriques pour estimer les dégâts causés par le feu, effets de 1^{er} et 2nd ordre.

- Effet du feu sur le feuillage

Les dégâts au houppier sont la principale cause de mortalité des arbres, en tout cas chez les pins matures dont l'écorce épaisse protège généralement bien les troncs. La partie détruite du houppier, avec perte des feuilles ainsi que des bourgeons, ne peut plus produire de nouvelles feuilles ni effectuer de photosynthèse. Les arbres qui survivent à des blessures au niveau de la couronne subissent souvent une réduction de leur croissance radiale.

Les parties aériennes les plus sensibles à l'échauffement sont les éléments les plus fins, tels que les feuilles et les bourgeons, en raison de leur faible épaisseur (Bär, Schröter, et Mayr 2021).

Les éléments fins sont particulièrement vulnérables à l'échauffement pour deux raisons :

- Le flux de chaleur reçu par unité de masse ou de volume de l'élément est inversement proportionnel à l'épaisseur de l'élément, donc d'autant plus important que l'élément est fin.
- La chaleur se diffuse rapidement à l'intérieur des éléments fins, endommageant proportionnellement plus de cellules et causant ainsi la mort de l'organe.

Par exemple, l'exposition d'une aiguille de pin à 60 °C pendant une minute est létale, tandis qu'un bourgeon de chêne vert peut survivre près de trois minutes à la même température. Cependant, une exposition à une température de 75 °C pendant cinq secondes entraînera systématiquement leur mortalité (Pimont et al. 2014).

Lorsque le feu ne se propage qu'en surface (brûlage dirigé ou feu peu intense), le transfert thermique vers le houppier a lieu à distance par convection et rayonnement, le transfert convectif étant dominant. Plus un arbre est haut et élagué, moins la probabilité que son houppier soit endommagé par un feu de surface est élevée.

La mortalité des feuilles due au feu est bien étudiée, mais les mécanismes exacts du "scorch" (brûlure ou roussissement du feuillage) varient en fonction de la dose de chaleur (Varner et al. 2021).

La hauteur de roussissement foliaire, qui est un mécanisme complexe, peut néanmoins s'évaluer en utilisant le modèle de Van Wagner (1977) :

$$h = 4,55 I^{\frac{2}{3}} \times (60 - T_{air})$$

Où I est l'intensité du feu en kW/m , et T_{air} la température de l'air

De plus, la présence de vent tend à incliner le panache, ce qui réduit les hauteurs de roussissement foliaire. Pour prendre en compte l'effet du vent, Van Wagner propose de diviser la hauteur de roussissement sans vent par la formule : $\sqrt{1 + 38 \frac{U^3}{I}}$

Où U est la vitesse du vent sous la canopée en $nm.s^{-1}$

Sans que l'on ait beaucoup de recul sur la validité de la formule (notamment au sein d'un peuplement entier), un vent ambiant de 20 km/h peut réduire la hauteur de roussissement d'environ 30 % et cette réduction peut même atteindre 60 % à 40 km/h.

- Effet du feu sur le tronc

Lors du passage du front de flammes au pied d'un arbre, la surface extérieure de l'écorce est concernée par la convection et le rayonnement thermique, et la chaleur se propage dans l'écorce par conduction. La conduction thermique est un processus lent qui persiste après le passage du feu, atténuant les variations de température dans l'écorce par rapport à l'air environnant. En général, un arbre peut survivre si le temps de séjour du feu (en minutes) est inférieur à $3\chi^2$, où représente l'épaisseur de l'écorce en centimètres. Par exemple, un pin d'Alep de 25 cm de diamètre avec une épaisseur d'écorce de 2 cm peut résister à un temps de séjour du feu de plus de 10 minutes. Cependant, les tiges d'un taillis de chêne vert, protégées par seulement 5 mm d'écorce, ne peuvent survivre à un feu de plus de 45 secondes (Pimont et al. 2014).

L'échauffement du tronc peut endommager les tissus sous-corticaux (phloème, cambium et xylème), qui assurent la croissance en diamètre et la circulation de la sève. Les tissus faiblement endommagés peuvent être régénérés. Une atteinte structurelle à ces tissus peut résulter en des dysfonctionnements hydrauliques et des embolies. La destruction du phloème sur toute la circonférence du tronc empêche notamment le stockage des produits de la photosynthèse dans les racines, la durée de survie de l'arbre est limitée à deux ans et dépend de la quantité des réserves accumulées avant l'incendie. Si le xylème est atteint, alors la conductance hydraulique de l'arbre peut être fortement réduite entraînant une embolie, qui peut compromettre la montée de l'eau dans le feuillage et conduire à la mort rapide de l'individu (Bär, Michaletz, et Mayr 2019; Colin et Jappiot 2001).

Ceci étant, une circulation de l'air au sein du peuplement complexifie cette première analyse, car le tronc perturbe l'écoulement d'air et crée une zone de turbulence sur sa face aval (par rapport au sens du vent et de progression du feu). Cette zone induit un attachement de la flamme au tronc (**Fig. 3.2**). Il en résulte une asymétrie des cicatrices de feu, plus marquées et plus hautes du côté sous le vent. Ces cicatrices permettent de déterminer la direction de propagation locale du feu a posteriori, en première approximation. La distribution du combustible autour du tronc influence également la hauteur de carbonisation. La dimension de la zone d'attachement de la flamme est proportionnelle à la vitesse du vent, ainsi qu'au diamètre du tronc. Cela explique pourquoi les petits arbres ont peu de cicatrices et pourquoi l'asymétrie de la carbonisation de leur tronc est rarement marquée. En revanche, ce phénomène provoque des dommages plus importants sous l'écorce des gros arbres, malgré leur écorce plus épaisse qui devrait, en théorie, offrir une meilleure protection (Pimont et al. 2014).

En cas de passages multiples du feu, les bourrelets cicatriciels successifs permettent, par carottage et comptage des cernes, de reconstituer l'histoire locale des incendies. Même si l'arbre survit, la zone de tissus morts sous l'écorce, généralement en forme de triangle, entraîne un décollement de l'écorce, exposant finalement le bois nu. Des bourrelets cicatriciels se forment alors et recouvrent progressivement la zone blessée, sauf si un nouveau feu touche le peuplement. Dans ce cas, le bois non protégé peut entrer en combustion et former une cavité à la base du tronc, fragilisant ainsi l'arbre.

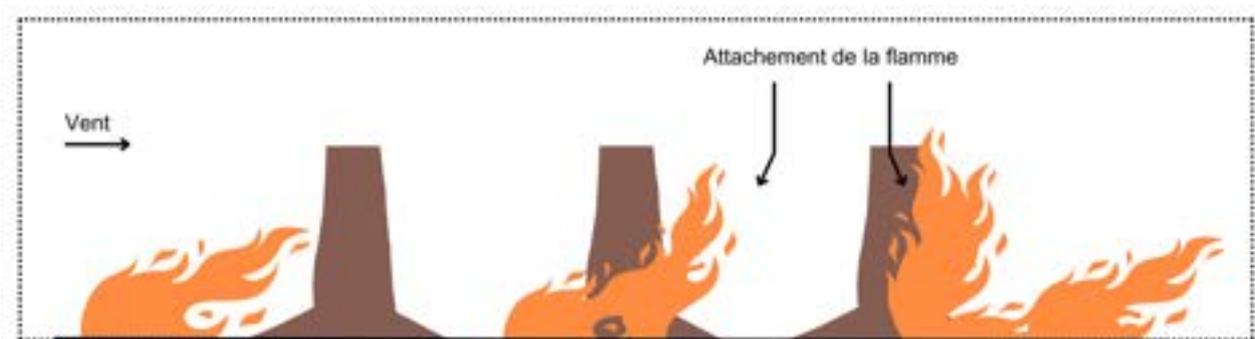


Figure 3.2. Phénomène d'attachement de la flamme sur le tronc, à l'origine de dégâts plus marqués en aval de la direction de propagation sur les plus gros arbres. D'après Gutsell & Johnson (1996).

- Effet du feu sur les racines

L'impact des dommages au système racinaire est encore mal compris, principalement en raison des difficultés associées à son étude. La mortalité liée aux blessures des racines concerne principalement les essences dont les racines sont proches de la surface, car les propriétés isolantes du sol offrent une certaine protection. Cependant, les feux d'humus, qui brûlent la matière organique du sol en profondeur, peuvent causer des dommages plus importants que les simples échauffements de surface. Les terminaisons racinaires situées dans les couches superficielles du sol sont particulièrement vulnérables à l'échauffement, ce qui affaiblit l'arbre de manière substantielle. De plus, l'altération du collet, c'est-à-dire la zone d'insertion des racines maîtresses, peut entraîner une perte de vigueur significative de l'arbre, pouvant aller jusqu'à sa mort (Bär, Michaletz, et Mayr 2019).

- Effets du feu sur la régénération du peuplement

La capacité de peuplements forestier à se régénérer après le passage du feu est très variables selon le comportement du feu et les caractéristiques des essences considérées. Deux mécanismes principaux de régénération post-incendie sont généralement distingués : la régénération par graines (*seeding*) et la régénération par rejets (*resprouting*) (Nolan et al. 2021).

Les essences répondent différemment aux catégories de dommages précédemment décrites selon leur modalité de régénération après incendie. Pour les arbres qui se régénèrent par la germination de leurs graines, de type « *seeder* », la perte de la canopée et de l'humus, où les graines sont stockées, compromet fortement leur régénération. En revanche, l'individu n'a pas besoin de survivre au feu pour perpétuer la population. Concernant les essences qui régénèrent par rejets, la perte du houppier aura un impact moindre sur leur capacité à se régénérer (bien que la défoliation puisse entraîner d'autres problèmes susceptibles de conduire à la mort de l'individu), mais ce sont les atteintes au tronc et aux racines qui endommagent ses capacités de rejet. Contrairement au type *seeder*, l'individu de type « *resprouter* » doit également rester vivant afin de se régénérer.

- *Seeder*

Dans certains cas, un feu modéré peut stimuler la régénération de certains conifères en favorisant la maturation accélérée et l'éclatement des cônes, libérant ainsi un grand nombre de graines dans les jours et les semaines qui suivent l'incendie. Cependant, un feu trop intense peut détruire l'embryon à l'intérieur des graines en raison de l'éclatement du tégument, compromettant ainsi leur capacité à germer.

- *Resprouter*

Les rejets post-feu surviennent si les tissus méristématiques, et particulièrement les bourgeons, ont été totalement ou partiellement protégés du feu. L'ouverture du milieu et l'absence de végétation concurrente après un incendie favorisent l'émission de rejets chez certaines essences. Cependant, si le feu est trop intense, la capacité des arbres à produire des rejets peut être significativement réduite, voire disparaître, en particulier si les bourgeons ou les tissus conducteurs ont subi des dommages thermiques excessifs.

- Effets indirects du feu

L'altération des organes vitaux entraîne l'affaiblissement de l'arbre, qui est beaucoup plus sensible aux attaques parasitaires ou fongiques.

La mortalité liée au feu intervient généralement durant les deux premières années après feu et on observe une stabilisation au bout de 3 à 5 ans. La pullulation de scolytes peut induire une mortalité additionnelle et différée, jusqu'à 10-15 ans chez les plus vieux individus. Des facteurs abiotiques, comme la sécheresse, augmentent la mortalité après incendie. Le diagnostic précoce de la mortalité des arbres après incendie constitue un enjeu important pour le gestionnaire. En effet, il est parfois nécessaire de supprimer les arbres qui vont mourir, afin de limiter les risques d'attaques de scolytes, de sécuriser les abords des routes ou des chemins ou de limiter l'impact paysager dans certaines zones. Mais il est souvent préféré de ne pas couper les arbres qui peuvent survivre, car ils ont encore un potentiel de croissance et, ils peuvent contribuer à la régénération naturelle (Torres-Ruiz et al. 2024).

2. TRAITS FONCTIONNELS ET VULNERABILITE

Un certain nombre de caractères morphologiques, physiologiques et phénologiques (traits fonctionnels) influence la combustibilité ainsi que la capacité des essences à résister et à se régénérer après incendie. Ces traits fonctionnels se manifestent à différentes échelles, de celle de l'individu à celle de la communauté ou de l'écosystème (J. E. Keeley et Pausas 2022; Lavorel et Garnier 2002). Nous listons ici les traits principaux que l'on a cherché à renseigner dans les fiches essences.

- Individu

Graines

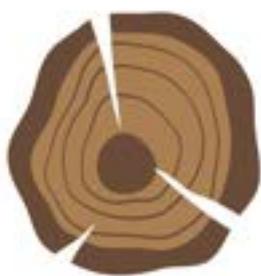


Sérotinie : Les graines stockées dans les cônes sérotineux sont protégées des températures atteintes pendant les incendies. Chez certains conifères (*Pinus halepensis*, *Pinus pinaster* (variable), *Cupressus sempervirens*, *Pinus brutia*), les fortes températures font fondre la résine et les cires qui scellent les écailles du cône entre elles. Quand le cône se refroidit, les résines se cristallisent et font plier les écailles, ce qui ouvre le cône. Les graines sont libérées dans un environnement sans concurrence et peuvent profiter des ressources sans compétition (Romero, 2020). L'échauffement des graines encore dans le cône lié au passage du feu ainsi que les conditions physico-chimiques post-feu, une fois la graine au sol, contribuent à la levée de la dormance prolongée dans laquelle se trouvait la graine, ouvrant la voie à sa germination.

Banque de graines : Les graines de grosses dimensions, ou protégées soit par une cuticule épaisse ou soit parce qu'elles sont enterrées, sont protégées et ont plus de chance de survivre au passage du feu. Les graines capables de dormance peuvent s'accumuler au fil des années, résister au feu ou dans des zones refuges puis germer quand les conditions seront favorables et bénéficier de tous les nutriments en absence de compétition. Enfin certaines essences (ex. pin parasol) protègent particulièrement bien leurs graines dans des cônes de gros volumes, ce qui peut les préserver du feu, même si les cônes sont tombés au sol.



Tronc



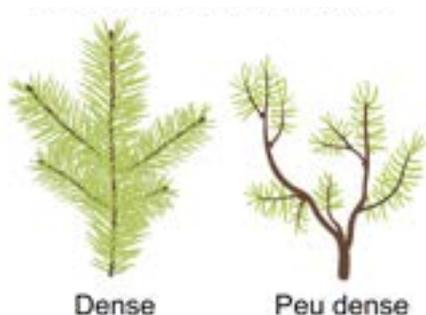
Épaisseur de l'écorce : une écorce épaisse protège et isole de la chaleur les tissus vitaux de l'arbre. Si l'on occulte le phénomène d'attachement de flamme, pour une essence donnée, plus un arbre est gros, plus son houppier et son cambium sont protégés. Ainsi, la résistance des arbres au feu augmente avec l'âge des individus jusqu'à une baisse de vigueur liée à la sénescence.

Rejet de souche : la capacité à faire des rejets de souches traduit une possibilité de développer de nouveaux brins à partir des racines, ou de la base du tronc.



Houppier

Teneur en eau : La teneur en eau désigne la quantité d'eau contenue dans les feuilles ou les aiguilles d'un arbre, exprimée en pourcentage de leur poids. Elle influence directement l'inflammabilité du feuillage : plus la teneur en eau est élevée, plus il sera difficile pour les feuilles de s'enflammer. Ce trait varie selon les essences et les conditions environnementales. Certaines essences conservent une teneur en eau élevée durant les périodes de sécheresse, ce qui limite leur combustibilité, tandis que d'autres voient leur teneur en eau diminuer rapidement en l'absence de précipitation, augmentant ainsi leur vulnérabilité au feu.



Densité des éléments fins : C'est la masse d'éléments fins par unité de volume. Plus les feuilles ou aiguilles sont denses, moins elles s'enflamment facilement, car l'énergie nécessaire pour les enflammer augmente. Toutefois, cet effet est faible par rapport à celui des variations de teneur en eau. De plus, si la densité des éléments augmente, la biomasse disponible augmente, donc en cas d'inflammation, l'énergie libérée aussi (Ewald et al. 2023).



Dense

Peu dense

Densité du houppier : l'effet de la densité est complexe.

Un houppier dense peut contribuer à l'effet d'échelle s'il s'enflamme, mais en cas de feu peu intense, cette inflammation peut être limitée par un effet écran lié à la densité. Ainsi, une densité plus élevée se traduit généralement par un feu moins rapide. Cependant, lorsque qu'il s'embrase la chaleur et l'énergie dégagée sont plus importantes, rendant le feu plus puissant et destructeur. En particulier, une densité de combustible minimale est nécessaire pour qu'un feu se propage de manière active en cime (voisine de 0.1 kg/m^3). Les effets de densité sont donc complexes et dépendent des interactions avec d'autres facteurs, météorologiques et hydriques notamment.

Rejet épicornique : rejet émis à partir de bourgeons situés sous l'écorce du tronc et / ou des branches. Cela favorise une reconstitution du houppier endommagé par le feu.



Rond

Oval

Tabulaire

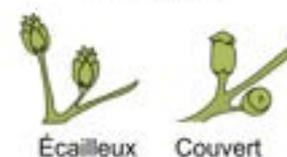


Entonnoir

Cônique

Architecture du houppier : certaines formes de houppier protègent le feuillage de l'échauffement par mise à distance du sol et écran des branches maîtresses (architecture tabulaire, comme le pin parasol) limitant les dommages foliaires.

Protection des bourgeons : même si la mortalité foliaire est importante, cette protection permet la reconstitution du houppier post-incendie. Des bourgeons protégés par des écailles épaisses et au sein de fourreau d'aiguilles protectrices sont plus à même de survivre à des échauffements importants.



Écailleux

Couvert



Poilu

Nu

Croissance apicale : une croissance apicale forte permet d'éloigner plus rapidement le feuillage du sol et d'un éventuel feu de surface, et de rétablir rapidement la canopée après un incendie.



Hauteur de base du houppier : c'est la hauteur entre le sol et le début du houppier ou la première branche de l'arbre. Plus cette hauteur est grande, plus la discontinuité verticale est potentiellement grande (selon la hauteur du sous-étage). La possibilité du passage du feu en cime est alors réduite (d'après le modèle de Van Wagner (1977), le niveau d'intensité du feu de surface nécessaire à l'inflammation des cimes décroît proportionnellement à cette hauteur), les houppiers seront mieux préservés et le feu sera moins intense. Cette hauteur de base du houppier dépend notamment de la propension à l'élagage naturel.

L'élagage naturel consiste en la chute des branches mortes. Lorsqu'une strate de sous-bois (petits arbres dominés ou arbustes) est abondante, on considère la distance séparant le haut de cette strate de la base des houppiers des arbres dominants, c'est le *Fuel strata gap* (Cruz et Alexander 2014).



La **rétenion en hauteur de matériel mort** favorise également la présence de combustible échelle (litière suspendue, lichen, écorce desquamée, présence de brindilles mortes) qui facilite le passage du feu en cime.



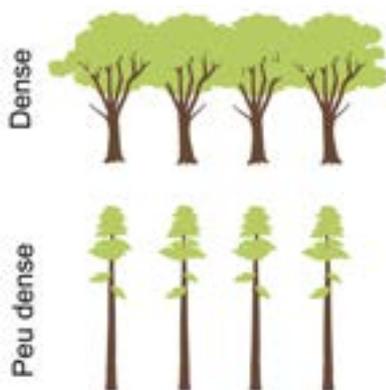
Hauteur totale : une grande hauteur d'arbre permet de limiter les dommages d'un feu de surface sur la cime.

Composés organiques inflammables : Présence dans les organes végétatifs d'une plante de composés chimiques qui augmentent l'inflammabilité, car leur température d'inflammation est plus faible que celle de la matière sèche (Elvira Martín 1989). En général, ces composés sont aromatiques et collants. Les principaux composés inflammables sont des huiles, des cires et des résines.

Composés organiques volatils : la nature des composés peut impacter positivement ou négativement l'inflammabilité du feuillage. Il n'existe pas de consensus scientifique sur l'influence des terpènes sur l'inflammabilité, c'est une famille chimique très large (Ormeño et al. 2009). Il semblerait cependant que les sesquiterpènes augmentent l'inflammabilité (Romero 2021).

- Peuplement

Strate arborée



Densité de la canopée : une canopée dense réprime le sous-bois en limitant l'accès à la lumière, cela maintient aussi une certaine fraîcheur et humidité.

Hauteur des arbres : un mélange d'essences de tailles différentes peut atténuer la discontinuité verticale dont aurait pu bénéficier les plus grands arbres.

Litière

La compaction et la composition de la litière sont des facteurs clés influençant sa combustibilité et sa propension à être consommée par le feu.

Densité apparente de la litière : la densité apparente de la matière sèche correspond à la quantité de matière sèche par unité de volume. Une litière dense (compacte) ne favorise pas la propagation du feu, car il y a plus de matière par unité de volume pour faire obstacle au rayonnement et l'oxygène circule plus difficilement ce qui limite son inflammabilité. Cependant, lors de feux puissants et sévères, toute la matière présente dans la litière est consommée et la quantité présente contribue à la puissance du feu.

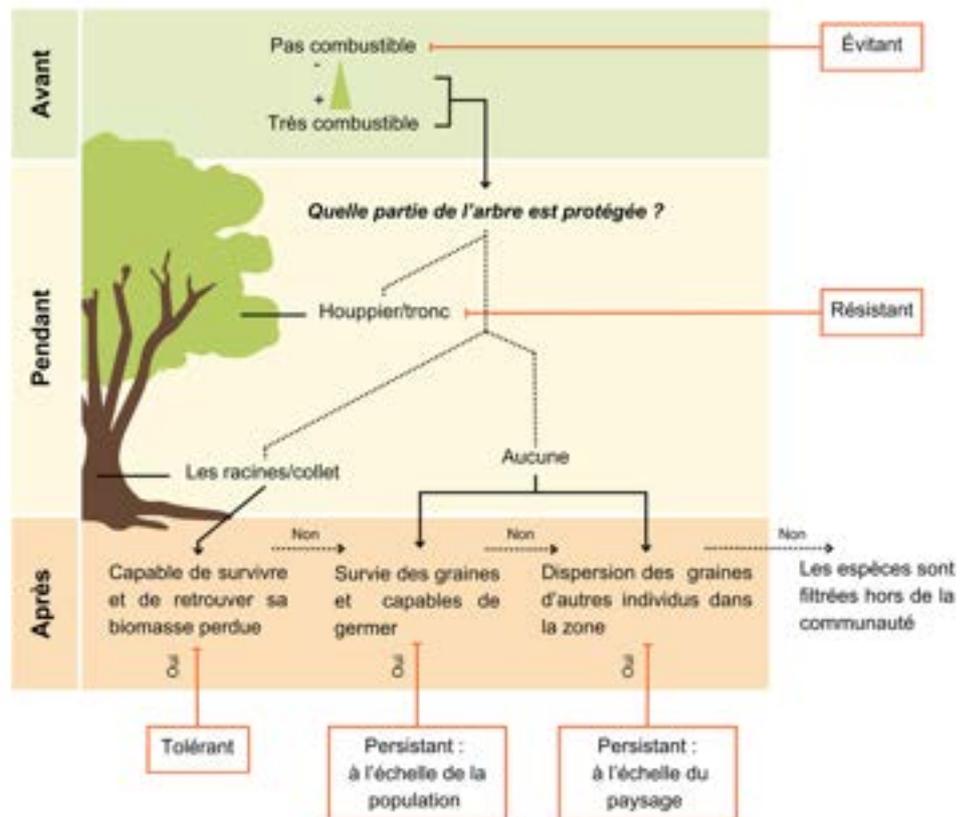
Forme des éléments fins : la forme du limbe, le degré de courbure, la longueur des aiguilles, la largeur des feuilles, le degré de division du limbe sont des facteurs qui influent la densité de la litière et son aération et donc son inflammabilité. Les feuilles longues et courbes brûlent plus rapidement et avec une plus grande intensité. Les feuilles avec un grand degré de division du lobe accentuent ces caractéristiques (Varner et al. 2015).



3. COMBINAISONS DE TRAITS FONCTIONNELS IMPACTANT LA SURVIE AUX FEUX

Certaines combinaisons de traits fonctionnels jouent un rôle crucial dans la détermination de la vulnérabilité des individus et des écosystèmes en influençant leur combustibilité, leur résistance et leur capacité de résilience face aux incendies (Agee 1993; Archibald, Hempson, et Lehmann 2019; J. E. Keeley 2012; J. G. Pausas, Keeley, et Schwillk 2017). Ces combinaisons peuvent être classifiées en différents types, selon les parties de l'arbre qui sont protégées (**Fig. 3.3**) et de ses traits morphologiques, structurels (**Fig. 3.4**).

Figure 3.3. Description de la manière dont les caractéristiques associées à l'évitement, à la résistance et à la tolérance au feu agissent dans le temps et les échelles (partie de la plante, individu, population ou paysage) pour filtrer les communautés végétales. Adaptation de la figure



d'(Archibald, Hempson, et Lehmann 2019).

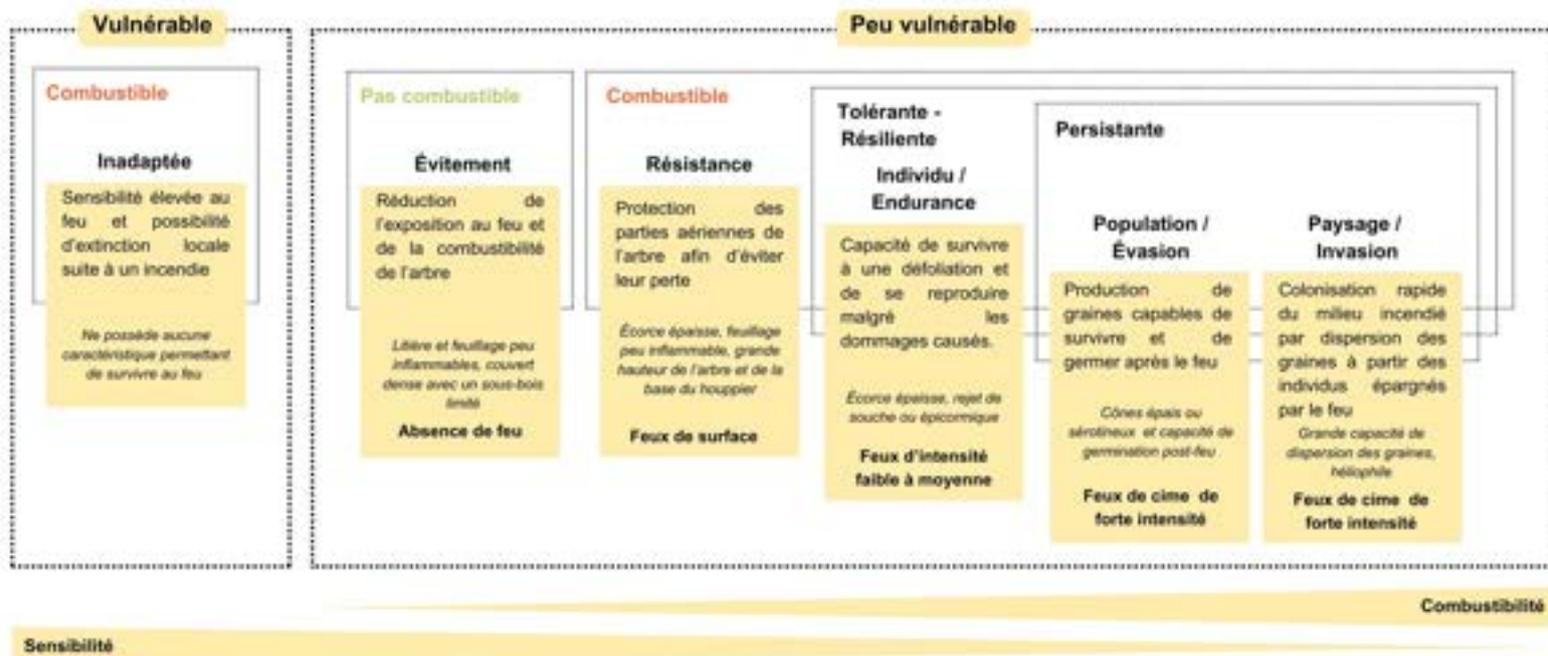


Figure 3.4. Représentation des différentes réponses au feu des essences, de leurs caractéristiques et des types de feux associés.

La combustibilité

Faible combustibilité

Certaines caractéristiques plus marginales réduisent la probabilité d'exposition au feu et la combustibilité, par exemple des composés limitant l'ignition (les tannins dans l'écorce comme chez les fagacées, ou la lignine présente dans les feuilles) (Da Silva et al. 2021; Ömer KÜÇÜK 2017), des feuilles ou aiguilles épaisses et denses, une forte teneur en eau, un houppier dense qui limite le sous-bois et permet d'avoir une litière plus humide et dense.

Exemples d'essences : *Abies alba*, *Cedrus atlantica*, *Pseudotsuga menziesii*

Forte combustibilité

Certaines caractéristiques augmentent la probabilité d'exposition au feu et favorisent la combustibilité des arbres et des peuplements. Ainsi, la présence de composés inflammables, des feuilles fines et sèches, ou encore une baisse de la teneur en eau en conditions de sécheresse, favorisent la combustion. De plus, un houppier ouvert qui permet une accumulation de matière sèche au sol et des branches fines et denses favorisent la propagation du feu.

Exemples d'essences : *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, *Quercus suber*

La résistance

Certaines caractéristiques des essences protègent les cellules du cambium et des parties aériennes de l'arbre, par exemple une écorce épaisse, des feuilles peu inflammables ou difficilement atteignables par les flammes, des bourgeons protégés du feu, une capacité à faire des rejets épïcormiques, un auto-élagage vigoureux limitant le passage du feu en cime.

Essences associées : *Pinus pinea*, *Quercus suber*, *Sequoia sempervirens*

La résilience

La résilience, parfois aussi appelée tolérance, se traduit par la capacité d'un individu ou d'un peuplement à retrouver son état d'origine. Ce mécanisme est visible à différentes échelles. Plusieurs types ont été identifiés :

- Tolérance de l'individu (résilience par endurance)

Certaines caractéristiques permettent aux individus de rester en vie malgré une forte défoliation et de se régénérer malgré les dommages causés. Cela peut s'exprimer par une forte tolérance aux brûlures pour les conifères ou une forte capacité à faire des rejets de souche pour les feuillus (Allen 2008).

Essences associées : *Pinus pinea*, *Pinus pinaster*, *Quercus suber*, *Quercus ilex*; hors zone méditerranéenne : *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*

- Persistance à l'échelle de la population (résilience par évation)

Certaines caractéristiques permettent aux communautés de recoloniser rapidement le milieu localement après l'incendie, par exemple des cônes épais ou sérotineux ou une germination possible voire favorisée après un feu (par exemple par une forte rétention de branches mortes qui facilite la montée du feu dans les cimes et l'éclatement des cônes sérotineux).

Essences associées : *Pinus halepensis*, *Pinus brutia*

- Persistance de l'essence dans le paysage

Certaines essences sont également capables de recoloniser le milieu brûlé depuis les zones situées en périphérie du feu grâce à une grande capacité de dispersion de ses graines. Même si les individus et leurs graines sont détruits dans la zone incendiée, les caractéristiques de

dissémination et de germination de ces essences en milieu ouvert sont suffisamment efficaces pour la recoloniser rapidement.

Essences associées : *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, *Pinus sabiniana* [non présentée dans la synthèse] (Fernandes et al. 2016)

4. VULNERABILITE AU FEU PAR GROUPE D'ESSENCES

Cette partie sur la vulnérabilité des essences au feu s'appuie sur une analyse combinant plusieurs sources d'information. La recherche inclut une revue approfondie de la littérature scientifique et technique, ainsi que des avis d'experts recueillis via un questionnaire détaillé, décrit en Annexe C.

Cette partie est avant tout synthétique. Pour plus de détails sur une essence en particulier, on se reportera aux fiches essences. Par ailleurs, on notera que certaines essences restent peu documentées, laissant subsister des zones d'ombre quant à leur vulnérabilité au feu.

- Feuillus

- Fagacées

- Les chênes (genre *Quercus*)

Les chênes présentent plusieurs caractères favorables à la résistance au feu et / ou à la récupération post-feu, variant d'une essence à l'autre. Généralement, les chênes ne sont pas réputés pour leur capacité à germer après un incendie, même si des germinations de chêne sessile (*Q. petraea*) ont été rapportées (Maringer et al. 2012). Leur banque de graines est généralement peu durable, c'est-à-dire que les graines ne survivent pas longtemps dans le sol, ce qui les rend encore plus vulnérables aux effets du feu.

Les chênes ont une écorce assez fine en comparaison des pins. Ils résistent aux feux de faible intensité, mais sont sensibles aux feux d'intensité modérée, exception faite du chêne liège (*Q. suber*) qui possède une écorce particulière, très épaisse et isolante.

Toutefois, tous les chênes ont une remarquable aptitude à émettre des rejets de souche qui peuvent croître rapidement. Par exemple, on peut observer chez le chêne vert (*Q. ilex*) des rejets pouvant atteindre 2 mètres en 2-3 ans. Le chêne liège, quant à lui, peut produire des rejets épicromiques en plus des rejets de souche.

Les feuilles de chêne sont généralement assez inflammables, bien que la combustibilité globale des chênaies varie selon l'essence. Par exemple les formations à chêne pédonculé (*Q. robur*) ou à chêne sessile présentent une combustibilité intermédiaire. Les formations à chêne pubescent (*Q. pubescens*), sont moyennement combustibles, mais leur vulnérabilité augmente en présence de sous-bois ou lorsqu'il s'agit d'un mélange avec une essence plus inflammable ou plus combustible.

Les formations à chêne vert et à chêne liège sont assez combustibles, mais ces arbres peuvent survivre à plusieurs incendies successifs et intenses grâce à leur résilience. La forte inflammabilité de leur feuillage permet un embrasement rapide, mais sans atteindre chez le chêne liège des températures létales pour sa partie aérienne. Les experts confirment en grande partie ces observations.

Cependant, les peuplements purs et fermés de chêne vert peuvent agir comme pare-feu naturel. En effet, ces peuplements tendent à être monospécifiques, formant des futaies denses ou des taillis vieillissants. Leur couvert dense empêche le développement du sous-bois en le privant de lumière, favorisant ainsi un environnement moins combustible. Au contraire, les peuplements ouverts de chêne vert typiques du méso méditerranéen inférieur (type « garrigue boisée »), ou ceux de chêne liège, généralement clairs, favorisent le développement d'un maquis dense très combustible communément parcourus par le feu. À la différence du chêne vert, le chêne liège est protégé du feu grâce à son écorce caractéristique. Toutefois, les experts notent qu'il peut finir par dépérir en cas de feux répétés, soulignant ainsi la limite de sa résistance.

Pour les essences comme le chêne chevelu (*Q. cerris*), le chêne des Canaries (*Q. canariensis*) et le chêne des Pyrénées ou chêne tauzin (*Q. pyrenaica*), les informations disponibles restent limitées, tant dans la littérature que dans les retours d'experts, rendant difficile une évaluation précise de leur vulnérabilité au feu.

o Autres Fagacées

Les autres essences de la famille des fagacées présentent également des caractéristiques pouvant permettre de survivre à un incendie. Le châtaignier (*Castanea sativa*), et le hêtre (*Fagus sylvatica*) ont la capacité de germer après un incendie. Bien que le hêtre et sa litière soient généralement peu inflammables, il faut noter que la litière de hêtre devient plus inflammable en automne, avant qu'elle ne soit tassée. Malgré cela, la hêtraie reste très sensible au feu, avec un taux de mortalité élevé même lors de feux de surface. Bien que le hêtre puisse produire des rejets de souche et des rejets épïcormiques, des études indiquent que les hêtres finissent généralement par mourir dans les trois années suivant l'incendie. Les experts s'accordent à dire que la vulnérabilité du hêtre est élevée.

En revanche, les peuplements adultes et sains de châtaignier sont plutôt résistants au feu et produisent de nombreux rejets surtout après un feu d'intensité moyenne. Les experts confirment que la sensibilité du châtaignier est plus prononcée lorsqu'il est jeune ou affaibli. Malgré son auto-élagage vigoureux et la teneur en eau élevée de ses feuilles, la châtaigneraie est considérée comme assez combustible à cause de son sous-bois et de son feuillage inflammable, même si ce dernier point peut sembler paradoxal du fait de sa teneur en eau élevée. Sa litière est également très combustible quand elle est sèche, mais elle se réhydrate facilement. Néanmoins, lorsque son sous-bois est entretenu, la châtaigneraie devient presque incombustible.

Betulacées et Acéracées

Le charme (*Carpinus betulus*) est une essence peu combustible, caractérisée par une écorce fine. Les avis d'experts convergent vers une faible résistance et résilience face au feu, bien que sa capacité à produire des rejets et à coloniser les milieux pionniers suggère une meilleure résilience qu'attendu. Il présente également une capacité de germination post-incendie, contrairement à l'érable à feuilles d'obier (*Acer opalus*), pour lequel aucune information supplémentaire n'a pu être obtenue. Toutefois, les données précises sur leur vulnérabilité au feu restent limitées.

Altingacées

Le copalme d'Amérique (*Liquidambar styraciflua*), est une essence pour laquelle les informations sont limitées, tant dans la littérature que dans les retours d'experts. Cependant, des observations de spécimens présentant des cicatrices de brûlure suggèrent qu'ils sont capables de survivre au feu malgré une écorce relativement fine. De plus, la capacité de cette essence à produire des rejets de souche et épécormiques pourrait traduire une aptitude à se rétablir rapidement et à retrouver un houppier fonctionnel après un incendie.

- Conifères

Pinacées

- Les pins (genre *Pinus*)

Les pins sont plutôt adaptés au feu, bien que les caractéristiques puissent varier selon les essences. Ils ont une écorce épaisse qui les rend résistants aux feux de surface de faible à moyenne intensité. Les pinèdes demeurent assez combustibles, en raison de leurs aiguilles longues, fines et riches en terpènes, ainsi que de leur litière aérée qui peut contenir de la résine, la rendant hautement inflammable. Le pin sylvestre (*P. sylvestris*) a une litière moins inflammable que les autres pins, en raison de ses aiguilles plus courtes. Enfin, les pins ne peuvent pas produire de rejets (à l'exception marginale du pin des Canaries). Le renouvellement du peuplement est donc entièrement dépendant de la survie des arbres ou de leur production de graines, et de ce point de vue, comme l'ont souligné les experts, certaines essences montrent une plus grande capacité de récupération que d'autres (par ex. difficulté de régénération après incendie du pin parasol, grande facilité pour le pin d'Alep).

Parmi les essences les plus combustibles, le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le pin de Turquie (*Pinus brutia*) sont fréquemment mentionnés. Ces deux pins sont des essences pyrophytes, avec des peuplements favorisant le passage du feu vers la cime et la libération de graines par les cônes sérotineux. La forte continuité verticale des structures formées par leurs peuplements est assurée par les branches mortes le long de leur tronc, qui retiennent les aiguilles mortes qui forment une litière suspendue sèche très inflammable. Leur couvert clair favorise le développement du sous-

bois, augmentant la combustibilité du milieu. Leur capacité à produire des cônes sérotineux permet une colonisation rapide du milieu après un incendie. Le pourcentage de cônes sérotineux est cependant très variable, allant de 40 à 80% pour le pin d'Alep.

En revanche, le pin pignon (*P. pinea*) et le pin noir (*P. nigra* subsp. *laricio* et subsp. *salzmannii*) sont des essences décrites comme « évitantes » du feu, caractérisées par une absence de branches dans la partie basse du tronc, avec un houppier haut qui leur permet, dans une certaine mesure, d'éviter les flammes. Les avis des experts divergent quant à leur résilience et à leur résistance, bien que ces caractéristiques soient généralement évaluées à un niveau moyen. Dans la littérature, la combustibilité des formations à pin pignon est considérée comme intermédiaire, tandis que celle des pinèdes formées par les autres pins présentés dans ce guide est forte. Même si ces essences de pin sont globalement considérées comme résistantes (en particulier le pin pignon qui peut survivre avec 80% de son houppier brûlé), le pin noir reste sensible aux feux de cime. Ces deux essences de pin ne possèdent pas de cônes sérotineux, mais la germination post-incendie reste possible. Le taux de germination varie considérablement chez le pin noir, et elle demeure incertaine chez le pin pignon, qui malgré des graines bien protégées par les cônes, peine à se réinstaller après feu.

Le pin maritime (*P. pinaster*) et le pin sylvestre (*P. sylvestris*) n'ont pas de stratégie type. L'élagage naturel du pin maritime est de type intermédiaire, celui du pin sylvestre n'est visible qu'à partir de 60 ans. Leur couvert est clairsemé ce qui assèche la litière, favorise le développement d'un sous-bois et rend le peuplement très combustible. Ils ont également une capacité de germination post-feu notable bien que variable pour le pin sylvestre qui ne produit pas de cônes sérotineux. Le pin maritime quant à lui en produit, mais avec des variations considérables selon les peuplements, allant de 2 à 82%. Sa capacité de régénération par graine post-incendie reste donc assez importante à très importante.

Globalement, les pins sont des essences dotées d'une grande plasticité, les caractéristiques des individus diffèrent en fonction du milieu où ils sont installés. De ce fait, en milieu méditerranéen les pins risquent d'être plus combustible qu'en milieu montagnard, comme c'est le cas pour les pins noirs et les pins sylvestres.

- Autres conifères

Les autres conifères de la famille des pinacées forment des peuplements moins combustibles que les pins. Leurs aiguilles sont courtes et épaisses ce qui rend la litière plus dense et compacte et réduit son inflammabilité. Le sapin de Douglas (ou le Douglas) (*Pseudotsuga menziesii*) et le sapin blanc (*Abies alba*), grâce à leurs houppiers denses qui inhibent le sous-bois, sont même considérés comme des barrières naturelles au feu lorsqu'ils sont présents en peuplements purs, avec une potentielle réduction de l'inflammabilité lorsqu'ils sont introduits en mélange dans un peuplement. Le cèdre (*Cedrus atlantica*) a également été suggéré comme pare-feu naturel dans la littérature. Mais les avis des experts divergent quant à sa résistance, sa résilience, et sa combustibilité, avec une grande variabilité. La pessière à *Picea abies* est aussi peu combustible. Le sapin de Céphalonie (*Abies cephalonica*) forme des peuplements moyennement combustibles, néanmoins, son houppier dense limite l'embroussaillage. Le comportement au feu du mélèze (*Larix decidua*), n'a pas été documentée.

Ces essences sont généralement moins résistantes et résilientes que les pins. Elles ne produisent pas de cônes sérotineux, ni de rejets à l'exception du mélèze. Des rejets ont pu être observés très rarement chez le sapin blanc et l'épicéa commun.

Le Douglas et le mélèze sont les seuls de ces conifères à être décrits comme résistants. En particulier, le Douglas est à la fois une essence évitante quand il est jeune grâce à sa croissance rapide et un combustible échelle limité. Cette essence est de plus en plus résistante en vieillissant, devenant très tolérant aux brûlures lorsqu'il est adulte. L'épicéa commun, le sapin blanc et le sapin de Céphalonie sont en revanche très sensibles. La résistance du cèdre n'est pas renseignée, mais des cicatrices d'anciens feux démontrent qu'il peut survivre à certains feux.

La germination post-incendie est possible pour ces conifères, à l'exception du genre *Abies*. Concernant le cèdre, sa régénération par graine est également possible, mais elle n'est pas suffisamment importante pour assurer la survie du peuplement.

Cupressacées

Les conifères de la famille des Cupressacées présentent des caractéristiques distinctes qui influent sur leur vulnérabilité au feu.

Le séquoia (*Sequoia sempervirens*) produit l'une des litières les plus inflammables parmi les conifères. Pourtant, cette essence est rarement concernée par des feux de grande intensité, du moins dans les peuplements fréquemment parcourus par le feu. Dans ces peuplements, les feux fréquents empêchent l'établissement d'essences de sous-étage « échelle à feu », comme le pin ponderosa dans la Sierra Nevada en Californie. Il est à la fois résistant, grâce à son écorce épaisse et son houppier haut, et également résilient, grâce à sa capacité à produire des rejets épicotomiques, même après un feu intense. Cependant, il n'est pas totalement à l'abri des dommages. Des peuplements de séquoias peuvent présenter des cicatrices importantes après des incendies, indiquant que ces arbres peuvent subir des impacts significatifs. Bien que la germination post-feu soit possible, elle reste toutefois très limitée.

Le calocèdre (*Calocedrus decurrens*) est une essence pour laquelle les informations sont limitées. Néanmoins, il est considéré comme tolérant aux brûlures, avec une sensibilité intermédiaire au feu malgré des aiguilles inflammables. Il est capable de germination après un incendie, possède une écorce épaisse, mais ne produit pas de rejets et il est capable d'élaguer naturellement ses branches mortes.

Quant au cyprès (*Cupressus sempervirens*), ses formations peuvent être considérées comme globalement assez combustibles, même si cette essence est sujette à controverse. Sa vulnérabilité semble cependant différer selon la variété et les modalités de taille. Son feuillage s'enflamme plutôt moins facilement que celui d'autres essences méditerranéennes, mais lorsqu'il est taillé en haie, sa densité et l'accumulation de matière morte dans le houppier le rendent fortement combustible, en particulier lorsqu'il est âgé. Cependant, la variété *horizontalis* présente une couronne clairsemée limitant cette accumulation de matière morte. Les composés chimiques libérés par les aiguilles de cyprès ont également un effet allélopathique sur le sol, limitant la densité du sous-étage végétal et réduisant la propagation du feu vers la cime. Sa litière est peu inflammable en

raison de son épaisseur et de sa faible aération, ce qui favorise la rétention d'humidité. Au Portugal et en Turquie, il a été envisagé de planter des cyprès comme pare-feu naturel, sans qu'il n'y ait de retour quant à l'efficacité. En ce qui concerne sa résilience, il possède des cônes sérotineux dont l'ouverture peut être provoquée par un feu, mais aussi par fortes chaleurs et une sécheresse. Son taux de germination post-incendie est élevé. Contrairement à certaines sources bibliographiques, les experts considèrent le cyprès comme très combustible et peu résistant. Sa résilience est également sujette à débat, bien qu'elle soit généralement évaluée comme faible.

PARTIE 4

-

**SYLVICULTURE ET GESTION PRÉVENTIVE DES
INCENDIES**

1. DE QUELLE SYLVICULTURE PREVENTIVE PARLE-T-ON ICI ?

Les stratégies de gestion forestière pour la prévention des incendies varient en fonction de l'objectif et de l'étendue des zones à protéger. Deux approches principales peuvent être distinguées : les interventions localisées, centrées sur la création de coupures de combustible, et les interventions en plein au sein du massif forestier, pouvant aller jusqu'à l'auto-protection des peuplements. Il est nécessaire de commencer par définir ces différentes stratégies de prévention des incendies de forêt pour spécifier ce que nous considérerons comme sylviculture préventive dans le cadre de cette synthèse.

La stratégie de gestion forestière préventive la plus couramment utilisée en France est celle des interventions localisées sur des coupures de combustible, qui consistent à aménager un réseau d'ouvrages de défense des forêts contre les incendies (DFCI). Les **travaux de DFCI** sont des dispositifs essentiels de la gestion forestière préventive, visant à protéger les massifs forestiers contre les incendies. Ces travaux, mis en œuvre dans des lieux stratégiques à l'échelle des massifs, impliquent souvent des modifications profondes des peuplements forestiers concernés, parfois au point de compromettre, au moins temporairement, leur capacité de régénération (Pimont et al. 2014). Ces aménagements agissent comme des barrières stratégiques pour contenir et canaliser la propagation du feu, en réduisant son intensité et autorisant ainsi les opérations de lutte. Leur distribution spatiale est planifiée en fonction des caractéristiques du paysage, des conditions topographiques et des vents dominants, afin de maximiser leur efficacité tout en minimisant l'impact sur l'écosystème forestier. Ils sont limités à quelques pourcents de la surface de la forêt qu'ils contribuent à protéger.

Au-delà de ces ouvrages, certaines interventions de prévention des incendies de forêt peuvent concerner le reste du massif forestier et visent à limiter la dynamique du feu, voire à réduire la vulnérabilité des peuplements eux-mêmes. Si ces travaux visent principalement à limiter la dynamique du feu, ils sont généralement localisés en renfort de coupures de combustible, mais avec un niveau d'intervention moins intense et moins fréquent, qui les distinguent clairement d'un ouvrage de DFCI. Dans ce cas, on qualifiera ces zones de **renfort DFCI**. Si ces travaux visent principalement à réduire la vulnérabilité du peuplement lui-même, leur localisation est dictée par la présence de zones d'intérêt particulier, que ce soit pour des raisons patrimoniales, écologiques,

paysagères, économiques ou sociales. L'objectif poursuivi est souvent de rechercher l'auto-protection (ou auto-résistance) face au feu en absence d'intervention des sapeurs-pompiers. Le principe en est le traitement de larges zones pour réduire la biomasse combustible et créer des discontinuités dans la structure forestière, tant horizontalement que verticalement. Cette seconde catégorie de travaux sera qualifiée d'**auto - résistance des peuplements**.

Nous proposons de **définir la sylviculture de prévention des incendies de forêt** comme l'ensemble des interventions à intégrer à la sylviculture classique, dans le but de réaliser des zones de renfort DFCl ou d'autoprotection des peuplements. Il s'agit de réduire la combustibilité des structures végétales en forêt, et notamment pour ralentir la propagation du feu et en diminuer les dommages (Vélez 1990). La sylviculture préventive vise donc aussi à rendre les peuplements moins sensibles au feu, pouvant aller jusqu'à leur auto-protection (CRPF 2022; Rigolot et al. 2013). Même si, comme on l'a vu, associer dans l'espace les zones de sylviculture préventive et les ouvrages de DFCl présente un intérêt, on distinguera leurs modalités de gestion et on n'intégrera pas dans cette synthèse d'éléments concernant la création et l'entretien de coupures de combustible.

En résumé, la sylviculture préventive déclinée à plusieurs échelles peut permettre de :

- Favoriser la résistance et la résilience à l'échelle locale et du paysage
- Limiter la vulnérabilité intrinsèque des peuplements
- Réduire l'intensité du feu

Au moins en zone méditerranéenne et dans le massif landais, l'expérience montre que lorsque les conditions climatiques sont les plus défavorables, le feu dévaste et traverse tous les types de peuplements, même ceux bénéficiant d'une gestion sylvicole (exemple des feux de Gironde durant l'été 2022). Rendre les peuplements moins combustibles implique alors des interventions au-delà des traitements sylvicoles standards, parfois très conséquentes, telles que l'élimination régulière de la strate arbustive et l'élagage. Pour des raisons financières et écologiques, les interventions de renfort DFCl ne sauraient être mises en œuvre dans tous les peuplements des zones à risque. Elles sont donc réservées aux zones périphériques des enjeux humains ou périphériques des ouvrages de DFCl.

Localement, en Corse notamment, des interventions dites d'auto-résistance sont réalisées dans certains peuplements à forts enjeux (arboretums, porte-graines, peuplements à forte valeur paysagère ou d'accueil), afin d'augmenter la probabilité de survie des arbres en cas d'incendie. Dans certains contextes de climat pour l'instant plus clément, où le feu est moins virulent et les arbres plus hauts, l'auto-résistance peut être favorisée par la discontinuité verticale obtenue par une conduite en futaie d'essences à couvert dense favorisant l'auto-élagage, et in fine la diminution de la probabilité que le feu monte en cime.

Un peuplement auto-résistant au feu peut jouer le rôle de renfort DFCI en cas de localisation favorable aux abords immédiats d'un ouvrage de DFCI, mais de telles opportunités sont peu fréquentes.

Dans les deux stratégies de sylviculture préventive, renfort DFCI ou auto-résistance, en plus des modes de gestion, le choix des essences forestières est important. Outre leurs caractéristiques intrinsèques, et notamment leurs vulnérabilités propres, leur adaptation aux conditions stationnelles locales actuelles et futures est cruciale. Le choix des nouvelles essences dans le contexte d'un renouvellement est par conséquent déterminant pour contribuer à atteindre les objectifs de prévention assignés aux futurs peuplements. Ce volet a déjà été largement détaillé dans le chapitre précédent consacré à la vulnérabilité des différentes essences. On se concentrera donc ici sur la description des interventions contribuant au renfort DFCI et à l'auto-résistance.

2. TYPES D'INTERVENTIONS

- Le renfort DFCI

Les principes de base de la réduction des combustibles aux abords des enjeux ou des ouvrages de lutte incluent :

- La diminution drastique des strates basses (enlèvement des broussailles),
- L'augmentation de la distance entre le sol et la base des houppiers d'arbres (élagage),
- Le maintien d'espaces entre les arbres et arbustes (éclaircie),

- La conservation d'essences plus résistantes au feu, ou d'individus plus résistants (avec un plus gros diamètre)

Les différentes opérations

- **Débroussaillage** : permet de réduire la quantité de combustible de surface mais aussi de créer une discontinuité verticale entre le sol et les houppiers.



- Manuel : utilisation d'outils pour couper la végétation basse qu'ils soient manuels comme la serpe ou bien thermiques et portés à dos d'homme comme la débroussailleuse à dos.



- Mécanique : utilisation de machines auto-portées pour broyer la végétation.



- Pâturage contrôlé : conduite de troupeaux pour brouter, limitant l'accumulation de combustibles et contrôlant la croissance végétale.



- Brûlage dirigé : conduite contrôlée du feu, pour réduire sélectivement les combustibles.

Parmi ces techniques, le débroussaillage mécanique est le plus largement utilisé en France, mais le brûlage dirigé et le pâturage contrôlé, offrent des complémentarités qui justifieraient un plus fort développement.

- **Élagage** : Taille sélective des branches d'arbres dans la partie inférieure de la couronne, afin d'élever la base des houppiers et d'augmenter la discontinuité verticale entre le sous-bois et les couronnes des arbres. L'élagage est nécessaire à la réduction du combustible d'échelle.



- **Éclaircie** : Coupe sélective d'arbres pour diminuer la densité du peuplement. Si l'on souhaite maintenir une couverture arborée qui limite la pousse des broussailles, on se limitera à couper les arbres de sous-étage pour obtenir une discontinuité verticale avec les arbres les plus hauts qui les dominent. Si l'on souhaite de plus limiter la possibilité de propagation du feu de cime en cime, on procédera à une éclaircie plus forte espaçant les houppiers des arbres dominants. Ce type d'éclaircie diminue la masse combustible globale et favorise la croissance et la bonne santé des arbres conservés, mais apporte de la lumière



au sol et favorise le développement des strates basses, qui nécessitera alors un débroussaillage plus fréquent.

- **Gestion des rémanents** d'élagage ou d'éclaircie : Les interventions sylvicoles produisent des rémanents (branches élaguées, houppiers démontés lors des coupes d'éclaircie) dont l'accumulation dans la parcelle traitée peut contribuer à augmenter sensiblement et durablement la combustibilité du peuplement. L'objectif est d'accélérer l'incorporation dans le sol de la matière végétale issue des actions sylvicoles et de débroussaillage pour limiter dans le temps la phase où ce combustible mort peut contribuer à la vulnérabilité du peuplement. Notons que seul le débroussaillage manuel produit de tels rémanents, les travaux mécaniques, ainsi que le brûlage dirigé ou le pâturage contrôlé, réduisent par la même opération les rémanents de travaux sylvicoles.

Par ailleurs, puisqu'il s'agit de sylviculture préventive, l'enlèvement des seuls rémanents de travaux sylvicoles ne suffit pas. L'essentiel de la biomasse de sous-bois (arbustes, rémanents, etc.) doit être broyé, brûlé (lorsque c'est possible) ou exporté. Le sylvopastoralisme peut apporter une contribution intéressante à cet objectif .

- Broyer : le débroussaillage mécanique évoqué plus haut peut permettre de réduire les rémanents, s'ils sont de petit diamètre.
- Abattre et disperser : élagage des arbres et coupe dans le sous-bois, à la base des arbustes, et dispersion des branches et rémanents d'arbustes sur le sol pour réduire la charge en combustible et favoriser la décomposition.
- Fragmenter les rémanents : les restes de branches, d'arbres et de broussailles de plus de 5 cm de diamètre sont coupés en morceaux de moins de 1 mètre et laissés sur le sol. Il ne faut pas que la hauteur d'accumulation dépasse 50 cm.
- Empiler et brûler les rémanents : les rémanents doivent être regroupés dans des endroits sans continuité avec les arbres ou les broussailles. Ils sont brûlés de manière contrôlée jusqu'à leur élimination. Des personnels spécialisés, formés et des mesures supplémentaires de prévention et d'extinction des incendies sont nécessaires. Les rémanents peuvent également être brûlés de manière extensive dans une clairière, avec une planification et exécution par du personnel hautement spécialisé. Quand ils concernent des rémanents issus du sous-bois, ces opérations sont généralement appelées des incinérations de végétaux coupés.

- Exporter pour commercialiser : à grande échelle, les intérêts sociaux, économiques et de protection doivent être combinés. Les bois issus des éclaircies peuvent faire l'objet d'une valorisation économique, pouvant financer au moins partiellement ces travaux de prévention. En Catalogne, la fondation Pau Costa, a contribué à la création d'un label spécifique pour les produits pastoraux en synergie avec des actions de prévention des incendies (<https://ramatsdefoc.org>).

Tableau inspiré par (Fitzgerald et Bennett 2013) Option de réduction du combustible et effet sur les différentes strates. (- : diminution de la quantité de combustible, + : augmentation de la quantité de combustible et 0 : quantité de combustible inchangée)

Interventions	Combustible de surface	Combustible échelle	Combustible des houppiers
Débroussailler - broyer	-	-	0
Élaguer	+	-	-
Éclaircir	+	0	-
Abattre et disperser	Redistribution	0	0
Fragmenter les rémanents	0	0	0
Empiler et brûler les rémanents	-	0	0

- Mise en auto-résistance :

L'auto-résistance, ou l'auto-protection forestière, vise à rendre les peuplements autonomes face aux incendies, favorisant leur survie même sans l'intervention des pompiers. Ce principe englobe la réduction du combustible et la modification de la structure du peuplement. Ces zones sont prioritaires en fonction de critères patrimoniaux, écologiques, paysagers, économiques ou sociaux.

Les principes sous-jacents impliquent de réduire la biomasse combustible au sein de la zone à protéger en créant des ruptures horizontales et verticales, pour diminuer la puissance potentielle du feu et éviter des échauffements létaux. Tous les types d'interventions décrits plus haut dans le cadre du renfort DFCl peuvent être mis en œuvre et combinés dans l'espace et dans le temps pour atteindre le résultat désiré. L'objectif de survie des arbres implique généralement de plus fortes intensités et fréquences d'intervention que le simple renfort DFCl. Les essences particulièrement résistantes au feu comme les pins pignon et maritime permettent d'atteindre d'auto-résistance avec moins de travaux ou à un stade plus jeune que des essences vulnérables au feu comme le pin d'Alep.

Il peut être utile en complément de traiter une zone périphérique pour réduire l'intensité du feu avant qu'il n'aborde la parcelle à protéger. Il est essentiel de prendre en compte l'étendue de la zone traitée pour créer des ruptures de combustible suffisantes afin de transformer les incendies de grande intensité en feux de surface moins puissants, notamment à l'approche des lisières. L'effet de masse est crucial dans cette approche.

- Compromis entre éclaircie et maîtrise des strates basses

Parmi les opérations décrites ci-dessus contribuant à la sylviculture préventive, l'éclaircie, qui vise à réduire la probabilité de propagation du feu en cime, a pour conséquence d'ouvrir le peuplement, et de favoriser le développement du sous-bois. C'est une décision qui a des conséquences importantes, car elle implique des interventions de contrôle du sous-bois pour de nombreuses années. De manière générale, il est nécessaire de faire des choix déterminants assez tôt dans la vie du peuplement lorsqu'il s'agit de gestion extensive de prévention des incendies de forêt.

Force est de constater que ces éclaircies fortes sont peu pratiquées en région méditerranéenne française, et si elles le sont dans les pinèdes des landes de Gascogne, il s'agit le plus souvent d'opérations pour la production de bois non accompagnées du broyage préventif du sous-bois. Pour passer d'une sylviculture standard à une sylviculture préventive, il s'agira d'accompagner les éclaircies successives prévues par le plan de gestion, d'un contrôle rigoureux des rémanents. Ce faisant, on restera bien en deçà des mises à distances des houppiers préconisées dans la littérature nord-américaine Alexander and Cruz (2020), mais en revanche on s'efforcera

d'accélérer l'établissement de la discontinuité verticale en accompagnant la ou les premières éclaircies d'un élagage des arbres conservés.

À l'opposé, assez tôt dans la vie du peuplement, le choix peut être fait de maintenir un couvert forestier dense et continu pour réduire le risque d'incendie en limitant l'arrivée de la lumière au sol et l'embroussaillage, créant une discontinuité verticale « naturelle » contribuant ainsi à contrarier la propagation du feu. Cette approche est plus adaptée à la conduite en futaie qu'à la conduite en taillis régulièrement exploité pour le bois de feu pour ce qui concerne les chênaies par exemple. En effet, aux coupes de taillis succèdent des phases de régénération très sensibles au feu qui s'étalent sur l'essentiel de la révolution. Néanmoins, une phase de couvert dense et continue de moindre vulnérabilité peut finir par s'établir même dans les taillis de chênes, ce qui peut amener à prolonger cette phase en renouvelant le peuplement plus tard que l'âge d'exploitabilité optimum. Dans tous les cas, cette approche est un pari risqué qui demande plusieurs décennies sans feu pour que les houppiers se développent jusqu'à se rejoindre (Dreyfus 1990).

Enfin, on parle de plus en plus de sylviculture à couvert continu, et sa mise en œuvre se développe dans des contextes forestiers variés. Mais les informations scientifiques et les retours d'expérience manquent pour juger des conséquences de ces modalités de gestion sur le risque d'incendie de forêt. Le microclimat forestier plus humide est de nature à limiter le risque, tant que les conditions de sécheresse ne sont pas trop fortes. De plus, la futaie irrégulière ne s'accompagne pas systématiquement d'un sous-étage dense, les observations de terrain montrant un large gradient de situations de ce point de vue, et des interventions ciblées pourraient éviter les situations de continuité de combustible critiques. Enfin, les taches de régénération, stade le plus sensible au feu qui s'étale sur plusieurs décennies, pourraient être gérées sur des surfaces réduites et des îlots éloignés les uns des autres. Ces options restent à préciser par des retours d'expériences et des expérimentations ciblées.

3. EFFETS ATTENDUS DES INTERVENTIONS

Les zones traitées en sylviculture préventive, que ce soit en renfort DFCl ou dans la perspective d'atteindre l'auto-résistance, présentent plusieurs avantages dans la prévention et la gestion des incendies de forêt. Leur combustibilité est réduite, la propagation et l'intensité des feux sont limitées : les discontinuités verticales limitent la propagation du feu dans les cimes des arbres, tandis que les discontinuités horizontales freinent sa progression au sol. Avec une plus faible densité d'arbre, les feux de cimes sont moins probables (Alvarez, Gracia, et Retana 2012). Les arbres de gros diamètres favorisés par l'éclaircie ont plus de chance de survivre au passage du feu et la résilience de la forêt est améliorée. Enfin, les efforts de suppression des feux sont facilités. Ces interventions sur la végétation facilitent l'intervention des pompiers et améliorent les conditions de sécurité, contribuant à la « défendabilité » de la forêt (CRPF 2022).

En outre, pour maximiser l'efficacité des interventions, certains principes peuvent être mis en avant. Les interventions les plus efficaces sont celles qui réduisent la charge dans plusieurs strates de combustibles (McKinney et al. 2022; Ott, Kilkenny, et Jain 2023). Quand il est possible, le brûlage dirigé réduit immédiatement le combustible fin. Le débroussaillage, bien qu'il change la structure du combustible pour favoriser sa dégradation naturelle, est souvent accompagné d'un broyage direct ou d'un traitement des rémanents, ce qui permet de réduire la biomasse disponible d'une manière similaire à celle du brûlage dirigé. Bien que l'éclaircie soit couramment pratiquée, son utilisation seule ne permet pas de réduire le risque du feu et la sévérité du feu. Le débroussaillage en plus de l'éclaircie est recommandé pour optimiser les résultats (Prichard et al. 2021). Enfin, la durée d'efficacité des interventions est limitée, nécessitant des repasses périodiques pour maintenir leur efficacité, en particulier lorsqu'il s'agit d'entretenir des sous-bois très dynamiques.

PARTIE 5

-

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

2. CONCLUSION

Cette synthèse présente la vulnérabilité des essences forestières au feu selon la combinaison de trois critères distincts mais complémentaires : la combustibilité, la résistance, et la résilience des arbres. Cette décomposition analytique détaillée permet une approche fine et nuancée de la vulnérabilité des forêts face aux incendies. En effet, elle met en lumière l'intérêt d'évaluer ces critères à différentes échelles : celle de l'individu pour la résistance et la résilience, et celle du peuplement pour la combustibilité et la résilience collective. Cette distinction est essentielle pour adapter les stratégies de gestion et de prévention des incendies, notamment en sylviculture.

Ces trois aspects ont été analysés à travers des données issues de diverses sources : des publications scientifiques, des rapports techniques et des avis d'experts recueillis au moyen d'un questionnaire détaillé. Cependant, malgré l'étendue des informations collectées, il subsiste des incertitudes pour certaines essences moins documentées, ce qui laisse des zones d'ombre dans notre compréhension globale.

Les connaissances actuelles sont principalement axées sur les essences méditerranéennes, qui présentent des adaptations spécifiques au feu, renforçant leur résistance et/ou leur résilience face au feu. Cependant, un manque de données concerne les essences tempérées, qui sont de plus en plus exposées au risque d'incendie qui s'étend vers le nord sous l'effet du changement climatique. Ces essences tempérées, moins étudiées, font l'objet de lacunes de connaissances majeures pour comprendre leur vulnérabilité au feu, tant au niveau de leur combustibilité que de leur capacité à se régénérer après un incendie. Ce manque de données est d'autant plus important que les essences en question vont être soumises dans le futur à des conditions météo inconnues jusqu'ici, induisant des régimes et comportements de feu inédits.

Une autre limitation de l'approche est liée au fait que la vulnérabilité des peuplements ne dépend pas uniquement des essences qui les composent, mais aussi beaucoup de leurs structures, qui peuvent fortement varier pour une même composition spécifique, selon l'âge du peuplement, l'historique de gestion et le climat.

Par ailleurs, la compréhension des effets des pratiques sylvicoles préventives demeure également limitée. Si la gestion des peuplements par réduction des combustibles ou

modification de leur structure est un levier connu pour limiter la propagation des feux, il reste difficile de croiser ces pratiques avec la spécificité des différentes essences forestières. A cela s'ajoute le fait que le recueil et la synthèse d'informations sont encore plus compliqués à mener de manière relativement exhaustive que pour la vulnérabilité. Ce manque d'informations complique la définition de stratégies adaptées, combinant une gestion sylvicole optimale et les particularités des essences vulnérables au feu. Un effort de recherche plus large sur ces interactions est nécessaire pour développer des approches intégrées de gestion des forêts face à l'augmentation des risques d'incendie.

3. PERSPECTIVES

Pour améliorer la gestion des incendies forestiers à l'avenir, plusieurs axes de recherche et d'application peuvent être envisagés :

- Renforcement des connaissances sur les essences forestières moins documentées : les lacunes de connaissances identifiées dans cette synthèse, notamment concernant certaines essences feuillues et résineuses, doivent faire l'objet de recherches spécifiques en écologie du feu pour mieux cerner leur résistance au feu et leur résilience post-incendie. L'enquête menée dans cette étude auprès de vingt-huit spécialistes constitue une première étape importante de recueil de connaissances expertes, mais ne peut être considérée comme exhaustive ; elle serait utilement complétée d'un élargissement du panel des personnes enquêtées ainsi que par des entretiens d'approfondissement ciblés.
- Développement des travaux sur la combustibilité des formations forestières, pures ou mélangées, selon les principales conduites sylvicoles et dans différents contextes bioclimatiques. Cela passe notamment par des travaux de caractérisation et de quantification du type de combustible, des analyses de leur sensibilité au feu et des retours d'expérience sur le comportement au feu d'une typologie de peuplements sur des incendies bien documentés. Pour conduire ces analyses, de nombreuses données peuvent être mobilisées. La caractérisation du combustible peut être réalisée en combinant l'occupation des essences (par

téledétection par exemple) et les caractéristiques structurelles du combustible, dont les charges arbustives, arborées, ainsi que les hauteurs de base de houppier (par LiDAR HD, Martin-Ducup et al., 2025) celles du combustible de surface (placettes d'inventaire). Un exemple de cartographie exploratoire combinant les données LiDAR HD, Cosia et OCS-GE de l'IGN dans le cadre du projet FIRE-RES et pour le compte du Ministère de la Transition Ecologique est illustré en **figure 5.1**. Ces facteurs peuvent permettre par exemple d'objectiver les rôles de certaines structures et types de formation, ainsi que de la météorologie, dans le passage des feux en cimes (Perrakis et al. 2023). De plus, les approches probabilistes de l'occurrence et de la taille des feux peuvent permettre de comprendre l'impact de certaines occupations des couverts sur l'activité locale des feux. Enfin, l'analyse de la sévérité des feux passés, que ce soit par téledétection à partir d'indices optiques, ou à partir de mesures locales de la consommation des combustibles arborés, peut fournir des éléments de compréhension supplémentaires sur les processus affectant la vulnérabilité des peuplements (Hakkenberg et al. 2024). Ces différentes analyses seront menées dans le cadre d'une thèse sur la vulnérabilité des peuplements, qui a débuté à l'INRAE (URFM et LESSEM) en janvier 2025.

- Optimisation des stratégies de gestion préventive : il est essentiel de développer des approches qui intègrent à la fois les dimensions écologiques et économiques. Cela pourrait inclure des recherches sur l'efficacité comparative des différents types d'opérations (éclaircie, débroussaillage, brûlage dirigé) et de leur combinaison dans le temps et dans l'espace, en fonction des types de peuplements et des conditions locales.
- Adaptation à l'augmentation des conditions météorologiques extrêmes : dans un contexte de changement climatique, la zone à risque s'étend. De plus, l'intensité, et donc la sévérité des feux, augmente avec la vitesse de propagation. Cette sévérité croissante des conditions météorologiques demande une adaptation continue des stratégies d'intervention et de gestion des forêts. Lorsque les conditions météorologiques sont plus difficiles, la vitesse de propagation des feux devient moins dépendante du type de combustible (Cruz, Alexander, et Fernandes 2022). Si les opérations de réduction du combustible ne ralentissent pas la propagation des incendies sous des conditions extrêmes, ils permettent néanmoins de diminuer la puissance du feu et son impact sur la forêt (Prichard et al. 2021).

- Gestion du paysage pour limiter la propagation des feux : une gestion à l'échelle du paysage, incluant la mosaïque interne des forêts¹ et celle des différents usages du sol, est nécessaire pour limiter l'étendue des feux et protéger la biodiversité. La recherche future devra associer écologie du paysage et sciences du feu pour mieux comprendre les complémentarités entre ces mosaïques paysagères, leur niveau de fragmentation et leur impact sur la dynamique des incendies. Des travaux de recherche devront aussi approfondir les liens entre l'hétérogénéité spatiale de la sévérité du feu, l'impact à moyen et long terme sur les habitats et les capacités de recolonisation des zones brûlées.

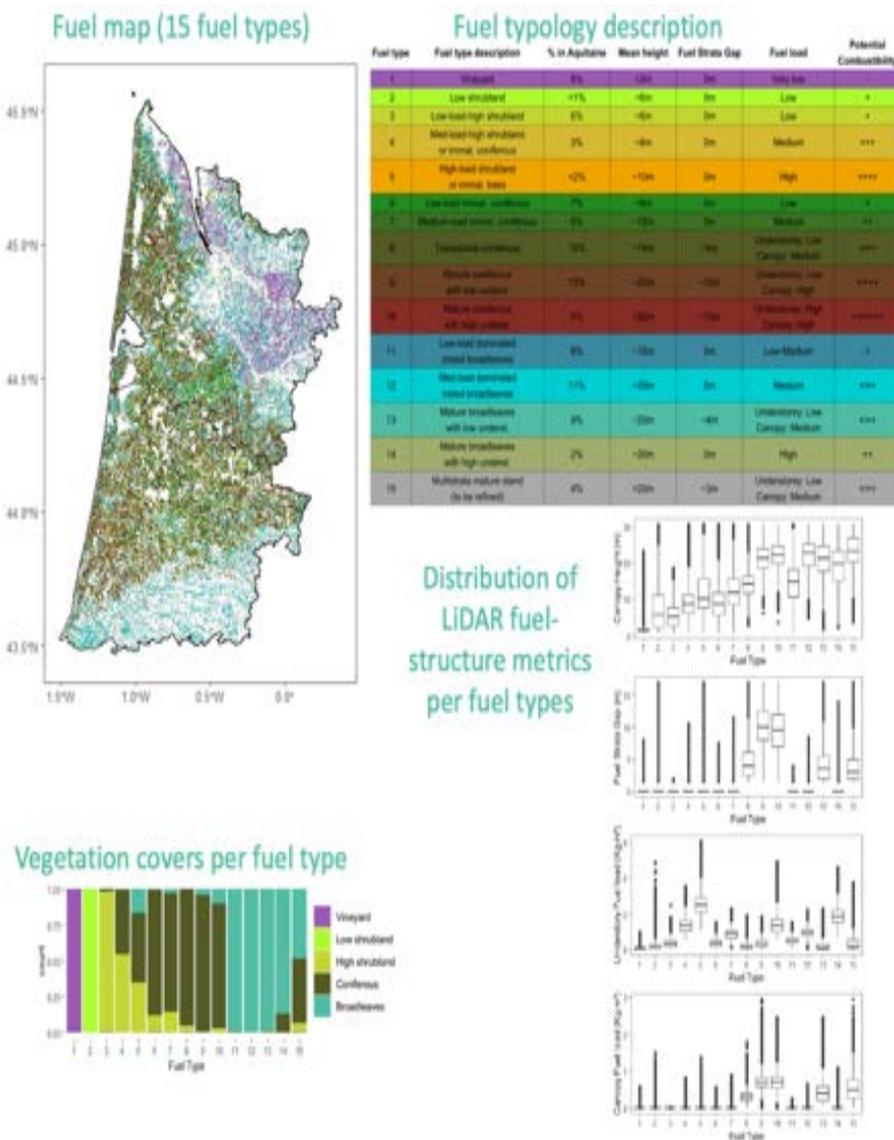


Figure 5.1. Cartographie du combustible dans le massif landais (Gironde et Landes) issue de la combinaison de trois produits de télédétection (LiDAR HD, Cosia et OCS-GE). Cette carte produite à 20 m de résolution permet de cartographier quinze grands types de structures combustibles et de connaître précisément localement le type de couvert ou des valeurs de métriques clés comme la charge de sous-bois ou la distance entre la strate basse et la canopée en mètre (*fuel strata gap*). Ce type de cartographie peut permettre de mieux comprendre les événements de feux qui s’y produiront, ainsi que les causes de leur sévérité.

¹ Voir aussi le concept de [forêt mosaïque](#) proposé par l’ONF

En conclusion, bien que cette synthèse représente une avancée significative dans la compréhension de la vulnérabilité des peuplements forestiers au feu, elle met également en lumière la nécessité de poursuivre les recherches dans ce domaine afin de consolider les connaissances visant à mettre en œuvre des pratiques de gestion adaptatives pour faire face aux défis croissants posés par les incendies de forêt dans un climat en évolution.

PARTIE 6
-
FICHES ESSENCES

Essences formant des peuplements en France métropolitaine

Feuillus

Chênes

pages 72 - 85

Chêne sessile
Chêne vert
Chêne liège
Chêne pédonculé
Chêne pubescent
Chêne chevelu
Chêne tauzin

Autres

pages 86 - 91

Châtaignier
Hêtre
Charme

Conifères

Pinacées

pages 92 - 115

Pin d'Alep
Pin de Turquie
Pin parasol
Pin(s) noir(s)
Pin maritime
Pin sylvestre
Douglas
Sapin blanc
Cèdre de l'Atlas
Épicéa commun
Sapin de Céphalonie
Mélèze d'Europe

Cupressacées

pages 116 - 117

Cyprès de Provence

Autres essences d'intérêt potentiel

Feuillus

pages 118 - 123

Chêne des Canaries
Copalme d'Amérique
Érable à feuille d'Obier

Conifères

pages 124 - 127

Séquoia toujours vert
Calocèdre

PRÉSENTATION DES FICHES ESSENCES

Fiabilité de la note

Classification

Nom commun
Nom latin

Notes de vulnérabilité

Synthèse sur la vulnérabilité de l'espèce

Caractéristiques des feux (optionnel)

Quantité de références

Cartes de prédiction de l'exposition au feu de l'essence

Caractéristiques de combustibilité à l'échelle du peuplement

Caractéristiques de l'espèce jouant un rôle dans sa vulnérabilité

Résultats des tests d'inflammabilité

Pin d'Alep
Pinus halepensis

Classification: Quercus/Quercus → Cistaceae → Pinaceae → Genus/Pinus

Notes de vulnérabilité:
 - Combustibilité: A B C D E
 - Résistance: A B C D E
 - Résilience: A B C D E

Synthèse sur la vulnérabilité de l'espèce:
 Le pin d'Alep est une essence dite "pyrophyte" et montre une adaptation au feu qui favorise l'ouverture des cônes sérotoeux en cas d'incendie. Il ne fait pas d'auto-élagage et les aiguilles qui tombent sont reboutées par les branches mortes, offrant une liasse suspendue hautement inflammable. Sa production de cône sérotoeux varie de 40 à 80% et lui permet de recoloniser rapidement le milieu après un incendie. Son couvert clair est propice au développement d'un sous-bois important, constituant une formation végétale très combustible. Ses aiguilles fines composées de strobilifères, rendent son feuillage et sa liasse facilement inflammables, bien que sa liasse le soit moins que celle d'autres espèces de pins car ses aiguilles sont plus courtes, lisses et sa mortalité est élevée car la structure de ses formateurs est favorable aux feux de cimes. Il reste résilient aux feux de surface grâce à son écorce épaisse.

Caractéristiques des feux (optionnel):
 - Régime de feu: Périodique - 20 ans
 - Type de feu: Feu de cime - Intensité forte

Évolution de l'exposition au feu de l'essence:
 - 2001-2020
 - TRACC 2090 (+3°C)

Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)

Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Pin d'Alep
En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie ■ En défaveur de sa survie

Caractéristiques de combustibilité à l'échelle du peuplement:
 - Couvert clair, branches mortes, liasse suspendue
 - Forte combustibilité verticale
 - Sous-bois dense et combustible

Caractéristiques de l'espèce jouant un rôle dans sa vulnérabilité:
 - Aiguilles fines et courtes
 - Taux élevé de cônes sérotoeux
 - Houppier très ouvert
 - Retention de branches mortes
 - Écorce épaisse
 - Aucune capacité de rept
 - Fort taux de germination

Résultats des tests d'inflammabilité:
 - Houppier: Inflammabilité forte
 - Tronc: NA
 - Litière: Inflammabilité forte

Les symboles

Notes de vulnérabilité*

NA Donnée manquante

Résistance et résilience

A Forte à très forte

B Moyenne à forte

C Modérée à moyenne

D Faible à modérée

E Très faible à faible

Combustibilité

A Très faible à faible

B Faible à modérée

C Modérée à moyenne

D Moyenne à forte

E Forte à très forte

Fiabilité

 Pas fiable

 Peu fiable

 Assez fiable

 Très fiable

La fiabilité d'une note tient compte de :

- La quantité d'informations
- La convergence des avis au sein de la littérature
- La convergence des avis entre la littérature et les experts
- La convergence des avis entre les experts

Les notes prennent en compte la littérature scientifique ainsi que les réponses au questionnaire des experts

Quantité de références

Littérature

 0
 < 10
 entre 10 et 30
 > 30

Expert

 0
 < 4
 entre 4 et 8
 > 8

NOTA BENE

Les termes et notions utilisés dans ces fiches sont définis dans :

1 *Revertegat C. et al. 2025. Synthèse sur la vulnérabilité des peuplements forestiers au feu. Rapport du projet AFORCE VULNEFEU*

2 * Les estimations des différentes composantes de la vulnérabilité, et en particulier de la combustibilité sont **fondées sur les caractéristiques de l'essence** et **ne prennent pas en compte les autres facteurs** comme la météorologie, le relief, l'âge du peuplement qui peuvent faire varier fortement la vulnérabilité. De plus, elles ne sont valables que pour un **peuplement forestier composé de manière dominante** par l'essence concernée

Chêne sessile

Quercus petraea



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



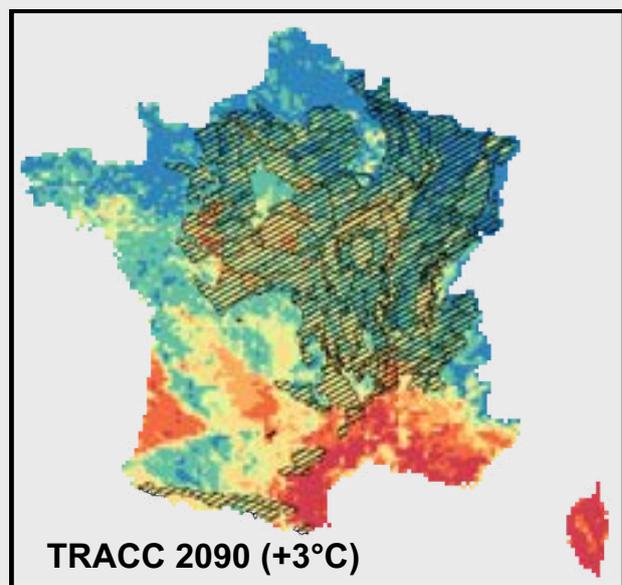
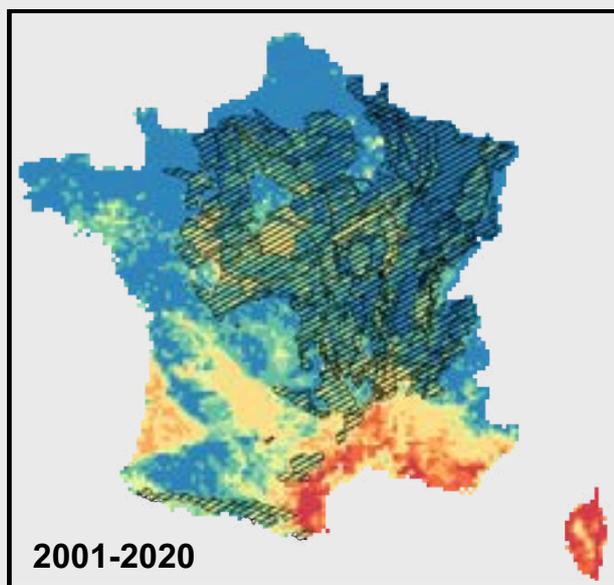
Le chêne sessile se distingue des autres chênes présentés dans cette synthèse par sa capacité à germer après un incendie. En complément, les rejets de souche qu'il peut produire facilitent sa régénération post-incendie. Bien que sa litière soit moyennement inflammable et qu'il résiste aux feux de faible intensité, il reste sensible aux feux d'intensité moyenne.

Expert



Les retours des experts concernant le chêne sessile sont relativement rares. Mais d'après eux, les feux sont rares dans ce type de peuplement, ce qui suggère une faible combustibilité. Elle est dépendante de la structure du peuplement et l'état du sous-bois. Sa capacité à faire des rejets témoigne d'une résilience non nulle. Selon les observations d'un expert, cette espèce se distingue par les caractéristiques suivantes : un port élevé avec des racines profondes, un auto-élagage prononcé, une densité de houppier importante, un recouvrement de la canopée limité, ainsi qu'une écorce particulièrement épaisse.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Chêne sessile

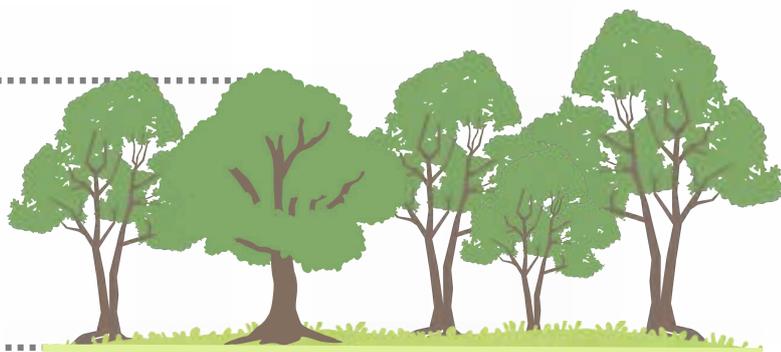
En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

NA



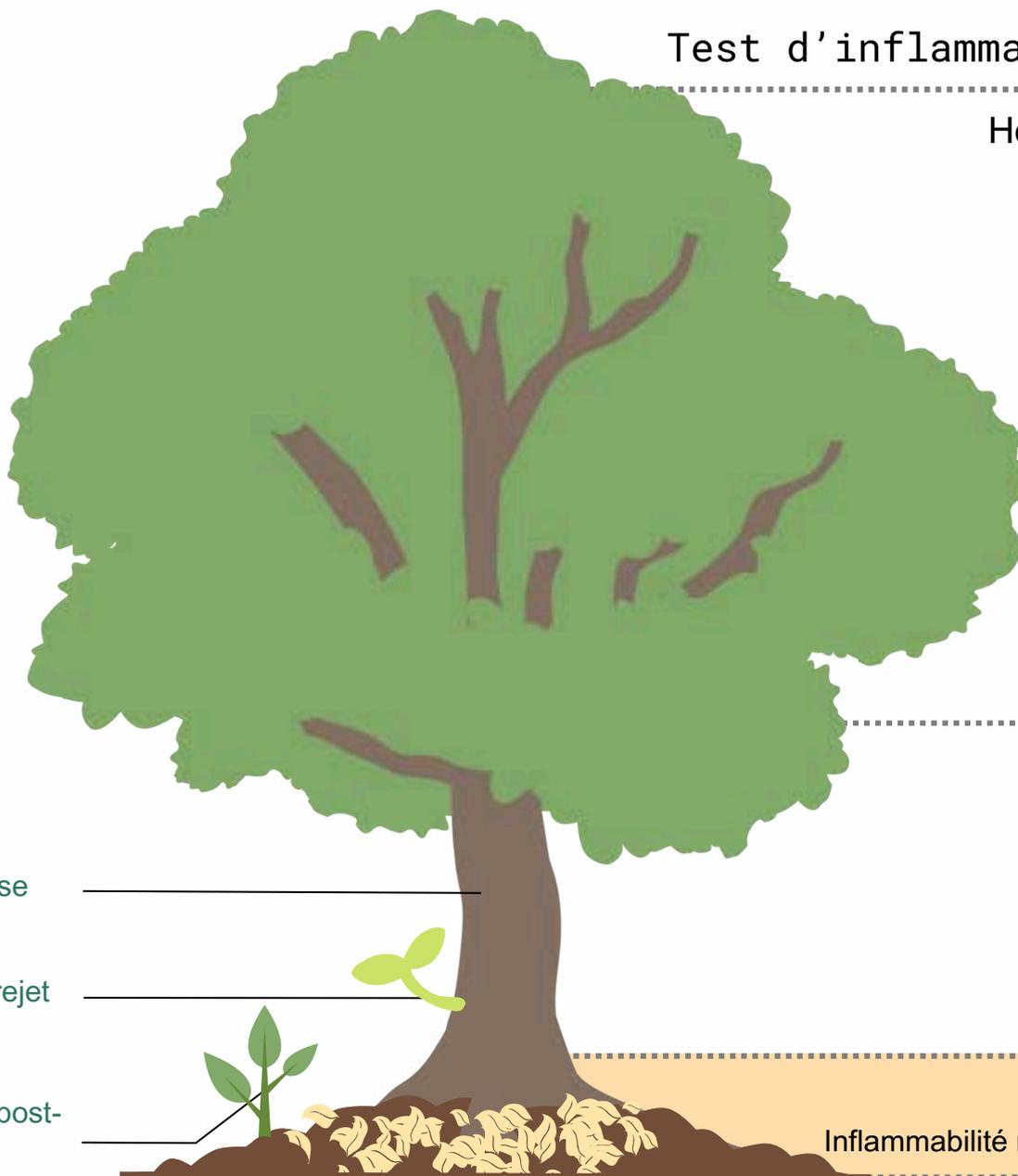
Test d'inflammabilité

Houppier
NA

Écorce épaisse

Capacité de rejet
de souche

Germination post-
feu possible



Litière

Inflammabilité moyenne

Chêne pédonculé

Quercus robur



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*	A B C D E	
Résistance*	A B C D E	
Résilience*	A B C D E	

Littérature



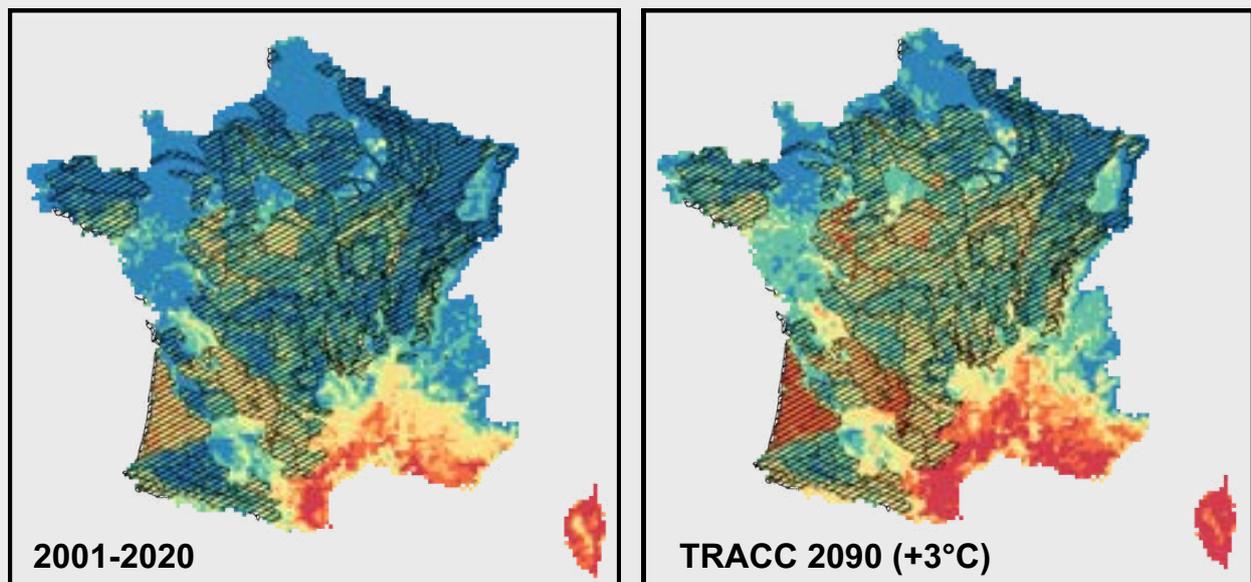
Une source décrit les peuplements de chêne pédonculé comme moyennement combustibles, et une autre décrit son feuillage comme très inflammable. Il est capable de résister aux feux de faible intensité. Malgré sa capacité à produire des rejets et son écorce d'épaisseur moyenne, il est sensible aux feux d'intensité moyenne qui affectent son houppier.

Expert



Comme le chêne sessile, peu d'experts ont renseigné cette essence. Néanmoins, elle est décrite comme peu combustible, les feux qui concernent ces peuplements sont de faible intensité, surtout lorsqu'il est en futaie et que le sous-bois est limité. Sa capacité à survivre dépend de l'âge du peuplement, mais sa résilience est assurée par les nombreux rejets qu'il est capable de produire.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Chêne pédonculé

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

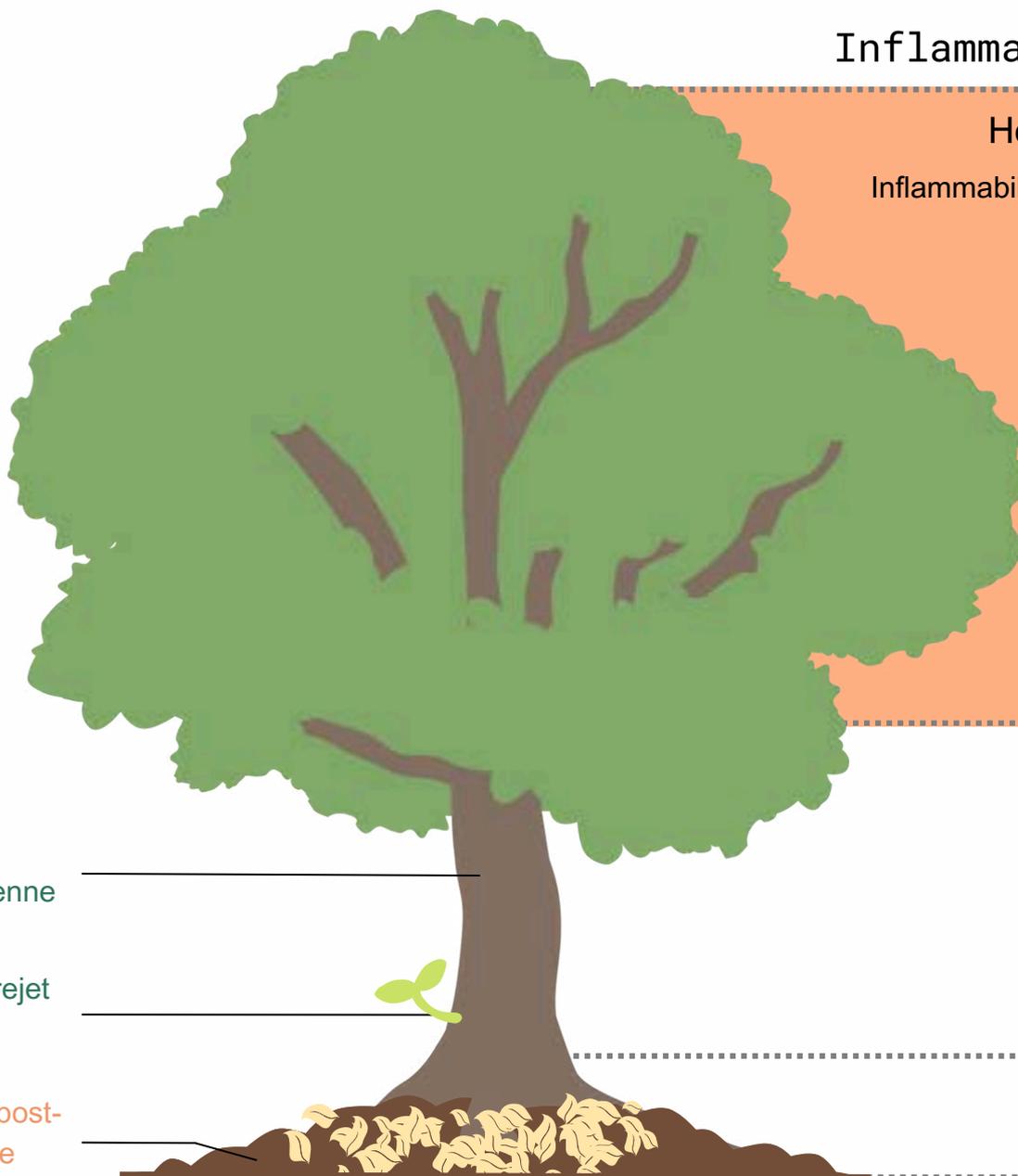
Combustibilité modérée



Inflammabilité

Houppier

Inflammabilité forte



Épaisseur de l'écorce moyenne

Capacité de rejet de souche

Germination post-feu impossible

Litière

NA

Chêne vert

Quercus ilex



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



Le chêne vert est capable de survivre à plusieurs incendies successifs et intenses, bien que son écorce fine le rende sensible aux échauffements du collet et que son feuillage soit très inflammable. Cette résilience est liée à sa forte capacité de rejet qui, même si elle diminue avec l'âge, peut lui permettre d'atteindre 2 mètres en moins de 5 ans. Ses peuplements évoluent à long terme vers des formations monospécifiques (yeuseraie), formant des futaies denses ou des taillis vieillis, qui peuvent agir comme un pare-feu naturel. En effet, leur couvert dense élimine petit-à-petit le sous-bois en privant les plantes de lumière, conduisant à une formation moins combustible. En revanche, sous forme de taillis ou de peuplements ouverts, les formations sont très combustibles.

Expert

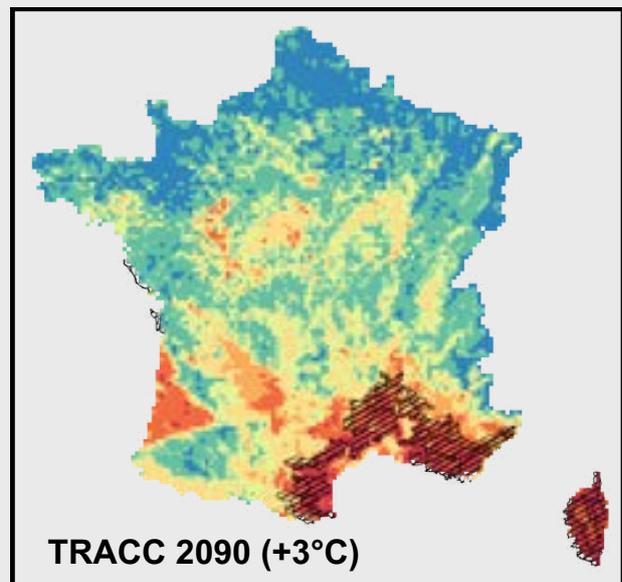
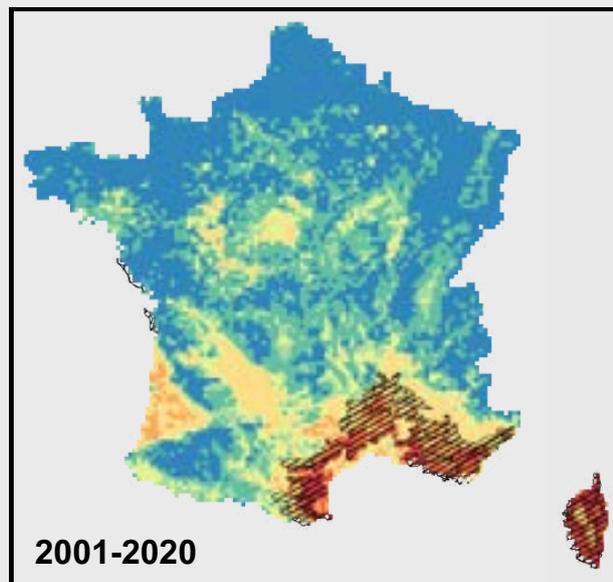


Conformément à la littérature, les experts considèrent le chêne vert comme très vulnérable au feu dans les formations végétales de type garrigue, mais beaucoup plus résistant en yeuseraie mature, créant un couvert sombre, sans sous-étage ni litière. Les experts ont également souligné la capacité du chêne vert à produire de nombreux rejets de souche.

Régime de feu

Fréquent <15 ans

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Chêne vert

En lien avec sa vulnérabilité au feu

 En faveur de sa survie

 En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

A B C D E

A B C D E

Peuplement jeune ou ouvert

Peuplement dense et âgé

Couvert dense

Faible couvert

Sous bois dense et sec

Sous bois réduit et moins sec



Test d'inflammabilité

Feuillage dense

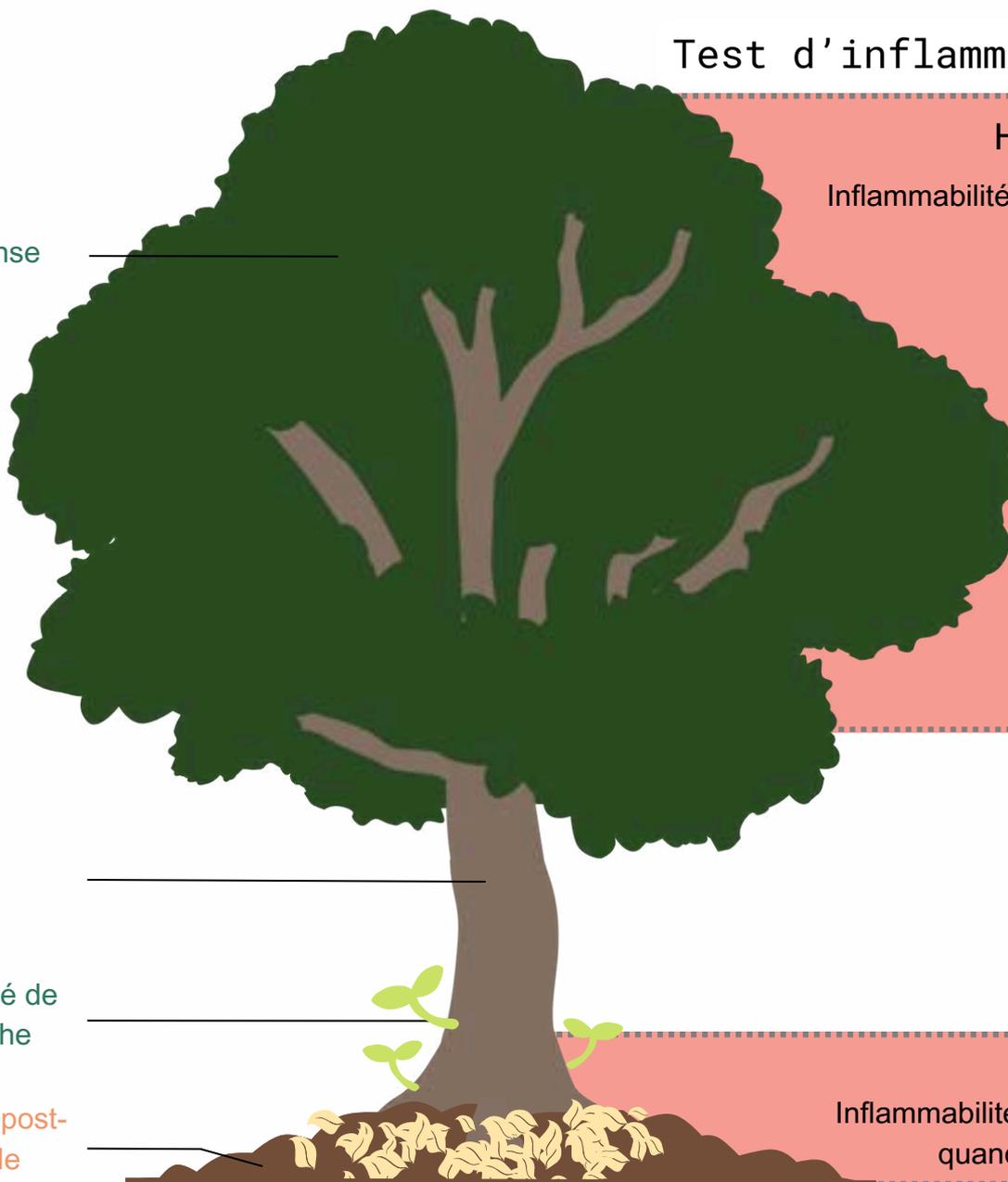
Houppier
Inflammabilité très forte

Écorce fine

Forte capacité de rejet de souche

Germination post-feu impossible

Litière
Inflammabilité très forte quand présente

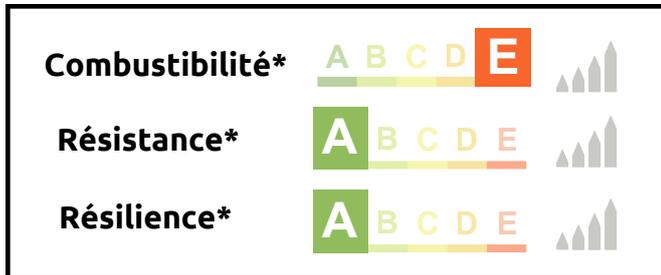


Chêne liège

Quercus suber



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)



Littérature



Le chêne liège se distingue par sa résistance au feu grâce à son écorce caractéristique, épaisse et isolante, et par sa résilience après feu, principalement liée à sa capacité à produire des rejets épicromiques, en plus des rejets de souche. Néanmoins, le feuillage inflammable et sec peut facilement s'embraser, même sans contact avec les flammes. Les peuplements de chêne liège sont très combustibles car leur couvert clair favorise le développement d'un maquis dense.

Expert



Conformément à la littérature, les experts considèrent le chêne liège comme très résistant et résilient, bien qu'il finisse par dépérir en cas de feux répétés.

À Gonfaron, lors de l'incendie de 2021, le feu très intense a montré que le chêne liège résiste mieux que d'autres espèces, malgré des conditions extrêmes.

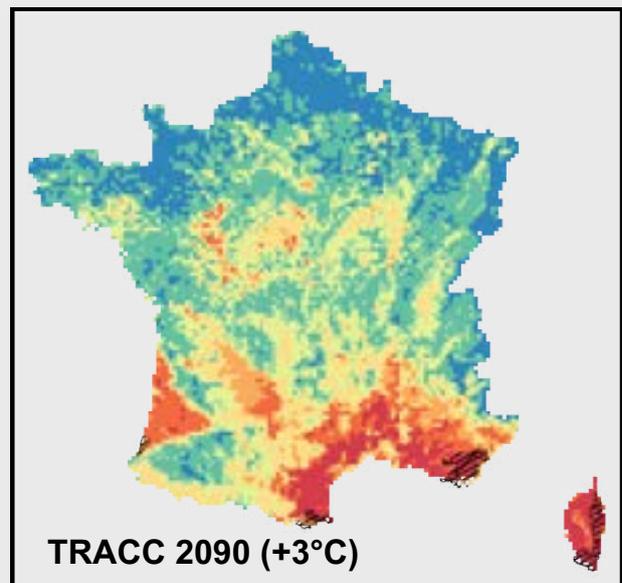
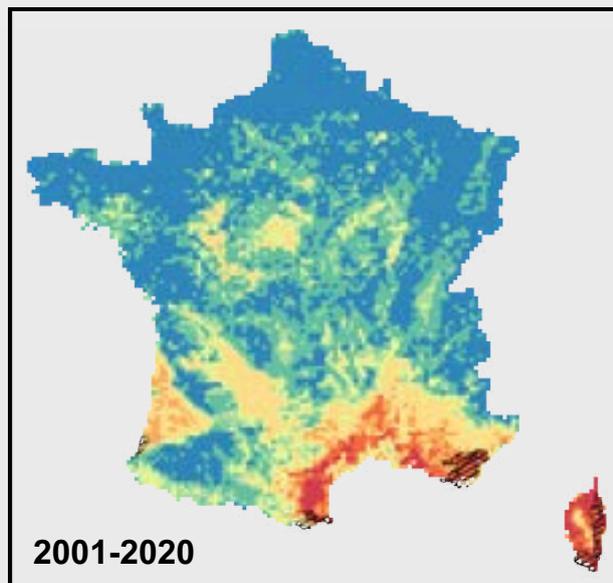
Régime de feu

Fréquent < 15 ans

Type de feu

Feu de cime - Intensité forte

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Chêne liège

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Faible couvert

Sous bois dense et sec



Test d'inflammabilité

Feuillage peu
dense

Rejet épicornique

Écorce en liège,
épaisse et isolante

Forte capacité de
rejet de souche

Germination post-
feu impossible

Houppier

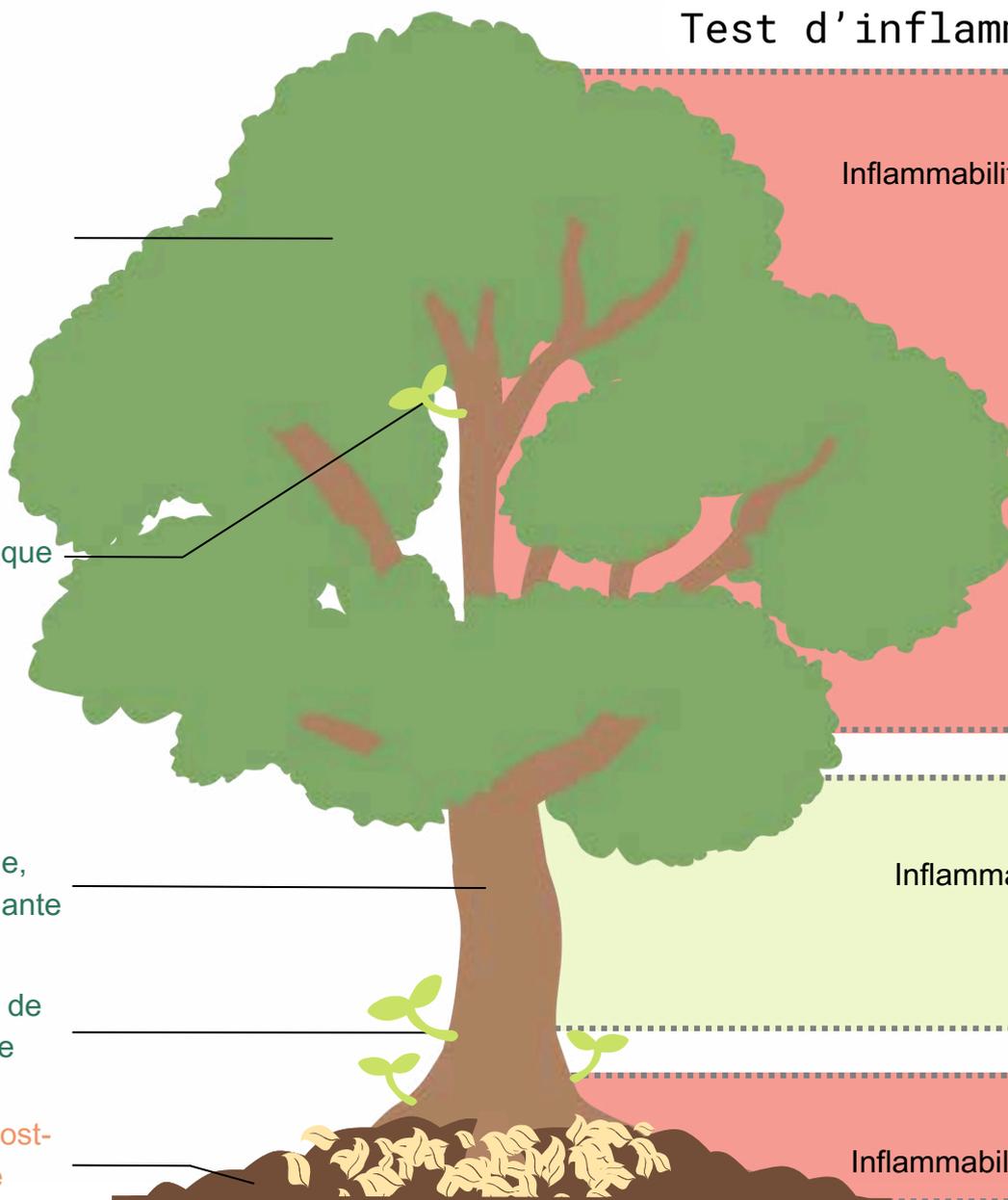
Inflammabilité très forte

Tronc

Inflammabilité faible

Litière

Inflammabilité très forte



Chêne pubescent

Quercus pubescens



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



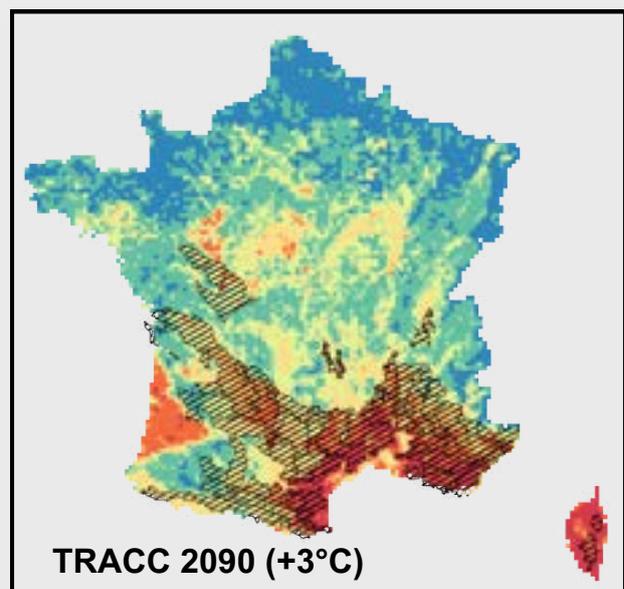
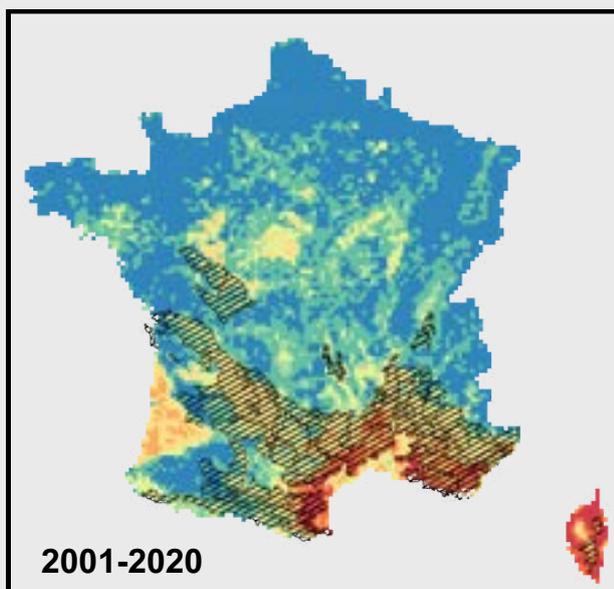
Le chêne pubescent en peuplement pur est peu combustible, mais la vulnérabilité au feu augmente avec la présence d'une strate arbustive. Sa litière très combustible conduit facilement un feu courant au sol. Les feuilles du chêne pubescent sont très inflammables, sauf au moment de la montée de sève au printemps. Son écorce d'épaisseur moyenne le rend également assez sensible au feu. Sa bonne résilience post-incendie est assurée par une croissance rapide de ses rejets.

Expert



Les experts définissent le chêne pubescent comme moyennement combustible, sa combustibilité dépendant surtout de l'état du sous-bois et de la structure du peuplement. Les avis divergent quant à sa résistance et sa résilience, mais globalement, celles-ci sont jugées moyennes. Certains experts insistent sur sa bonne capacité à produire des rejets de souche.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Chêne pubescent

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Combustibilité **faible** en peuplement pur et fermé, **forte** en peuplement ouvert



Test d'inflammabilité

Houppier

Inflammabilité très forte

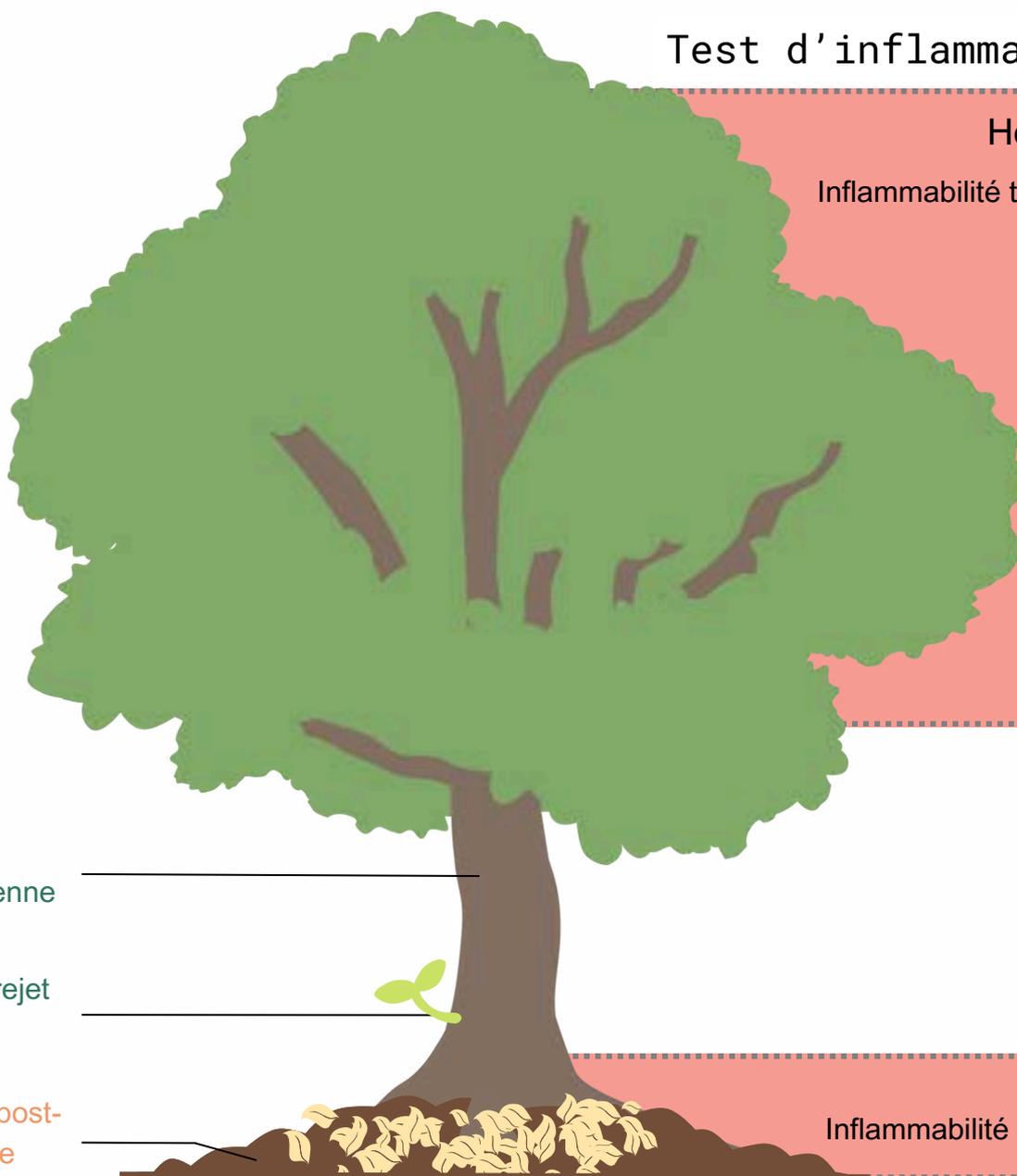
Épaisseur de l'écorce moyenne

Capacité de rejet de souche

Germination post-feu impossible

Litière

Inflammabilité très forte



Chêne chevelu

Quercus cerris



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*

NA



Résistance*

NA



Résilience*

A B C D E



Littérature



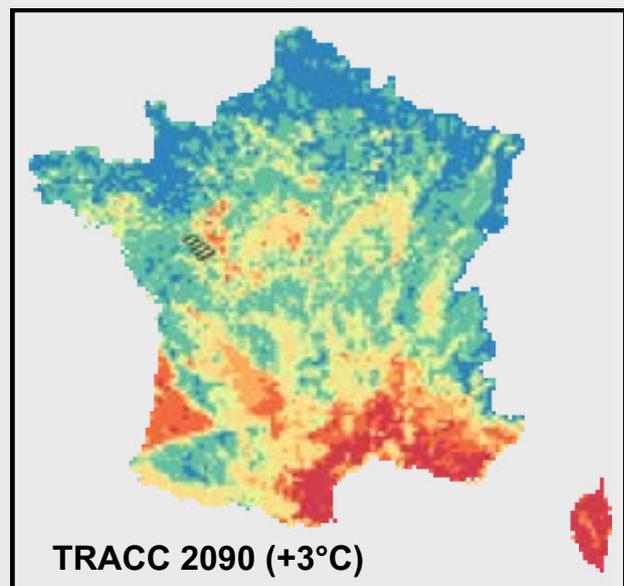
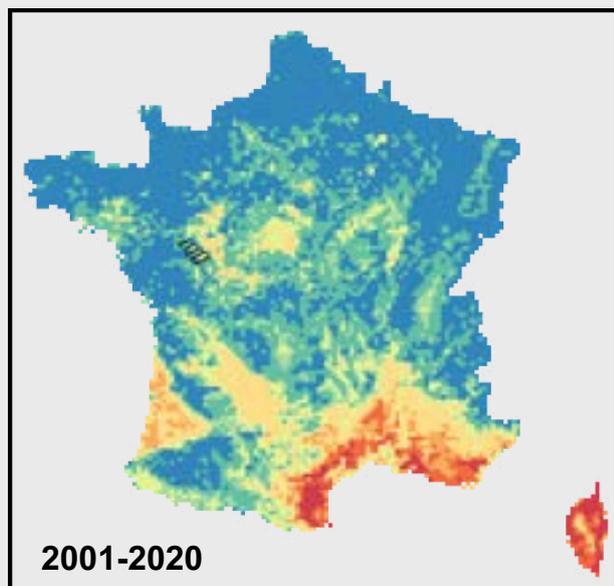
Le chêne chevelu est une essence pour laquelle les informations disponibles sont limitées. Néanmoins, il est relevé qu'il ne peut pas germer après un feu. En revanche, il présente une forte capacité de rejets.

Expert



Aucun expert n'a fourni d'avis concernant le chêne chevelu.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Chêne chevelu

En lien avec sa vulnérabilité au feu

 En faveur de sa survie

 En défaveur de sa survie

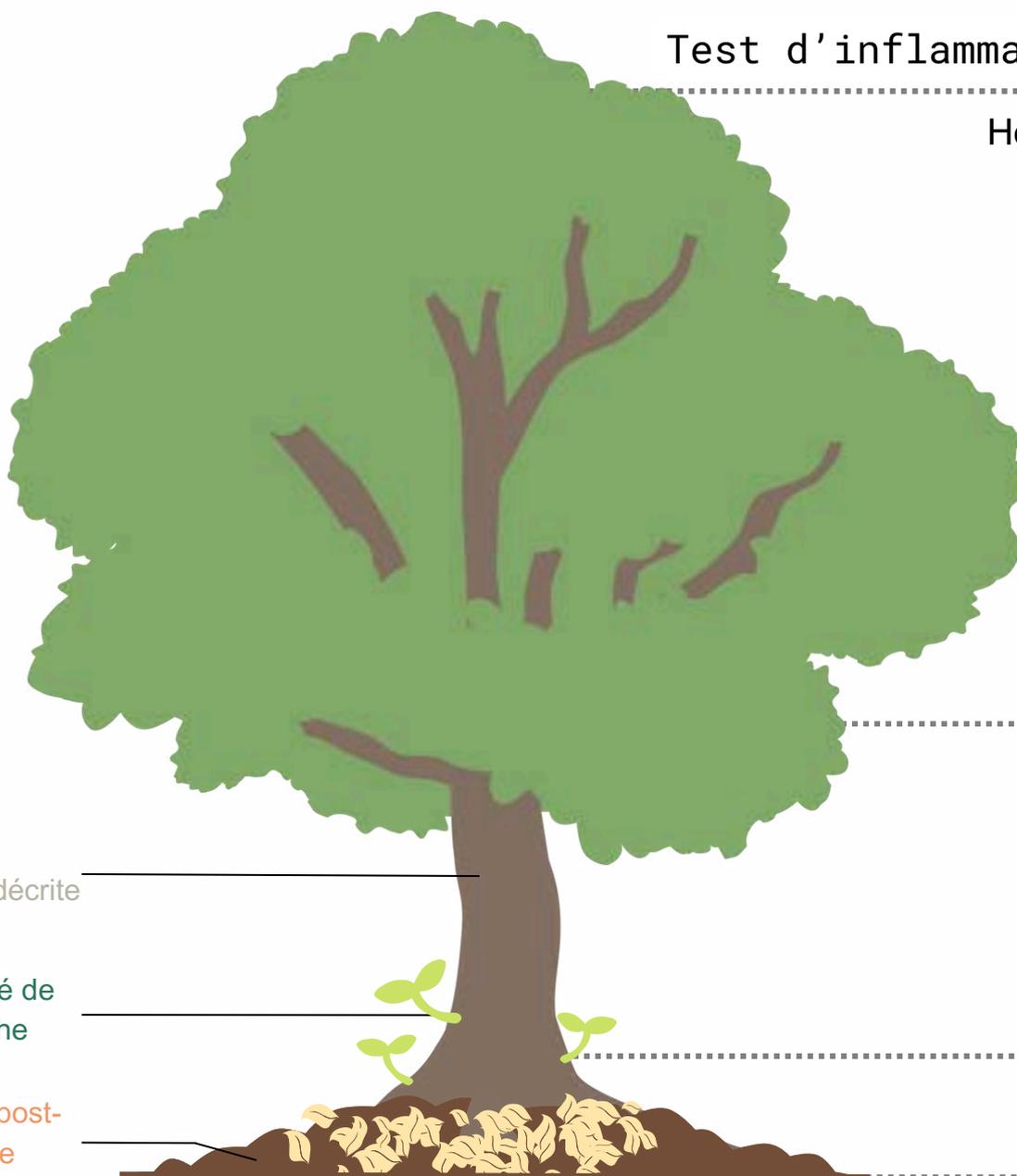
Combustibilité du peuplement

NA



Test d'inflammabilité

Houppier
NA



Épaisseur de
l'écorce non décrite

Forte capacité de
rejet de souche

Germination post-
feu impossible

Litière
NA

Chêne tauzin

Quercus pyrenaica



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*

NA



Résilience*



Littérature



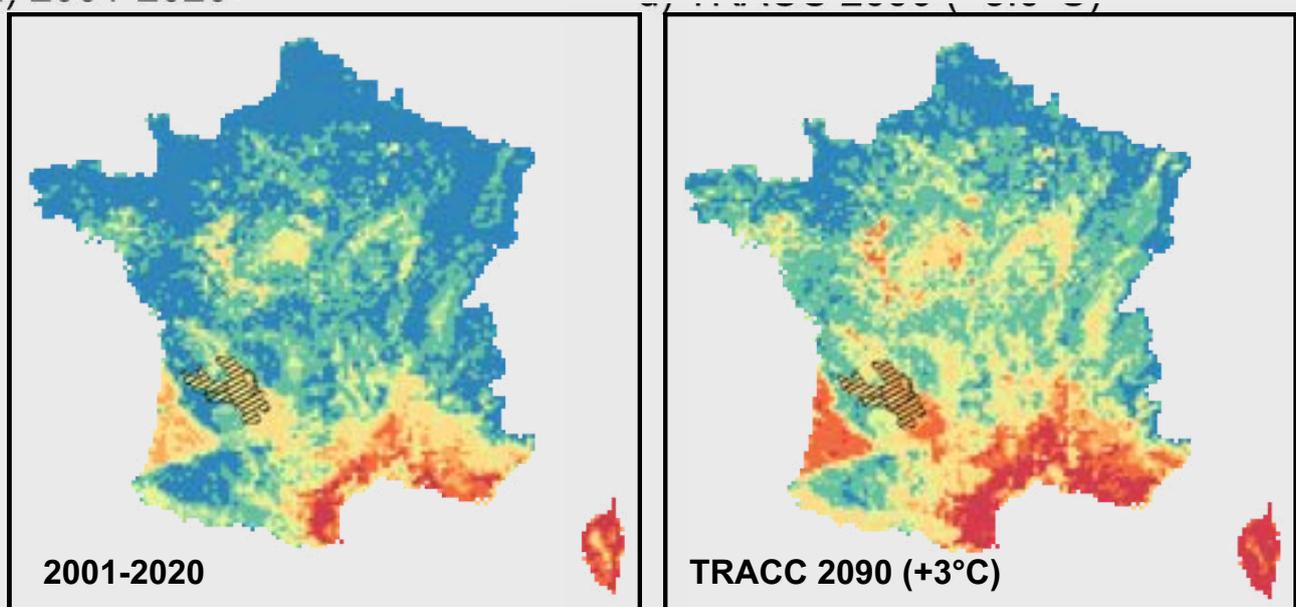
Le chêne tauzin est une essence pour laquelle les informations disponibles sont limitées. Néanmoins, il est relevé qu'il ne peut pas germer après un feu et qu'il présente une faible capacité de rejets. De plus, un seul article mentionne une combustibilité considérée comme faible des formations à chêne tauzin.

Expert



Trop peu d'avis ont été recueillis concernant le chêne tauzin pour en tirer des conclusions.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Chêne tauzin

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

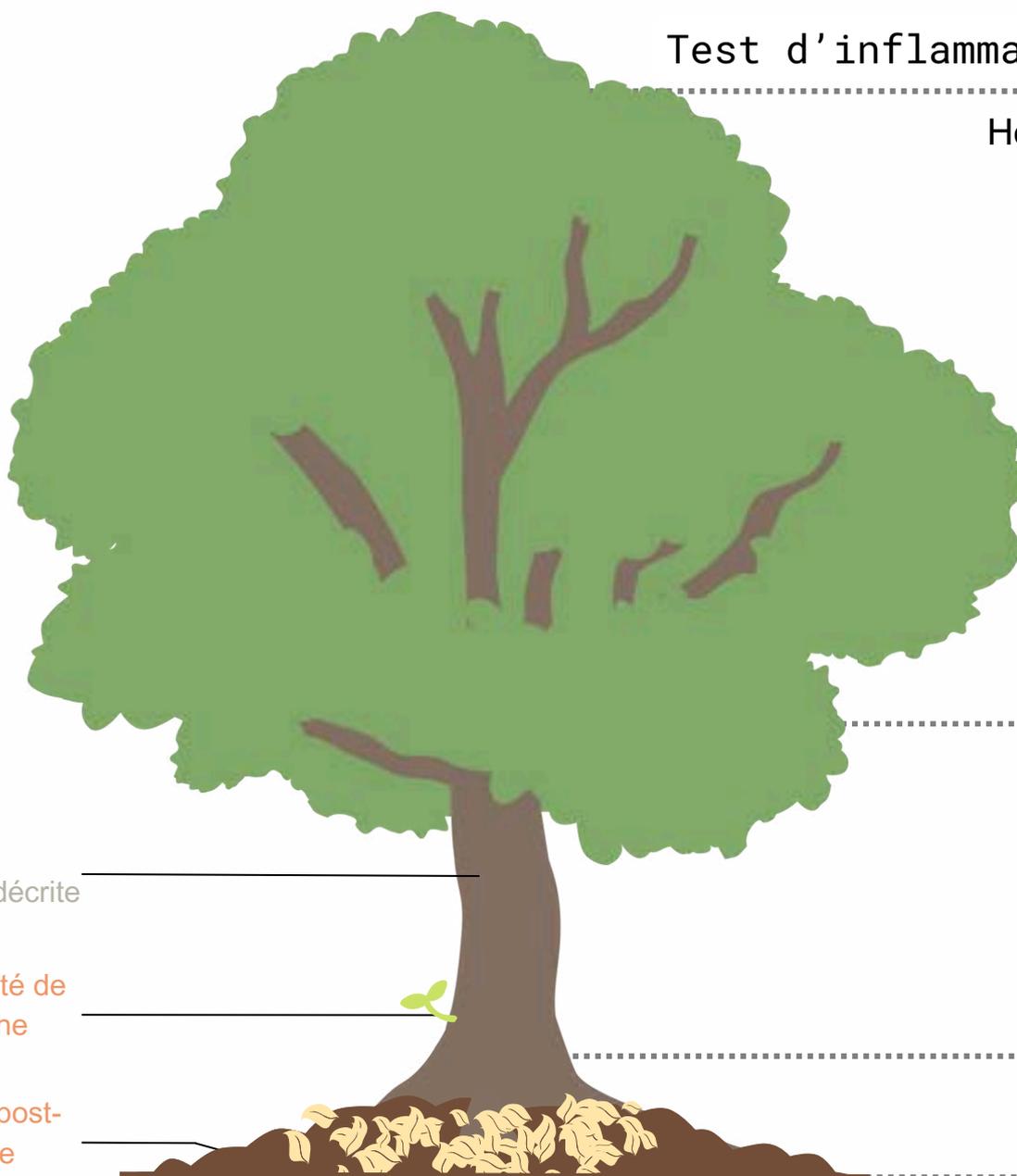
Combustibilité du peuplement

NA



Test d'inflammabilité

Houppier
NA



Épaisseur de
l'écorce non décrite

Faible capacité de
rejet de souche

Germination post-
feu impossible

Litière
NA

Châtaignier

Castanea sativa



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



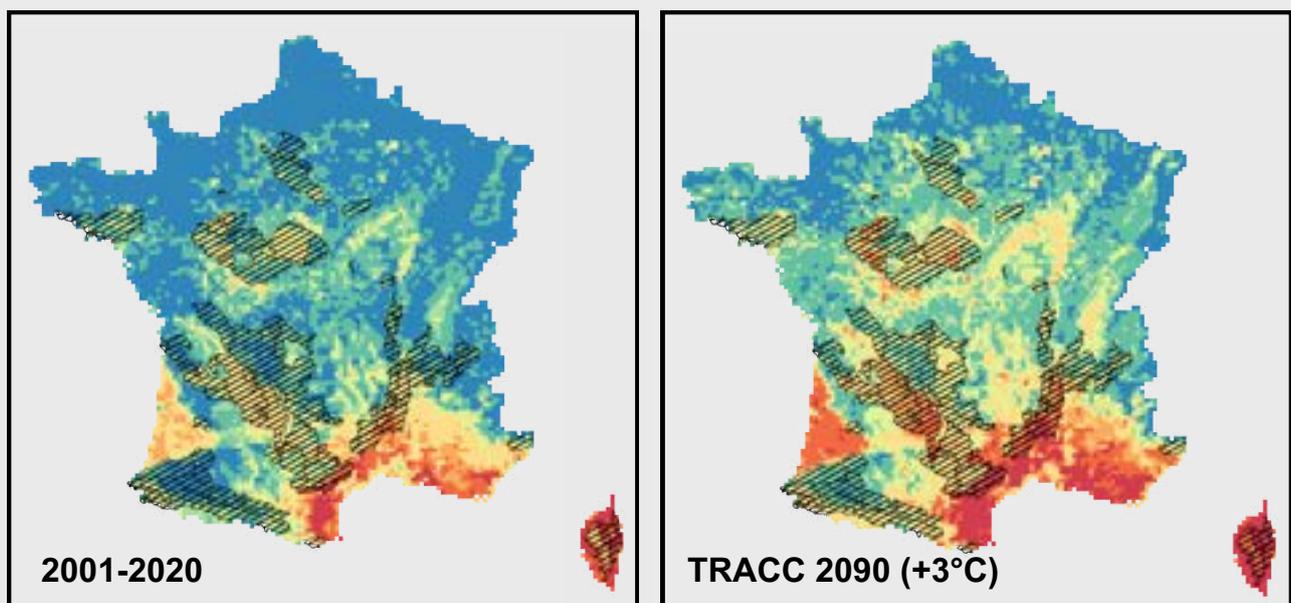
Le châtaignier est résilient au feu, car il produit de nombreux rejets après incendie. La germination post-incendie de ses graines est également possible. Son feuillage est décrit comme inflammable, sauf pendant la montée de sève au printemps, bien que certaines sources soulignent une teneur en eau relativement élevée. Sa litière sèche est également très combustible, mais elle se réhydrate facilement. Néanmoins, en absence de sous-bois, il est peu combustible, grâce à son auto-élagage remarquable et à la forte teneur en eau de ses feuilles. Les peuplements adultes et sains semblent être résistants, voire favorisés (de nombreux rejets), par les feux d'intensité moyenne. Toutefois, leur sensibilité au feu est marquée lorsqu'ils sont jeunes ou affaiblis.

Expert



Les experts décrivent le châtaignier comme moyennement vulnérable en termes de combustibilité, de résistance et de résilience. Certains soulignent la résistance des individus âgés et sains, notamment grâce à leur houppier étalé qui limite le sous-bois. Les experts confirment également la bonne capacité du châtaignier à produire des rejets.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Châtaignier

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Couvert dense

Absence de sous bois



Test d'inflammabilité

Forte teneur en eau des feuilles au printemps

Épaisseur de l'écorce non décrite

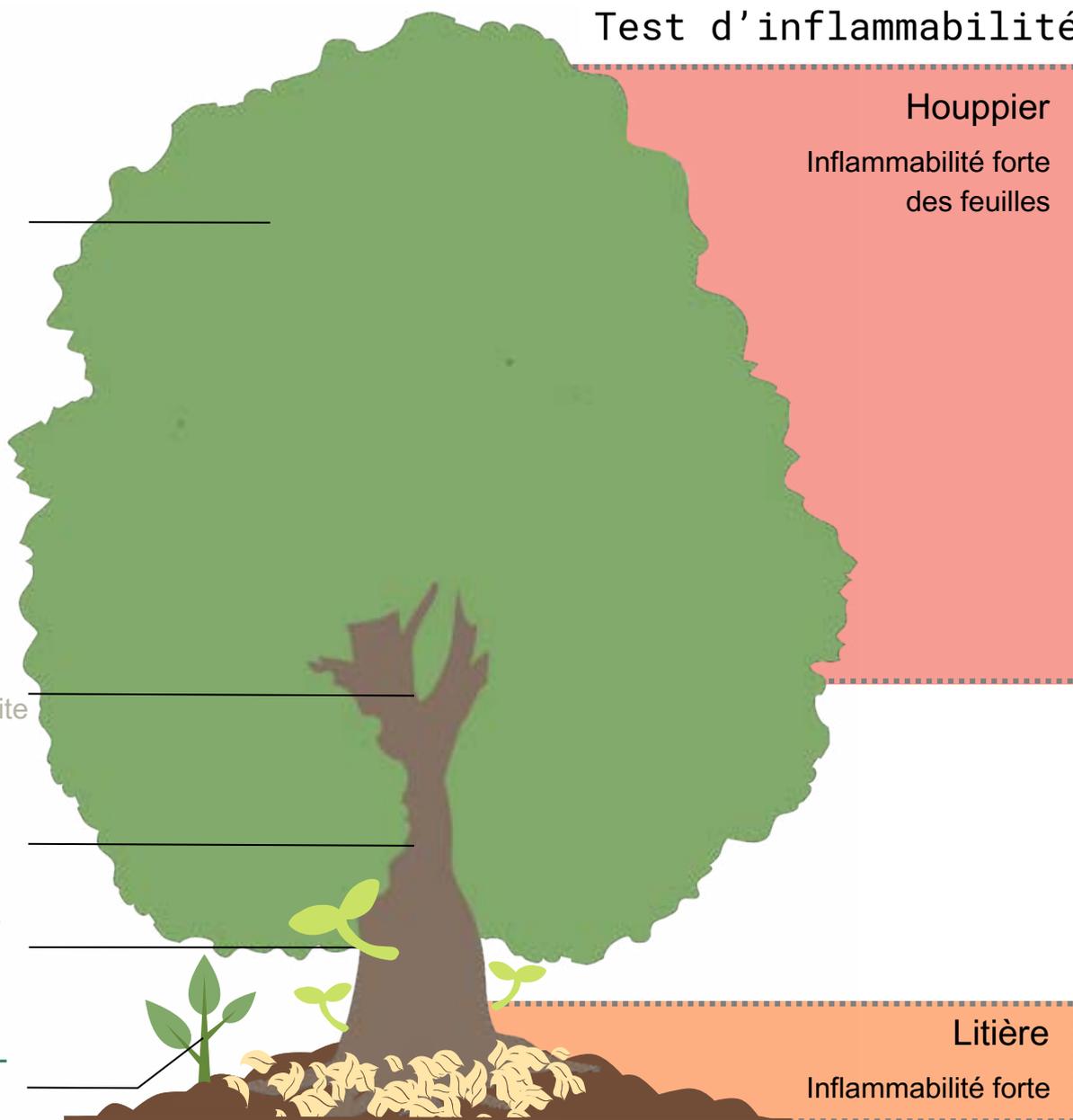
Auto-élagage

Forte capacité de rejet de souche

Germination post-feu possible

Houppier
Inflammabilité forte
des feuilles

Litière
Inflammabilité forte



Hêtre

Fagus sylvatica



Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Littérature



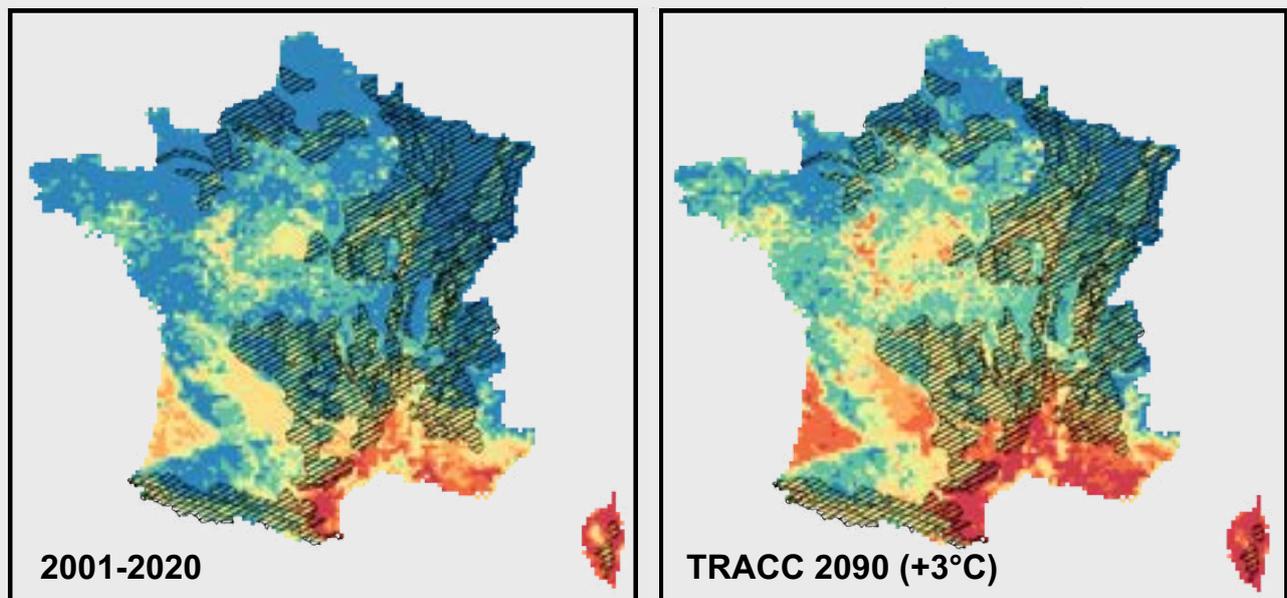
Le hêtre est très sensible au feu. Bien que sa combustibilité soit moindre et que son feuillage soit peu inflammable, son écorce fine ne le protège pas suffisamment, ce qui entraîne une mortalité élevée même en cas de feux de surface de faible intensité. La litière sèche des hêtraies est d'une combustibilité intermédiaire, d'autant qu'elle se réhydrate facilement. La capacité du hêtre à faire des rejets est possible mais médiocre, les nouvelles pousses ont tendance à mourir dans les 3 années suivant le feu. Toutefois, en cas de feu de faible intensité, sa couronne peut se rétablir et les rejets peuvent persister. Son taux de germination est également suffisant concernant les feux d'intensités faibles à modérées. Néanmoins, un incendie plus sévère endommagera la banque de graine dans le sol, qui est fragile, et compromettra la régénération.

Expert



Les experts sont unanimes quant à la faible combustibilité et la faible résilience du hêtre. Sa résistance, bien que légèrement plus débattue, est également décrite comme assez faible. Cependant, certains experts soulignent que les hêtres en futaie adulte montrent une meilleure résistance, surtout lorsque le sous-bois est réduit et que la litière est compacte. En revanche, en automne, sa litière fraîchement tombée est sèche et aérée, favorisant le feu jusqu'aux premières pluies. C'est ce qui a été observé lors de l'incendie de Ghisoni en novembre 2017 en Haute-Corse.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Hêtre

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

NA

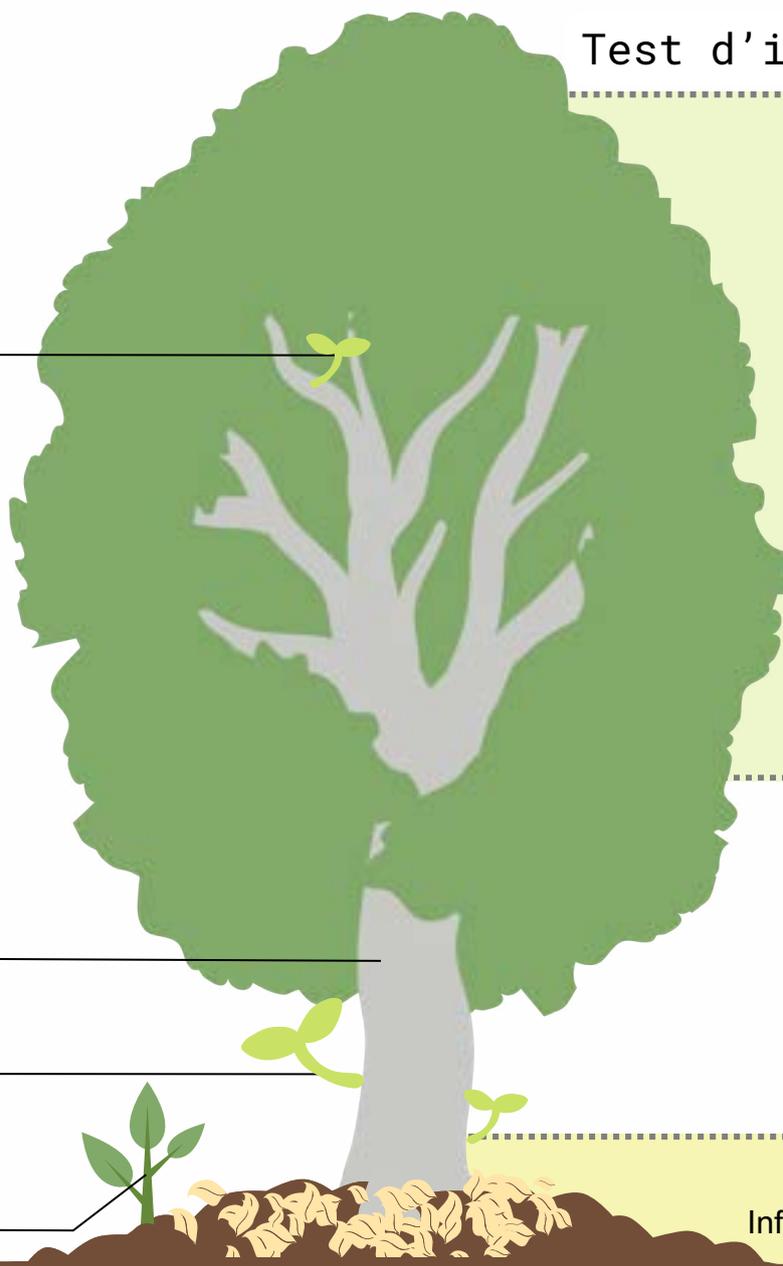


Test d'inflammabilité

Houppier

Inflammabilité faible

Rejet épïcormique,
mais ne persistent
pas



Écorce fine

Capacité de rejet
de souche, mais
ne persistent pas

Germination post-
feu possible

Litière

Inflammabilité moyenne

Charme

Carpinus betulus



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



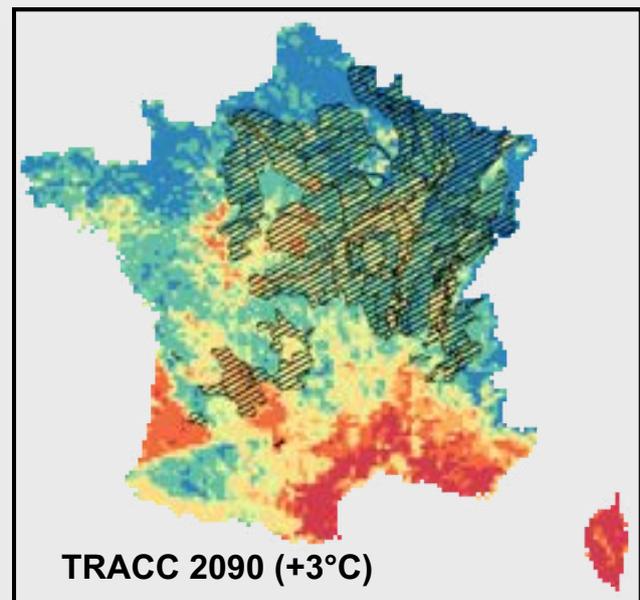
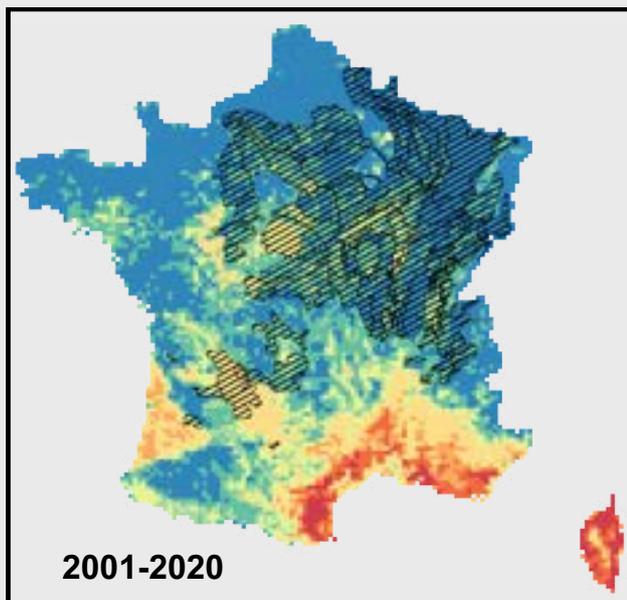
Le charme est une essence pour laquelle les informations disponibles sont limitées. Néanmoins, il est relevé que son écorce est assez fine, même si plus épaisse que le hêtre, et qu'il est capable de produire des rejets.

Expert



Les avis d'experts soulignent la faible résistance et résilience de cette espèce. Ils décrivent également le charme comme peu combustible, avec une écorce fine. Comme dans la littérature, un expert souligne sa capacité à faire des rejets et à coloniser les milieux pionniers, ce qui laisse penser que sa résilience n'est peut-être pas si limitée.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Charme

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

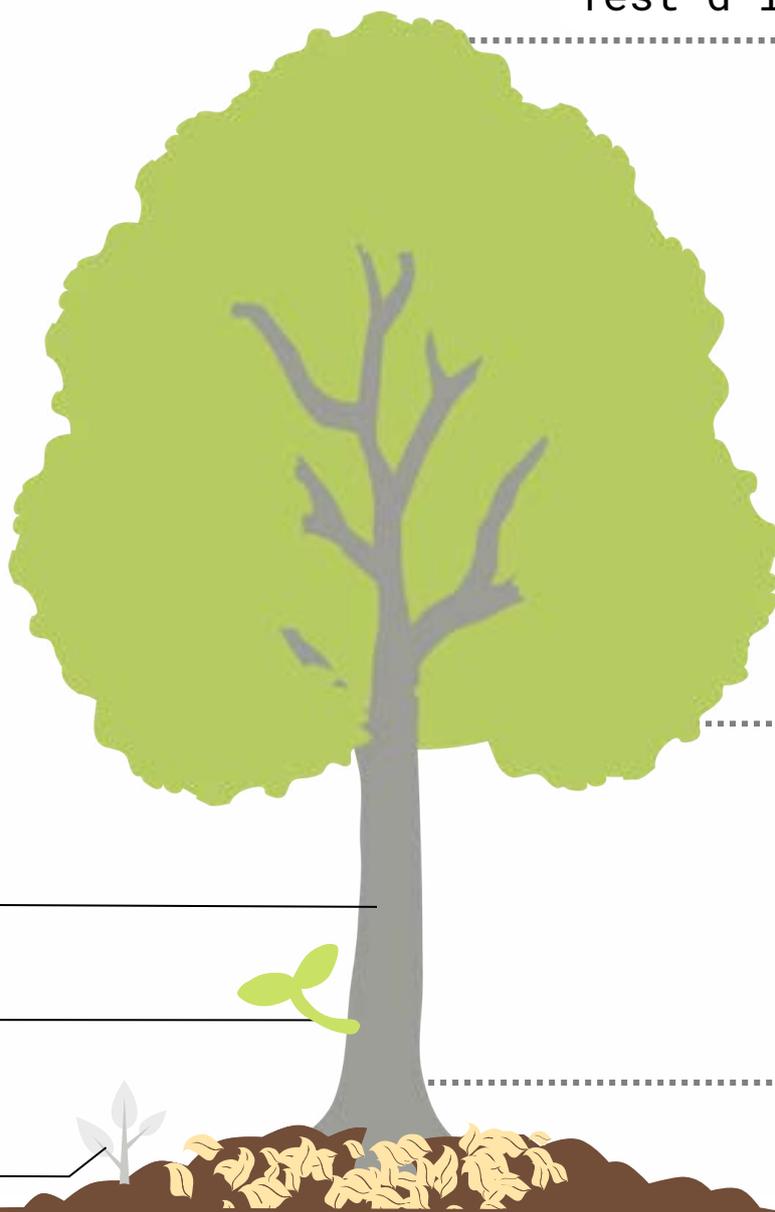
Combustibilité
du peuplement

NA



Test d'inflammabilité

Houppier
NA



Écorce fine

Capacité de rejet
de souche

Taux de germination
post-feu inconnu

Litière
NA

Pin d'Alep

Pinus halepensis



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



Le pin d'Alep est une essence dite "pyrophyte" et montre une adaptation au feu qui favorise l'ouverture des cônes sérotineux en cas d'incendie. Il ne fait pas d'auto-élagage et les aiguilles qui tombent sont retenues par les branches mortes, créant une litière suspendue hautement inflammable. Sa production de cône sérotineux varie de 40 à 80% et lui permet de recoloniser rapidement le milieu après un incendie. Son couvert clair est propice au développement d'un sous-bois important, constituant une formation végétale très combustible. Ses aiguilles fines composées de sesquiterpènes, rendent son feuillage et sa litière facilement inflammables, bien que sa litière le soit moins que celle d'autres espèces de pins car ses aiguilles sont plus courtes. Même si sa mortalité est élevée car la structure de ses formations est favorable aux feux de cimes, il reste résistant aux feux de surface grâce à son écorce épaisse.

Expert



Les avis des experts divergent quant à la résilience du pin d'Alep, bien qu'elle soit en moyenne considérée comme relativement élevée. Les experts s'accordent à dire que le pin d'Alep est très combustible et peu résistant. À Gonfaron, les pinèdes de pin d'Alep ont favorisé la propagation de l'incendie d'août 2021, notamment à cause des sautes de feu dues au détachement de l'écorce.

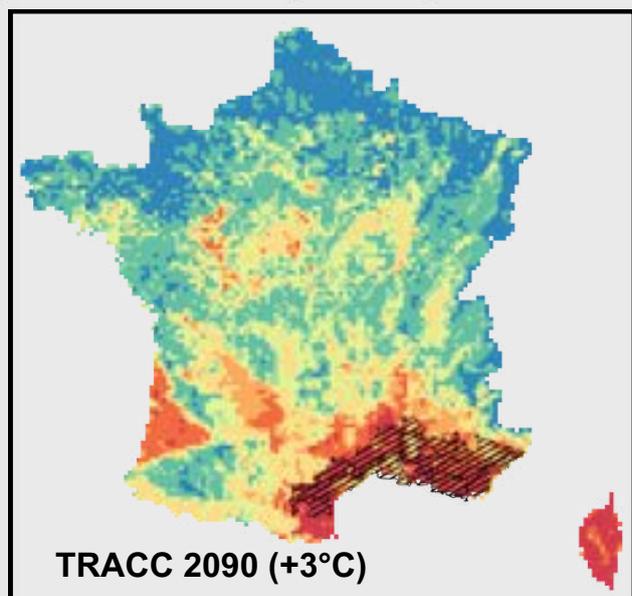
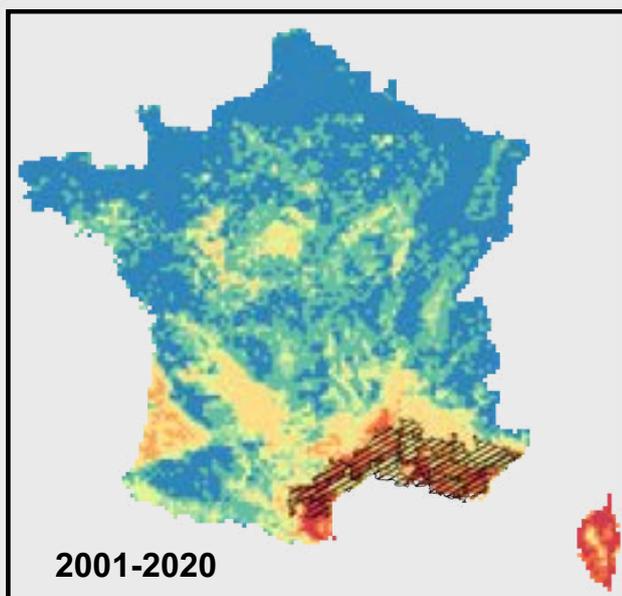
Régime de feu

Périodique 20-50 ans

Type de feu

Feu de cime - Intensité forte

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Pin d'Alep

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

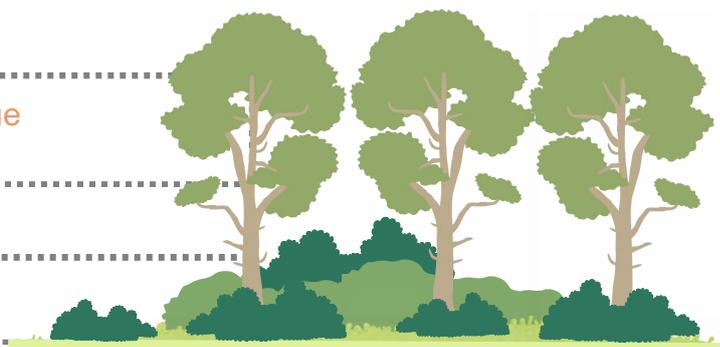
■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

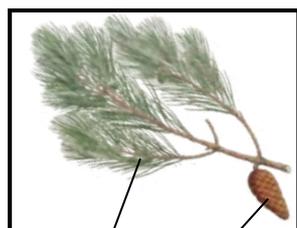
Couvert clair, branches mortes, litière suspendue

Forte continuité verticale

Sous-bois dense et combustible



Test d'inflammabilité



Aiguilles fines et courtes

Taux élevé de cônes sérotineux

Feuillage peu dense

Rétention de branches mortes

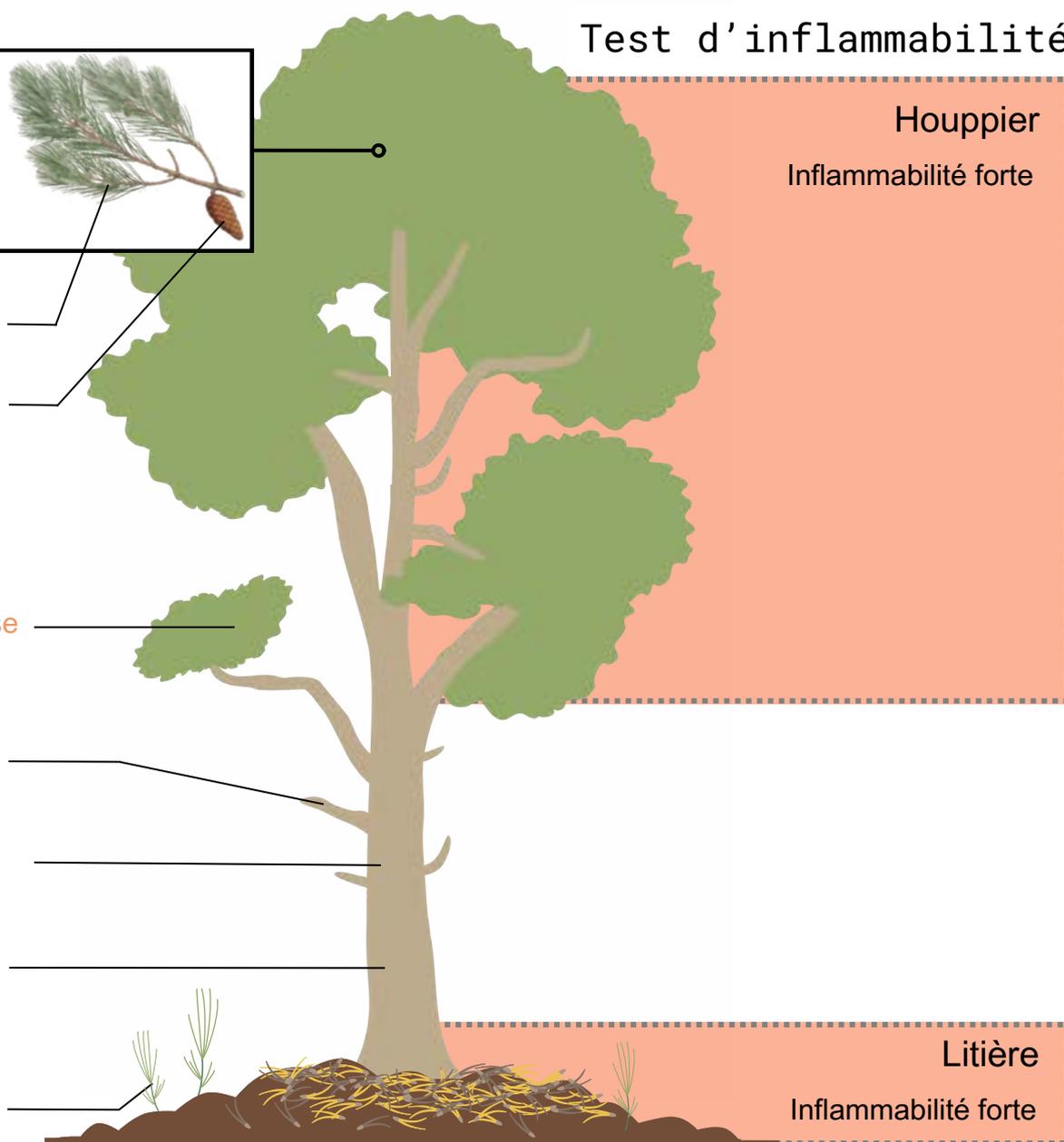
Écorce épaisse

Aucune capacité de rejet

Fort taux de germination

Houppier
Inflammabilité forte

Litière
Inflammabilité forte



Pin de Turquie

Pinus brutia



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



Le pin de Turquie, comme le pin d'Alep, est une essence dite "pyrophyte" et présente une adaptation au feu favorisée par l'ouverture des cônes sérotineux en cas d'incendie. Bien que ses aiguilles plus épaisses que celles du pin d'Alep soient plus résistantes au feu, sa litière serait plus inflammable, du fait de la longueur des aiguilles plus importante. Il ne présente pas d'auto-élagage, ce qui induit une forte continuité verticale propice aux feux de cime. Sa capacité à produire des cônes sérotineux lui permet de coloniser rapidement le milieu après un incendie, bien que le pourcentage de cônes sérotineux puisse varier considérablement. L'inflammabilité de son houppier n'est pas établie dans la littérature, mais au vu de ses ressemblances avec le pin d'Alep, il est probable qu'il soit très inflammable.

Expert



Les deux experts qui ont donné leur avis considèrent que le pin de Turquie est très peu résistant et relativement résilient. Ils estiment également que cette espèce est assez combustible.

Régime de feu

Périodique 20-50 ans

Type de feu

Feu de cime - Intensité forte

Évolution de l'exposition au feu de l'essence

Cette espèce étant peu ou non présente en France, aucune carte de répartition spécifique n'est disponible pour ce territoire.

Caractéristiques du Pin de Turquie

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

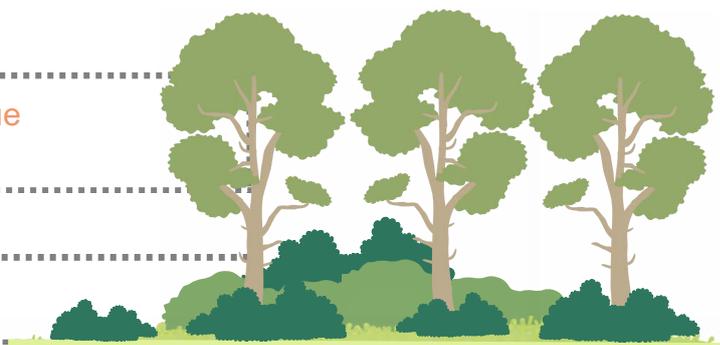
■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

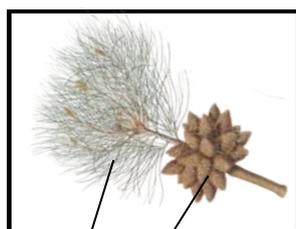
Couvert clair, branches mortes, litière suspendue

Forte continuité verticale

Sous-bois dense et combustible



Test d'inflammabilité



Aiguilles épaisses et longues

Taux élevé de cônes sérotineux

Rétention de branches mortes

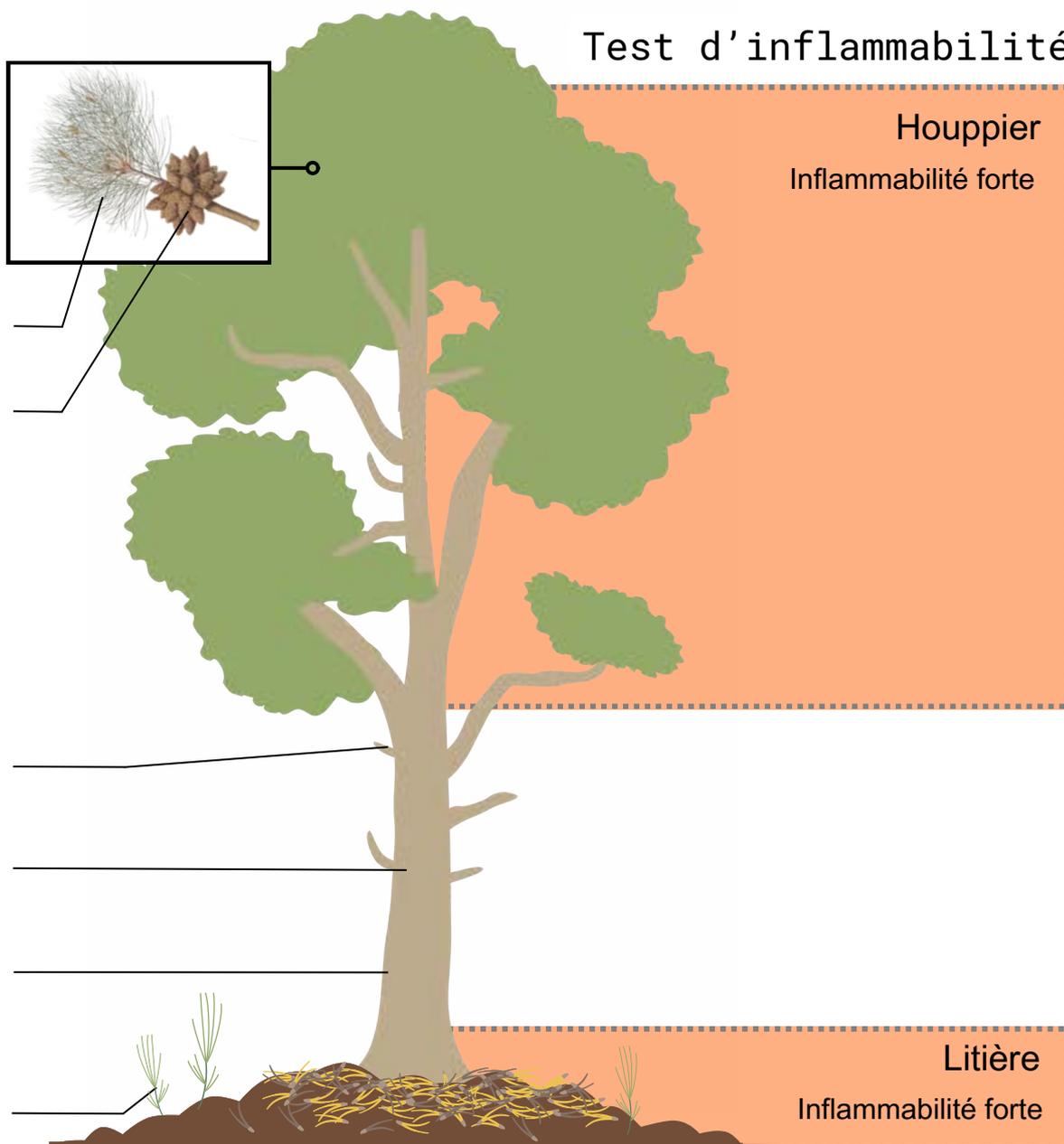
Écorce épaisse

Aucune capacité de rejet

Fort taux de germination

Houppier
Inflammabilité forte

Litière
Inflammabilité forte



Pin parasol

Pinus pinea



Combustibilité*

A B C D E



Résistance*

A B C D E



Résilience*

A B C D E



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Littérature



Le pin parasol se distingue par sa résistance importante face au feu, notamment grâce à son écorce épaisse. Il peut survivre avec plus de 80% de son houppier brûlé. Il est également moins combustible que les autres pins de ce guide. Son houppier élevé et son tronc dépourvu de branches mortes limitent la montée du feu vers la cime. Son houppier est également plus dense que celui du pin d'Alep, ce qui limite le développement du sous-bois, qui peut tout de même être suffisamment important pour rendre ces formations combustibles. Sa litière aérée, grâce aux aiguilles fines et longues, est également assez combustible. Bien que le pin parasol ne possède pas de cônes sérotineux, ses graines sont bien protégées par des cônes épais, qui favorisent leur survie en les protégeant de la chaleur et des brûlures. En revanche, la régénération après feu est très incertaine, du fait de l'irrégularité inter-annuelle de la production de graines, d'une distance de dispersion des graines limitée (barochorie) et d'une survie des semis faible. Par conséquent, la résilience du pin parasol est limitée.

Expert



Les avis des experts divergent quant à la résistance du pin parasol. Les notes varient également de manière significative pour sa combustibilité, qui tend à être élevée en moyenne, et pour sa résilience, qui est considérée comme moyenne.

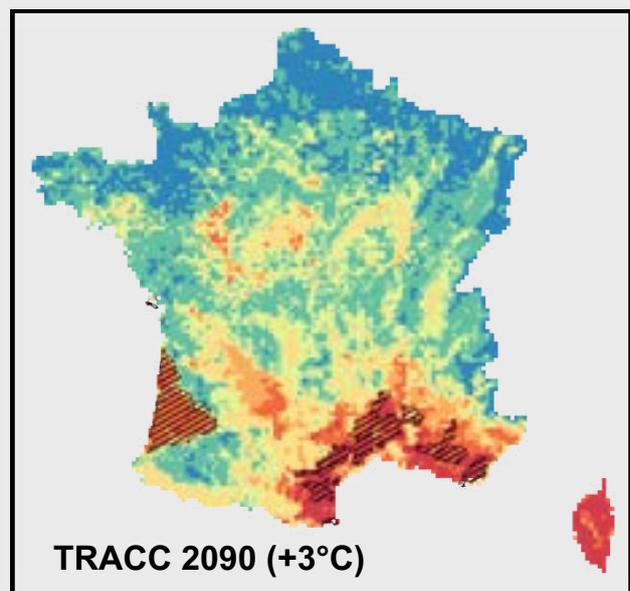
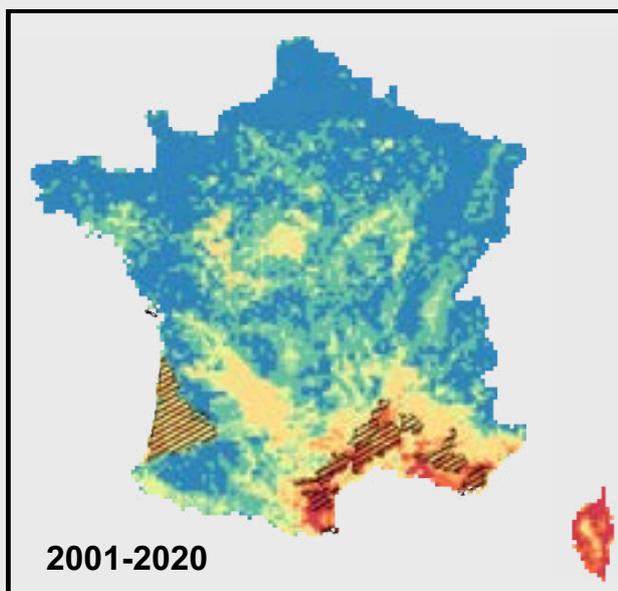
Régime de feu

Fréquent <15 ans

Type de feu

Feu de surface - Intensité moyenne

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Pin parasol

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

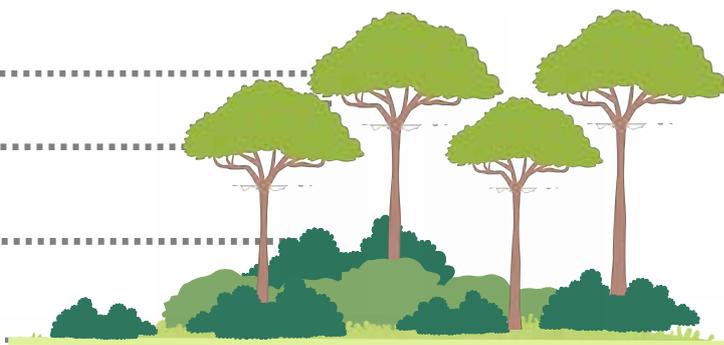
■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Couvert moyennement clair

Faible continuité verticale

Sous-bois dense et combustible



Test d'inflammabilité

Houppier
Inflammabilité
moyenne

Cônes épais,
non sérotineux

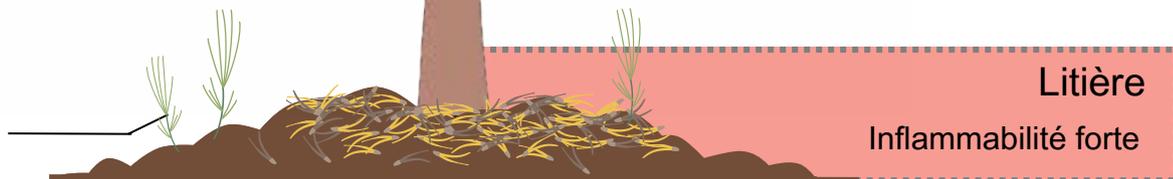
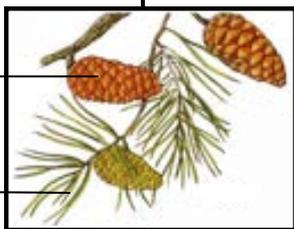
Aiguilles fines et
longues

Fort auto-élagage

Écorce épaisse

Aucune capacité
de rejet

Régénération par
graine possible
mais incertaine



Litière
Inflammabilité forte

Pin(s) noir(s)

Pinus nigra

subsp. laricio et *subsp. salzmannii*



Littérature



Les pins noirs sont caractérisés par une architecture qui limite l'exposition aux flammes. Cette essence est décrite comme "évitante", avec une croissance rapide, un auto-élagage vigoureux associé à un houppier haut, les mettant rapidement hors de portée des flammes. Bien qu'ils soient résistants aux feux de surface grâce à une écorce épaisse, les pins noirs restent sensibles aux feux de cime, leur mortalité pouvant être 3 fois supérieure à celle du pin maritime pour tous les âges considérés. La litière est plus combustible que celle du pin d'Alep. Les aiguilles fines et flexueuses constituent une litière aérée et hautement inflammable, et augmentent le risque d'embrasement du feuillage. Même si ils ne sont pas sérotineux, les cônes des pins noirs sont plutôt épais. La capacité de germination des graines est notable, bien que faible. La germination est assez lente et il met du temps à s'installer.

Note : peu d'information sont disponibles sur le Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra subsp. nigra*), sa litière serait également très aérée et combustible



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Expert



Les experts s'accordent pour dire que les pins noirs présentent une combustibilité relativement élevée. En ce qui concerne leur résilience et leur résistance, les avis sont partagés, bien que la tendance générale les situe à un niveau moyen.

Le feu de Vizzavona en 2000 a montré que les peuplements adultes gérés ont une bonne résistance à l'incendie. Mais en 2017 à Ghisoni les pins laricio ont eu tendance à générer des sautes de feu.

Régime de feu

Fréquent <15 ans

Type de feu

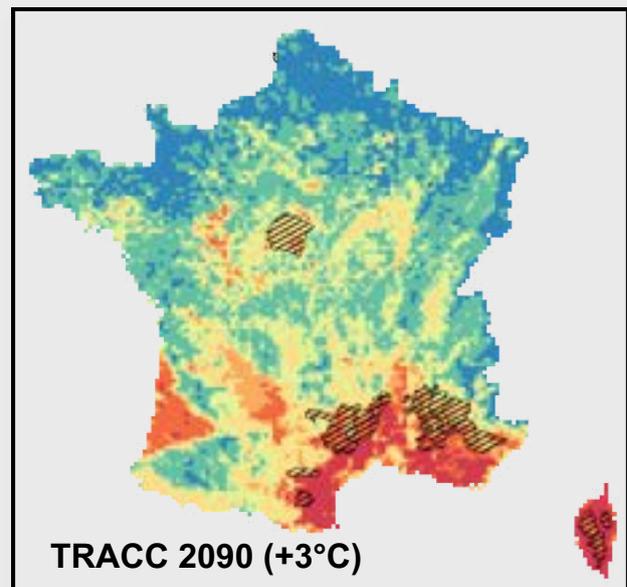
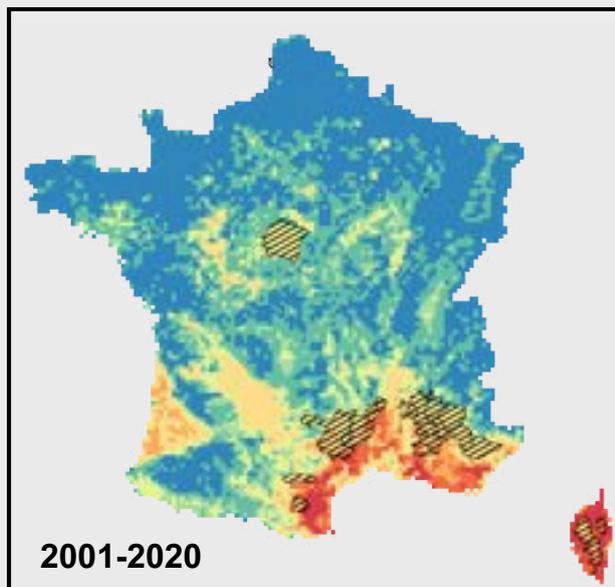
Feu de cime - Intensité forte

Évènements de feu connus

Vizzavona (2B), été 2000
4890 ha parcourus.

Ghisoni (2B), automne
2017, 550 ha parcourus.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques des Pins noirs

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

NA



Test d'inflammabilité

Bourgeons épais
et écailleux

Aiguilles fines,
longues et
courbées

Cônes épais,
non sérotineux

Fort auto-élagage

Écorce épaisse

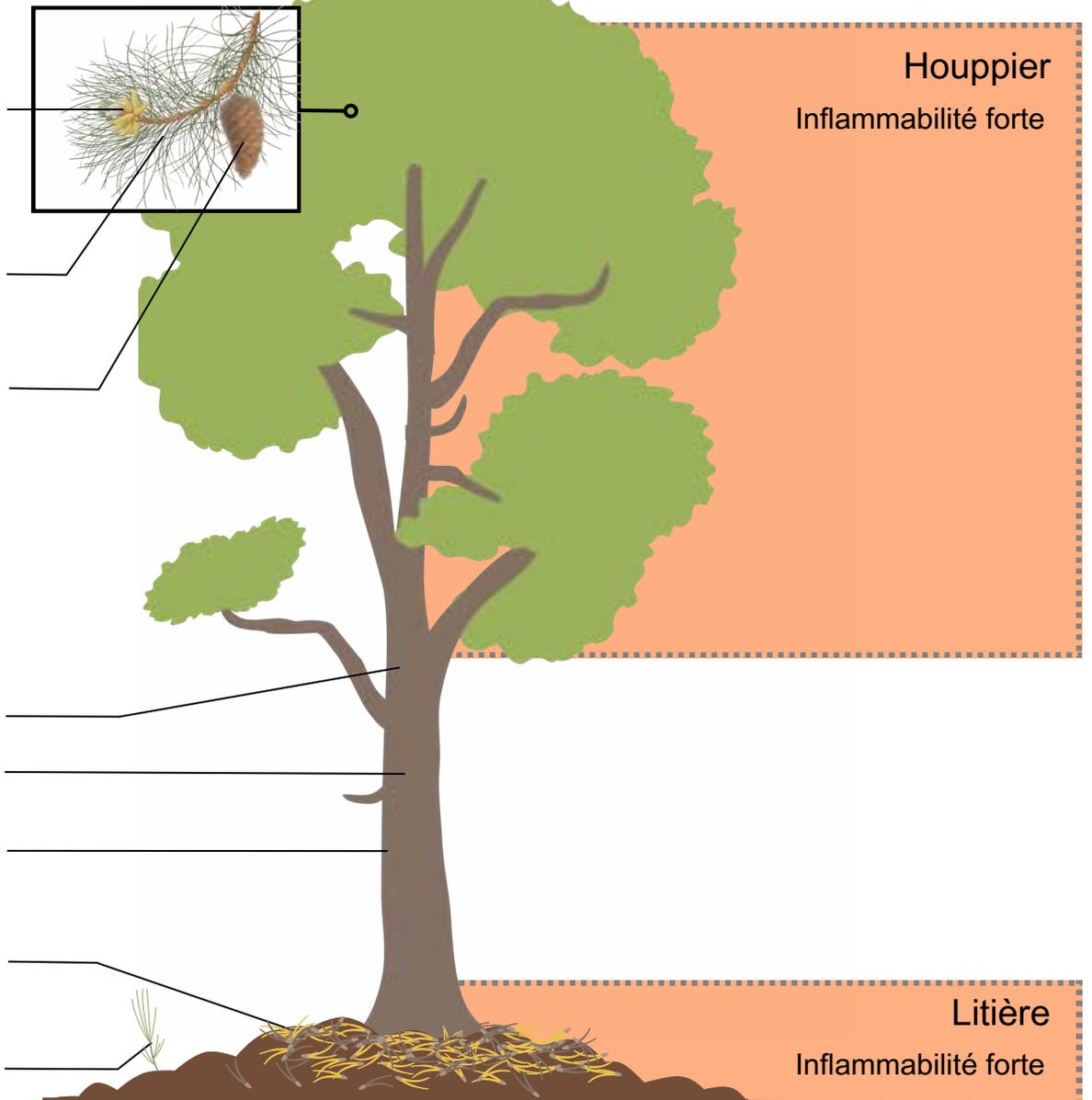
Aucune capacité
de rejet

Litière aérée

Germination post-
feu possible

Houppier
Inflammabilité forte

Litière
Inflammabilité forte



Pin maritime

Pinus pinaster



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



Le pin maritime montre des caractéristiques mixtes en termes de réponse au feu, entre le type « pyrophyte » et « évitant ». Bien que son auto-élagage soit de type intermédiaire, il demeure assez combustible. Ses aiguilles, plus épaisses que celles du pin d'Alep et du pin pignon, ont une inflammabilité moyenne. Mais sa litière n'en est pas moins inflammable. En effet, ces pins ont une litière aérée, très profonde ; son couvert clairsemé favorise son assèchement en laissant passer la lumière et le vent. La litière du pin maritime est plus combustible que celle du pin d'Alep. Sa production de cônes sérotineux varie considérablement selon les peuplements, allant de 2 à 82%, mais sa capacité de régénération post-incendie par germination reste assez importante. Le pin maritime peut survivre à un haut niveau de défoliation, grâce aux écailles qui protègent ses bourgeons du feu. Il est également résistant aux feux de surface grâce à son écorce épaisse.

Expert



Les experts considèrent unanimement le pin maritime comme très combustible. En revanche, les avis sont plus divergents concernant sa résilience, bien qu'elle soit généralement évaluée comme moyenne à haute. Quant à sa résistance, elle est décrite comme moyenne.

Régime de feu

Fréquent <15 ans

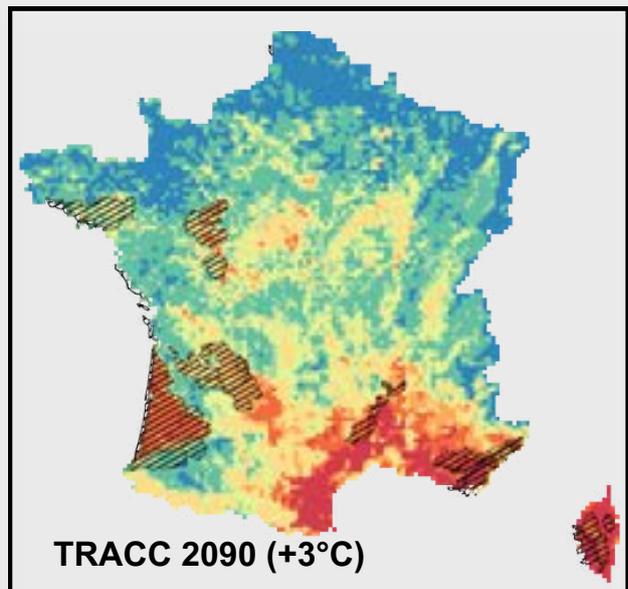
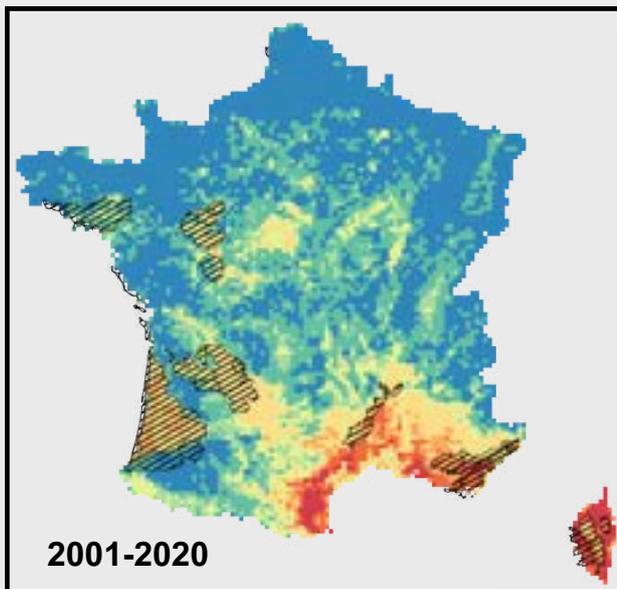
Type de feu

Feu de cime - Intensité moyenne

Évènement de feu connu

Gironde (33), été 2022, 30 000 ha

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



Répartition de l'essence (2020)



Caractéristiques du Pin maritime

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Couvert clairsemé

Continuité verticale moyenne

Sous-étage constitué de fougères, particulièrement sensibles quand elles sèchent (hiver et été).



Test d'inflammabilité

Bourgeons épais et écailleux

Aiguilles fines, longues et courbées

Cônes partiellement sérotineux

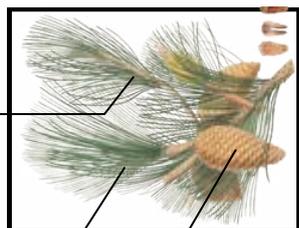
Taux d'élagage naturel moyen

Écorce épaisse

Aucune capacité de rejet

Litière épaisse, aérée

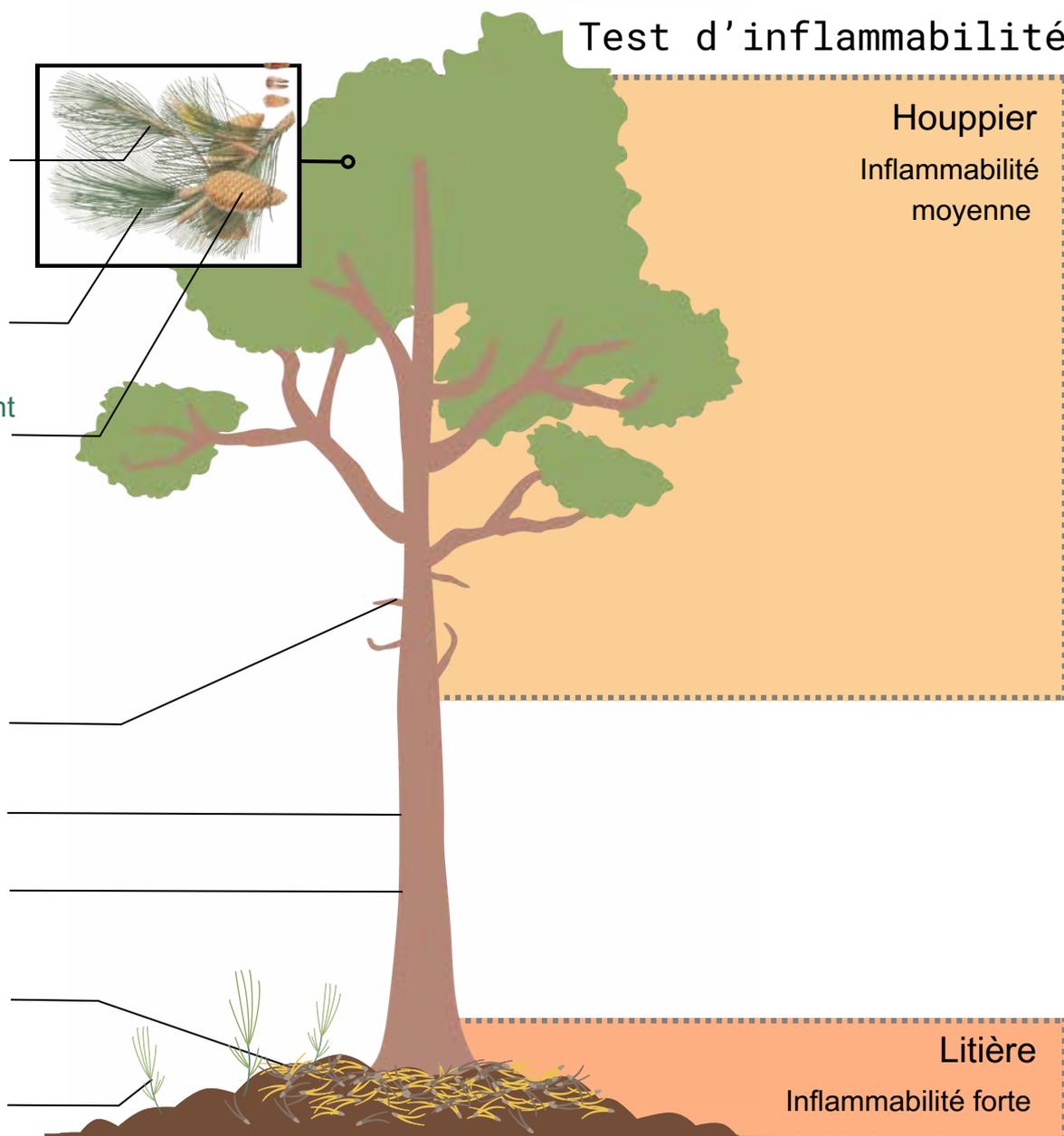
Fort taux de germination



Houppier
Inflammabilité moyenne

Litière

Inflammabilité forte



Pin sylvestre

Pinus sylvestris



Combustibilité*

A B C D E



Résistance*

A B C D E



Résilience*

A B C D E



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Littérature



Le pin sylvestre est caractérisé par une résistance modérée face aux incendies. Bien qu'il ne possède pas de cônes sérotineux, sa capacité de germination est notable, même si elle est très variable. Le pin sylvestre est moins inflammable que les autres pins, mais davantage que les autres conifères. Son houppier clairsemé permet à la lumière et au vent de pénétrer, asséchant ainsi la litière. De plus, ses aiguilles riches en terpènes et en résine, contribuent à l'embrasement de son feuillage et augmentent la combustibilité de la litière. L'auto-élagage du pin sylvestre n'est perceptible qu'après 60 ans, ce qui favorise l'accumulation de branches mortes et augmente les possibilités du passage du feu en cime.

Expert

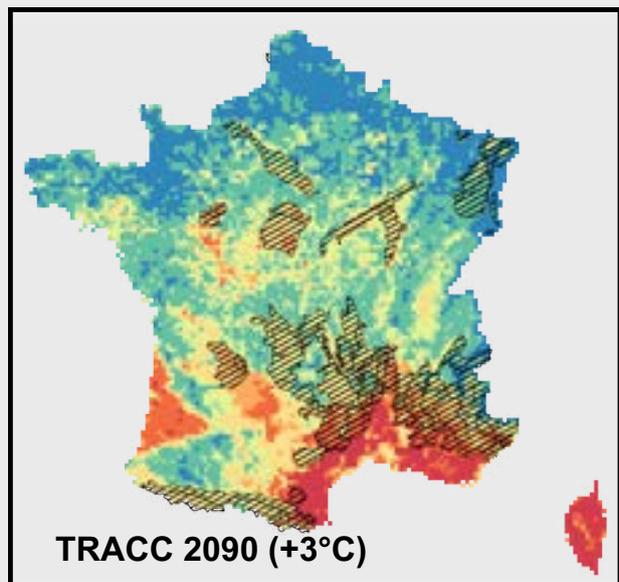
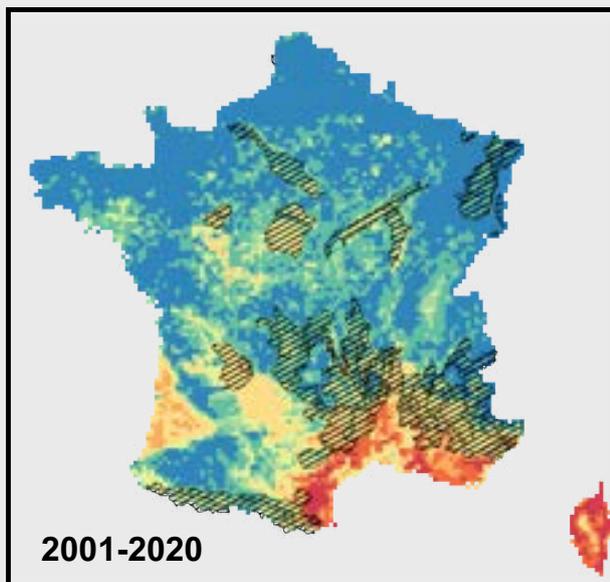


Souvent comparés aux pins noirs, les experts s'accordent en grande partie pour dire que le pin sylvestre est très combustible. Mais sa vulnérabilité dépend notamment du milieu dans lequel il se trouve, car c'est une espèce dotée d'une grande plasticité : les pins sylvestre n'ont pas la même allure en Méditerranée ou en montagne. Concernant sa résilience, les avis sont plus variés, mais elle est généralement notée comme moyenne. Sa résistance est également sujette à débat, bien que globalement jugée assez faible.

Type de feu

Feu de cime - Intensité moyenne

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Pin sylvestre

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

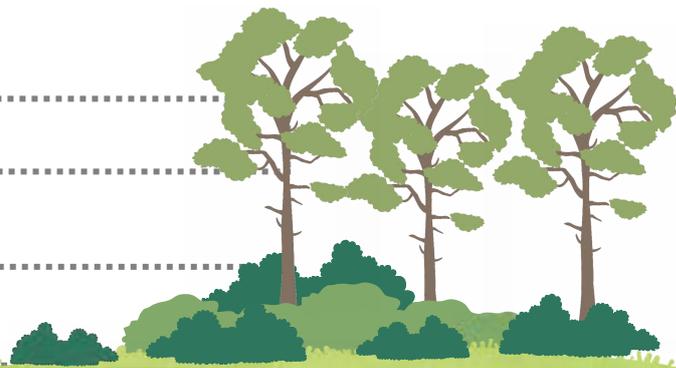
■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Couvert clair

Forte continuité verticale

Sous-bois dense et combustible



Test d'inflammabilité

Houppier
Inflammabilité forte

Aiguilles longues et fines, riche en résine

Cônes non sérotineux

Auto-élagage lent

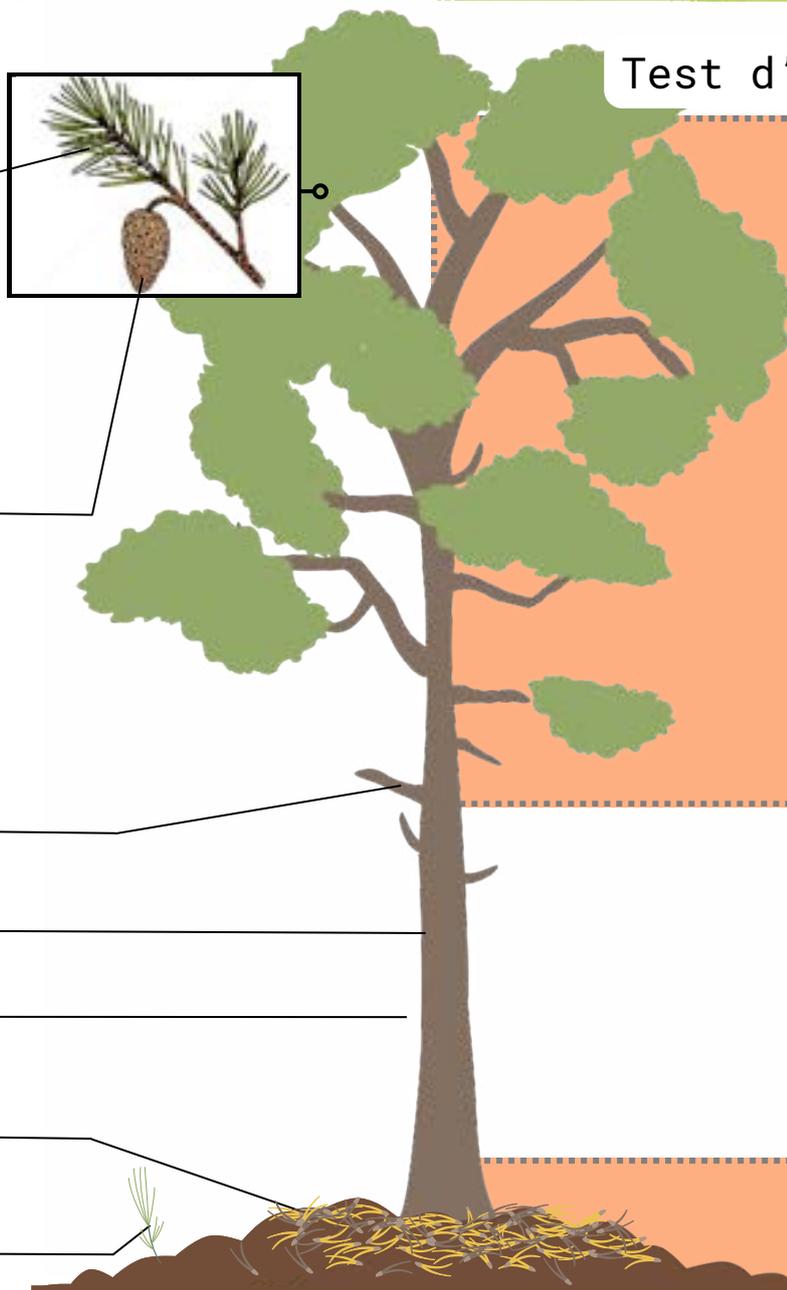
Écorce épaisse

Aucune capacité de rejet

Litière sèche et aérée

Germination post-feu possible

Litière
Inflammabilité forte



Douglas

Pseudotsuga menziesii



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



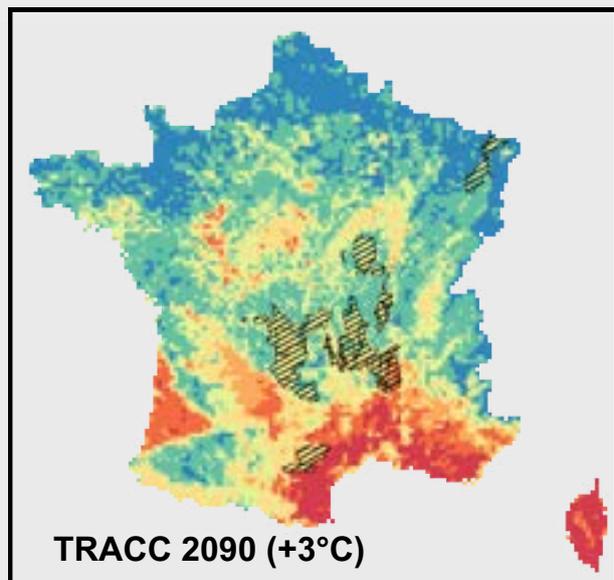
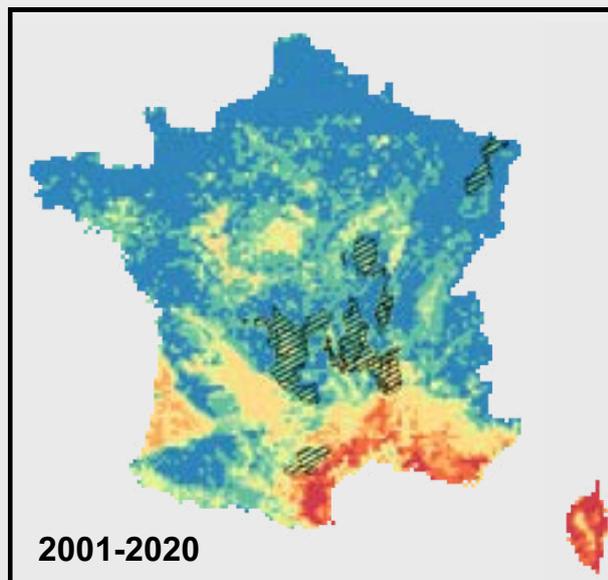
Le Douglas est considéré comme "évitant" le feu lorsqu'il est jeune, puis résistant à l'âge adulte. Bien que son auto-élagage soit lent, son écorce épaisse lui confère une grande tolérance aux brûlures. Même s'il ne produit pas de cônes sérotineux, ses cônes résistent bien à la chaleur, renforçant ainsi sa capacité de régénération post-feu par germination. La tolérance au feu du Douglas a cependant des limites, car il ne survit pas aux feux de forte intensité. Son feuillage est inflammable mais difficilement atteignable grâce à un houppier haut, lorsqu'il est adulte. Ses aiguilles courtes et épaisses rendent sa litière dense et peu inflammable. Une étude suggère même que sa présence pourrait atténuer l'inflammabilité de la litière d'un peuplement quand il y est introduit.

Expert



Peu d'experts ont donné leur avis sur le Douglas. Néanmoins, il a été comparé à l'épicéa. Sa combustibilité est assez faible, surtout en peuplement adulte. La recolonisation du milieu par le Douglas a été décrite comme très faible par les experts.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



▨ Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Douglas

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

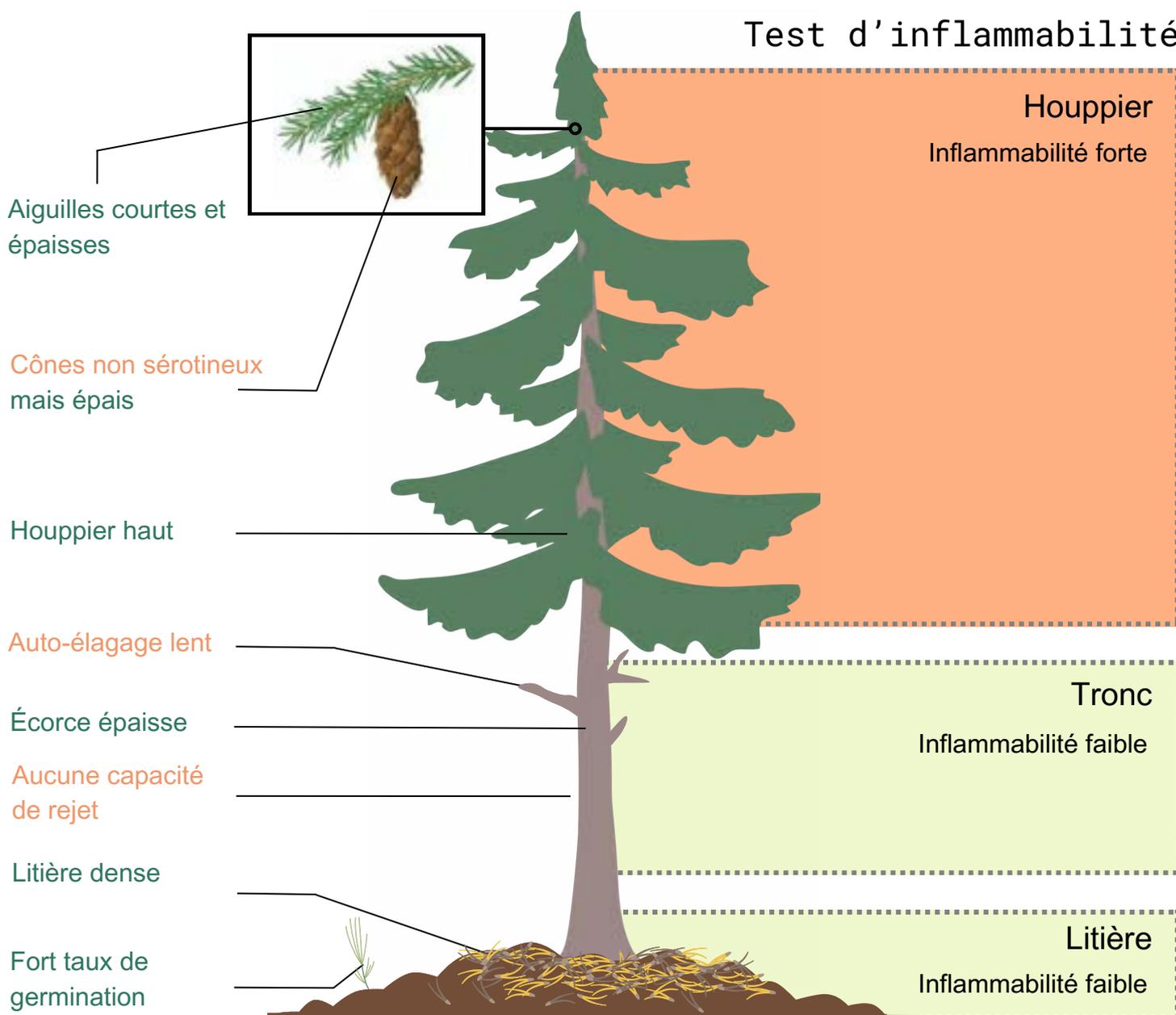
■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Combustibilité faible



Test d'inflammabilité



Caractéristiques du Sapin blanc

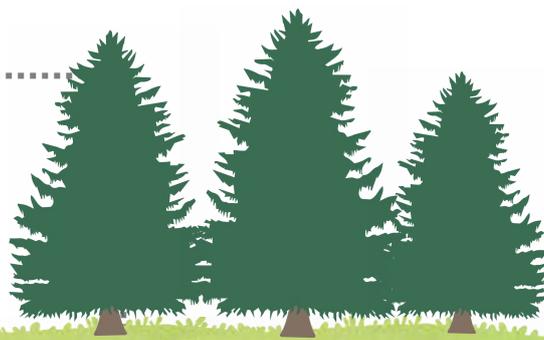
En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

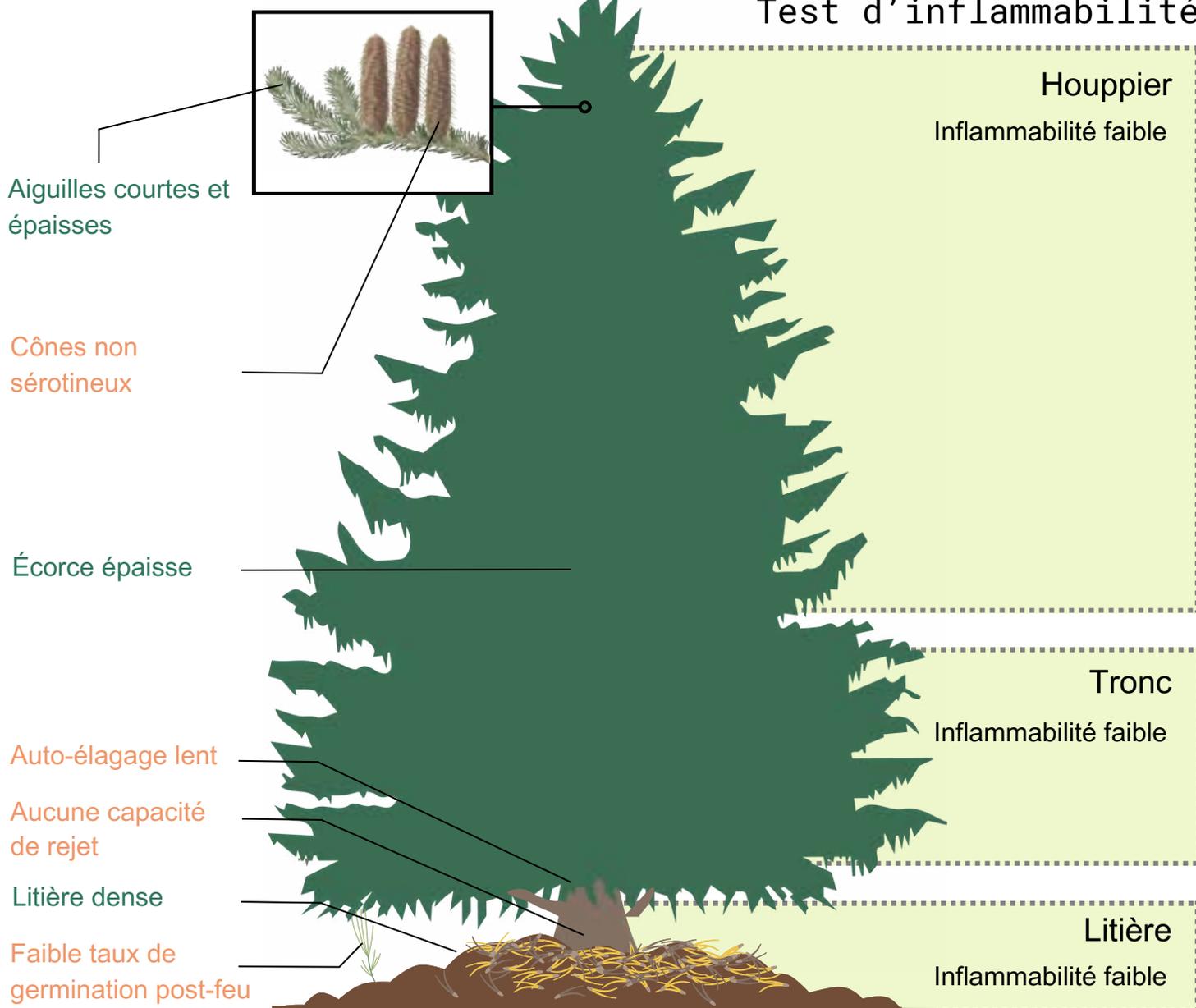
■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Combustibilité faible



Test d'inflammabilité



Sapin blanc

Abies alba



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



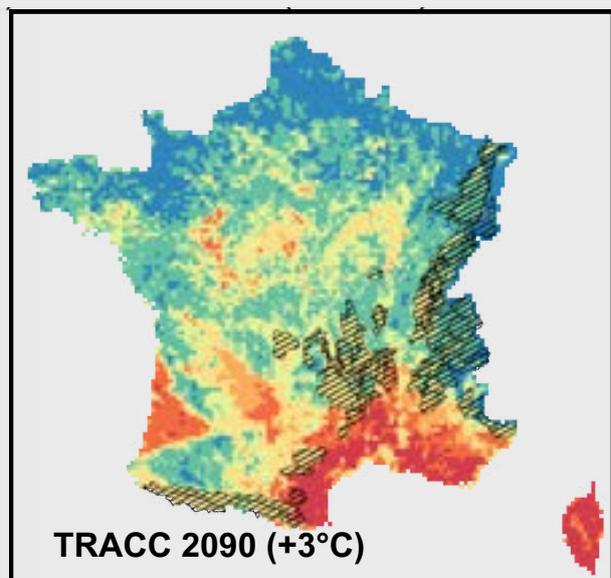
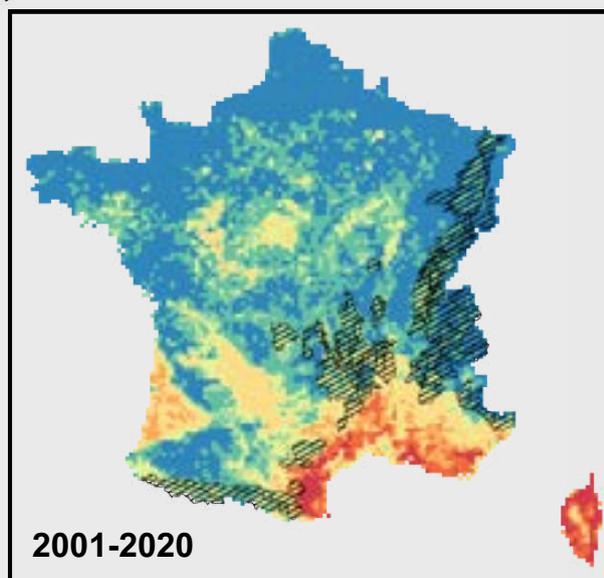
Le sapin blanc présente une faible combustibilité. Il est reconnu comme un "pare-feu" naturel lorsqu'il forme des peuplements purs. Malgré un auto-élagage lent qui favorise la rétention de bois mort, son écorce et son houppier sont peu inflammables. Ses aiguilles courtes et épaisses rendent sa litière compacte et limitent la circulation de l'air, réduisant la propagation du feu de surface. Cependant, le sapin blanc est très sensible en raison de son écorce fine. De plus, il ne produit pas de cônes sérotineux et ses capacités de germination après un feu sont faibles, ce qui diminue considérablement sa résilience. Les informations sur son éventuelle capacité à produire des rejets après un feu sont contradictoires.

Expert



Quelques experts ont fourni des informations sur le sapin blanc. Ils s'accordent à dire qu'il est peu combustible et très peu résilient. Sa résistance quant à elle, bien que jugée faible à cause de son écorce fine, peut s'améliorer lorsqu'il est en futaie adulte.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Cèdre de l'Atlas

Cedrus atlantica



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



Le cèdre possède la litière la moins inflammable de tous les conifères. Ses aiguilles courtes et épaisses rendent la litière très compacte, réduisant ainsi son inflammabilité. Globalement peu combustible, la présence sporadique de cèdres ne parvient cependant pas à réduire la combustibilité d'un peuplement mixte. Le couvert d'une cèdraie est dense et sombre, ce qui limite le développement d'un sous-bois significatif. Son auto-élagage naturel contribue également à réduire la continuité verticale du combustible. Bien que sa germination post-feu soit possible, elle n'est pas suffisante pour assurer la régénération d'un peuplement. Mais le cèdre reste résistant aux feux de faible intensité.

Expert



Les avis divergent concernant le cèdre, avec des notes globalement moyennes, mais présentant de grands écarts. Il a néanmoins été décrit comme un arbre à houppier haut, avec un recouvrement élevé, une litière peu épaisse, une écorce fine et une capacité de germination post-feu possible, mais moyenne.

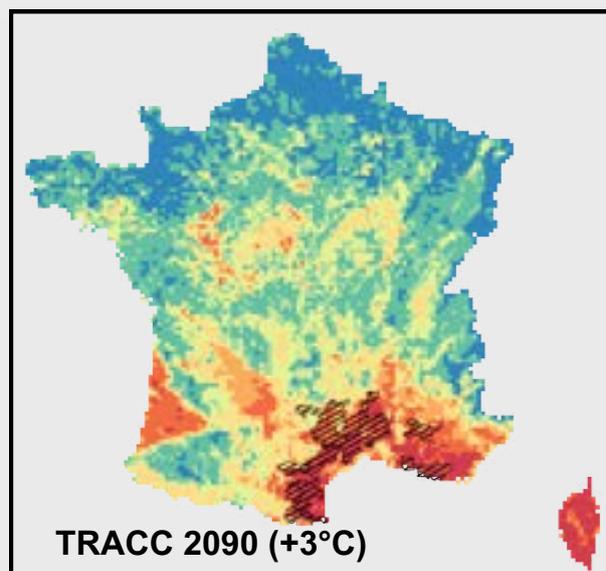
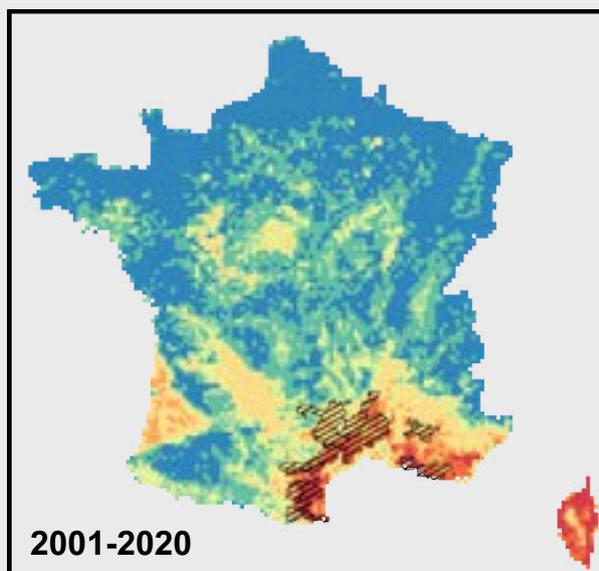
Régime de feu

Rare > 100 ans

Type de feu

Feu de surface - Intensité faible

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



Répartition de l'essence (2020)



Caractéristiques du Cèdre de l'Atlas

En lien avec sa vulnérabilité au feu

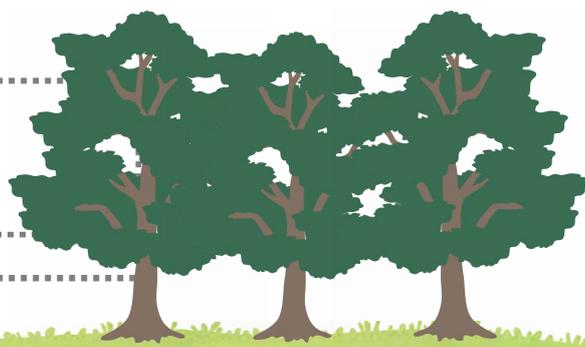
■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Couvert étalé, dense et sombre

Sous-bois limité



Test d'inflammabilité

Aiguilles courtes,
riches en eau

Cônes non
sérotineux

Écorce fine

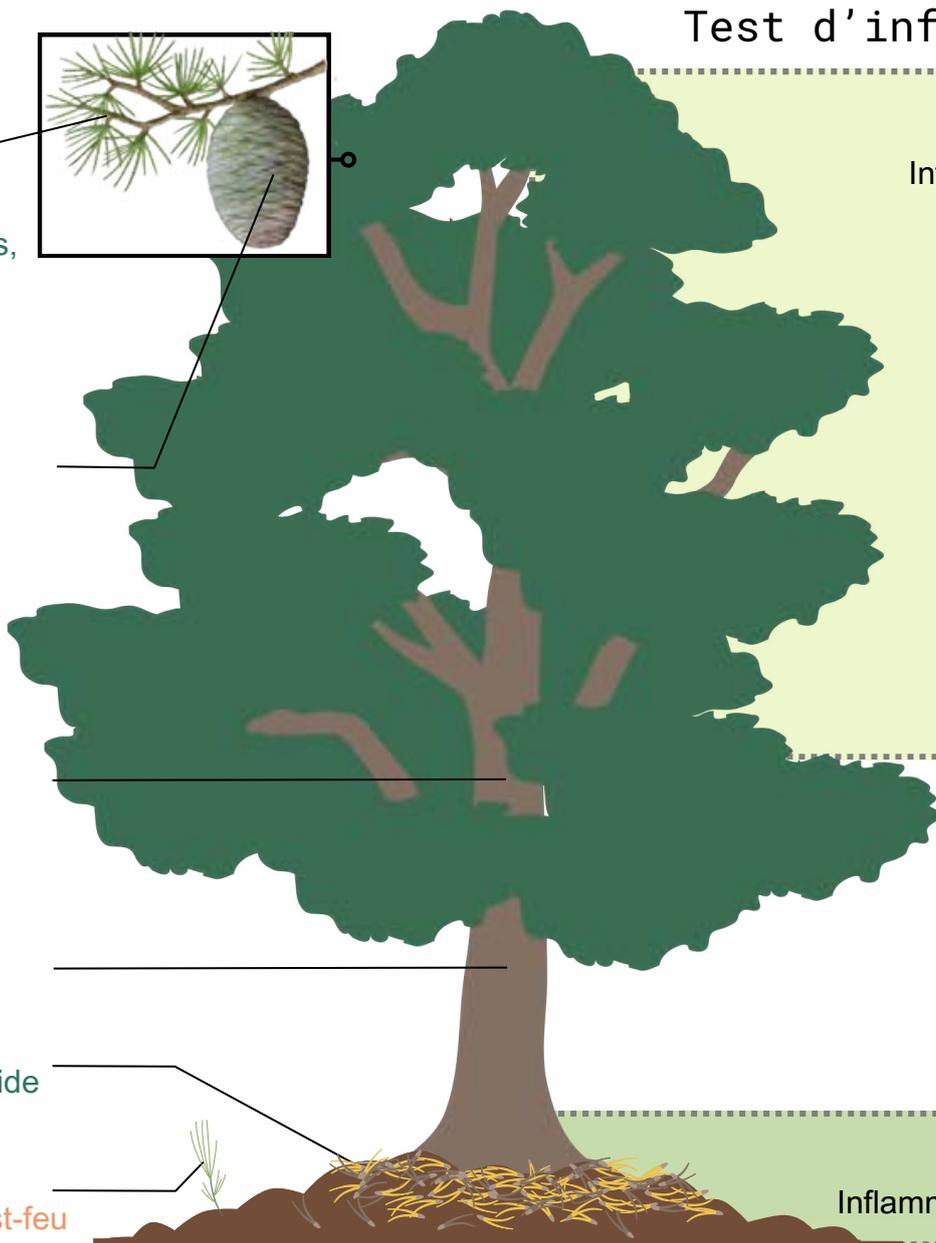
Auto-élagage

Litière dense,
compacte, humide

Faible taux de
germination post-feu

Houppier
Inflammabilité faible
des aiguilles

Litière
Inflammabilité très faible



Épicéa commun

Picea abies



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



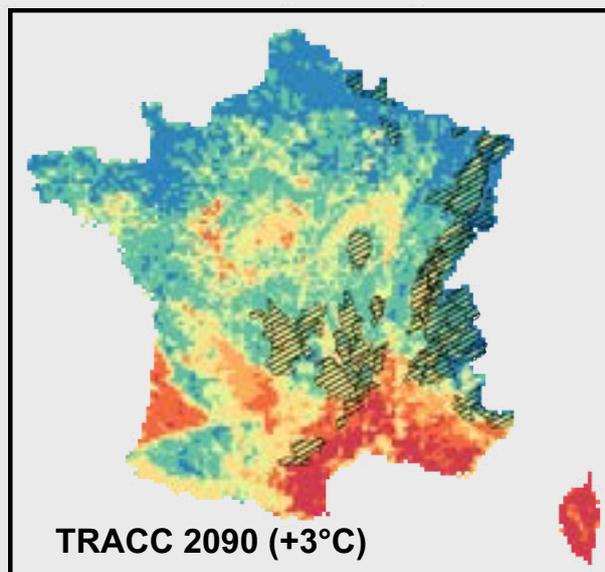
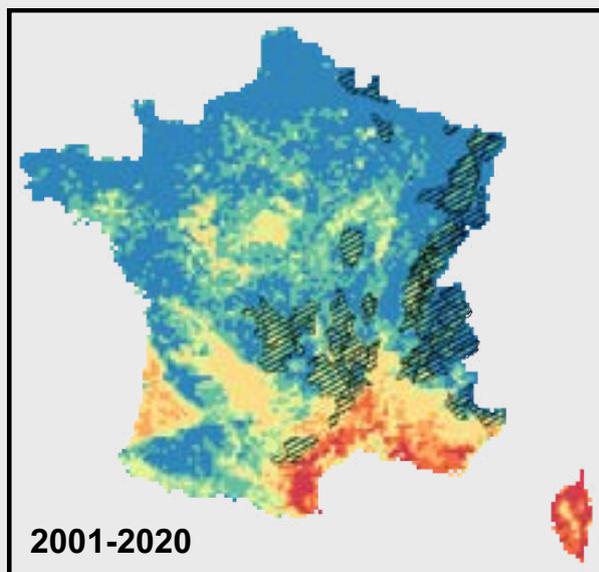
L'épicéa commun présente une combustibilité faible. Ses aiguilles sont courtes et épaisses, ce qui rend la litière dense et compacte, limitant ainsi son inflammabilité. Son écorce de faible à moyenne épaisseur le rend assez sensible, voire intolérant au feu. Peu de données concernent les capacités de germination post-feu. Les informations sur son éventuelle capacité à produire des rejets après un feu sont contradictoires.

Expert



Peu d'experts ont donné leur avis sur l'épicéa. Néanmoins, ils s'accordent avec la littérature pour dire que les peuplements d'épicéas sont peu combustibles, notamment du fait d'un sous-bois limité, surtout en futaie adulte. De même, l'écorce peu épaisse des épicéas les rend peu résistants. La résilience de cette essence n'a pas été discutée.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques de l'Épicéa commun

En lien avec sa vulnérabilité au feu

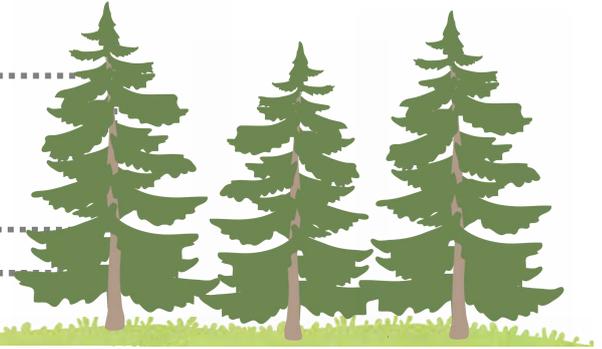
■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Couvert dense

Sous-bois limité



Test d'inflammabilité

Houppier
NA

Cônes non
sérotineux

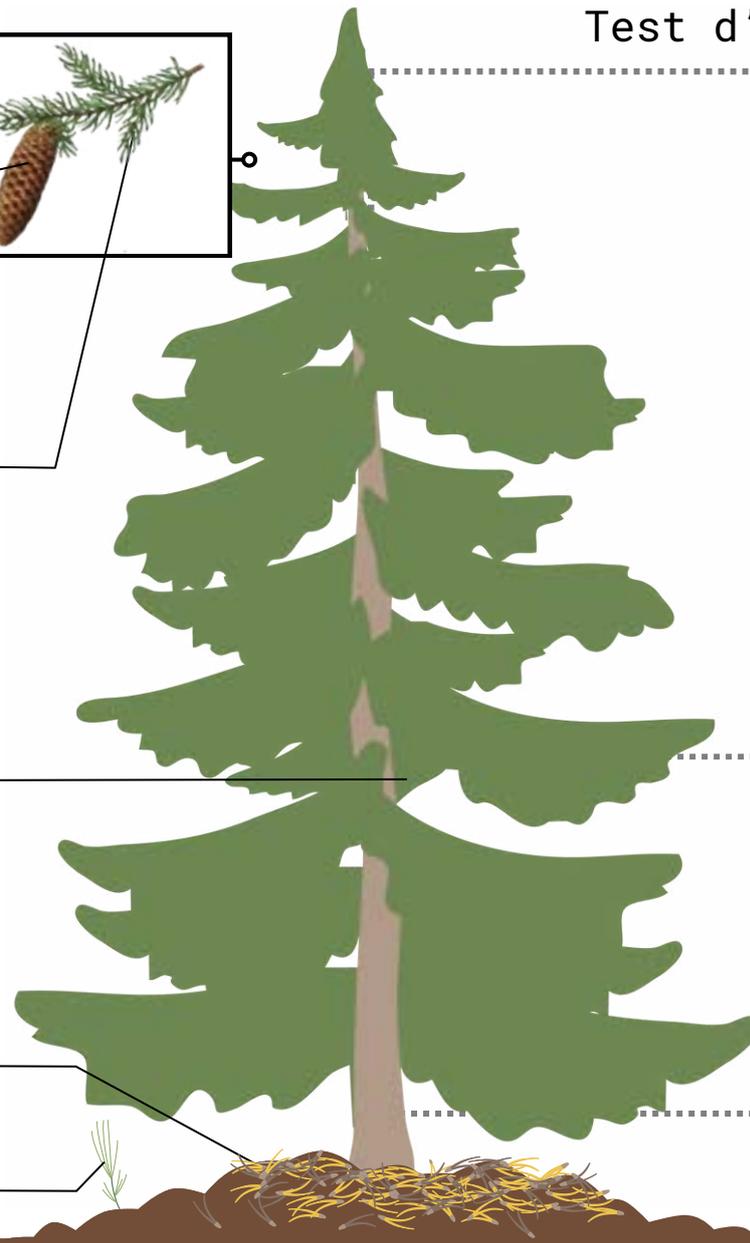
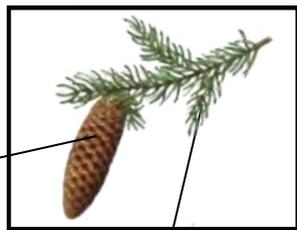
Aiguilles courtes
et épaisses

Écorce fine

Litière dense

Faible taux de
germination post-feu

Litière
NA



Sapin de Céphalonie

Abies Cephalonica



Combustibilité*

A B C D E



Résistance*

A B C D E



Résilience*

A B C D E



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Littérature



Le sapin de Céphalonie est assez sensible au feu. Son écorce fine et son incapacité à produire des rejets la rendent mal adaptée aux incendies. Sa combustibilité est modérée et son houppier volumineux permet également de limiter l'embroussaillage. Ses graines survivent rarement à l'incendie, mais elles peuvent germer dans des environnements très humides.

Expert



Peu d'experts ont fourni des informations sur le sapin de Céphalonie. Les deux experts qui se sont exprimés s'accordent pour dire que sa combustibilité et sa résistance sont dans la moyenne basse, tandis que sa résilience est faible. Il a été décrit comme possédant un houppier haut, une écorce fine, une litière peu épaisse, et étant incapable de germer après un feu.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence

Cette espèce étant peu ou non présente en France, aucune carte de répartition spécifique n'est disponible pour ce territoire.

Caractéristiques du Sapin de Céphalonie

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Couvert dense

Sous-bois limité



Test d'inflammabilité

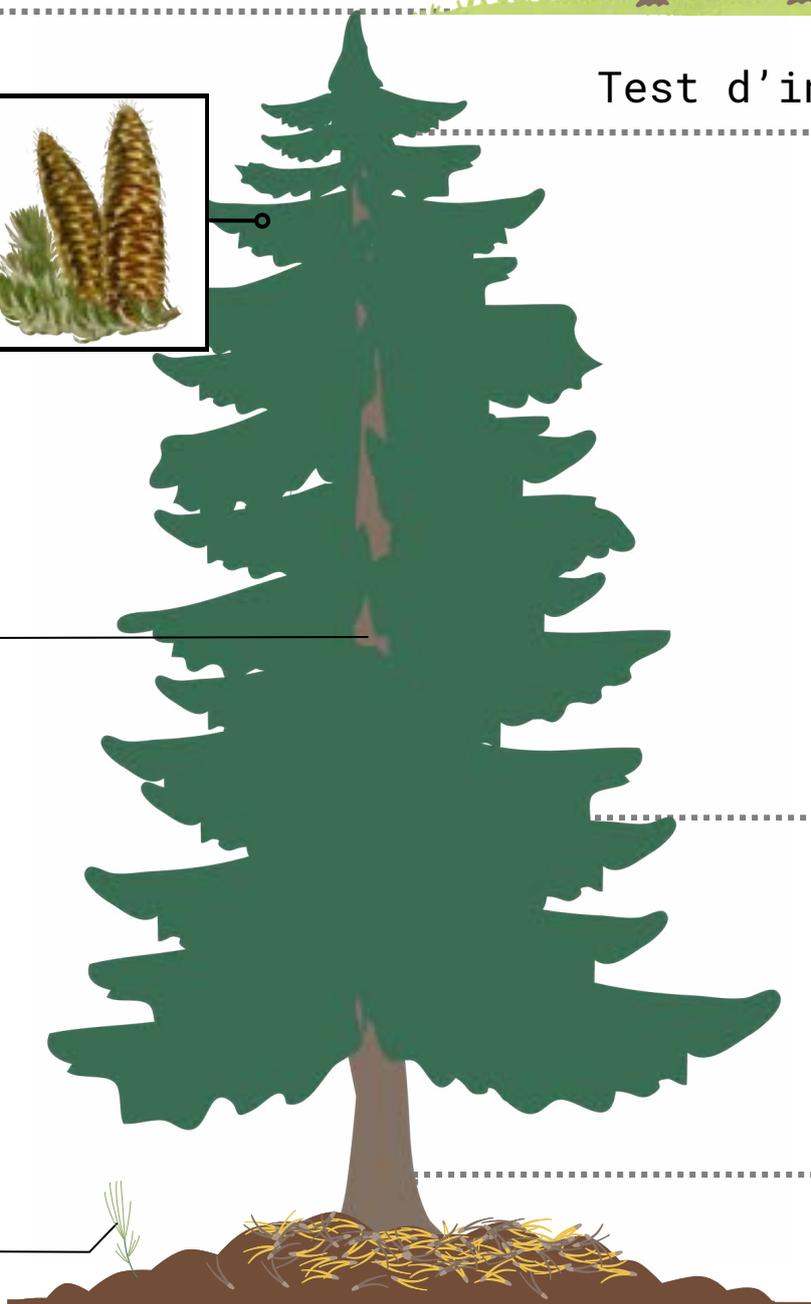
Houppier
NA

Cônes non
sérotineux



Écorce fine

Faible taux de
germination post-feu



Litière
NA

Mélèze d'Europe

Larix decidua



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



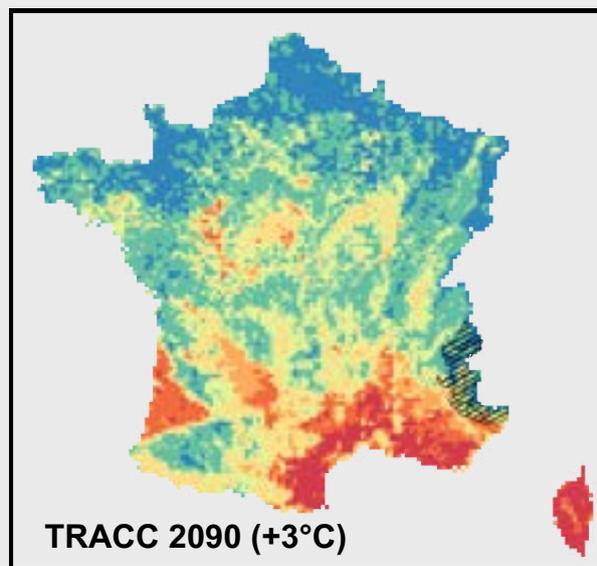
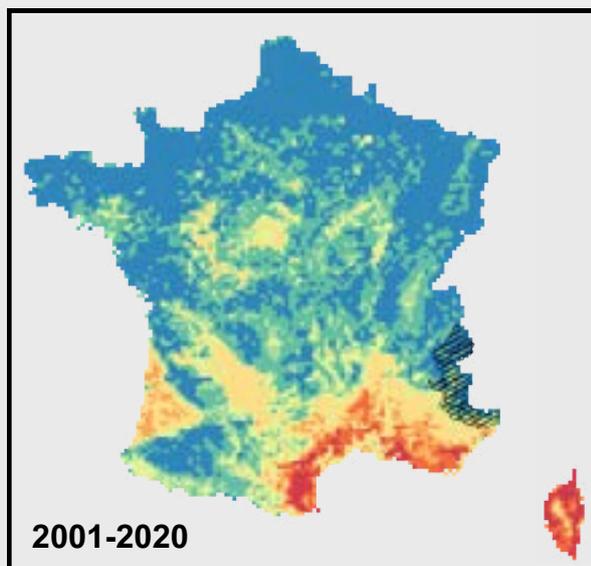
Le mélèze d'Europe est une essence pour laquelle les informations sont relativement limitées. Une source le décrit comme indifférent au feu, mais sans détailler le type de feu ou l'intensité subie. Son écorce épaisse protège son tronc. Son taux de germination post-incendie est élevé. C'est également le seul conifère de ce guide, avec le séquoia, à être capable de faire des rejets après un incendie.

Expert



Peu d'experts ont donné leur avis sur le mélèze. Néanmoins, il a été décrit comme peu combustible. En effet, les aiguilles particulièrement fines de cette essence se décomposent très vite, ce qui laisse peu de litière combustible. Cette essence est également souvent associée à du pâturage, le sous-bois y est alors limité. Il peut s'avérer assez résistant grâce à son écorce épaisse. De plus, les feux qui le touchent sont de faible intensité. Cependant, il est plus vulnérable en hiver.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques du Mélèze d'Europe

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

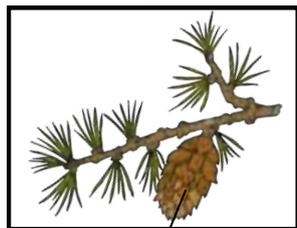
NA



Test d'inflammabilité

Houppier
NA

Cône non
sérotineux



Écorce épaisse

Rejet de souche

Fort taux de
germination

Litière
NA



Cyprès de Provence

Cupressus sempervirens



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*

A B C **D** E



Résistance*

A B C D **E**



Résilience*

A B **C** D E



Littérature



La vulnérabilité du cyprès au feu semble différer selon la variété. Son feuillage s'embrase difficilement. Cependant, il est important de préciser que les cyprès taillés en haie, en particulier la variété *pyramidalis*, sont hautement combustibles en raison de la densité de leur feuillage et de l'accumulation de matière morte (malgré la faible inflammabilité des aiguilles vertes et de la litière). En comparaison, la variété *horizontalis* présente une couronne plus clairsemée, ce qui limite l'accumulation de combustible fin et sec. Les composés chimiques libérés par les aiguilles de cyprès ont également un effet allélopathique sur le sol, empêchant l'installation d'un sous-étage végétal et réduisant ainsi la montée du feu vers la cime. Sa litière dense retient l'humidité et est peu inflammable. La résistance au feu des peuplements forestiers de cyprès reste peu documentée. Le cyprès produit des cônes sérotineux, dont l'ouverture peut être déclenchée par un feu, mais aussi par de fortes chaleurs en période de sécheresse. Peu d'études ont été réalisées sur sa régénération post-feu, mais sa production de cônes suggère qu'elle est relativement forte.

Expert



D'après les experts le cyprès est considéré comme très combustible et très peu résistant. La question de sa résilience est débattue, mais contrairement à la littérature les experts la considèrent comme plutôt faible.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence

Cette espèce étant peu ou non présente en France, aucune carte de répartition spécifique n'est disponible pour ce territoire.

Caractéristiques du Cyprès de Provence

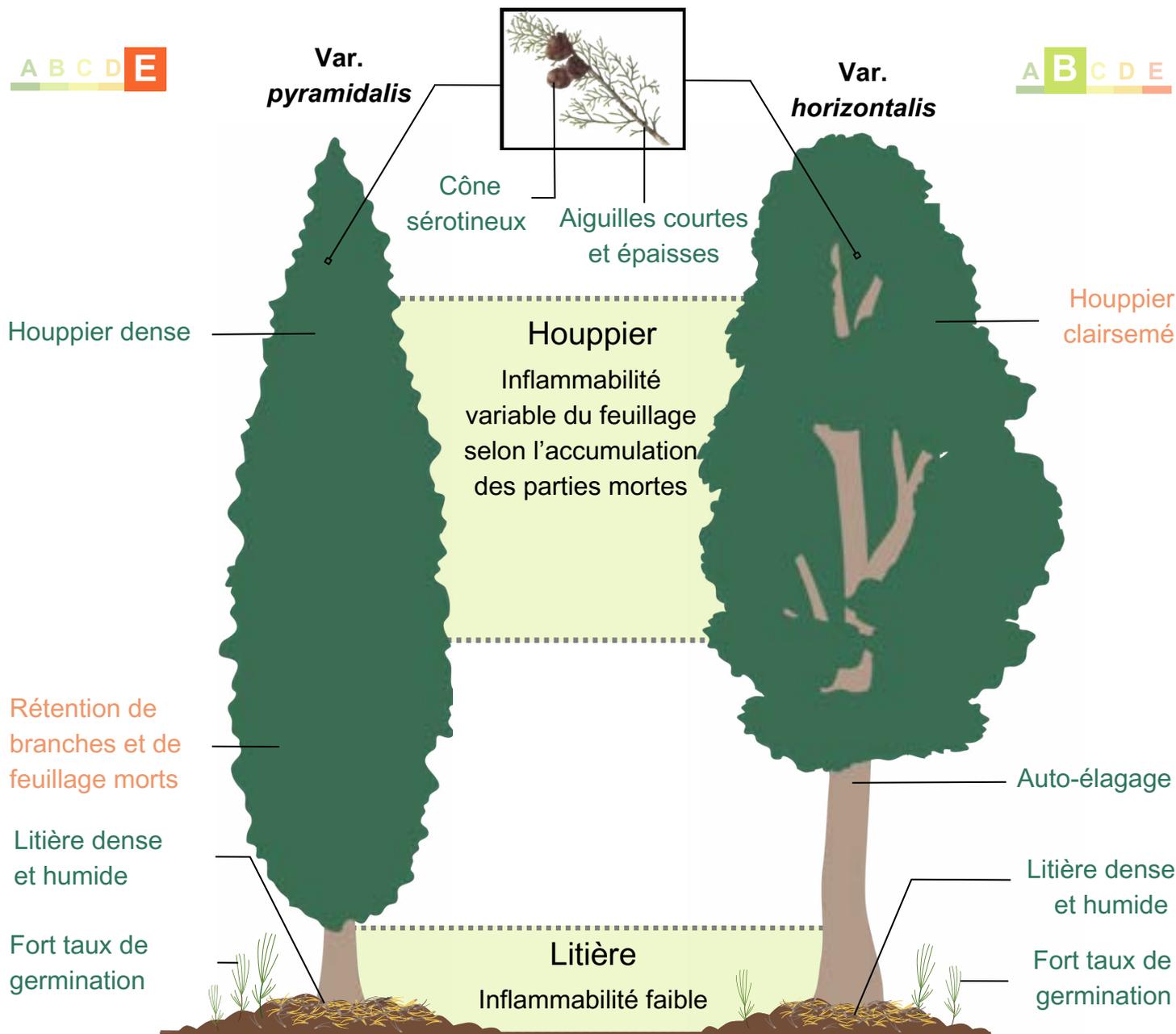
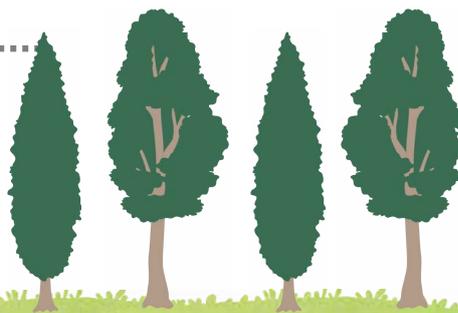
En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Absence de sous-bois grâce à l'effet
allélopathique des aiguilles



Autres espèces d'intérêt potentiel

Feuillus

118 - 123

Chêne des Canaries
Copalme d'Amérique
Érable sycomore

Conifères

124 - 127

Séquoia toujours vert
Calocèdre

Chêne des Canaries

Quercus canariensis



Combustibilité*

NA



Résistance*

NA



Résilience*

A B C D E



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Littérature



Le chêne des Canaries est une essence pour laquelle les informations disponibles sont limitées. Néanmoins, il est relevé qu'il ne peut pas germer après un feu, mais il présente une forte capacité de rejets.

Expert



Aucun expert n'a fourni d'avis concernant le chêne des Canaries.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence

Cette espèce étant peu ou non présente en France, aucune carte de répartition spécifique n'est disponible pour ce territoire.

Caractéristiques du Chêne des Canaries

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

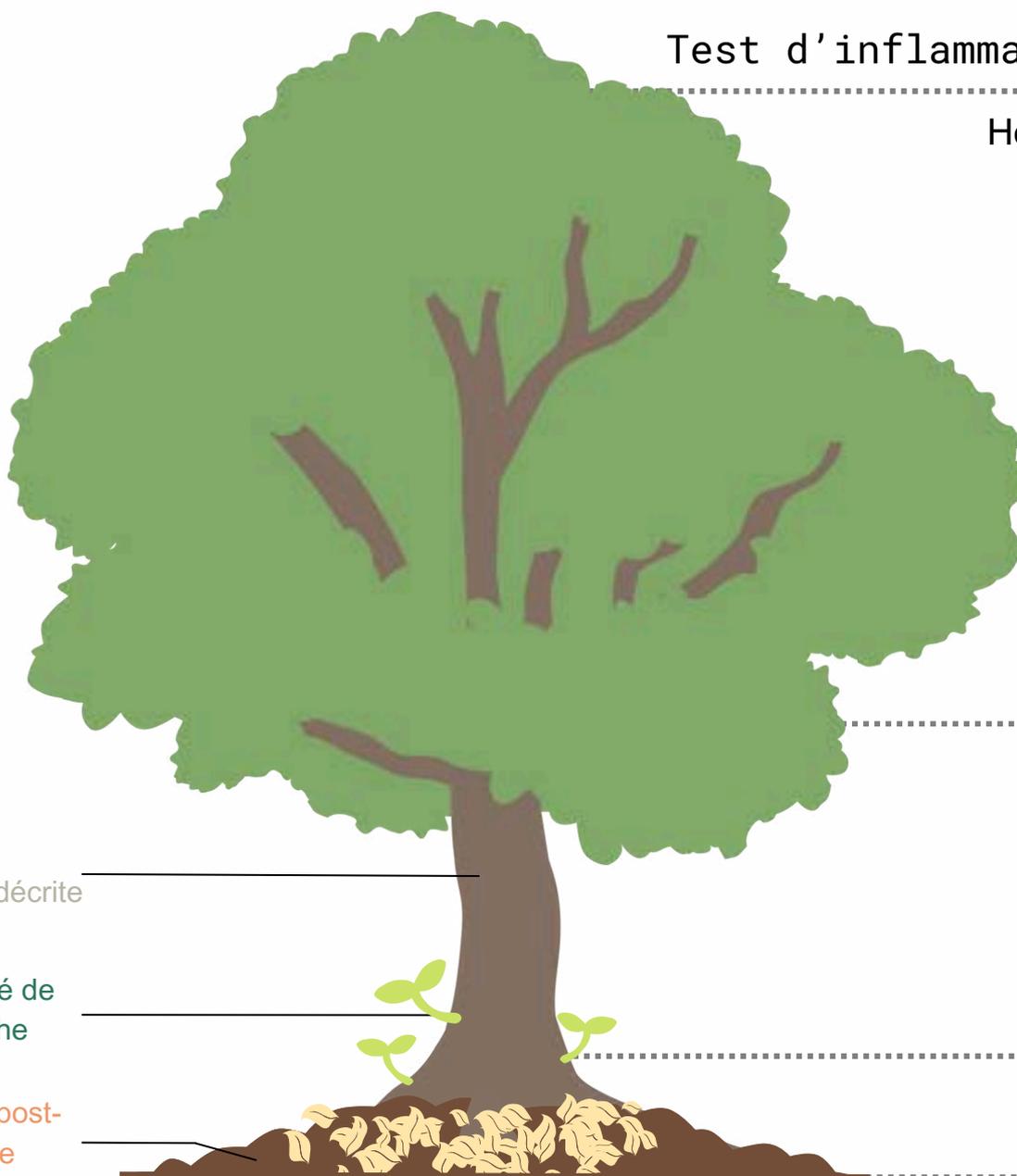
Combustibilité du peuplement

NA



Test d'inflammabilité

Houppier
NA



Épaisseur de
l'écorce non décrite

Forte capacité de
rejet de souche

Germination post-
feu impossible

Litière
NA

Copalme d'Amérique

Liquidambar styraciflua



Combustibilité*

NA



Résistance*

NA



Résilience*

NA



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Littérature



Le copalme d'Amérique est une essence pour laquelle les informations disponibles sont limitées. Néanmoins, des observations de spécimens présentant des cicatrices de brûlure suggèrent qu'ils sont capables de survivre au feu, malgré une écorce fine. De plus, cette espèce peut produire des rejets de souche et épïcormiques, ce qui pourrait traduire une capacité à se rétablir rapidement et à retrouver un houppier fonctionnel après un incendie.

Expert



Aucun expert n'a fourni d'avis concernant le copalme d'Amérique.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence

Cette espèce étant peu ou non présente en France, aucune carte de répartition spécifique n'est disponible pour ce territoire.

Caractéristiques du Copalme d'Amérique

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

NA



Test d'inflammabilité

Houppier
NA

Rejet épicornique



Écorce fine

Capacité de rejet
de souche



Taux de germination
post-feu inconnu



Litière
NA



Érable à feuille d'Obier

Acer opalus



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*

A B C D E



Résistance*

A B C D E



Résilience*

A B C D E



Littérature



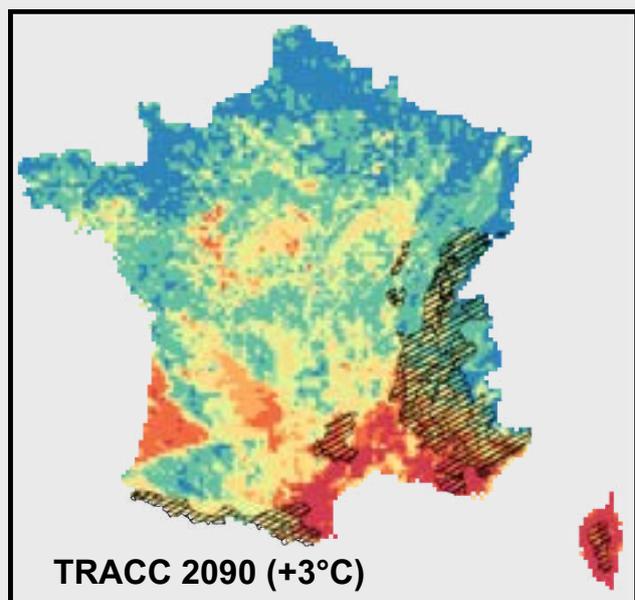
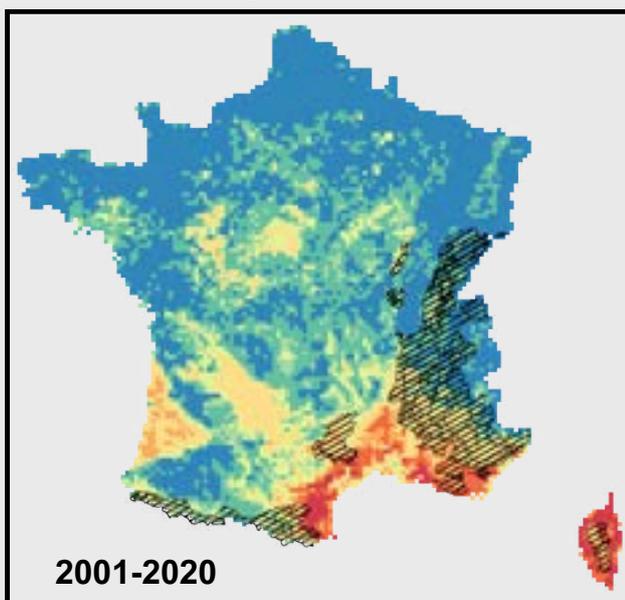
L'érable à feuille d'obier est une essence pour laquelle les informations disponibles sont limitées. Sa capacité à produire des rejets a été observée, mais aucune germination post-incendie n'a été notée. Des informations sont accessibles concernant d'autres espèces d'érables : par exemple, l'érable champêtre se révèle particulièrement sensible au feu, pouvant même entraîner une extinction locale après des incendies répétés. L'érable rouge et l'érable à sucre, deux espèces d'Amérique du Nord, montrent également une sensibilité au feu, mais sont capables de se régénérer et de recoloniser le milieu rapidement. Aucune information spécifique sur la combustibilité des érables n'a cependant été relevée.

Expert



Trop peu d'avis ont été recueillis concernant l'érable à feuilles d'obier pour en tirer des conclusions.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence



Nombre de feux >20 ha (sur 20 ans par pixel)



 Répartition de l'essence (2020)

Caractéristiques de l'Érable à feuilles d'obier

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

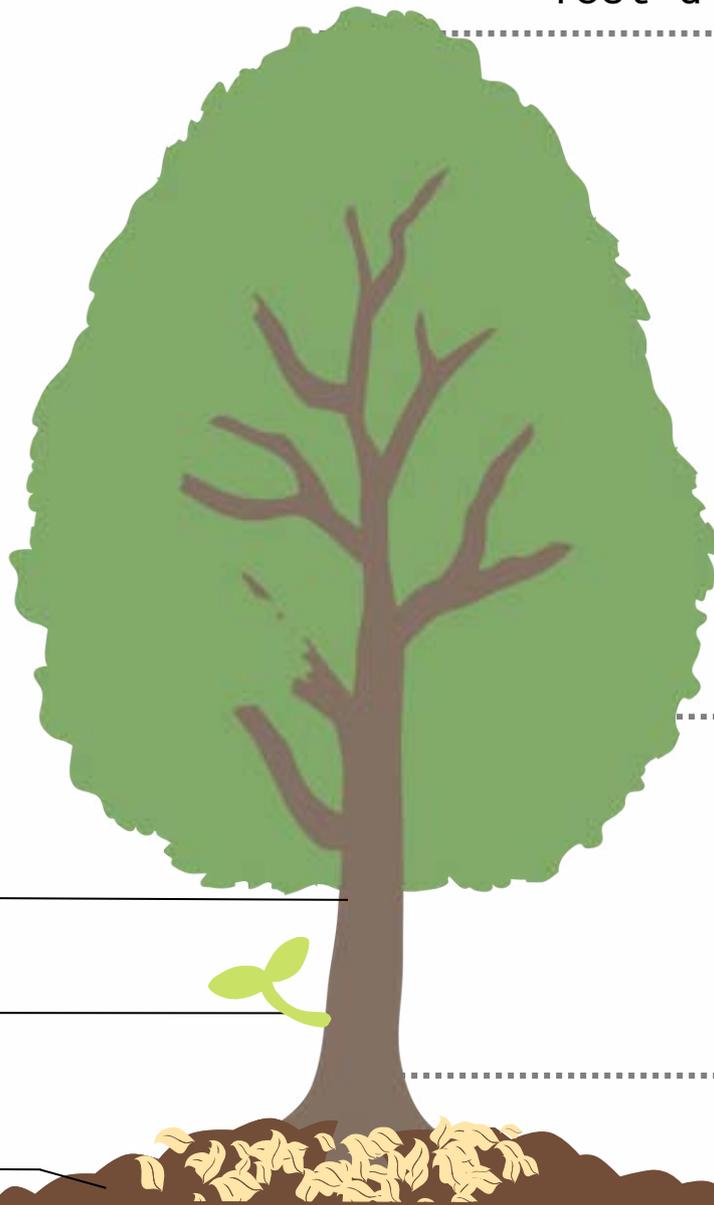
Combustibilité du peuplement

NA



Test d'inflammabilité

Houppier
NA



Épaisseur de
l'écorce non décrite

Capacité de rejet
de souche

Germination post-
feu impossible

Litière
NA

Séquoia toujours vert

Sequoia sempervirens



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Combustibilité*



Résistance*



Résilience*



Littérature



Le séquoia (*Sequoia sempervirens*) produit l'une des litières les plus inflammables parmi les conifères. Pourtant, cette essence est rarement concernée par des feux de grande intensité, qui se limitent généralement à des feux de surface. Il est à la fois résistant, grâce à son écorce épaisse et son houppier haut, et résilient, grâce à sa capacité à produire des rejets épïcormiques, même après un feu intense. Cependant, il n'est pas totalement à l'abri des dommages. Des peuplements de séquoias peuvent présenter des cicatrices importantes après des incendies, indiquant que ces arbres peuvent subir des impacts significatifs. Bien que la germination post-feu soit possible, elle reste toutefois très limitée.

Expert



Trop peu d'avis ont été recueillis concernant le séquoia pour en tirer des conclusions.

Régime de feu

Occasionnel > 100 ans

Évolution de l'exposition au feu de l'essence

Cette espèce étant peu ou non présente en France, aucune carte de répartition spécifique n'est disponible pour ce territoire.

Caractéristiques du Séquoia

En lien avec sa vulnérabilité au feu

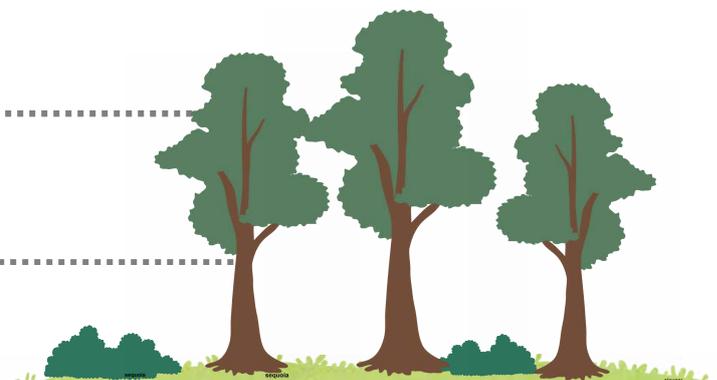
■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

Canopée haute

Faible continuité verticale



Test d'inflammabilité

Houppier
NA

Cône non
sérotineux

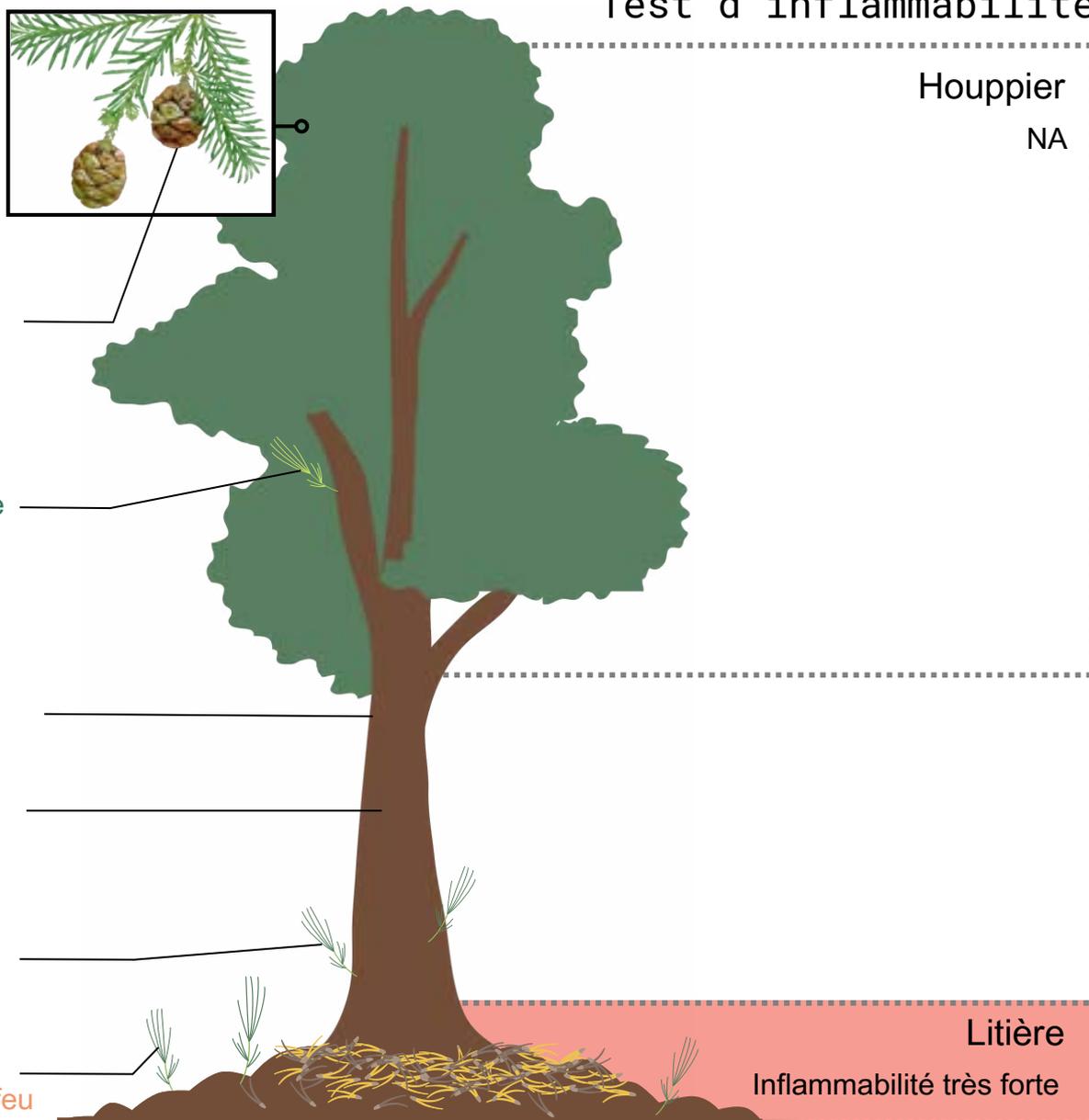
Rejet épïcormique

Écorce épaisse

Auto-élagage

Rejet de souche

Faible taux de
germination post-feu



Litière

Inflammabilité très forte

Calocède

Calocedrus decurrens



Combustibilité*

NA



Résistance*

A B C D E



Résilience*

A B C D E



* fondée sur les caractéristiques de l'essence indépendamment des autres facteurs (climat, structure...) (cf notice)

Littérature



Le calocède est une essence pour laquelle les informations sur la combustibilité sont limitées. La seule donnée concerne ses aiguilles qui sont décrites comme très inflammables. Il est considéré comme tolérant aux brûlures, avec une sensibilité intermédiaire au feu. Son écorce moyennement épaisse et son élagage naturel ne lui permettent néanmoins pas de résister à un feu intense. Il ne produit pas de rejet mais est néanmoins capable de germination après un incendie. La régénération par graine se fait grâce à des individus matures épargnés par le feu, les graines sont transportées par le vent et peuvent coloniser le milieu incendié. Le taux d'établissement des semis dans les peuplements incendiés diminue en fonction de la distance par rapport à la source de graines la plus proche. Le plus souvent, les semis ne survivent pas et sont remplacés rapidement par des espèces héliophiles plus compétitives.

Expert



Aucun expert n'a fourni d'avis concernant le calocède.

Évolution de l'exposition au feu de l'essence

Cette espèce étant peu ou non présente en France, aucune carte de répartition spécifique n'est disponible pour ce territoire.

Caractéristiques du Calocèdre

En lien avec sa vulnérabilité au feu

■ En faveur de sa survie

■ En défaveur de sa survie

Combustibilité du peuplement

NA



Test d'inflammabilité



Cône non
sérotineux

Houppier
Inflammabilité forte
des aiguilles

Écorce d'épaisseur
moyenne

Auto-élagage

Germination post-
feu possible

Litière
NA



BIBLIOGRAPHIE

- Agee, James K. 1993. « FIRE ECOLOGY OF PACIFIC NORTHWEST FORESTS ».
- Alexander, Martin, et Miguel Cruz. 2020. « Evaluating the 3-m tree crown spacing guideline for the prevention of crowning wildfires in lodgepole pine forests, Alberta ». *Forestry Chronicle* 96 (septembre):165-73. <https://doi.org/10.5558/tfc2020-021>.
- Allen, H.D. 2008. « Fire: Plant Functional Types and Patch Mosaic Burning in Fire-Prone Ecosystems ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 32 (4): 421-37. <https://doi.org/10.1177/0309133308096754>.
- Alvarez, Albert, Marc Gracia, et Javier Retana. 2012. « Fuel Types and Crown Fire Potential in Pinus Halepensis Forests ». *European Journal of Forest Research* 131 (2): 463-74. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0520-6>.
- Archibald, Sally, Gareth P. Hempson, et Caroline Lehmann. 2019. « A Unified Framework for Plant Life-History Strategies Shaped by Fire and Herbivory ». *New Phytologist* 224 (4): 1490-1503. <https://doi.org/10.1111/nph.15986>.
- Armenteras, Dolors, María Constanza Meza, Tania Marisol González, Immaculada Oliveras, Jennifer K. Balch, et Javier Retana. 2021. « Fire Threatens the Diversity and Structure of Tropical Gallery Forests ». *Ecosphere* 12 (1): e03347. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3347>.
- Bär, Andreas, Sean T. Michaletz, et Stefan Mayr. 2019. « Fire Effects on Tree Physiology ». *New Phytologist* 223 (4): 1728-41. <https://doi.org/10.1111/nph.15871>.
- Bär, Andreas, Dennis Marko Schröter, et Stefan Mayr. 2021. « When the Heat Is on: High Temperature Resistance of Buds from European Tree Species ». *Plant, Cell & Environment* 44 (8): 2593-2603. <https://doi.org/10.1111/pce.14097>.
- Barrows, J S. 1951. « Fire Behavior in Northern Rocky Mountain Forests ».
- Cane, D., C. Wastl, S. Barbarino, L. A. Renier, C. Schunk, et A. Menzel. 2013. « Projection of Fire Potential to Future Climate Scenarios in the Alpine Area: Some Methodological Considerations ». *Climatic Change* 119 (3): 733-46. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0775-7>.
- Castel Clavera, Jorge, François Pimont, Thomas Opitz, Julien Ruffault, Miguel Rivière, et Jean-luc Dupuy. 2022. « Disentangling the factors of spatio-temporal patterns of wildfire activity in south-eastern France ». *International Journal of Wildland Fire* 32 (décembre):15-28. <https://doi.org/10.1071/WF22086>.
- Castel-Clavera, Jorge, François Pimont, Thomas Opitz, Julien Ruffault, Renaud Barbero, Denis Alard, et Jean-Luc Dupuy. 2025. « A comparative analysis of fire-weather indices for enhanced fire activity prediction with probabilistic approaches ». *Agricultural and Forest Meteorology* 361 (février):110315. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110315>.
- Colin, Pierre-Yves, et Marielle Jappiot, éd. 2001. *Protection des forêts contre l'incendie: fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen*. Cahiers FAO conservation 36. Rome: FAO.
- Countryman, Clive M. 1972. « THE FIRE ENVIRONMENT CONCEPT ». In *THE FIRE ENVIRONMENT CONCEPT*. The Forest Service of the U.S. Department of Agriculture: PACIFIC SOUTHWEST Forest and Range Experiment Station.
- CRPF. 2022. « Diversification et reconstitution post incendie dans le massif des Landes de Gascogne ». *Revue de littérature scientifique et technique*.
- Cruz, Miguel G, et Martin E Alexander. 2014. « Canopy-Fuel Characteristics of Conifer Forests » 73 (4).
- Cruz, Miguel G., Martin E. Alexander, et Paulo M. Fernandes. 2022. « Evidence for Lack of a Fuel Effect on Forest and Shrubland Fire Rates of Spread under Elevated Fire Danger Conditions: Implications for Modelling and Management ». *International Journal of Wildland Fire* 31 (5): 471-79. <https://doi.org/10.1071/WF21171>.

- Curt, Thomas, Christelle Hély, Renaud Barbero, Jean-Luc Dupuy, Florent Mouillot, et Julien Ruffault. 2022. *Feux de végétation*. éditions Quae. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3506-3>.
- Da Silva, Jane Rodrigues, Diogo Da Silva Matos, Amanda Galdi Boaretto, Carlos Alexandre Carollo, Lincoln Carlos Silva De Oliveira, Edna Scremin-Dias, Geraldo Alves Damasceno Junior, et Rosani Do Carmo De Oliveira Arruda. 2021. « Fire Tolerance Strategies in Woody Species from Pantanal Riparian Forests Involve Phenolic Compounds and Structure of the Inner Bark ». *Flora* 281 (août):151865. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151865>.
- De Rigo, Daniele, Giorgio Liberta', Tracy Durrant, VIVANCOS Tomas Artes, et Jesus San-Miguel-Ayanz. 2018. « Forest Fire Danger Extremes in Europe under Climate Change: Variability and Uncertainty ». JRC Publications Repository. 18 janvier 2018. <https://doi.org/10.2760/13180>.
- Dirnböck, Thomas, Franz Essl, et Wolfgang Rabitsch. 2011. « Disproportional Risk for Habitat Loss of High-Altitude Endemic Species under Climate Change: HABITAT LOSS OF HIGH-ALTITUDE ENDEMICS ». *Global Change Biology* 17 (2): 990-96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02266.x>.
- Dreyfus, Philippe. 1990. « Produire pour protéger ou comment limiter le risque d'incendie dans les peuplements de Pin noir d'Autriche des Alpes sèches ». *Revue forestière française* 42 (S): 207-17. <https://doi.org/10.4267/2042/26139>.
- Duane, Andrea, Marc Castellnou, et Lluís Brotons. 2021. « Towards a Comprehensive Look at Global Drivers of Novel Extreme Wildfire Events ». *Climatic Change* 165 (3): 43. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03066-4>.
- Dupire, Sylvain, Thomas Curt, S. Bigot, et Thibaut Fréjaville. 2019. « Vulnerability of forest ecosystems to fire in the French Alps ». *European Journal of Forest Research* 138 (octobre). <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01206-1>.
- Dupuy, Jean-luc, Hélène Fargeon, Nicolas Martin-StPaul, François Pimont, Julien Ruffault, Mercedes Guijarro, Carmen Hernando, Javier Madrigal, et Paulo Fernandes. 2020. « Climate Change Impact on Future Wildfire Danger and Activity in Southern Europe: A Review ». *Annals of Forest Science* 77 (2): 1-24. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5>.
- Durand, Jean Maurice, Vincent Piveteau, Philippe Cannard, Christophe Leuret, et Frédéric Mortier. 2023. « Rapport – Tome 2 « S'adapter au changement d'ère : apprendre à vivre avec le feu pour les moyen et long termes » ». n° 22032-R2. Politique de prévention et de lutte contre l'incendie de forêt dans un contexte d'extension et d'intensification du risque dû au changement climatique. Inspection générale de l'environnement et du développement.
- Elvira Martín, Luis Miguel. 1989. « Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque ». Monografías INIA 68. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- Ewald, Michael, Pia Labenski, Erik Westphal, Elke Metzsch-Zilligen, Michael Großhauser, et Fabian Ewald Fassnacht. 2023. « Leaf litter combustion properties of Central European tree species ». *Forestry: An International Journal of Forest Research*, mai, cpad026. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad026>.
- Fernandes, Patrícia, Cristina Antunes, Pedro Pinho, Cristina Máguas, et Otilia Correia. 2016. « Natural Regeneration of Pinus Pinaster and Eucalyptus Globulus from Plantation into Adjacent Natural Habitats ». *Forest Ecology and Management* 378 (octobre):91-102. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.027>.
- Ferrand, Djamel, et Nicolas Comes. 2021. « Feux de forêts et d'espaces naturels ». GUIDE DE DOCTRINE OPÉRATIONNELLE.
- Fitzgerald, Stephen, et Max Bennett. 2013. « A Land Manager's Guide for Creating Fire-Resistant Forests ».
- Flannigan, Mike, B. Stocks, Turetsky, et Mike Wotton. 2009. « Impact of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest ». *Global Change Biology* 15 (janvier):549-60. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>.

- Ganteaume, A., M. Jappiot, et C. Lampin. 2012. « Assessing the flammability of surface fuels beneath ornamental vegetation in wildland-urban interfaces in Provence (South-Eastern France). » *International Journal of Wildland Fire* 22 (3): 333-42. <https://doi.org/10.1071/WF12006>.
- Ganteaume, Anne. 2020. *Le jardin exemplaire: guide technique comment aménager son jardin pour réduire la vulnérabilité de sa maison face aux incendies de forêt*. Aix-en-Provence [Avignon]: INRAE Cardère éditeur.
- Ghodrat, Maryam, Farshad Shakeriaski, David James Nelson, et Albert Simeoni. 2021. « Existing Improvements in Simulation of Fire–Wind Interaction and Its Effects on Structures ». *Fire* 4 (2): 27. <https://doi.org/10.3390/fire4020027>.
- Gongalsky, K. B., et T. Persson. 2013. « Recovery of Soil Macrofauna after Wildfires in Boreal Forests. » *Soil Biology & Biochemistry* 57:182-91.
- Gottfried, Michael, Harald Pauli, Andreas Futschik, Maia Akhalkatsi, Peter Barančok, José Luis Benito Alonso, Gheorghe Coldea, et al. 2012. « Continent-Wide Response of Mountain Vegetation to Climate Change ». *Nature Climate Change* 2 (2): 111-15. <https://doi.org/10.1038/nclimate1329>.
- Hakkenberg, CR, ML Clark, T Bailey, P Burns, et SJ Goetz. 2024. « Ladder fuels rather than canopy volumes consistently predict wildfire severity even in extreme topographic-weather conditions | Communications Earth & Environment ». *Communications Earth & Environment* 5 (1), 721., 2024. <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01893-8>.
- Hood, Sharon M., J. Morgan Varner, Phillip van Mantgem, et C. Alina Cansler. 2018. « Fire and Tree Death: Understanding and Improving Modeling of Fire-Induced Tree Mortality ». *Environmental Research Letters* 13 (11): 113004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae934>.
- Jones, Gavin M., et Morgan W. Tingley. 2022. « Pyrodiversity and Biodiversity: A History, Synthesis, and Outlook ». *Diversity and Distributions* 28 (3): 386-403. <https://doi.org/10.1111/ddi.13280>.
- Jones, Matthew, John Abatzoglou, Sander Veraverbeke, Niels Andela, Gitta Lasslop, Matthias Forkel, Adam Smith, et al. 2022. « Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change ». *Reviews of Geophysics* 60 (juin). <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>.
- Keeley, Jon, William Bond, Ross Bradstock, Juli Pausas, et Philip Rundel. 2011. « Fire in Mediterranean Ecosystems; Ecology, Evolution and Management ». *Fire in Mediterranean Ecosystems: Ecology, Evolution and Management*, janvier, 1-515. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139033091>.
- Keeley, Jon E. 2009. « Fire Intensity, Fire Severity and Burn Severity: A Brief Review and Suggested Usage ». *International Journal of Wildland Fire* 18 (1): 116. <https://doi.org/10.1071/WF07049>.
- . 2012. « Ecology and Evolution of Pine Life Histories ». *Annals of Forest Science* 69 (4): 445-53. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0201-8>.
- Keeley, Jon E., et Juli G. Pausas. 2022. « Evolutionary Ecology of Fire ». *ANNUAL REVIEW OF ECOLOGY EVOLUTION AND SYSTEMATICS* 53:203-25. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102320-095612>.
- Kelly, L. T., et L. Brotons. 2017. « Using Fire to Promote Biodiversity ». *Science* 355 (6331): 1264-65. <https://doi.org/10.1126/science.aam7672>.
- Kohler, Thomas, Markus Giger, Hans Hurni, Cordula Ott, Urs Wiesmann, Susanne Wymann von Dach, et Daniel Maselli. 2010. « Mountains and Climate Change: A Global Concern ». *Mountain Research and Development* 30 (1): 53-55. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-09-00086.1>.
- Lavorel, S., et E. Garnier. 2002. « Predicting Changes in Community Composition and Ecosystem Functioning from Plant Traits: Revisiting the Holy Grail ». *Functional Ecology* 16 (5): 545-56. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x>.

- Le Monde.fr*. 2022. « Incendies : six cartes et graphiques qui dressent un premier bilan d'un été sans précédent », 22 août 2022. https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2022/08/22/incendies-six-cartes-et-graphiques-qui-montrent-un-premier-bilan-inedit-de-l-ete_6138700_4355770.html.
- Mantgem, Phillip J. van, Jonathan C. B. Nesmith, MaryBeth Keifer, Eric E. Knapp, Alan Flint, et Lorriane Flint. 2013. « Climatic Stress Increases Forest Fire Severity across the Western United States ». *Ecology Letters* 16 (9): 1151-56. <https://doi.org/10.1111/ele.12151>.
- Maringer, Janet, Thomas Wohlgemuth, Andrew Hacket-Pain, Davide Ascoli, Roberta Berretti, et Marco Conedera. 2020. « Drivers of Persistent Post-Fire Recruitment in European Beech Forests ». *Science of The Total Environment* 699 (janvier):134006. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134006>.
- Maringer, Janet, Thomas Wohlgemuth, Christophe Neff, Gianni Boris Pezzatti, et Marco Conedera. 2012. « Post-fire spread of alien plant species in a mixed broad-leaved forest of the Insubric region ». *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 207 (1): 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2011.07.016>.
- Martin-Ducup, Olivier, Jean-Luc Dupuy, Maxime Soma, Juan Guerra-Hernandez, Eva Marino, Paulo M. Fernandes, Ariadna Just, et al. 2025. « Unlocking the potential of Airborne LiDAR for direct assessment of fuel bulk density and load distributions for wildfire hazard mapping ». *Agricultural and Forest Meteorology* 362 (mars):110341. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110341>.
- Massiau, Antonella, et Muriel Tiger. 2023. « Guide de sylviculture pour la prévention des incendies de forêt en Corse ». Office national des forêts. 23 octobre 2023. <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/+1d8b::guide-de-sylviculture-pour-la-prevention-des-incendies-de-foret-en-corse.html>.
- McKinney, Shawn T., Ilana Abrahamson, Theresa Jain, et Nathaniel Anderson. 2022. « A systematic review of empirical evidence for landscape-level fuel treatment effectiveness ». *Fire Ecology* 18 (1): 21. <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00146-3>.
- Miller, Richard, Jeanne Chambers, David Pyke, Frederick Pierson, et C. Williams. 2013. « A review of fire effects on vegetation and soils in the Great Basin region: Response and site characteristics ». *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-308*. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, novembre.
- Moritz, Max A., Marco E. Morais, Lora A. Summerell, J. M. Carlson, et John Doyle. 2005. « Wildfires, Complexity, and Highly Optimized Tolerance ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102 (50): 17912-17. <https://doi.org/10.1073/pnas.0508985102>.
- Nolan, Rachael H., Luke Collins, Andy Leigh, Mark K.J. Ooi, Timothy J. Curran, Thomas A. Fairman, Víctor Resco De Dios, et Ross Bradstock. 2021. « Limits to Post-fire Vegetation Recovery under Climate Change ». *Plant, Cell & Environment* 44 (11): 3471-89. <https://doi.org/10.1111/pce.14176>.
- Ömer KÜÇÜK, Nursema AKTEPE*. 2017. « Effect Of Phenolic Compounds On The Flammability In Forest Fires », avril. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.546647>.
- Ormeño, Elena, Blanca Céspedes, Iván A. Sánchez, Angel Velasco-García, José M. Moreno, Catherine Fernandez, et Virginie Baldy. 2009. « The relationship between terpenes and flammability of leaf litter ». *Forest Ecology and Management* 257 (2): 471-82. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.019>.
- Östlund, L, O Zackrisson, et A -L Axelsson. 1997. « The history and transformation of a Scandinavian boreal forest landscape since the 19th century ». *Canadian Journal of Forest Research* 27 (8): 1198-1206. <https://doi.org/10.1139/x97-070>.
- Ott, Jeffrey E., Francis F. Kilkenny, et Theresa B. Jain. 2023. « Fuel treatment effectiveness at the landscape scale: a systematic review of simulation studies comparing treatment scenarios in North America ». *Fire Ecology* 19 (1): 10. <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00163-2>.

- Pausas, Juli G., Ross A. Bradstock, David A. Keith, et Jon E. Keeley. 2004. « Plant Functional Traits in Relation to Fire in Crown-Fire Ecosystems ». *Ecology* 85 (4): 1085-1100. <https://doi.org/10.1890/02-4094>.
- Pausas, Juli G., Jon E. Keeley, et Dylan W. Schwilk. 2017. « Flammability as an Ecological and Evolutionary Driver ». *Journal of Ecology* 105 (2): 289-97. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12691>.
- PAUSAS, Juli G., et Susana PAULA. 2005. « Plant functional traits database for Euro-Mediterranean ecosystems ». EUFIRELAB: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a “wall-less” Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region.
- Pausas, Juli, et Jon Keeley. 2009. « A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life ». *Bio-science* 59 (juillet):593-601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>.
- Perrakis, Daniel, Miguel Cruz, Martin Alexander, Chelene Hanes, Dan Thompson, S.W. Taylor, et Brian Stocks. 2023. « Improved logistic models of crown fire probability in Canadian conifer forests ». *International Journal of Wildland Fire*, août. <https://doi.org/10.1071/WF23074>.
- Peterson, David L., Morris C. Johnson, James K. Agee, Theresa B. Jain, Donald McKenzie, et Elizabeth D. Reinhardt. 2005. « Forest Structure and Fire Hazard in Dry Forests of the Western United States ». PNW-GTR-628. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-628>.
- Pimont, François, Jean-luc Dupuy, Eric Rigolot, et Yvon Duché. 2014. « Les effets du passage d’un feu dans un peuplement arboré ». *La revue Forêt Méditerranéenne* XXXV (mars):17-30.
- Pimont, François, Jean-Luc Dupuy, Julien Ruffault, Eric Rigolot, Thomas Opitz, Juliette Legrand, et Renaud Barbero. 2023. « Projections des effets du changement climatique sur l’activité des feux de forêt au 21ème siècle : Rapport final ». Report, INRAE. <https://doi.org/10.17180/gpdj-xb05>.
- Piqué, Míriam, Teresa Valor, Marc Castellnou, Jordi Pagés, Asier Larrañaga, Marta Miralles, et Teresa Cervera. 2011. *Integració del risc de grans incendis forestals (GIF) en la gestió forestal: Incendis tipus i vulnerabilitat de les estructures forestals al foc de capçades*. Generalitat de Catalunya. Departament d’Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Centre de la Propietat Forestal. Vol. Incendis tipus i vulnerabilitat de les estructures forestals al foc de capçades. Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST).
- Popović, Zorica, Srdjan Bojović, Milena Marković, et Artemi Cerdà. 2021. « Tree Species Flammability Based on Plant Traits: A Synthesis ». *Science of The Total Environment* 800 (décembre):149625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149625>.
- Prichard, Susan J., Paul F. Hessburg, R. Keala Hagmann, Nicholas A. Povak, Solomon Z. Dobrowski, Matthew D. Hurteau, Van R. Kane, et al. 2021. « Adapting Western North American Forests to Climate Change and Wildfires: 10 Common Questions ». *Ecological Applications* 31 (8): e02433. <https://doi.org/10.1002/eap.2433>.
- Rego, Francisco Castro, Penelope Morgan, Paulo Fernandes, et Chad Hoffman. 2021. *Fire Science: From Chemistry to Landscape Management*. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7>.
- Rigolot, Eric, Louis Amandier, Yvon Duché, Bernard Prévosto, Christian Ripert, et Rémi Savazzi. 2013. « Le pin d’Alep et l’incendie - Sylviculture préventive ».
- Rodrigues, Marcos, Àngel Cunill Camprubí, Rodrigo Balaguer-Romano, Julien Ruffault, Paulo M Fernandes, et Víctor Resco de Dios. 2022. « Drivers and Implications of the Extreme 2022 Wildfire Season in Southwest Europe ».
- Romero, Bastien. 2021. « Contribution à l’étude de la plasticité des traits liés au feu chez des espèces à germination obligatoire dans les zones soumises à différents régimes de feu ». These de doctorat, Aix-Marseille. <https://www.theses.fr/2021AIXM0135>.

- Ruffault, Julien, Thomas Curt, Nicolas K. Martin-StPaul, Vincent Moron, et Ricardo M. Trigo. 2018. « Extreme Wildfire Events Are Linked to Global-Change-Type Droughts in the Northern Mediterranean ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18 (3): 847-56. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-847-2018>.
- Ruffault, Julien, Thomas Curt, Vincent Moron, Ricardo M. Trigo, Florent Mouillot, Nikos Koutsias, François Pimont, et al. 2020. « Increased Likelihood of Heat-Induced Large Wildfires in the Mediterranean Basin ». *Scientific Reports* 10 (1): 13790. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70069-z>.
- Smit, Barry, et Johanna Wandel. 2006. « Adaptation, adaptive capacity and vulnerability ». *Global Environmental Change, Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change*, 16 (3): 282-92. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>.
- Stephens, Scott L, Brandon M Collins, Christopher J Fettig, Mark A Finney, Chad M Hoffman, Eric E Knapp, Malcolm P North, Hugh Safford, et Rebecca B Wayman. 2018. « Drought, Tree Mortality, and Wildfire in Forests Adapted to Frequent Fire ». *BioScience* 68 (2): 77-88. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix146>.
- Torres-Ruiz, José M., Hervé Cochard, Sylvain Delzon, Thomas Boivin, Regis Burlett, Maxime Cailleret, Déborah Corso, et al. 2024. « Plant Hydraulics at the Heart of Plant, Crops and Ecosystem Functions in the Face of Climate Change ». *New Phytologist* 241 (3): 984-99. <https://doi.org/10.1111/nph.19463>.
- Turner, Monica G., William H. Romme, Robert H. Gardner, et William W. Hargrove. 1997. « EFFECTS OF FIRE SIZE AND PATTERN ON EARLY SUCCESSION IN YELLOWSTONE NATIONAL PARK ». *Ecological Monographs* 67 (4): 411-33. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0411:EOFSAP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0411:EOFSAP]2.0.CO;2).
- Varner, J. Morgan, Sharon M. Hood, Doug P. Aubrey, Kara Yedinak, J. Kevin Hiers, W. Matthew Jolly, Timothy M. Shearman, Jennifer K. McDaniel, Joseph J. O'Brien, et Eric M. Rowell. 2021. « Tree Crown Injury from Wildland Fires: Causes, Measurement and Ecological and Physiological Consequences ». *The New Phytologist* 231 (5): 1676-85. <https://doi.org/10.1111/nph.17539>.
- Varner, J. Morgan, Jeffrey M. Kane, Jesse K. Kreye, et Eamon Engber. 2015. « The Flammability of Forest and Woodland Litter: A Synthesis ». *Current Forestry Reports* 1 (2): 91-99. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0012-x>.
- Vélez, Ricardo. 1990. « La sylviculture préventive des incendies en Espagne ». *Revue forestière française* 42 (S): 320-31. <https://doi.org/10.4267/2042/26157>.
- Wagner, C E Van. 1977. « Conditions for the start and spread of crown fire. » *Canadian Journal of Forest Research* 7(1), 1977.
- Wagner, C. E. Van. 1987. « Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System ». (Canada Communication Group Publ: Ottawa).
- White, Robert H., et Wayne C. Zipperer. 2010. « Testing and Classification of Individual Plants for Fire Behaviour: Plant Selection for the Wildland–Urban Interface ». *International Journal of Wildland Fire* 19:213–227 19:213-27.
- Whitman, Thea, Ellen Whitman, Jamie Woolet, Mike D. Flannigan, Dan K. Thompson, et Marc-André Parisien. 2019. « Soil Bacterial and Fungal Response to Wildfires in the Canadian Boreal Forest across a Burn Severity Gradient ». *Soil Biology and Biochemistry* 138 (novembre):107571. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107571>.

ANNEXES

Annexe A : Les trois composantes de la vulnérabilité et liste des traits qui les caractérisent

Résistance : La résistance se définit comme la capacité d'un arbre ou d'un peuplement à survivre physiquement à un feu en préservant ses structures et organes externes, en particulier le houppier, malgré les dommages apparents.

Résilience : La résilience se rapporte à la capacité d'un arbre ou d'un peuplement à retrouver son état initial après avoir été exposé au feu (Enright et al., 2014). Au niveau individuel, cela peut s'exprimer par la possibilité de produire des rejets quand les organes vitaux ont survécu. Au niveau du peuplement, la résilience est également associée à la régénération, englobant la germination des graines, le semis, ou la génération de nouveaux rejets.

Combustibilité : Dans le contexte de ce rapport, la combustibilité est une mesure globale qui inclut l'inflammabilité (capacité du combustible à s'enflammer), l'énergie libérée pendant la combustion, la vitesse de combustion, le taux de consommation du combustible (proportion de biomasse brûlée), et la durabilité (persistance du feu avec ou sans source de chaleur externe).

Dans la langue française, le terme « combustibilité » définit seulement l'énergie libérée pendant la combustion et c'est le terme « inflammabilité » qui englobe des caractéristiques de la combustion, de la facilité d'ignition à la persistance du feu. Mais dans un souci de compréhension nous préférons utiliser le terme « inflammabilité » pour désigner la capacité d'ignition, et « combustibilité » comme mesure globale.

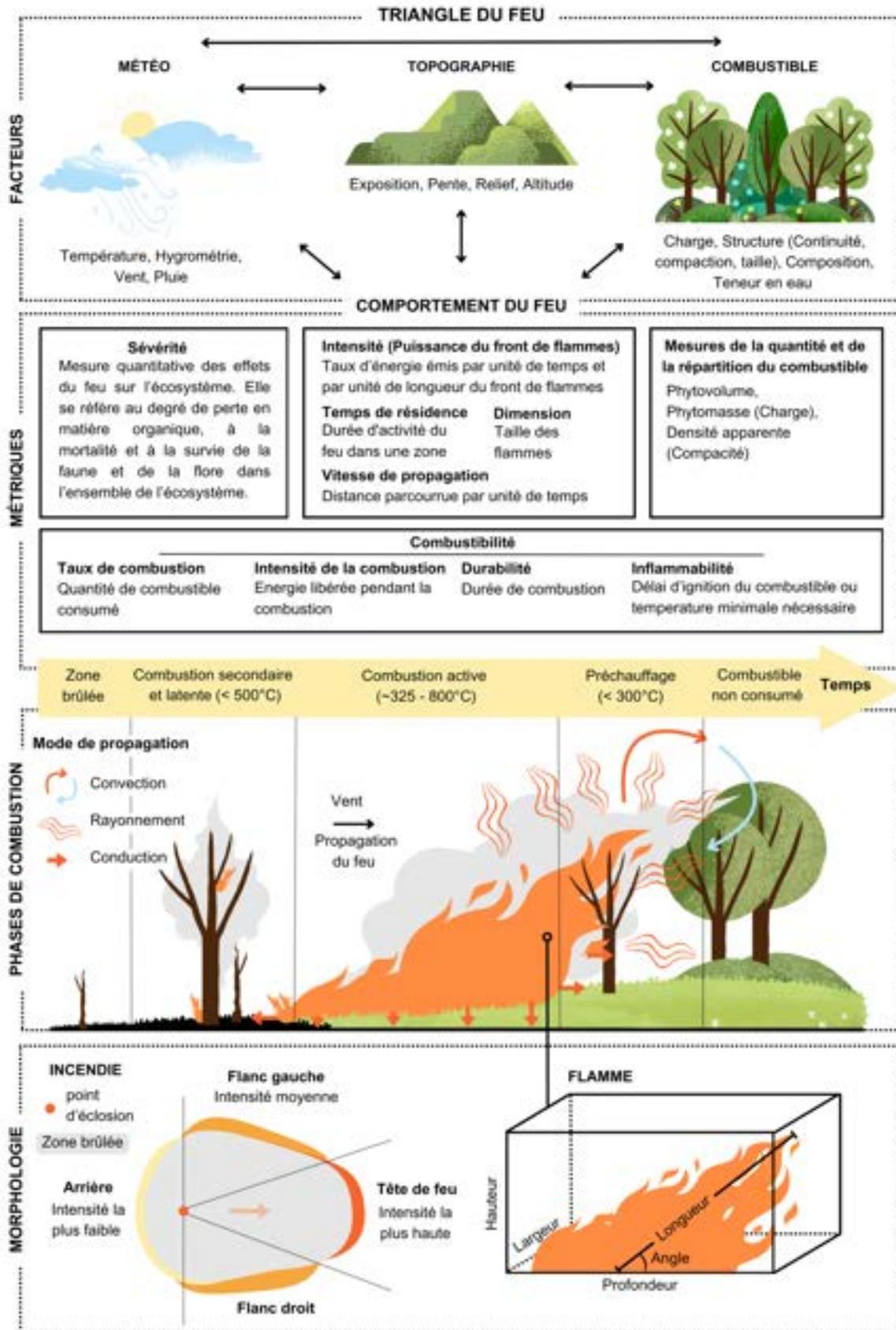
Ainsi, tout au long de ce rapport, la combustibilité est le terme utilisé pour définir la capacité d'un combustible à s'enflammer et à maintenir sa combustion.

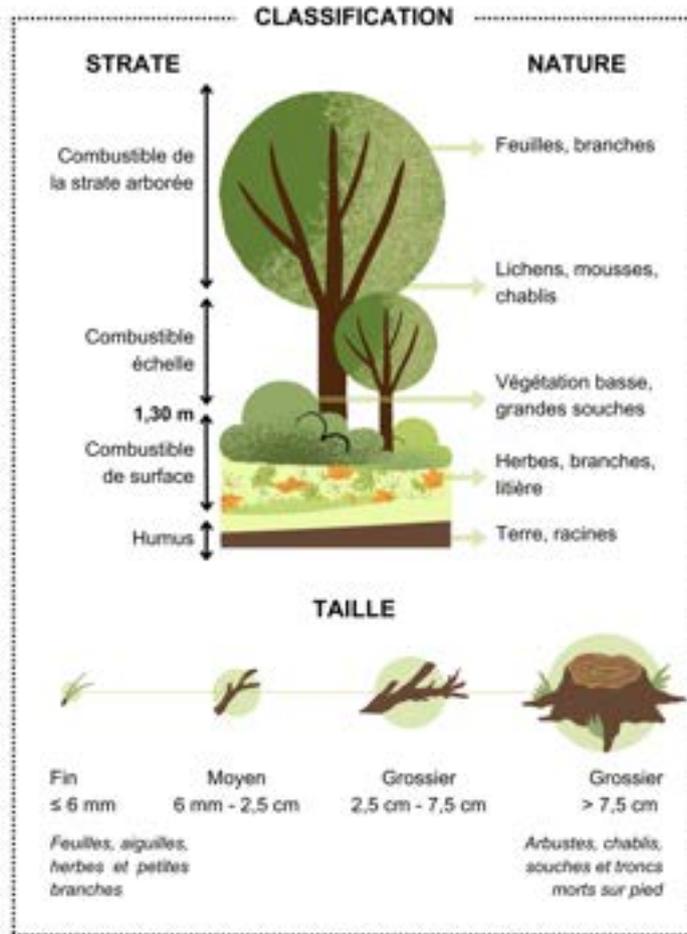
On parle de combustibilité pour une plante entière, mais d'inflammabilité pour des rameaux, des feuilles ou de la litière.

Tableau A1. Liste des traits ayants un impact sur la vulnérabilité, et ses effets (augmentation ou diminution) sur la combustibilité, la résistance et la résilience. (Armenteras et al. 2021; J. G. Pausas et al. 2004; PAUSAS et PAULA 2005; Popović et al. 2021; Romero 2021)

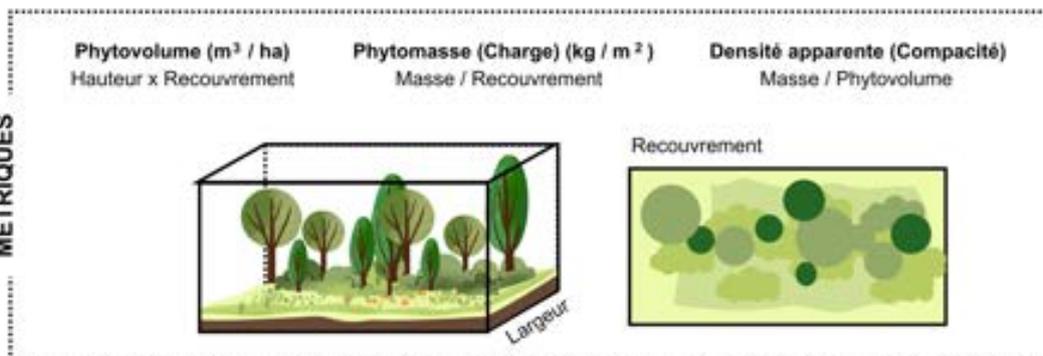
		Traits	Cas	Combustibilité	Résistance	Résilience
Individu	Général	Âge de maturité	Rapide		+	+
		Hauteur	Haut		+	
	Graine	Sérotinie	Présente			+
		Banque de graine	Présente			+
		Capacité de germination post-feu	Possible			+
		Synchronisation de la production	Présente			+
		Protection des graines	Présente			+
	Racine	Profondeur des racines	Profonde			+
	Tronc	Rejet de souche	Possible			+
		Épaisseur d'écorce	Épais		+	
	Houppier	Protection bourgeons	Présente		+	
		Composé organique volatile	Inflammable	+	-	
		Rejet épïcormique	Possible			+
		Hauteur de base du houppier (Elagage naturel)	Haut	-	+	
		Densité du houppier	Élevée	-	+	
		Rétention de branches mortes	Présente	+	-	
		Densité des éléments fins	Élevée	+		
		Épaisseur des éléments fins	Épais	-	+	
	Litière	Charge	Élevée	+		
Compacité		Élevée	-			
Teneur en eau		Élevée	-			
Strate herbacée	Charge/recouvrement/hauteur	Élevée	+			
	Teneur en eau	Élevée	-			
	Compacité	Élevée	+			
Strate arbustive	Teneur en eau	Élevée	-			
	Charge/recouvrement/hauteur	Élevée	+			
	Compacité	Élevée	-			
Strate arborée	Hauteur de base de la canopée	Haut	-			
	Densité de la canopée	Élevée	-			
	Hauteur des arbres	Haut	-			
Peuplement						

Annexe B. Fiches de synthèse sur les feux et les combustibles

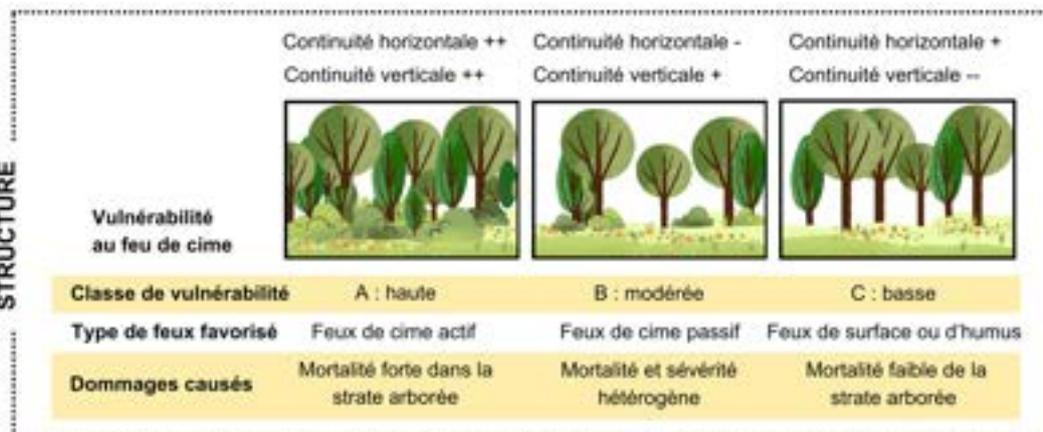




MÉTRIQUES



STRUCTURE



Annexe C. Questionnaire

Informations personnelles

Genre :

Age :

Département :

Vulnérabilité des Essences

1.1. Vulnérabilité intrinsèque des essences

a) Choisissez au maximum 8 essences sur lesquelles vous avez des informations vis à vis de leur vulnérabilité au feu. Si possible, privilégiez les essences du haut de la liste.

Les espèces dans le tableau sont ordonnées avec en haut celles dont nous avons le moins d'informations sur la vulnérabilité au feu.

Cochez là ou les réponses

Veuillez sélectionner de 2 à 8 réponses.

- Chêne chevelu (*Quercus cerris*)
- Érable sycomore (*Acer opalus*)
- Copalme d'Amérique (*Liquidambar styraciflua*)
- Charme (*Carpinus betulus*)
- Calocèdre (*Calocedrus decurrens*)
- Chêne des Canaries (*Quercus canariensis*)
- Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*)
- Sapin de Céphalonie (*Abies cephalonica*)
- Chêne pubescent (*Quercus pubescens*)
- Séquoia à feuille d'If (*Sequoia sempervirens*)
- Pin de Calabre (*Pinus brutia*)
- Mélèze (*Larix decidua*)
- Pin noir (*Pinus nigra*)
- Chêne rouvre (*Quercus petraea*)
- Chêne des Pyrénées (*Quercus pyreanica*)
- Châtaignier (*Castanea sativa*)
- Chêne pédonculé (*Quercus robur*)
- Pin pignon (*Pinus pinea*)
- Cyprès de Provence (*Cupressus sempervirens*)
- Epicéa (*Picea abies*)
- Chêne vert (*Quercus ilex*)
- Chêne liège (*Quercus suber*)
- Sapin blanc (*Abies alba*)
- Sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii*)
- Hêtre (*Fagus sylvatica*)
- Pin d'Alep (*Pinus halepensis*)
- Pin maritime (*Pinus pinaster*)
- Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*)

1.1.b) Ce sont les espèces que vous avez sélectionnées.

Assurez-vous de ne pas en avoir sélectionné plus de 9 espèces à la question précédente, au risque de rencontrer un problème lors de la validation du questionnaire

Veillez leur attribuer à chacune une note de combustibilité, de résistance et de résilience sur une échelle de 1 à 5. (En essayant si possible de donner une note absolue.)

1 : faible ; 5 : fort

	Combustibilité du cortège associé : Propension à générer des feux puissants	Résistance Capacité à survivre et préserver ses structures externes	Résilience : Capacité à retrouver son état initial	Commentaires éventuels
Esp 1				
Esp 2				
Esp 3				
Esp 4				
Esp 5				
Esp 6				
Esp 7				

Vulnérabilité associée aux traits fonctionnels

Dans la mesure du possible, pour chacune de ces caractéristiques et pour toutes espèces confondues, notez sur une échelle de 1 à 5 l'impact de ces caractéristiques sur la combustibilité, la résistance et la résilience.

a) Caractéristiques à l'échelle de l'individu :

Les traits signalés par une astérisque (*) sont définis dans l'aide.

1 : faible ; 5 : fort

	Combustibilité du cortège associé : Propension à générer des feux puissants	Résistance Capacité à survivre et préserver ses structures externes	Résilience : Capacité à retrouver son état initial	Commentaires éventuels
Présence d'une banque de graine*				
Capacité à germer après le feu				
Profondeur des racines				
Épaisseur de l'écorce				
Capacité à faire des rejets (de souche ou épiqueormique)*				
Densité du houp-pier*				
Épaisseur des				

feuilles ou aiguilles				
Propension à l'élagage naturel				
Croissance en hauteur rapide				
Hauteur de l'arbre				
Teneur en composés organiques volatils				
Écoulement résineux				



Banque de graines : Quantité de graines présentes dans le sol ou dans la canopée (bines) et longévité.

Capacité à faire des rejets (de souche ou épicaormiques) : Capacité d'un arbre à générer de nouvelles pousses à partir des parties souterraines ou du tronc ou des branches.

Densité du houppier : Masse de combustible disponible du houppier par unité de volume du houppier.

Propension à l'élagage : Tendance d'un arbre à perdre ses branches inférieures mortes de manière naturelle.

b) Caractéristiques à l'échelle du peuplement

Les traits signalés par une astérisque (*) sont définis dans l'aide.

1 : faible ; 5 : fort

	Combustibilité du cortège associé : Propension à générer des feux puissants	Résistance Capacité à survivre et préserver ses structures externes	Commentaires éventuels
Densité de la canopée* / Charge / Biomasse fine			
Recouvrement arboré / Continuité horizontale			
Hauteur de base de la canopée* / Continuité verticale			
Hauteur moyenne du peuplement			
Charge / Biomasse fine abustive			
Composition en essence du cortège			
Teneur en eau de la végétation			
Épaisseur de la litière			



Densité de la canopée : Masse de combustible disponible dans la canopée par unité de volume de la canopée.

Hauteur de base de la canopée : Distance verticale entre le sol et la base inférieure de la canopée. C'est un indicateur de la continuité verticale.

Charge : Quantité de combustible exprimée en poids sec de combustible par unité de surface.

Recouvrement : Proportion de la surface du sol couverte par la projection verticale des combustibles.

Traits des essences sélectionnées

1.3.a) Voici les deux premières essences sélectionnées dans la liste de la question 1.1.

Essence 1 :

Essence 2 :

1.3.b) Pour ces deux espèces, notez sur une échelle de 1 à 5 l'abondance, la présence ou la quantité des caractéristiques suivantes pour chaque essence.

1 : Peu abondant(e) / Faible

5 : Abondant(e) / Fort(e)

Exemples : La hauteur de base du houppier de cette essence est grande : 5 / Cette essence fait peu ou pas de jets : 1.

A l'échelle de l'individu :

	Esp 1	Esp 2
Présence d'une banque de graine*		
Capacité à germer après le feu		
Capacité à faire des jets (de souche ou épicormique)*		
Profondeur des racines		
Épaisseur de l'écorce		
Densité du houppier*		
Épaisseur des feuilles ou aiguilles		
Propension à l'élagage naturel		
Croissance en hauteur rapide		
Hauteur de l'arbre		
Teneur en composés organiques volatils		
Écoulement résineux		

- **Banque de graines :** Quantité de graines présentes dans le sol ou dans la canopée (diamètre et longueur).
- Capacité à faire des jets (de souche ou épicormique) :** Capacité d'un arbre à générer de nouvelles pousses à partir des parties souterraines ou du tronc ou des branches.
- Densité du houppier :** Masse de combustible disponible du houppier par unité de volume du houppier.
- Propension à l'élagage naturel :** Tendance d'un arbre à perdre ses branches inférieures mortes de manière naturelle.

1.3.c) Pour ces deux essences, notez sur une échelle de 1 à 5 l'importance de chaque caractère sur la vulnérabilité au feu.

1 : Peu / Faible

5 : Abondant / Forte

Exemples : La hauteur de base du houppier de cette essence est grande : 5 / Cette essence fait peu ou pas de jets : 1.

A l'échelle du peuplement :

Les traits signalés par une astérisque (*) sont définis dans l'aide.

	Esp 1	Esp 2
Densité de la canopée* / Charge / Biomasse fine		
Recouvrement arboré / Continuité horizontale		
Hauteur de base de la canopée* / Continuité verticale		
Hauteur moyenne du peuplement		
Charge / Biomasse fine abustive		
Composition en essence du cortège		
Teneur en eau de la végétation		
Épaisseur de la litière		

Densité de la canopée : Masse de combustible disponible dans la canopée par unité de volume de la canopée.
Hauteur de base de la canopée : Distance verticale entre le sol et la base inférieure de la canopée. C'est un indicateur de la continuité verticale.
Charge : Quantité de combustible exprimée en poids sec de combustible par unité de surface.
Recouvrement : Proportion de la surface du sol couverte par la projection verticale des combustibles.

Retour(s) d'expérience(s)

2.1. Pouvez-vous citer un évènement de feu, pertinent du point de vue de la vulnérabilité des peuplements, auquel vous avez assisté ?

Nous privilégions les informations concernant les peuplements pour lesquels nous manquons de données, mais toutes les informations sont les bienvenues.

Section à dupliquer autant de fois que nécessaire

Année :

Période (mois/saison) :

Localisation (massif/ville/département) :

Surface parcourue (approximative, ordre de grandeur) :

Quelle est la fréquence de ce type d'évènement dans votre région ? :

Quels peuplements étaient concernés par l'incendie ? (Détail des essences, âge et structure, sous étage...) :

Quelles étaient les conditions environnementales locales au moment du feu ? (pente/relief/orientation, météo) :

Sur une échelle de 1 à 10, quelle était la sévérité de cet incendie (1 : pas de mortalité des arbres, 10 : Mortalité totale des arbres) :

Quels ont été les moyens mis en place pour maîtriser l'incendie ? :

Y-a-t-il eu des interventions post-incendie pour améliorer la résistance ? Si oui, lesquelles ?

Qu'avez-vous appris de cet évènement ?

Sylviculture préventive

a) Parmi les pratiques suivantes, notez sur une échelle de 1 à 5 leur efficacité sur les différents aspects de la vulnérabilité.

Vous êtes libre de vous exprimer dans la colonne "Commentaire" (ex. : fréquence pour optimiser l'efficacité / inefficace sur telle essence etc.)

1 : Peu efficace, 5 : Très efficace

	Combustibilité du cortège associé : Propension à générer des feux puissants	Résistance Capacité à survivre et préserver ses structures externes	Commentaires éventuels
Débroussaillage mécanique			
Pâturage			
Brûlage dirigé			
Élagage			
Éclaircie			
Gestion des rémanents d'éclaircies (abattage-dispersé, empiler-brûler, broyage, évacuation)			

Selon vous, comment la gestion forestière pourrait être améliorée pour diminuer la vulnérabilité des peuplements aux incendies ?

Sylviculture post-incendie

3.2. Sylviculture post-incendie

a) Des pratiques de gestion forestière post-incendie ont-elles été mises en place pour améliorer la résilience des peuplements que vous connaissez ?

Décrivez le contexte (essences, conditions, échelle...) et **expliquez vos choix**.

Ajoutez un commentaire seulement si vous sélectionnez la réponse.

Choix	Pratiques	Commentaires
	Reboisement par l'essence d'origine	
	Reboisement par une autre essence ou mélange d'essences. Si oui, lesquelles ?	
	Promotion de la régénération naturelle (par semis ou rejet)	
	Récolte sélective des arbres endommagés : Retirer les arbres fortement endommagés en laissant ceux qui ont survécu avec des chances de régénération	
	Amélioration de la structure du peuplement (taillis, futaie...)	
	Suivi à long terme (surveiller et évaluer l'évolution du peuplement au fil du temps en ajustant les stratégies de gestion au besoin)	
	Contrôle des maladies et parasites	

3.2.b) Quelles autres pratiques de gestion forestière pourraient être utilisées afin de favoriser la résilience d'un peuplement incendié ?

Détaillez les pratiques qui pourraient être mises en place par essence, âge du peuplement et par échelle (de la parcelle ou du paysage)

Réponse :

4.2. Quels aspects de la recherche sur la vulnérabilité des peuplements forestiers méritent un effort particulier selon vous ?

Réponse :

4.3. Quelles sont les essences sur lesquelles vous aimeriez avoir plus d'informations et qui mériteraient selon vous des travaux de recherche particuliers sur leur vulnérabilité au feu ?

Réponse :

4.4. Pouvez-vous partager 2 ou 3 ressources, propre à votre région ou département, qui pourraient nous apporter des connaissances dans le domaine de la vulnérabilité des peuplements aux feux ?

(Livre, rapport, brochures, dépliant, évaluation, audit post incendie, enquête, document interne, conférence...)

Réponse :

Informations professionnelles

Quels aspects des feux de forêt maîtrisez-vous le mieux ?

Choix	Pratiques
	Inflammabilité / risque d'éclosion
	Comportement du feu / combustibilité / gestion des combustibles / gestion préventive
	Comportement du feu aux abords des ouvrages de DFCI / des enjeux humains
	Gestion post incendie / résilience
	Effets du feu sur la végétation (résistance, adaptations morphologiques)

Autre :



Dans quelles grandes régions écologiques avez-vous une expertise en Défense des Forêts Contre les Incendies (DFCI) ? Précisez le nombre d'années d'expérience pour chaque région sélectionnée

Choix	Pratiques	Nombre d'années d'expérience
	Alpes	
	Centre nord	
	Corse	
	Grand est	
	Grand ouest	
	Jura	
	Méditerranée	
	Pyrénées	
	Sud ouest	
	Vosges	

Autres :

Quelle est votre position professionnelle ?

Choix	Pratiques
	Gestionnaire forestier.e
	Intervenant.e en cas d'incendie (analyste des incendies de forêt, pompier)
	Universitaire (Recherche)
	Bureau d'étude

Donnez-vous une note d'expertise dans le domaine de la DFCI, sur une échelle de 1 à 10.

1 : Peu de connaissances ; 10 : Très compétent

Réponse :

Quel pourcentage de votre temps de travail avez-vous consacré à la DFCI ces deux dernières années ?

Réponse :

Comment avez-vous principalement acquis les connaissances que vous avez aujourd'hui ?

Choix	Pratiques
	Formation initiale
	Formation continue
	Formation pompier
	Formation universitaire
	Formation DFCI
	Expérience de terrain
	Livre/Guide
	Articles et rapports scientifiques
	Séminaire
	Discussions

Autre :

Annexe D. Descriptif sommaire des méthodes utilisées

1. Revue bibliographique

Outils utilisés :

- Zotero : Gestion des références bibliographiques. Les articles pertinents ont été répertoriés, et les passages importants ou potentiellement utiles ont été surlignés.
- Tableau de suivi : Un tableau de suivi a été créé pour organiser les informations issues de la littérature scientifique (littérature grise, blanche, numérique et papier). Ce tableau inclut des colonnes sur les tags, le thème de l'article, un résumé, les informations retenues et les essences étudiées.

Recherche documentaire :

- Les moteurs de recherche utilisés incluent Aureli, Web of Science et Google Scholar, avec des mots-clés comme « fire », « wildfire », en appliquant des filtres tels que « review » pour optimiser les résultats.
- Une première liste des traits fonctionnels des arbres (caractéristiques morphologiques, anatomiques, chimiques) a été établie afin d'identifier les facteurs impactant la combustibilité, la résistance ou la résilience des essences face au feu.
- Un tableau de croisement entre les traits fonctionnels et les essences a été conçu avec les colonnes suivantes : « traits », « essence », « citation », « auteur, date », « commentaire ». Ce tableau a été alimenté à partir de recherches spécifiques en utilisant les mots-clés tels que « nom latin » + « fire » ou « nom commun » + « fire ».

Optimisation des recherches :

Pour les informations manquantes, les mots-clés ont été affinés en fonction du trait fonctionnel recherché (« nom du trait » + « essence »).

2. Recueil d'expertise par questionnaire

Objectif : Compléter les données bibliographiques avec les retours d'experts sur la vulnérabilité des essences et identifier les divergences d'avis. Les informations récoltées permettent de combler les lacunes documentaires et d'affiner les analyses.

Conception :

- Un questionnaire a été développé sur LimeSurvey, en consultation avec des experts pour définir les questions. Trois parties ont été initialement intégrées dans un même questionnaire, mais les séparer pourrait apporter plus de clarté.
- Un retour d'expérience plus détaillé pourrait également être demandé sous forme de fichier Word pour laisser plus de liberté aux répondants.

Traitement des réponses :

- Les réponses ont été traitées avec les étapes suivantes : nettoyage des données (suppression des valeurs non numériques), calcul des moyennes et écarts types des notes, et regroupement des informations (profils des experts, notes, commentaires).
- Des graphiques ont été générés pour visualiser les évaluations des traits et des essences.

3. Fiches essences

Inspiration et contenu :

- Les fiches ont été inspirées par des modèles existants, notamment ceux de ClimEssence et European Atlas of Tree Species. La mise en page a été réalisée à l'aide du logiciel Canva.
- Les fiches intègrent des notes de vulnérabilité (combustibilité, résistance, résilience) basées sur une moyenne entre une évaluation subjective (allant de A à E) et la moyenne des réponses du questionnaire (allant de 1 à 5).

Notation de la vulnérabilité :

- Les notes de résistance et résilience suivent une échelle où
A = 1,
B = 2,
C = 3,
D = 4,
E = 5.

Pour la combustibilité, l'échelle est inversée (A = 5, B = 4, C = 3, D = 2, E = 1).

Fiabilité des données :

Les notes de fiabilité vont de 1 à 4 barres pleines, en fonction des critères suivants :

- Réduction d'une barre si :
 - Trop peu d'informations dans la bibliographie (<4 références).
 - Divergences importantes entre la bibliographie et les experts.
 - Divergence des réponses au sein du questionnaire (écart type > 2 ou forte dispersion des avis).
- Ajout d'une barre si :
 - Concordance entre bibliographie et experts (écart type < 1,5).
 - Pas de divergence significative au sein du questionnaire (écart type < 1).

Expertise et références :

- Les **notes d'expertise** varient de 1 à 3 étoiles pleines selon le nombre d'experts ayant répondu
1 étoile : <4,2 réponses
2 étoiles : entre 4,2 et 8,4
3 étoiles : >8,4
- Les **notes de référence** sont basées sur le nombre de références utilisées
1 étoile : <10 références ;
2 : entre 10 et 30
3 étoiles : >30

4. Cartes de répartition

Sources de données : Les cartes de répartition des essences sont superposées à des projections futures du nombre de grands feux en France. Trois sources principales ont été utilisées pour les cartographier la répartition des essences :

- **Données ONF** : Utilisation de rasters pour déterminer la présence des essences avec les codes essence, avec comptage des pixels par sylvoécocorégion (hachures pour des valeurs supérieures à 1000 pixels).
- **Données chorologiques** : Cartes qualitatives de répartition issues de l'article de Caudullo et al. (2017), avec hachures pour des recouvrements supérieurs à 70 % des sylvoécocorégions. (<https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.05.007>)
- **RPP (Relative Probability of Presence)** : Données issues de l'Atlas européen avec hachures lorsque la probabilité moyenne de présence de l'essence dépasse 0,05*. (https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/efdac/download/Atlas/pdf/How_to_read_the_Atlas.pdf)

*probabilité de présence modifiée pour le Pin pignon à 0,015 et 0.025 pour le chêne chevelu

Priorisation des données : Les cartes sont prioritairement issues des données RPP, suivies des données ONF et, en dernier recours, des données chorologiques. Cette hiérarchie est fondée sur la qualité et la précision perçue des données.

Par ordre alphabétique, les cartes de répartition utilisées :

Cèdre : ONF
 Charme : RPP
 Châtaignier : RPP
 Chêne chevelu : RPP
 Chêne liège : RPP
 Chêne pédonculé : RPP
 Chêne pubescent : RPP
 Chêne tauzin : RPP
 Chêne sessile : RPP
 Chêne vert : RPP
 Épicéa : RPP
 Erable : Chorological data
 Hêtre : RPP
 Mélèze : RPP
 Pin d'Alep : RPP
 Pin maritime : RPP
 Pin noir : RPP
 Pin pignon : RPP
 Douglas : RPP



INRAE Centre PACA
84000 AVIGNON
Contact : francois.pimont@INRAE.fr

Rejoignez-nous sur :

