

Vulnéfeu

Exposition et vulnérabilité des peuplements forestiers au feu
dans le contexte du changement climatique

Orléans, 25/03/2025

François Pimont, Camille Revertegat (INRAE)





Projet Vulnéfeu : Exposition et vulnérabilité des peuplements forestiers au feu dans le contexte du changement climatique

- Thème B de l'Appel à projets 2023 : Vulnérabilité des peuplements au feu
- Durée : septembre 2023 – novembre 2024 => extension février 2025
- Financement du RMT AFORCE / Budget total 40 k€ (+ 83k€ autofinancement)
- Coordination : INRAE URFM;
- Partenariat : INRAE, ONF, DSF

Camille Revertegat, Eric Rigolot, Jean-Luc Dupuy, Julien Ruffault, François Pimont (INRAE URFM)

Tom Rizziato, Sylvain Dupire, (INRAE LESSEM)

Philippe Deuffic (INRAE ETTIS)

Marion Toutchkov (ONF DFCI)

Brigitte Mush, Alexandre Piboule (ONF RDI)

Bernard Boutte (DSF)





Contexte et objectifs du projet

- **Contexte :**

- les grands feux de l'été 2022
- une forte demande en matière de connaissances

- **Objectifs**

(1) Synthétiser les connaissances sur :

- l'évolution de l'exposition des massifs forestiers aux feux de forêt
- la vulnérabilité au feu des essences et des peuplements

(2) Identifier les perspectives d'améliorations et d'intégration des informations



1. Synthèse des connaissances

Connaissances récentes sur l'exposition présente et future :

Projections Météo-France, ONF et INRAE, commandées par le MASA pour le rapport Mortier en 2023

Par ex : rapport INRAE : <https://hal.inrae.fr/hal-04149936>

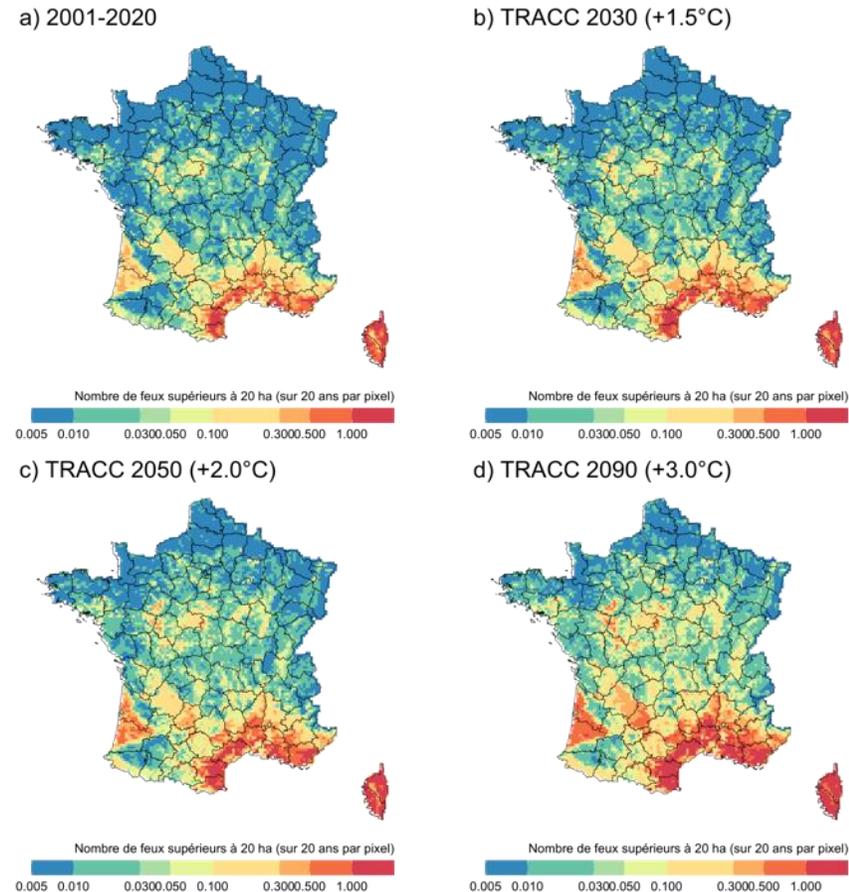
Mais résultats présentés sous forme de scénarios d'émissions (RCP)

Remplacement des RCP par une seule trajectoire d'adaptation pour en faciliter l'application

	2030	2050	2100
Monde (pré-industriel)	+1,5 °C	+2,0 °C	+3,0 °C
Fr-Hex (pré-industriel)	+2,0 °C	+2,7 °C	+4,0 °C
Fr-Hex (ref 1976-2005)	+1,4 °C	+2,1 °C	+3,4 °C

Tableau 2. Lignes 1 : niveaux de réchauffement planétaire par rapport à la période pré-industrielle 1850-1900. Lignes 2 et 3 : niveaux de réchauffement correspondants sur la France hexagonale par rapport à la période pré-industrielle et 1976-2005.

Source Météo-France



1. Synthèse des

> 350

documents
consultés

28

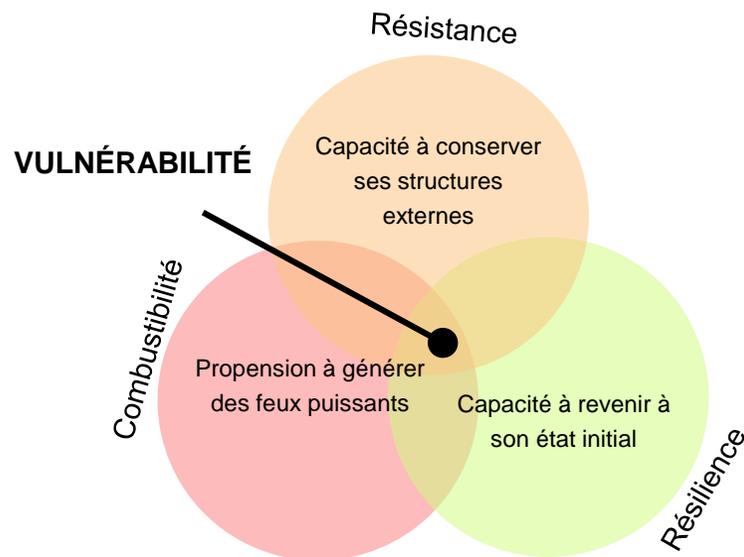
essences
d'arbre

21

caractères
morpho -
anatomique

28

Enquêtes
auprès
d'experts



Chêne sessile,
Chêne vert,
Chêne liège,
Chêne pédonculé,
Chêne pubescent,
Chêne chevelu,
Chêne des canaries,
Chêne des Pyrénées,
Châtaignier,
Hêtre,
Charme,
Érable sycomore,
Copalme d'Amérique,

Pin d'Alep,
Pin de Turquie,
Pin pignon,
Pin noir,
Pin maritime,
Pin sylvestre,
Sapin Douglas,
Sapin blanc,
Cèdre, Épicéa,
Sapin de
Céphalonie,
Mélèze,
Séquoia,
Calocèdre,
Cyprès

Individu

Peuplement

	Traits	
Individu	Général	Âge de maturité
		Hauteur
	Graine	Sérotinie
		Banque de graine
		Capacité de germination post-feu
		Synchronisation de la production
		Protection des graines
	Racine	Profondeur des racines
	Tronc	Rejet de souche
		Épaisseur d'écorce
	Houppier	Protection bourgeons
		Composé organique volatile
		Rejet épïcormique
		Hauteur de base du houppier
Densité du houppier		
Rétention de branches mortes		
Densité des éléments fins		
Épaisseur des éléments fins		
Litière	Charge	
	Compacité	
	Teneur en eau	
Strate herbacée et arbustive	Charge/recouvrement/hauteur	
	Teneur en eau	
	Compacité	
Strate arborée	Hauteur de base de la canopée	
	Densité de la canopée	
	Hauteur des arbres	



Rapport complet (152 pages)

Contexte et généralités

18p

Écologie et évolution des incendies
Mécanismes, comportement, métriques

les peuplements face aux feux

22p

Mécanismes de mortalité, caractéristiques des arbres associés à la vulnérabilité

ylviculture et gestion préventive

10p

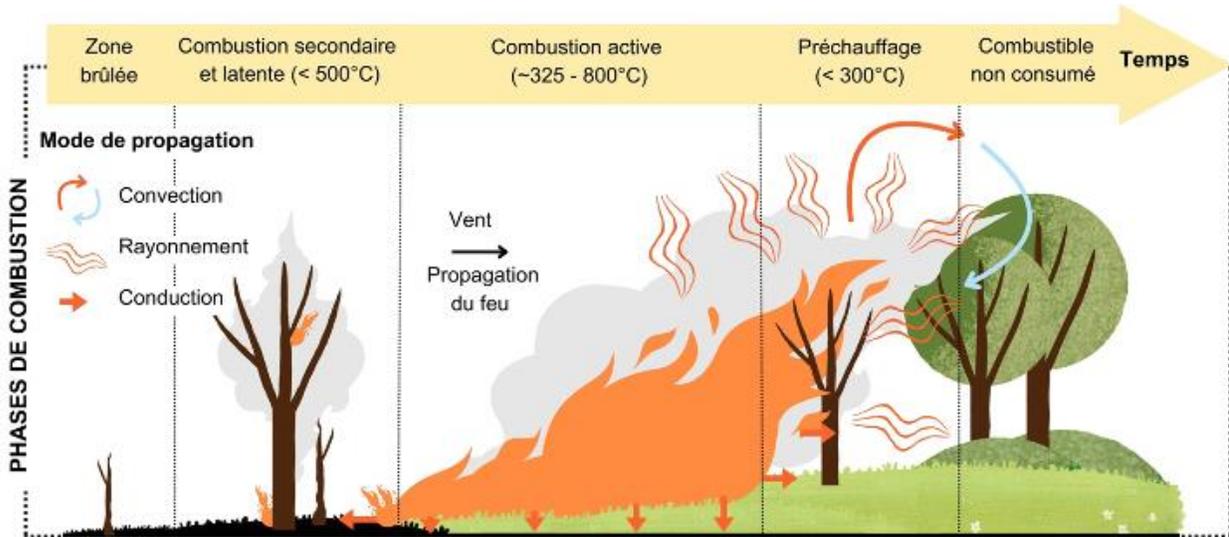
Distribution spatiale, types de traitements, importance et perspectives

Fiches essences

66p

28 essences actuelles et en devenir

Le rapport est richement illustré par des figures originales et pédagogiques (ex figure 5.3).



STRUCTURE	Continuité horizontale ++	Continuité horizontale -	Continuité horizontale +
	Continuité verticale ++	Continuité verticale +	Continuité verticale --
Vulnérabilité au feu de cime			
Classe de vulnérabilité	A : haute	B : modérée	C : basse
Type de feux favorisé	Feux de cime actif	Feux de cime passif	Feux de surface ou d'humus
Dommages causés	Mortalité forte dans la strate arborée	Mortalité et sévérité hétérogène	Mortalité faible de la strate arborée

Les fiches essences

Essences formant des peuplements en France métropolitaine

Feuillus

Chênes
pages 4 - 17

Autres
pages 18 - 23

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

Châtaignier
Hêtre
Charme

Conifères

Pinacées
pages 24 - 47

Cupressacées
pages 48 - 49

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

Cyprès de Provence

Autres essences d'intérêt potentiel

Feuillus
pages 51 - 56

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

Conifères
pages 57 - 60

Séquoia toujours vert
Calocèdre

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

Quantité de références

Littérature

- ☆☆☆ 0
- ☆☆☆ < 10
- ☆☆☆ entre 10 et 30
- ☆☆☆ > 30

Expert

- ☆☆☆ 0
- ☆☆☆ < 4
- ☆☆☆ entre 4 et 8
- ☆☆☆ > 8

Angiospermes → Fagales → Fagacées → Genre Quercus

Chêne vert

Quercus ilex

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 notes)

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 côté 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 (yeuseraies), formant des futures ombrées ou des taillis vieilles, 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 liège. 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

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

Peuplement jeune ou ouvert Peuplement dense et âgé

Faible couvert Couvert dense

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

Litère Inflammabilité très forte quand présente



Les 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)

Gymnospermes → Conifères → Pinacées → Genre Pinus

Pin d'Alep
Pinus halepensis

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

Littérature
Le pin d'Alep est une essence dite "pyrophyte" et montre une adaptation au feu qui favorise l'ouverture des cônes sérolineux 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 sérolineux 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 ~~à la structure de ses formations~~.

Régime de feu: Périodique - 20-50 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)
0,005 0,010 0,020 0,050 0,100 0,300 0,500 1,000

Répartition de l'essence (2020)

Quantité de références

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

Caractéristiques de l'espèce jouant un rôle dans sa vulnérabilité

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

Fortes continuités verticales

Sous-bois dense et combustible



Caractéristiques de combustibilité à l'échelle du peuplement

Inflammabilité

Houppier
Inflammabilité forte

Tronc
NA

Résultats des tests d'inflammabilité

Aiguilles fines et courtes

Taux élevé de cônes sérolineux

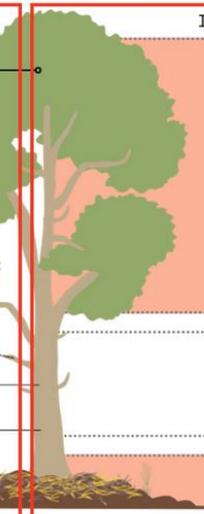
Houppier non décant

Rétention de branches mortes

Écorce épaisse

Aucune capacité de rejet

Fort taux de germination



Litière
Inflammabilité forte



1. Synthèse des connaissances

Un gros travail de synthèse des connaissances a été réalisé, mais...

- Un croisement quantitatif avec les facteurs du danger météo (exposition des parcelles) reste à faire
- Pour une même essence, les facteurs de combustibilité et de résistance des peuplements dépendent beaucoup des caractéristiques locales des peuplements (âge, structure, pratiques sylvicoles, etc)

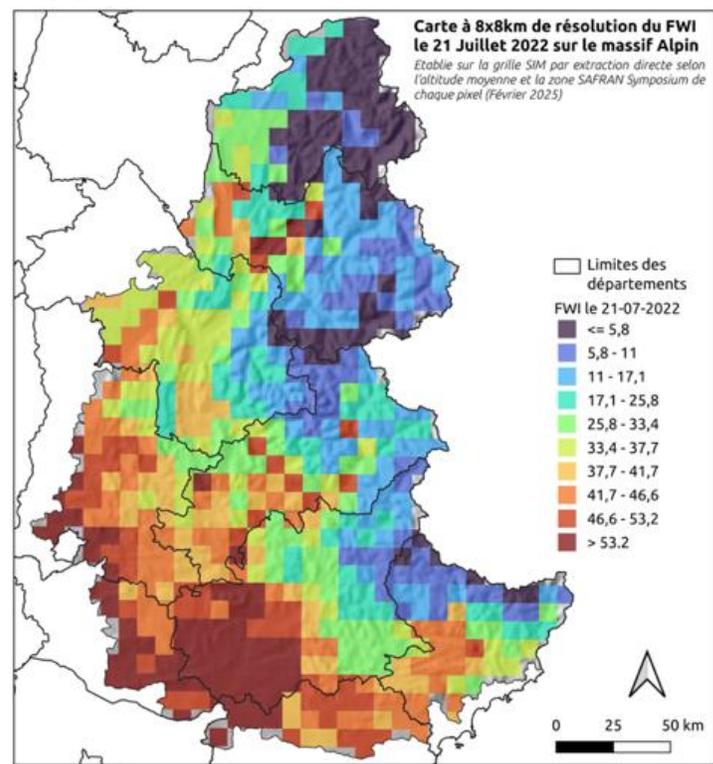
Quelles sont les perspectives pour les intégrer ?



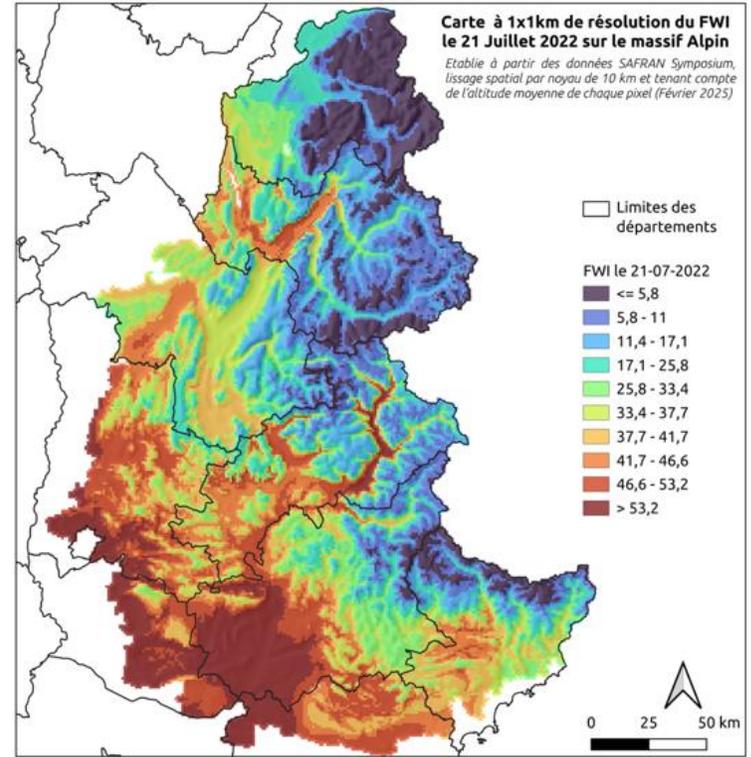
2. Perspectives d'amélioration

Amélioration de la précision de l'exposition dans les zones à fort relief

Approche actuelle : Safran 8km



Nouvelle approche à 1km avec données Safran Symposium



+ financement complémentaire MTE / DGPR

=> Méthodologie à intégrer dans les futures travaux nationaux, qui permettra de mieux caractériser l'exposition des peuplements de montagne

Méthodologie développée par INRAE LESSEM dans le cadre du projet Vulnéfeu (stage de Tom Rizzati)

Table des matières

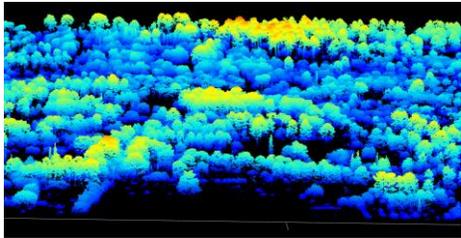
Résumé	1
Remerciements	11
Table des matières	111
Introduction	1
1 Méthodes et données	2
1.1 Présentation et construction des indices	2
1.1.1 Indices sur l'état du combustible (FFMC, DMC, DC)	2
1.1.2 Indices sur le comportement de feu (BSI, BUI, FWI)	2
1.1.3 Définition des saisons de travail	3
1.2 Données explorées	4
1.2.1 SIM (SAFRAN - SURFEX/ISBA/CROCUS - MEPLA)	4
1.2.2 SIM2 (SAFRAN - SURFEX/ISBA - MODCOU)	5
1.2.3 Zones symposiums	6
1.2.4 Stations Météo-France	6
2 Comparaison des données stations et SAFRAN	8
3 Influence de l'altitude	12
3.1 Influence de l'altitude sur les différents indices et variables	12
3.2 Prise en compte de l'altitude par une descente d'échelle	14
3.3 Problèmes aux frontières inter-zones et lissage spatial	16
4 Influence de l'exposition	18
4.1 Influence de l'exposition sur les indices	18
4.1.1 Lien entre durée de jour et daylength factor	18
4.1.2 Impact du daylength factor sur le DMC, BUI et FWI	20
4.1.3 Impact du drying factor sur le DC, BUI et FWI	21
4.2 Prise en compte de l'exposition grâce au masque topographique	22
5 Conclusion et perspectives	24
5.1 Synthèse des résultats	24
5.2 Perspectives	24
5.2.1 Lissage spatial par krigeage	24
5.2.2 Exploration d'autres indices	27
5.2.3 Validation par le terrain	27
5.2.4 Suite du stage	27
5.3 Place du stage dans le contexte de la mission inter-ministérielle	27
6 Annexes	29
Bibliographie	31



2. Perspectives d'amélioration

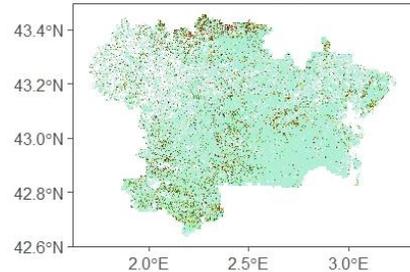
Intégrer la structure des peuplements

Utilisation du LiDAR HD

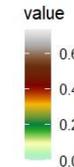
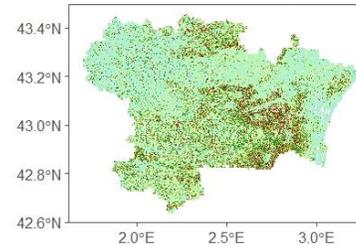


Cartographie des facteurs clés du roussissement/passage en cime dans l'Aude

Base de canopée (m)



Charge en surface (Kg.m²)



Approche développée dans le post-doc d'Olivier Martin pour caractériser la combustibilité des peuplements



=> Perspectives de cartographie de la vulnérabilité prenant en compte essence ET structure (travaux nationaux + thèse Camille Revertegat financée par INRAE et l'ADEME)

INRAE + ONF + IGN



Livrables et perspectives de diffusion

- Synthèse sur la vulnérabilité des essences contenant les fiches espèces
⇒ Pour les gestionnaires et les professionnels impliqués dans la prévention et la lutte contre les incendies (SDIS, etc)



- Diffusion du contenu des fiches espèces dans climEssence
⇒ Les fiches vulnéfeu seront téléchargeables sur le site de ClimEssences (au niveau de chaque essence)
⇒ Les informations de climEssence seront mise à jour à partir de l'info des fiches; qq verrous à lever : essences non couvertes par l'étude, conversion du vulnéscore en notes "climEssences", etc.

- Rapport de Tom Rizziato sur la descente d'échelle feu-météo dans les zones de montagne
=> Pour les décideurs publiques et les scientifiques; pour documenter les futurs travaux nationaux

• Quelle plus-value ?

- approche des trois composantes de la vulnérabilité (combustibilité, résistance, résilience), fondée sur une large consultation de la littérature et de l'expertise => info plus complète que la version actuelle de climEssence
- Des suites à donner à partir de cet état des lieux (dont thèse INRAE/ADEME et travaux nationaux)