



HAL
open science

La carte nationale de sensibilité de la végétation forestière aux incendies

Rémi Savazzi, Jean-Luc Kicin, Benoît Reymond

► **To cite this version:**

Rémi Savazzi, Jean-Luc Kicin, Benoît Reymond. La carte nationale de sensibilité de la végétation forestière aux incendies. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2022, 75, pp.12-23. hal-04152841

HAL Id: hal-04152841

<https://hal.science/hal-04152841v1>

Submitted on 5 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La carte nationale de sensibilité de la végétation forestière aux incendies

Se préparer au risque accru d'incendie, c'est aussi se donner des outils de diagnostic à l'échelle nationale. Les spécialistes ONF y travaillent, en collaboration avec INRAE et Météo-France. La cartographie de la sensibilité de la végétation aux incendies permet déjà une veille efficace au quotidien et ouvre des possibilités de modélisation pour anticiper les évolutions futures. Mais l'élaboration d'une telle carte est complexe et il reste encore beaucoup à faire pour évaluer au mieux les sensibilités effectives d'aujourd'hui et demain.

Le risque incendie de forêt en France a longtemps été considéré comme l'apanage de la forêt landaise et de la zone méditerranéenne, et il est depuis longtemps étudié et cartographié sur ces deux territoires. Cependant les effets du changement climatique se font sentir déjà depuis quelques années, et l'émergence de nombreux événements sur le reste du territoire métropolitain fait ressortir le besoin d'une évaluation nationale du risque d'incendie de forêt.

Une première étude interservices a été produite en 2010 pour répondre à ce besoin dans la mesure des éléments d'expertise mobilisables. Dix ans plus tard, les ministères de l'Agriculture et de l'Écologie ont octroyé de nouveaux financements pour permettre une mise à jour de ce travail. Les principes de la méthode et les premiers résultats ainsi que les analyses restant à mettre en œuvre sont présentés dans cet article.

Rappels sur l'étude initiale de 2010

La mission interministérielle sur l'extension des zones sensibles aux feux de forêts (appelée « mission Chatry ») a souhaité réaliser une approche cartographique nationale de cette extension, en faisant appel aux compétences de plusieurs organismes nationaux : l'ONF, l'IFN et Météo France.

L'approche s'est basée sur de nombreuses hypothèses qui restaient à préciser et les résultats ne pouvaient donc pas être considérés comme "la" vérité intangible et incontestable, mais comme un aperçu d'une situation assez plausible.

À partir de l'analyse des incendies passés significatifs hors région méditerranéenne lors de grandes années de sécheresse, et des connaissances empiriques de l'ONF sur les feux majeurs en région méditerranéenne, en particulier dans l'arrière-pays, il est apparu possible d'estimer la sensibilité au feu des formations forestières, en tenant compte notamment de leurs conditions stationnelles particulières.

Les principales hypothèses reposaient sur une analyse des seuls incendies estivaux, en se basant sur les formations en place dont la sensibilité potentielle ne s'exprimerait que dans les zones qui auraient à l'horizon 2040 des conditions de danger météorologique d'incendie équivalentes à celles du moyen pays méditerranéen au début des années 2000. Ces conditions ont été approchées à partir d'analyses statistiques et de simulations aux horizons 2040 et 2060 de l'Indice Forêt Météo (IFM), indice composite calculé par Météo France à partir de données météorologiques simples et destiné à la prévision du danger d'incendie (voir encadré).

Cette étude innovante (Fig. 1) avait cependant un certain nombre de manques, d'incertitudes et d'approximations découlant d'hypothèses parfois réductrices et de la disponibilité voire de la qualité des données utilisées (difficulté de trouver à l'échelle nationale des données à la fois homogènes, précises et récentes). Plusieurs pistes d'amélioration avaient alors été identifiées, dont :

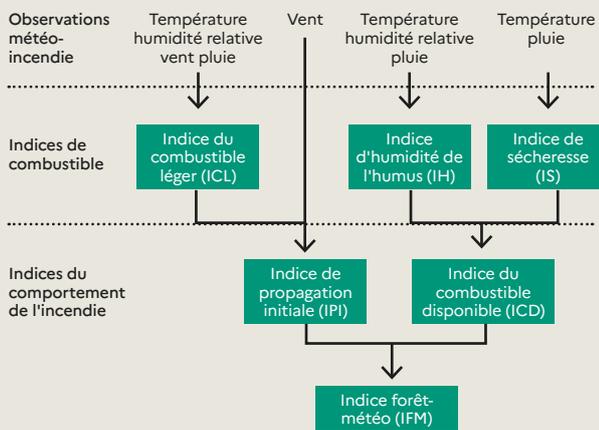
- l'amélioration de la cartographie de la végétation,
- l'amélioration de l'évaluation des réserves en eau des sols,
- la prise en compte des feux d'hiver,
- la prise en compte des feux de culture,
- la prise en compte des risques de dépérissement,
- la prise en compte des nouveaux scénarios du GIEC,
- la prise en compte de divers indices météorologiques.

L'Indice Forêt Météo

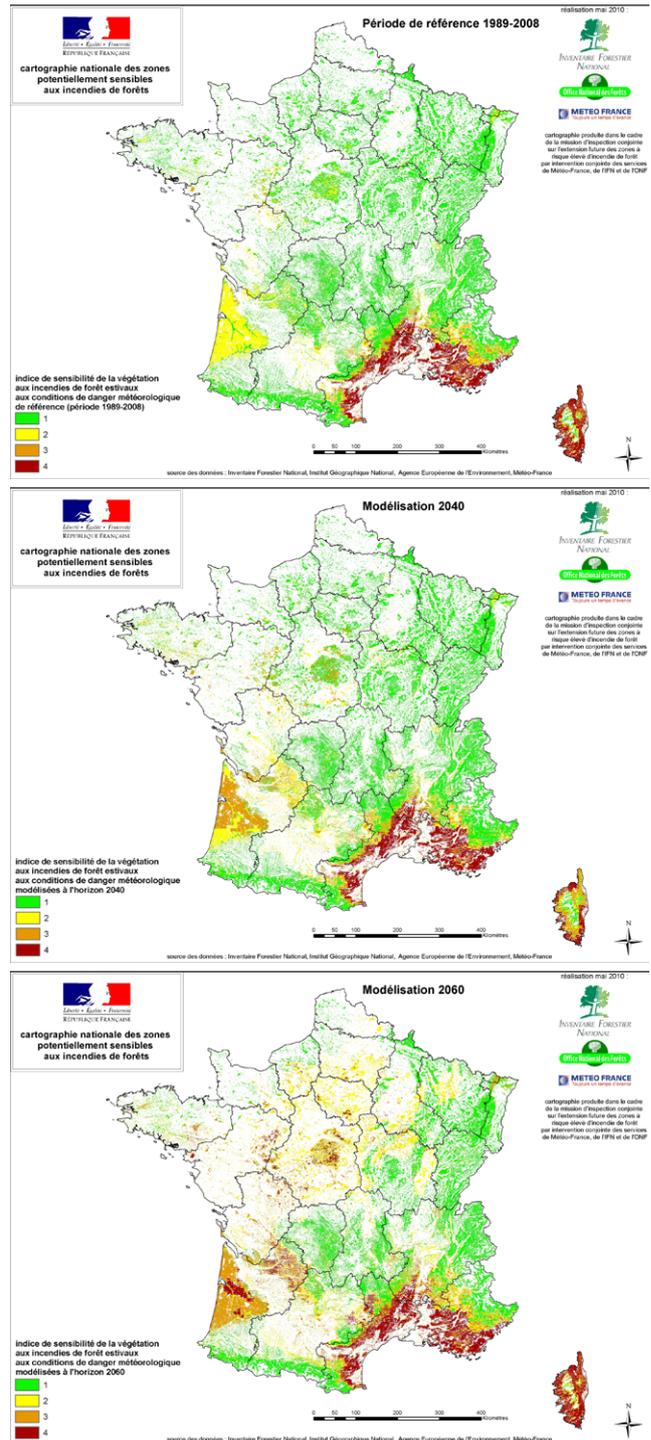
L'Indice Forêt Météo (IFM ou FWI en anglais) a été développé dans les années 1970 au Canada sur la base d'un modèle empirique. Il est calculé de façon itérative (la valeur du jour dépend de celle du jour précédent) à partir de paramètres météorologiques de base (température, humidité de l'air, vent, précipitations) intégrés dans cinq composantes intermédiaires qui décrivent la teneur en eau des combustibles et le comportement des incendies (cf. schéma).

Il est depuis utilisé dans le monde entier, dans des versions parfois adaptées, pour réaliser des prévisions de risque d'incendie. Météo-France utilise cet indice et ses composantes, combinés à d'autres indices développés localement, dans ses prévisions quotidiennes de danger d'incendie de forêt.

Les trois premières composantes traduisent la teneur en eau des combustibles en lien avec différentes couches du sol. De façon simplifiée pour une analyse opérationnelle telle qu'utilisée en France, L'ICL traduit la sécheresse superficielle en lien avec la teneur en eau de la litière et des herbacées et qui influe sur le risque d'éclosion (ou anciennement *propagation initiale*), l'IH traduit la sécheresse des premières couches du sol en lien avec la teneur en eau de la strate arbustive basse et qui influe sur le risque de propagation, et l'IS traduit la sécheresse des couches plus profondes du sol en lien avec la teneur en eau des strates arbustive haute et arborée et qui influe sur le risque de propagation de feux importants.



↑ Schéma de principe du calcul de l'Indice Forêt Météo



↑ Figure 1. Exemple de résultat de l'étude de 2010 : cartes de l'indice de sensibilité de la végétation aux incendies estivaux pour la période de référence (1989-2008) et aux horizons 2040 et 2060.

Méthode 2021 pour la carte nationale de sensibilité de la végétation forestière

La partie « socle » de la nouvelle étude, réalisée en 2020-2021, consiste en l'élaboration d'une carte nationale de sensibilité de la végétation, destinée à être croisée avec des conditions climatiques.

À ce stade, comme en 2010, seuls les incendies estivaux sont pris en compte. En effet les connaissances actuelles encore partielles sur les feux hivernaux et les possibilités de cartographie des facteurs impliqués ne permettent pas de proposer immédiatement une modélisation fiable de ce phénomène à l'échelle nationale.

Les incendies estivaux concernent des formations forestières en saison de végétation. Leur sensibilité est fonction de la structure du peuplement, des essences présentes, mais aussi de la teneur en eau de la litière, des herbacées et majoritairement des parties fines et vivantes de la végétation arbustive et arborée (dont l'état d'hydratation dépend en grande partie des réserves en eau du sol). Cette sensibilité est donc modélisable en fonction du type de peuplement, de la station (en particulier de ses réserves en eau potentielles), et des conditions climatiques, facteurs eux-mêmes possibles à approcher à l'échelle de l'étude.

En premier lieu, il s'agit d'évaluer la **sensibilité potentielle** des formations végétales pour une sécheresse forte, c'est-à-dire pour des conditions de sécheresse théoriques uniformes équivalentes à celles rencontrées habituellement dans le moyen pays méditerranéen.

Ensuite, la prise en compte des conditions stationnelles repose sur l'hypothèse que cette sensibilité potentielle va s'exprimer de façon plus ou moins marquée en fonction de la réserve en eau des sols. Il en résulte une nouvelle notion baptisée **sensibilité brute**, indépendante des conditions climatiques par construction et qui ne s'exprime que si les formations sont effectivement exposées à une sécheresse forte.

La confrontation avec les conditions climatiques permet enfin d'obtenir une **sensibilité effective** de la végétation aux incendies estivaux. Plusieurs approches de ces conditions climatiques peuvent être utilisées, pour différents usages :

- application des conditions moyennes de sécheresse de la période de référence permettant d'obtenir l'indice de sensibilité effective actuelle ;
- recours aux simulations climatiques disponibles pour telle ou telle période future afin d'évaluer la sensibilité effective en tenant compte des effets du changement climatique ;
- croisement avec des prévisions quotidiennes d'indices météorologiques pour estimer une sensibilité effective opérationnelle, permettant de dimensionner d'éventuelles mesures de prévention ou les dispositifs de lutte.

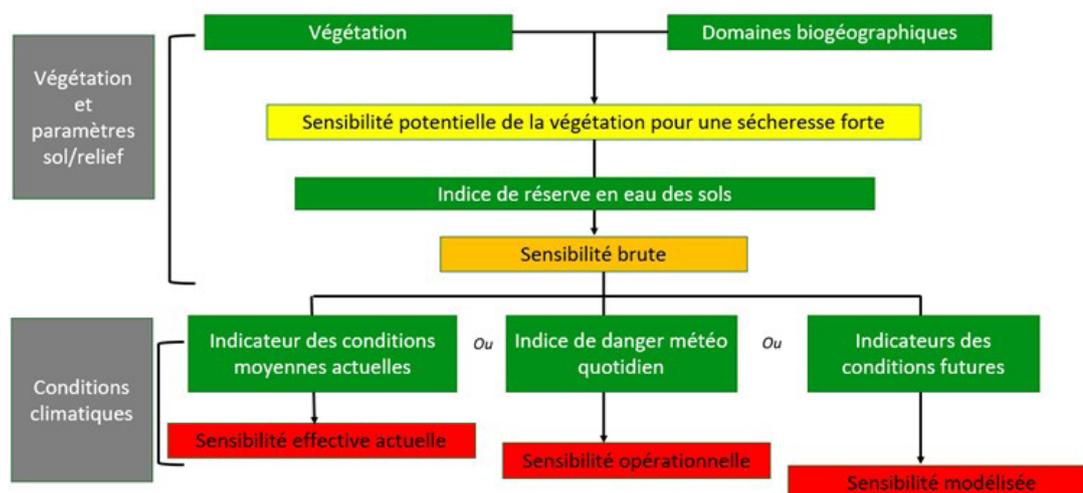
Les trois étapes de cette méthodologie peuvent être résumées par un schéma (Fig. 2) qui positionne les différentes notions de sensibilité décrites précédemment et donne le cadre général de l'exposé plus détaillé qui suit.

La sensibilité potentielle

La première étape de la méthode repose par nécessité sur les hypothèses suivantes :

- la végétation reste telle qu'elle est actuellement ;
- sa sensibilité à une sécheresse théorique forte s'évalue à dire d'expert en se référant aux observations dans l'arrière-pays méditerranéen et sur quelques événements documentés hors méditerranée.

Le travail consiste à établir une carte de végétation sur toute la France métropolitaine puis à classer les différents peuplements forestiers en 5 niveaux de sensibilité potentielle aux incendies estivaux. Le domaine biogéographique est également considéré pour tenir compte des réalités différentes que recouvre une même appellation de type de végétation.



← Figure 2. Schéma récapitulatif de la méthodologie d'élaboration d'une carte nationale de sensibilité de la végétation forestière aux incendies, en 3 étapes. En vert, les données d'entrée ; en jaune, orange et rouge, la notion de sensibilité cartographiée par étape

■ Cartographie des types de végétation

Les données cartographiques sur la végétation à l'échelle nationale sont issues de diverses sources. La principale et la plus homogène est la BDForêt® V2 de l'IGN-IFN. Pour pouvoir préciser les noms des espèces, pas toujours identifiées, elle a été complétée par des données de la BD Forêt® V1 et des points d'inventaires de l'IGN-IFN.

Ces bases de l'IGN-IFN portent essentiellement sur les types forestiers, et sont parfois incomplètes ou imprécises sur les milieux ouverts (landes, garrigues, maquis, pelouses, friches...). Aussi, afin d'obtenir une couverture aussi complète que possible de la végétation, ces données initiales ont été enrichies en intégrant certains types provenant de la BD Topo® de l'IGN (2020) et des données provenant du Centre d'Expertise Scientifique « occupation des sols » du pôle Theia, une structure scientifique et technique groupant 11 institutions publiques impliquées dans l'observation de la terre : données (2018) issues entre autres de la classification d'images optiques multi-temporelles à haute résolution spatiale.

Ces données de végétation sont disponibles soit en format vectoriel (BD Forêt®, BD Topo®) soit en format raster (CES occupation des sols) ; pour faciliter les calculs et les croisements avec les autres facteurs, elles ont toutes été transformées en format raster, en pixels de 10 m sur 10 (format d'origine du CES).

Ce travail a permis par regroupements et compléments d'obtenir une quarantaine de types de végétation cartographiés sur l'ensemble du territoire.

■ Déclinaison par domaines biogéographiques et notation

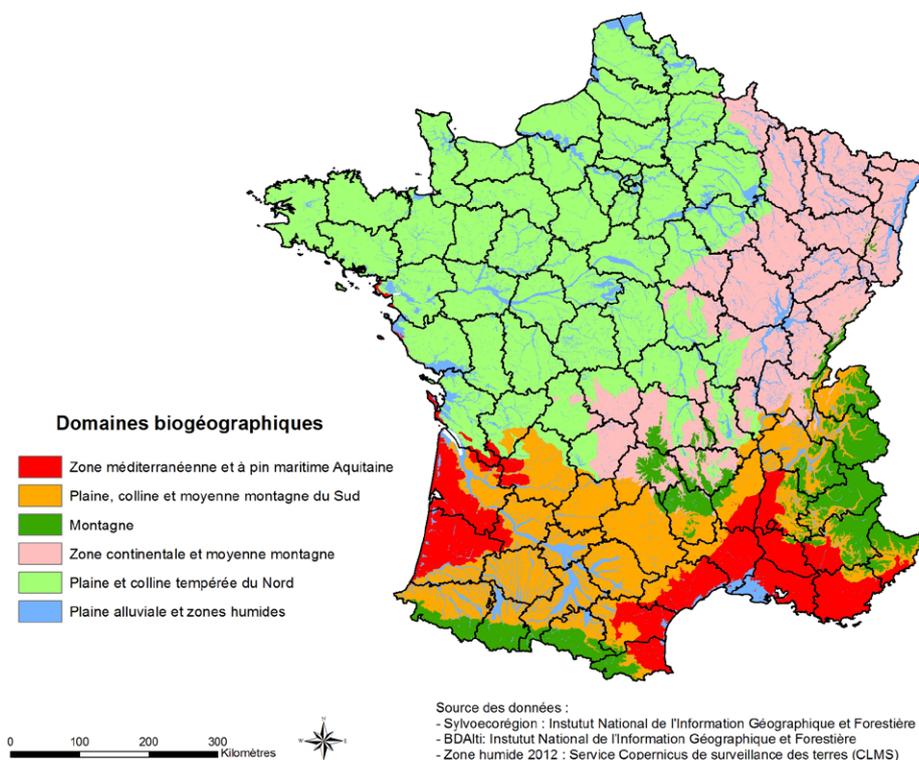
Un même type de végétation forestière n'a pas forcément le même faciès (structure de peuplement, nature des différentes strates...) selon sa localisation sur le territoire et donc pas forcément la même sensibilité. Afin de prendre en compte ces variabilités, il a donc été nécessaire de croiser le travail précédent avec une carte des domaines biogéographiques.

À partir des sylvoécotéorégions de l'IGN-IFN, qui prennent en compte les facteurs déterminant la production forestière et la répartition des grands types d'habitats forestiers, ont été créés 6 domaines biogéographiques représentés sur la carte ci-après (Fig. 3) :

- un domaine de montagne regroupant les sylvoécotéorégions « Alpes » et « Pyrénées » ainsi que les zones situées hors de ces massifs montagneux mais à plus de 1000 m d'altitude ;
- quatre domaines géographiques par regroupement de sylvoécotéorégions, pour leur partie située à moins de 1000 m d'altitude ;
- un domaine des zones alluviales et des zones humides, déterminé en utilisant des données mises à disposition par le service Copernicus (Programme européen d'observation de la Terre).

Ces données sont produites en format vectoriel avec une précision au 1/25 000. Les polygones ont été transformés en pixel de 10 m sur 10, mais la précision géographique reste celle du 1/25 000.

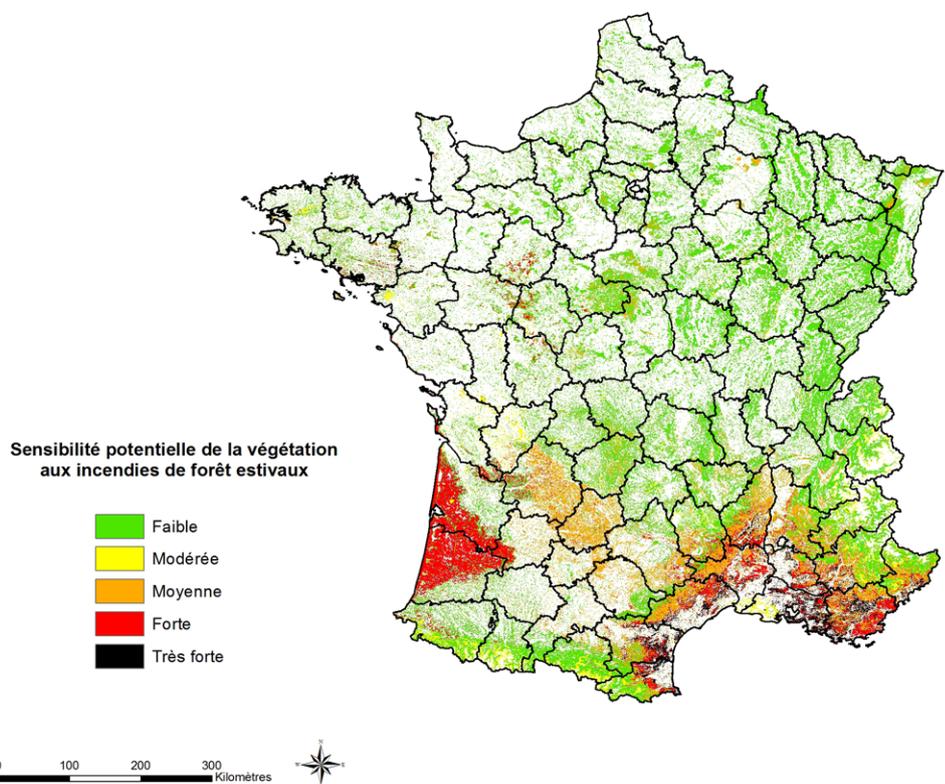
L'attribution du niveau de sensibilité potentielle se fait enfin, pour chaque type de peuplement, selon le domaine biogéographique (Tab. 1 et Fig. 4).



← **Figure 3.**
 Les domaines biogéographiques créés pour appréhender les différents faciès des types de végétation forestière.

Type de formation	Domaines biogéographiques				
	Zone méditerranéenne et à pin maritime Aquitaine	Plaine, colline et moyenne montagne du Sud	Plaine et colline tempérée du Nord	Zone continentale et moyenne montagne	Montagne, plaine alluviale et zones humides
Pin Alep	Très forte	Forte	Forte	Moyenne	Modérée
Lande ligneuse	Très forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Modérée
Forêt ouverte	Très forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Modérée
Pin maritime	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Modérée
Chêne vert	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Chêne liège	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Pin Parasol	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Forêt fermée sans couvert arboré	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Forêt ouverte conifères	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Forêt ouverte feuillus	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Forêt ouverte mixte	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Forêt ouverte sans couvert arboré	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Eucalyptus	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Arbousier	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée
Pin sylvestre	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible
Pin laricio, pin noir	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Modérée	Faible
Cèdre	Moyenne	Moyenne	Modérée	Modérée	Faible
Chêne pubescent, Chêne liège	Moyenne	Moyenne	Modérée	Modérée	Faible
Chêne pubescent, Chêne vert	Moyenne	Moyenne	Modérée	Modérée	Faible
Chêne pubescent	Moyenne	Moyenne	Modérée	Modérée	Faible
Chataignier	Moyenne	Moyenne	Modérée	Modérée	Faible
Lande herbacée	Moyenne	Moyenne	Modérée	Modérée	Faible
Chêne pubescent, Chataignier	Moyenne	Moyenne	Modérée	Modérée	Faible
Chêne pubescent, Hêtre	Modérée	Faible	Faible	Faible	Faible
Hêtre, Chataignier	Modérée	Faible	Faible	Faible	Faible
Douglas	Modérée	Faible	Faible	Faible	Faible
Meleze	Modérée	Faible	Faible	Faible	Faible
Pin à crochets, pin cembro	Modérée	Faible	Faible	Faible	Faible
Sapin, Epicéa	Modérée	Faible	Faible	Faible	Faible
Forêt fermée mixte	Modérée	Faible	Faible	Faible	Faible
Forêt fermée de conifères	Modérée	Faible	Faible	Faible	Faible
Chêne rouvre - pédonculé	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Chêne-Hêtre	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Bouleau - Saule	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Charme-houblon	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Frêne - Erable	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Robinier	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Hêtre	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Forêt fermée de feuillus	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Peupleraie	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Chêne rouvre - pédonculé, Chataignier	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible

← **Tableau 1.** Indice de sensibilité potentielle des types de végétation décliné par domaine biogéographique.



← **Figure 4.** Carte de la sensibilité potentielle de la végétation aux incendies estivaux

La sensibilité brute

La notion de sensibilité brute a pour objectif la prise en compte des facteurs qui favorisent le dessèchement des végétaux, en les intégrant dans un indice de réserve en eau du sol. Cet indice est un facteur majorant ou minorant qui part du principe que la sensibilité potentielle s'exprime plus ou moins fortement en fonction de la vitesse de dessèchement du sol.

■ Réserve utile maximale des sols forestiers

La réserve en eau utile des sols est une grandeur complexe à estimer et à cartographier car conditionnée par de nombreux paramètres comme la texture, la profondeur de prospection des racines, la charge en cailloux ou encore la densité apparente. À l'échelle nationale, il n'existe que quelques données disponibles à des échelles très variables.

Dans le cas présent, il a été choisi de l'approcher en utilisant la cartographie de réserve utile maximale des sols forestiers (RUM), produite en 2012 par l'UMR SILVA (AgroParisTech, INRAE, Université de Lorraine) en collaboration avec IGN.

Contrairement à la réserve en eau du sol (RU), qui représente l'eau réellement disponible dans le sol pour des conditions climatiques données, la RUM représente la quantité d'eau maximale que peut contenir le sol. Les données, notices et limites d'utilisation sont disponibles via la [plateforme SILVAE](#).

Ces données sont disponibles sur l'ensemble du territoire national par pixel de 500 mètres, ce qui leur donne une assez faible précision géographique, mais cela reste bien meilleur que les seules données géologiques au 1/1 000 000 utilisées dans l'étude de 2010. Pour les besoins des calculs, les pixels de 500 mètres ont été redécoupés en pixels de 10 mètres, sans interpolation.

Et pour des raisons opérationnelles, les données brutes ont été regroupées, à dire d'expert, en 3 classes :
Favorable : réserve en eau maximale (RUM) favorable, permettant une bonne alimentation en eau de la plante et limitant son dessèchement estival.
Moyenne : RUM « neutre » au niveau du dessèchement de la végétation.
Défavorable : RUM faible, accélérant le dessèchement de la végétation.

■ L'ensoleillement facteur d'assèchement

L'ensoleillement, aussi appelé insolation, est la mesure du rayonnement solaire que reçoit une surface au cours d'une période donnée.

En un lieu donné, il dépend de nombreux paramètres : coordonnées géographiques (qui influent sur les heures de lever et de coucher du soleil), effets topographiques (ombrage des reliefs proche et lointain), phénomènes météorologiques (nuages, brouillard).

À ce stade, les paramètres météorologiques ne sont pas pris en compte et les calculs sont faits sur une durée donnée (dans notre cas sur l'année complète) pour un temps clair permanent, ce qui conduit à un calcul d'ensoleillement maximal.

Pour la prise en compte des reliefs et altitudes, ce sont les données du modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN au pas de 50 m qui ont été utilisées pour les calculs. Le résultat brut est donc une cartographie en classes d'ensoleillement maximal, par pixels de 50 mètres, redécoupés en pixels de 10 mètres sans interpolation.

Là encore, les résultats ont été groupés en 3 classes. Les zones de fort ensoleillement subissent un plus fort dessèchement que les autres et la classe qui les réunit a été qualifiée de « favorable au dessèchement » ; à l'opposé, la classe des faibles valeurs d'ensoleillement a été qualifiée de « favorable à la conservation de l'eau ». Quant à la classe intermédiaire, elle est dite « neutre »

Noter que l'utilisation du MNT de l'IGN au pas de 50 mètres ne permet pas de distinguer les microreliefs locaux, et de ce fait, les zones de faible et fort ensoleillement apparaissent principalement dans les massifs montagneux.

■ Croisements : l'indice de réserve en eau des sols et la sensibilité brute

L'indice de réserve en eau des sols résulte de la combinaison des classes de réserve utile maximale et des classes d'ensoleillement maximal et s'exprime lui-même en trois niveaux : favorable, neutre ou défavorable (Tab. 2). Croisé ensuite avec la sensibilité potentielle, il applique une modulation atténuante, neutre ou aggravante dont découlent les 5 classes de sensibilité brute de la végétation forestière aux incendies (Tab. 3) (Fig. 5).

INDICE DE RÉSERVE EN EAU DES SOLS			
Réserve utile maximale des sols forestiers (RUM)	Ensoleillement		
	Favorable à la conservation en eau	Neutre	Favorable au dessèchement
Favorable	Favorable	Favorable	Neutre
Moyenne	Neutre	Neutre	Défavorable
Défavorable	Neutre	Défavorable	Défavorable

↑ **Tableau 2.** Détermination de l'indice de réserve en eau des sols, d'après les classes de RUM et d'ensoleillement.

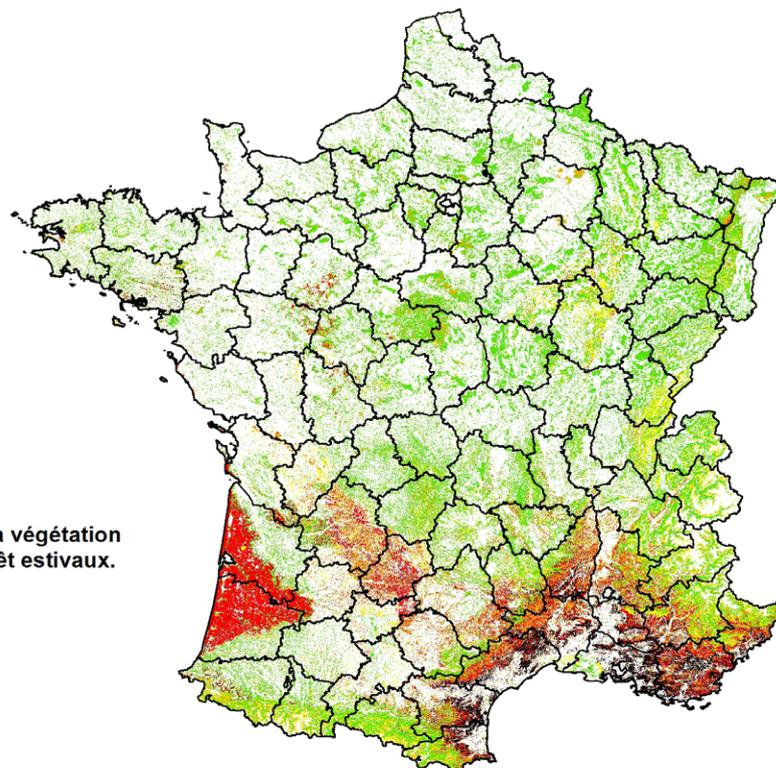
INDICE DE SENSIBILITÉ BRUTE DE LA VÉGÉTATION AUX INCENDIES DE FORÊT ESTIVAUX			
Indice de sensibilité potentielle de la végétation aux incendies de forêt estivaux	Indice de réserve en eau des sols		
	Favorable	Neutre	Défavorable
Faible	Faible	Faible	Modérée
Modérée	Faible	Modérée	Moyenne
Moyenne	Modérée	Moyenne	Forte
Forte	Moyenne	Forte	Très forte
Très forte	Forte	Très forte	Très forte

↑ **Tableau 3.** L'indice de sensibilité brute résulte d'une modulation de la sensibilité potentielle par l'indice de réserve en eau des sols.



© John Bersi

↑ Forêt de pin d'Alep en zone méditerranéenne sur sol aride : sensibilité brute forte à très forte.



← **Figure 5.** Carte de la sensibilité brute de la végétation aux incendies estivaux

Sensibilité brute de la végétation aux incendies de forêt estivaux.



0 100 200 300 Kilomètres



Regroupements géographiques : sensibilité brute par massif

Le résultat des étapes précédentes est produit en pixels de 10 m mais les incertitudes décrites au fur et à mesure sur la précision de la donnée conduisent à recommander une utilisation de la valeur obtenue au pixel avec la plus grande prudence. Ce travail, valable pour une approche homogène à l'échelle de la France entière, n'est certainement plus valable si on zoome à l'échelle de la parcelle.

Aussi pour une approche plus globale il est pertinent synthétiser cette donnée selon des entités géographiques de petite à moyenne taille, par exemple par régions IFN, massifs ou forêts. Les cartes des petites régions IFN ou des forêts relevant du régime forestier existent déjà, mais une carte des massifs a été créée spécifiquement pour cette étude (selon une approche uniquement cartographique).

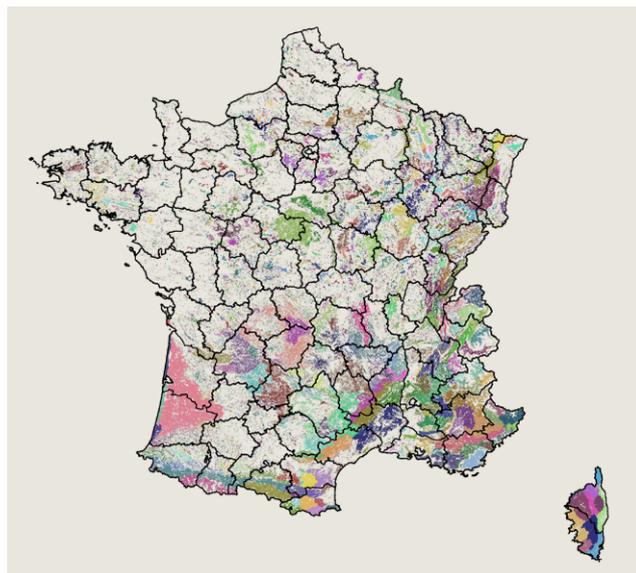
Les massifs forestiers ont été définis à partir de la cartographie des types de végétation nationale initialement créée. De cette donnée sont conservées les formations forestières et les landes et sont éliminés l'eau, le minéral, les formations agricoles, les pelouses, les haies... Les entités de moins de 4 ha sont mises de côté et on regroupe celles qui restent et qui se situent à moins de 100 m les unes des autres. De ces regroupements, ne sont conservés que ceux qui ont une surface de plus de 20 ha, auxquels on raccroche les entités de moins de 4ha se trouvant à moins de 100 m.

Enfin pour éviter d'avoir d'immenses entités d'un seul tenant, les massifs de plus de 100 000 ha sont redécoupés selon les petites régions forestières de l'IFN

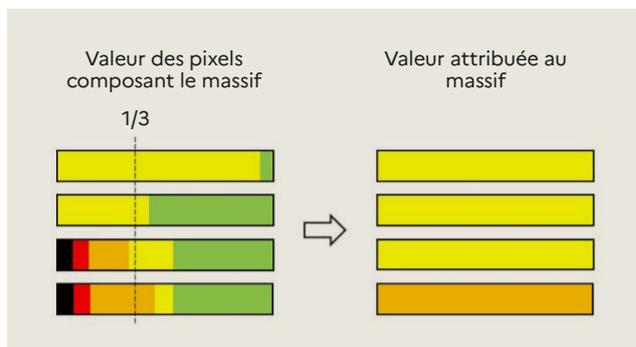
Les massifs ainsi définis dans cette étude sont donc des regroupements d'entités de végétation situées à moins de 100m les unes des autres faisant ensemble au moins 20 ha, et situées à plus de 100 m d'un autre massif défini de la même façon (Fig. 6).

L'objectif de ces regroupements est de **mettre en évidence le risque dominant** au sein de l'entité regroupée, en veillant à identifier les entités les plus sensibles aux incendies estivaux. Le calcul de moyenne a tendance à effacer les valeurs les plus hautes et les plus basses, et ne peut donc pas satisfaire à cet objectif. Une possibilité serait de retenir pour l'entité la valeur de sensibilité la plus représentée ; mais on sait d'expérience qu'il s'agit souvent, au moins dans les espaces moyennement sensibles aux incendies, d'une des valeurs les plus basses. Cette possibilité a donc aussi été écartée.

Le choix retenu prend empiriquement pour hypothèse qu'un massif forestier se comporte globalement vis-à-vis des incendies comme le tiers de sa surface la plus sensible. Pour chaque entité (région IFN, massif ou forêt), le niveau de sensibilité qui lui est affecté est donc celui qui est égalé ou dépassé sur au moins 1/3 de sa surface (cf. schéma de principe Fig. 7).



↑ **Figure 6.** Carte des massifs forestiers constitués pour une approche pertinente de la sensibilité de la végétation forestière.



↑ **Figure 7.** Principe de l'attribution du niveau de sensibilité à un massif forestier : c'est le niveau qui est égalé ou dépassé sur 1/3 de la surface.

Sensibilité effective : premières évaluations

Une fois la sensibilité brute théorique définie, on prend l'hypothèse qu'elle ne s'exprime géographiquement et temporellement que lors des fortes sécheresses. Pour cela il faut la croiser avec des données météorologiques. Plusieurs approches sont possibles, à des échelles de temps différentes selon l'objectif qu'on poursuit. Deux premières utilisations sont décrites ci-après, l'une répondant à une approche globale pour une période donnée, et l'autre à des besoins d'évaluation quotidienne.

■ Sensibilité effective actuelle à l'échelle nationale

La première utilisation consiste à définir une sensibilité correspondant aux conditions climatiques moyennes observées sur une période de référence. Cette approche statistique permet de comparer les territoires entre eux en leur affectant une sensibilité la plus probable, mais ne traduit pas forcément le risque exceptionnel (au sens statistique du terme) d'avoir une année ou une courte période avec une sensibilité plus élevée.

Pour définir ces conditions moyennes, en attendant les résultats de travaux plus détaillés en cours de réalisation par Météo-France, un indicateur a été retenu : le nombre de jours sur la période référence de 30 ans au cours desquels la composante IS de l'IFM (cf. encadré p. 13) est supérieure à 700. Cette valeur représente empiriquement le début du niveau de sécheresse très forte (seuil issu de l'analyse des feux significatifs estivaux en région méditerranéenne).

Cet indicateur est réparti comme suit en 3 classes, le niveau de la classe 3 ayant été déterminé de façon à bien discriminer zone méditerranéenne (Fig. 8) :

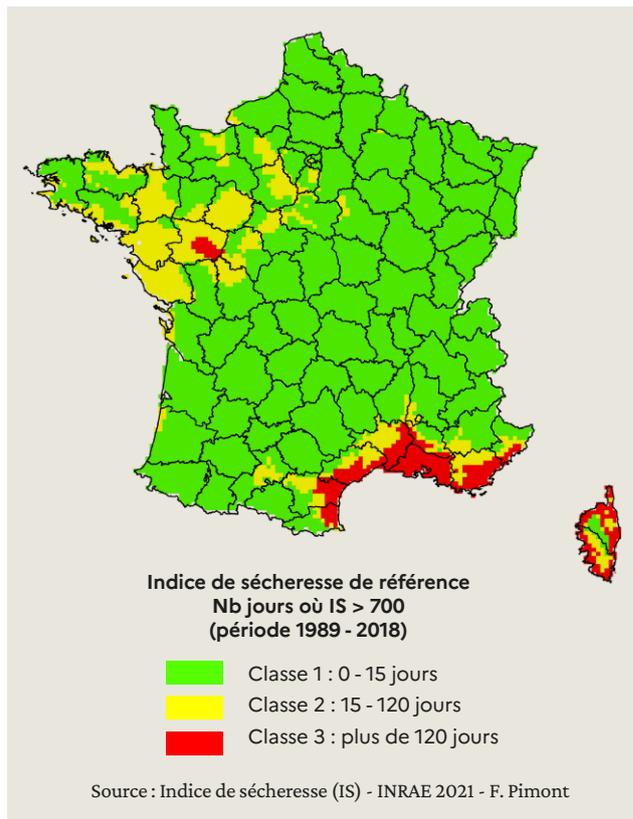
Classe 1 : moins de 15 jours sur la période soit moins d'un jour tous les 2 ans ; probabilité très faible d'avoir une période de sécheresse très forte

Classe 2 : 15 à 120 jours sur la période soit entre un jour tous les 2 ans et 4 jours par an

Classe 3 : plus de 120 jours par an sur la période soit plus de 4 jours par an en moyenne ; probabilité importante d'avoir quelques jours de sécheresse très forte chaque année mais aussi d'avoir des périodes assez longues sur certaines années

Pour mémoire d'autres indicateurs ont été testés : Bilan Hydrique Climatique (donnée développée par le réseau R&D de l'ONF) ou indicateur de fréquence d'IFM moyen sur la saison dépassant un certain seuil utilisé dans l'étude de 2010, mais les tests ont été moins concluants car permettant moins de discriminer les territoires.

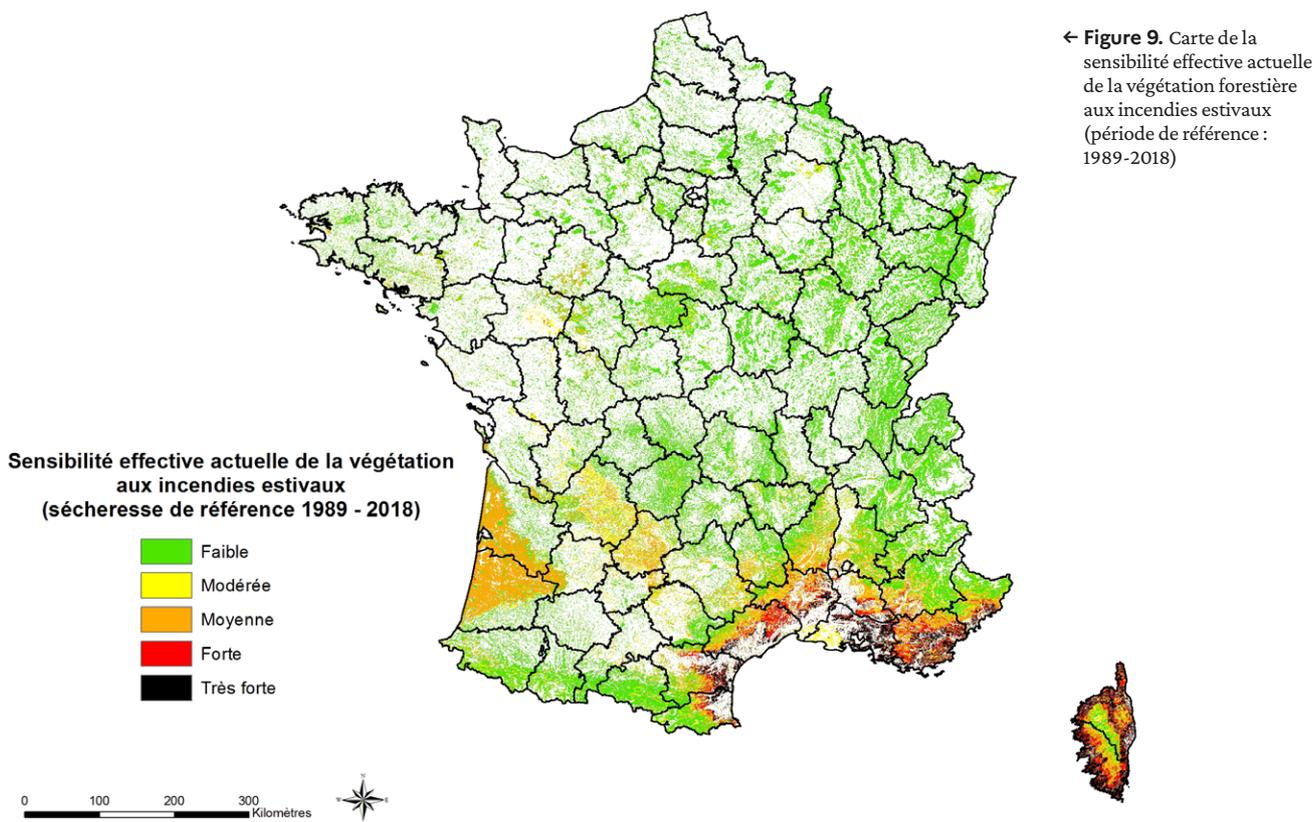
La sensibilité effective pour la période de référence 1989-2018 est ensuite définie en croisant les 3 classes de notre indicateur de sécheresse avec la sensibilité brute de la végétation forestière aux incendies estivaux (Tab. 4) (Fig. 9).



↑ **Figure 8.** Carte de l'indice de sécheresse de référence (= nombre de jours où IS > 700 sur la période 1989-2018).

INDICE DE SENSIBILITÉ DE LA VÉGÉTATION AUX INCENDIES ESTIVAUX AUX CONDITIONS DE SÉCHERESSE DE RÉFÉRENCE (1989 - 2018)			
Indice de sensibilité brute de la végétation aux incendies de forêt estivaux	Indice de sécheresse de référence (Nombre de jours d'IS > 700 sur la période 1989 - 2018)		
	Classe 1 (0 - 15 jours)	Classe 2 (15 - 120 jours)	Classe 3 (plus de 120 jours)
Faible	Faible	Faible	Modérée
Modérée	Faible	Modérée	Modérée
Moyenne	Modérée	Moyenne	Moyenne
Forte	Moyenne	Moyenne	Forte
Très forte	Moyenne	Forte	Très forte

↑ **Tableau 4.** Détermination de la sensibilité effective actuelle de la végétation forestière aux incendies estivaux, d'après la sensibilité brute et l'indice de sécheresse de référence.

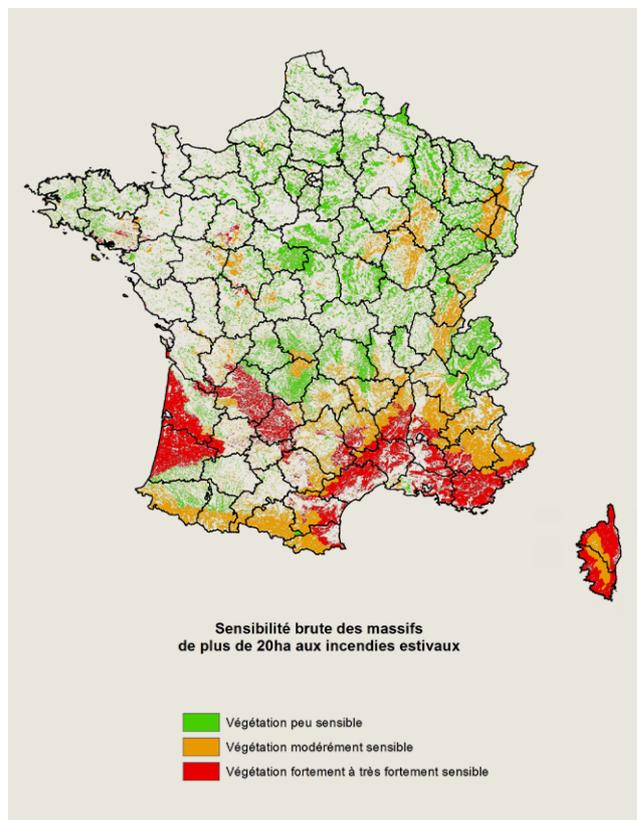


← **Figure 9.** Carte de la sensibilité effective actuelle de la végétation forestière aux incendies estivaux (période de référence : 1989-2018)

Veille du risque quotidien

Une autre utilisation possible dès à présent consiste à avoir une approche quotidienne des conditions météorologiques dans le cadre d'une prévision du risque.

La carte de sensibilité brute a été établie en version regroupée par massif (ou par forêt relevant du régime forestier) et simplifiée en 3 classes au lieu de 5, pour des besoins de facilité de lecture opérationnelle, à l'intention des membres du réseau de référents DFCI hors méditerranée. Elle leur sert à analyser localement le risque quotidien, notamment pour décider la mise en œuvre de mesures de prévention adaptées. Le principe, décrit dans une fiche réflexe mise à disposition des référents, consiste à croiser cette carte (Fig. 10) avec celle de l'indice de « danger intégré » produite quotidiennement et automatiquement à l'échelle nationale par Météo-France. Cela permet, quand le danger météorologique est élevé, de cibler certaines mesures contraignantes sur les massifs ou les forêts identifiés à risque. Ce croisement est actuellement fait de façon visuelle mais il est prévu à court terme une transmission par Météo-France de données géoréférencées afin de le réaliser par SIG.



↑ **Figure 10.** Sensibilité brute aux incendies estivaux par massif, simplifiée en 3 classes, à croiser avec l'indice de danger de Météo France pour la veille du risque au quotidien

Incertitudes - Limitation d'usage

Malgré des progrès importants dans les connaissances au cours de la décennie écoulée, de nombreux facteurs sont encore mal estimés, ou à minima répartis en classes de manière empirique, à dire d'expert. Cela introduit des marges d'incertitudes qui peuvent conduire pour la plupart des facteurs à des écarts possibles d'une classe par rapport aux valeurs retenues. C'est en particulier le cas pour l'évaluation de l'indice de sensibilité potentielle de la végétation : malgré la déclinaison dans 5 domaines biogéographiques, des incertitudes persistent pour certaines formations végétales.

D'autre part, pour les facteurs qui mettent en jeu la qualité des sols et/ou la topographie, la précision géographique est relativement faible, et de ce fait des écarts sont possibles, en particulier sur les bordures des pixels de base (avant redécoupage à 10 m).

En conclusion, le choix de procéder aux calculs par pixel de 10 mètres a été guidé par le souci d'une transcription géographique « lisible » et cohérente avec les limites physiques ; mais il conduit dans le résultat final à un risque d'écart sur le pixel : écart d'une classe (sur 5 classes) difficile à quantifier mais certainement conséquent (probablement de l'ordre de 20 à 25% des pixels), voire de 2 classes dans une minorité de cas (probablement moins de 5%), cumulé à de possibles écarts géographiques.

Cela signifie que ces résultats par pixels de 10 mètres ne peuvent être utilisés directement et appliqués sur le terrain à l'échelle de la parcelle. On doit donc les considérer comme des tendances, dont seuls les regroupements par entités beaucoup plus vastes sont pertinents (au moins 20 à 25 hectares, avec un degré de confiance fort au-delà de 100 hectares).

Les travaux qui restent à poursuivre

Les résultats des travaux présentés dans cet article sont déjà opérationnels mais ne répondent pas à tous les besoins d'amélioration identifiés lors de l'étude de 2010. D'autres travaux sont en cours ou à venir.

■ Cartographie de la sensibilité aux feux d'hiver et printemps

Comme indiqué précédemment, l'approche actuelle ne concerne que les feux d'été. Cependant la problématique des feux hors saison estivale devient aussi prégnante et nécessite d'être abordée. Même si les connaissances actuelles ne permettent pas forcément d'avoir une approche aussi fiable que pour les feux estivaux, il serait utile de produire une carte de sensibilité pour ces feux, en faisant certainement des hypothèses réductrices et des approximations, et en espérant pouvoir l'améliorer dans le futur comme c'est le cas actuellement avec l'étude de 2010.

Même si une partie des peuplements identifiés comme sensibles en été peuvent l'être aussi en hiver (peuplements ouverts, certains résineux), il est nécessaire de revoir le classement de certains autres. La problématique est d'identifier la nature du sous-bois, qui est souvent déterminant dans le comportement des feux hors saison estivale, afin de faire ressortir les formations sensibles (fougères, bruyères, ajonc, molinie, litières épaisses). Une piste est à l'étude en lien avec l'IGN-IFN pour une approche statistique à partir des données placettes d'inventaire.

Ainsi la sensibilité brute « printemps-hiver » pourrait être croisée avec des indices de sécheresse spécifiques, différents de ceux utilisés en été, pour définir une sensibilité effective « hors saison estivale ».

■ Prise en compte des risques de dépérissement

L'hypothèse selon laquelle la végétation actuelle reste en place est réductrice et mérite une approche différente. S'il est difficile de prévoir d'éventuels changements de végétation, une approche possible serait la prise en compte des risques de dépérissement de façon statistique et probabiliste à partir des cartes de compatibilité climatique de l'application [ClimEssences](#). L'hypothèse serait alors que les peuplements associés à une essence et situés dans une zone où cette essence ne serait plus compatible pourraient être, avec une certaine probabilité, exposés à des dépérissements.

Ceci amènerait à une mortalité partielle modifiant la structure du peuplement et créerait plus de milieux ouverts avec un sous-étage potentiellement à risque plus développé, majorant la sensibilité brute. Cependant il sera nécessaire de confronter cette hypothèse avec les travaux sur l'adaptation de la gestion forestière au changement climatique de façon à s'assurer que des choix de gestion ne risqueraient pas de conduire à un effet différent de celui envisagé.

■ Choix des indices météorologiques et modélisations futures

L'Etat a confié à Météo France le calcul de nombreux indices et statistiques : indices traduisant le comportement de la végétation morte (feux de printemps ou hiver et feux de récolte en été) ou vivante (feux estivaux), analyse sur l'année entière ou selon les saisons, moyennes d'indices sur une période ou nombre de jours de dépassements de seuils...

- en utilisant plusieurs modèles de prévision afin de fiabiliser les projections,
- pour 3 scénarios GIEC (optimiste/pessimiste/médian),
- pour une période de référence actuelle ainsi que pour 3 horizons définis sur des périodes de 30 ans donc statistiquement plus fiables que les périodes de 20 ans utilisées dans l'étude de 2010 : proche (2021-2050), moyen (2041-2070) et lointain (2071-2100).

Les résultats de ces calculs devraient être disponibles à l'automne 2022. Les experts de l'agence DFCI de l'ONF participeront ensuite au choix des indices et seuils les plus pertinents à retenir. Ces derniers seront alors recroisés avec la sensibilité brute afin de réviser la carte de sensibilité effective actuelle et de produire des cartes de sensibilité modélisée pour les différents scénarios et horizons.

À noter qu'INRAE est impliqué aux côtés de Météo-France et de l'ONF dans cette étude interservices. INRAE a construit un modèle probabiliste à partir des statistiques historiques des feux, qui intègre des facteurs structurels (liés généralement à l'occupation du sol) et des facteurs conjoncturels (liés à la météorologie). Il permet de définir en chaque point du territoire la probabilité d'occurrence d'un feu de plus d'un hectare ou la probabilité qu'un de ces feux dépasse un certain seuil de surface. Ce modèle sera utilisé pour aider à caler de façon objective les indicateurs à retenir et la définition des classes.

Conclusion

Pour travailler de façon homogène à l'échelle nationale, cette étude même améliorée par rapport à celle de 2010 a encore dû se baser sur un certain nombre d'hypothèses et d'approximations, souvent réductrices par rapport à une réalité beaucoup plus complexe. Ce travail permet déjà un certain nombre d'applications, mais présente encore des limites et des possibilités d'amélioration (dont certaines sont déjà identifiées).

Cette étude ne permet pas d'utiliser les résultats obtenus pour une analyse ponctuelle mais des travaux locaux plus approfondis peuvent s'en inspirer, avec l'aide méthodologique éventuelle des experts de l'agence DFCI.

Enfin les données sont disponibles en interne (en visualisation dans le webserveur « veille incendie » utilisé par les référents DFCI ou en format SIG auprès de l'agence DFCI) et ont été remises au ministère de l'agriculture qui en a financé la production dans le cadre de la MIG DFCI et qui en a assuré la diffusion auprès de DDT(M) via les DRAAF.

Rémi Savazzi⁽¹⁾, Jean-Luc Kicin⁽²⁾, Benoît Reymond⁽³⁾

1. ONF, expert national incendie, adjoint au directeur agence DFCI Midi-Méditerranée
2. ONF, agence DFCI Midi-Méditerranée, pôle DFCI Midi-Pyrénées
3. ONF, agence DFCI Midi-Méditerranée, pôle appui technique et SI

RÉFÉRENCES

• Chatry C., Le Quentrec M., Laurens D., Le Gallou J.Y., Lafitte J.J., Creuchet B., Grelu J., 2010. Rapport de la mission interministérielle Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts. Paris : CGEDD/CGAER/IGF. 190 p.
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/104000494/index.shtml>

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Yvon Duché, responsable de l'étude de 2010 et initiateur de celle-ci avant son départ en retraite, depuis laquelle il a encore pu donner quelques précieux avis. Nous remercions également les collègues de la direction et du Pôle Innovation, Appui Technique et Systèmes d'Information de l'agence DFCI pour leurs appuis, avis et contributions. Merci enfin aux partenaires d'INRAE (notamment François Pimont) et de Météo-France (notamment Mathieu Regimbeau) pour leur collaboration, ainsi qu'au ministère de l'Agriculture pour qui et avec lequel ces travaux ont été conduits.

