



Conception d'indices météorologiques pour prendre en compte le risque de sécheresse estivale dans la garantie de reprise des plantations

Avec le soutien financier de :



Auteurs : Clara Tallieu (INRAE), Catherine Collet (INRAE),
Jean-Pierre Renaud (ONF), Jonathan Pitaud (ONF)

Contributeurs : Bernard Boutte (MASA-DSF), Emmanuel Cacot (Unisylva),
Fabien Carouille (MASA-DSF), Loïc Cotten (Alliance Forêts Bois), Damien
François (Forêts et Bois de l'Est)

Octobre 2022

Pour citer ce rapport :

Tallieu Clara, Collet Catherine, Renaud Jean-Pierre, Pitaud Jonathan (2022). **Conception d'indices météorologiques pour prendre en compte le risque de sécheresse estivale dans la garantie de reprise des plantations.** *Rapport du programme « Reprise des plantations en climat changeant (REPLANT-CLIC) »*. 71 pages.

Table des matières

1. Remerciements	3
2. Résumé	3
3. Abstract	4
4. Contexte du projet	5
5. Objectifs et démarche	6
6. Matériels et méthodes	7
6.1. Matériels.....	7
6.1.1. Variable réponse : taux de mortalité des plants	7
6.1.2. Variables explicatives	18
6.2. Méthodes	25
6.2.1. Méthode d'analyse : Random Forest	25
6.2.2. Calibration à l'échelle nationale : DSF.....	26
6.2.3. Etude de cas : ONF et GCF	36
7. Résultats	36
7.1.1. Modélisation des mortalités de plants à l'échelle nationale (données du DSF)	36
7.1.2. Modélisation des mortalités de plants à partir des données des questionnaires.....	42
8. Quelles applications opérationnelles envisager ?	44
8.1. Quelle définition de la sécheresse exceptionnelle adopter ?	44
8.2. Simulation cartographique a posteriori de divers scénarios de garantie	48
8.2.1. A l'échelle nationale : données du DSF	48
8.2.2. A l'échelle régionale : forêts publiques de Franche-Comté et Haute-Marne	50
8.3. Autres considérations opérationnelles	51
8.3.1. La résolution spatiale	51
8.3.2. Les avantages d'une approche générique.....	51
8.3.3. Une expérience opérationnelle à l'ONF	52
8.3.4. La relativité de la définition des sécheresses dans le temps.....	52
8.3.5. Réflexions autour d'une redistribution des prises de risques.....	53
9. Limites de l'étude	54
10. Perspectives, suites à donner.....	55
11. Conclusions.....	56
12. Valorisations et diffusion des travaux	57
13. Références	58
14. Annexes	59

1. Remerciements

Ce rapport est le fruit du travail réalisé dans le cadre du programme « Reprise des plantations en climat changeant (REPLANT-CLIC) » qui a bénéficié du soutien financier de l'interprofession France Bois Forêt et du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire.

Nous remercions les organismes qui ont gracieusement fourni les données nécessaires aux analyses menées :

- Météo-France pour la fourniture de données Safran dans le cadre d'une licence « Enseignement Recherche » et du partenariat INRAE - Météo-France.
- L'unité de service AgroClim de INRAE, en particulier Benoît Persyn, qui joue un rôle essentiel d'intermédiaire avec Météo-France dans le cadre du partenariat entre les deux établissements.
- Le Département Santé des Forêts du Ministère de l'Agriculture pour la fourniture des données de son suivi annuel de la réussite des plantations de l'année grâce à la collaboration de Bernard Boutte et Fabien Carouille.
- Les organismes de gestion forestière ayant fourni des données de constats de reprise réalisés par leurs techniciens : Office national des forêts (en particulier Philippe Proudhon pour la Bourgogne-Franche-Comté et Jean-Baptiste Doridant pour la Haute-Marne), les coopératives forestières Alliance Forêts Bois (Loïc Cotten), Unisylva (Emmanuel Cacot) et Forêts et Bois de l'Est (Damien François, Alice Sabine).

Enfin, nous remercions le soutien institutionnel apporté au projet par l'Union nationale des entreprises du paysage (UNEP), la Fédération nationale Entrepreneurs des territoires (FNEDT), le Syndicat national des pépiniéristes forestiers (SNPF) et les Experts forestiers de France (EFF).

2. Résumé

Les sécheresses sévères qu'a connue la France ces dernières années ont occasionné des difficultés importantes de reprise des plantations forestières (Boutte 2021). Ces épisodes ont conduit la filière du reboisement à questionner les conditions contractuelles de garantie de reprise. Les pratiques en vigueur jusqu'alors pouvaient prévoir des conditions d'exclusion de la garantie pour des raisons météorologiques, notamment la sécheresse. Toutefois, celles-ci reposaient sur des définitions variables de la sécheresse et parfois jugées inadaptées.

Afin d'améliorer la reconnaissance de l'absence de responsabilité des entreprises de reboisement vis-à-vis des surmortalités induites par les sécheresses extrêmes, nous avons cherché à développer une nouvelle définition de ces événements susceptible d'être mieux partagée à l'échelle de la filière.

Nous avons testé 92 variables météorologiques candidates calculées par Météo-France à la résolution spatiale de 8 x 8 km. L'évaluation de leur pertinence a reposé sur l'analyse de leur capacité à prédire des taux de mortalité élevés à l'issue de la première saison de végétation des plantations. La modélisation de ces liens statistiques a été réalisée en mobilisant les données du suivi annuel national des plantations du Département de la santé des forêts couvrant la période de 2007 à 2021, sur une sélection de 16 essences forestières, étant les principales utilisées en reboisement en France. Ces analyses ont été complétées par l'utilisation de données régionales de reprise de plantations fournies par des gestionnaires forestiers. L'apport de ce second jeu de données nous a permis d'évaluer la robustesse des résultats obtenus à l'échelle nationale.

Ces analyses ont montré que la mortalité abiotique des plants est dépendante de l'essence considérée, certaines étant plus vulnérables que d'autres aux aléas de sécheresse. Elles nous ont aussi permis

d'identifier deux variables météorologiques particulièrement prometteuses du fait de leurs liens importants avec les mortalités de plants : l'indice standardisé de sécheresse des précipitations (en anglais, *standardised precipitation index*, SPI) et l'indice standardisé de sécheresse des sols (en anglais *standardised soil wetness index*, SSWI) tous deux concernant les trois mois d'été (juin, juillet et août). L'utilisation de ces deux indices, seuls ou combinés, nous apparaît être un choix pertinent en vue d'une définition générique de la sécheresse dans le cadre des garanties de reprise de plantations.

La définition contractuelle de la sécheresse nécessitant de choisir une règle d'utilisation des indices accompagnée d'un seuil de déclenchement de l'exclusion de garantie, nous avons réalisé une analyse de sensibilité afin d'appréhender, pour plusieurs combinaisons des SPI et SSWI d'été, l'effet de la valeur du seuil de déclenchement. Ces résultats nous permettent de fournir aux parties prenantes des éléments factuels sur les effets auxquels on peut s'attendre sur les fréquences d'exclusion de garantie au regard de scénarios rétrospectifs appliqués à la période couverte par les données (2007-2021). Cela devrait éclairer une négociation préalable à l'adoption de nouvelles pratiques dont nous discutons quelques implications opérationnelles.

3. Abstract

Severe droughts which occurred in France last years created strong difficulties of survival in forest plantings (Boutte 2021). These events incited the reforestation sector to challenge contractual conditions relative to the survival guarantee. The practices in use until then could include some exclusion conditions of guarantee for meteorological reasons, including drought. However, they were based on variable drought definitions, sometimes judged as inadequate.

In order to improve the recognition of the non-responsibility of reforestation companies with respect to over-mortality of seedlings induced by extreme droughts, we tried to develop a new definition of these events that could be better shared among the sector.

We tested 92 meteorological candidate variables calculated by Météo-France at a spatial resolution of 8 x 8 km. The assessment of their relevance was based on the analysis of their ability to predict high mortality rates at the end of the first growing season of the plantations. Prediction models were created using the data from the national annual survey of forest plantings led by the Département santé des forêts (forests health Département) covering the period from 2007 to 2021, on a selection of 16 forest species, being the most frequently used in reforestation in France. These analysis have been completed using survival rates data collected by forest managers at regional scale. The contribution of this second data set allowed us to evaluate the robustness of the results obtained at the national scale.

These analysis showed that abiotic mortality of seedlings depends on the species considered, some being more sensitive than others to drought risks. They also allowed us to identify two meteorological variables that are particularly promising having strong relationships with seedlings mortality rates : the standardised precipitation index (SPI) and the standardised soil wetness index (SSWI) both concerning the three summer months (June, July and August). Using these two indices, alone or combined, seems to us to be a relevant choice for a generic definition of drought regarding plantation survival guarantees.

As the contractual definition of severe drought requires the choice of a rule for the use of the indices together with a triggering threshold for the exclusion of the guarantee, we carried out a sensitivity analysis in order to understand the effect of the value of the triggering threshold for several combinations of summer SPI and SSWI. These results allow us to provide stakeholders with factual evidence on the effects that can be expected on guarantee exclusion frequencies under retrospective

scenarios applied to the period covered by the data (2007-2021). This should inform a negotiation prior to the adoption of new practices, some operational implications of which we discuss.

4. Contexte du projet

Ces dernières années, le territoire métropolitain a connu des épisodes de sécheresse d'ampleur géographique et d'intensité exceptionnelles de façon récurrente et parfois successive. La séquence 2018-2019-2020 s'est avérée tout à fait notable de ce point de vue. Nous pouvons aussi citer l'année 2015. Ces épisodes ont, en particulier, eu des conséquences négatives sur la reprise des plantations forestières. Il s'agit des quatre années les plus difficiles depuis 2007 pour la réussite des plantations au regard du suivi annuel de leur reprise par le Département de la santé des forêts (DSF : Boutte, 2021). Cette séquence a été à l'origine de difficultés pour la filière du reboisement.

La reprise des plants, à l'issue de leur première saison de végétation en forêt, est généralement garantie par les entreprises de reboisement. Le plus souvent, les engagements contractuels ne garantissent pas la reprise de la totalité des plants, 80 % à l'automne étant le plus commun. Dans les chantiers où ce taux de survie n'est pas atteint, l'entreprise prend à sa charge les regarnis permettant de satisfaire ce taux. Les conditions contractuelles de garantie prévoient également un certain nombre de cas d'exclusion pour lesquels il est admis que l'entreprise n'est pas responsable de la mortalité des plants et n'a donc pas à en assumer la charge du remplacement. Par exemple, le Cahier des clauses techniques générales des travaux forestiers de boisement¹ cite les attaques d'animaux ou d'insectes ravageurs et divers aléas naturels (incendie, inondation, éboulement, avalanche). Le cas de la sécheresse exceptionnelle n'est pas cité par ce document cadre mais il est souvent avancé dans les documents contractuels (clauses particulières, conditions générales de vente). Cet aléa, connu pour causer des difficultés de reprise dans les plantations, est souvent mentionné sous une terminologie du type « sécheresse caractérisée ». Or, cette qualification manque régulièrement d'une définition précise pour l'accompagner ou, lorsqu'elle existe, elle peut parfois être mal acceptée ou jugée inadaptée dans la pratique forestière (cas des arrêtés de calamité agricole par exemple). A ces imprécisions, s'ajoute le fait qu'il est délicat d'imputer, lors du constat de reprise, la cause de la mortalité des plants à un éventuel défaut d'exécution des travaux (qui relèverait de la garantie) ou à la sécheresse (qui ne relève pas de la responsabilité de l'entreprise), le résultat étant un plant sec sans autre symptôme dans les deux cas. Cela conduisait souvent les intervenants d'un chantier où la reprise était insuffisante à négocier à l'amiable les quantités de regarnis pris en charge par chacun. Or, les épisodes de sécheresse sévères de 2015 puis 2018-2019-2020 ont mis à mal les conditions habituelles de garantie de reprise qui supposaient des quantités de regarnis trop lourdes à assumer pour les entreprises. Celles-ci ont alors exprimé leur besoin d'une meilleure reconnaissance de leur absence de responsabilité en cas de sécheresse exceptionnelle.

A l'issue de l'épisode de 2015, un groupe de travail a été mis en place en vue d'étudier les possibilités de révision des conditions de garantie des plantations, notamment en recherchant une définition météorologique plus précise et partagée. Ce travail n'a finalement pas conduit à un changement des pratiques pour des questions méthodologiques (les données disponibles à l'époque étaient bien moins nombreuses que celles dont nous disposons aujourd'hui) mais aussi à la faveur d'années suivantes plus propices aux plantations ayant, temporairement, remis au second plan ces enjeux. En 2019, le sujet étant revenu sur le devant de la scène accompagné d'un degré supplémentaire d'inquiétude lié aux prévisions de réchauffement climatique global, un nouveau

¹ https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/documents/Bulletinofficiel-0030524/F34_2012-05-30.pdf

groupe de travail a été constitué sous l'égide de France-Bois-Forêt. Ce groupe a réuni des représentants des entreprises du reboisement (pépiniéristes, ETF reboiseurs) et des donneurs d'ordres (notamment l'Office national des forêts, la Société forestière de la CDC, les Experts forestiers de France) en vue d'aboutir à un accord sur de nouvelles conditions de garantie de reprise en cas de sécheresse exceptionnelle. Le groupe de travail a alors sollicité le Département Recherche Développement Innovation de l'ONF qui a réalisé une étude préliminaire en 2020. Cette analyse a permis de montrer que nous disposions de données permettant d'évaluer la pertinence de diverses variables météorologiques candidates à la définition des épisodes de sécheresse, dont certaines étaient prometteuses. L'importance des enjeux nécessitant d'approfondir cette première étude, une demande a été déposée en novembre 2020 à France-Bois-Forêt afin de financer un programme plus ambitieux intitulé « Reprise des plantations en climat changeant » (REPLANT-CLIC). Ce programme multipartenaires regroupait INRAE, l'ONF, le Groupe Coopération Forestière (GCF) et le DSF et était coordonné par le pôle RENFOR sur le renouvellement forestier. Le financement de FBF a été obtenu en mars 2021 et le programme a démarré en juin de la même année.

Ce rapport présente les principaux résultats de ce programme ainsi que les possibles implications opérationnelles.

5.Objectifs et démarche

Le programme REPLANT-CLIC s'articulait autour de trois objectifs principaux :

1. Identifier un ou plusieurs indicateurs météorologiques pertinents pour caractériser les épisodes de sécheresse exceptionnels qui ont un impact négatif sur la survie des plants forestiers au cours de leur première saison de végétation.
2. Evaluer les conséquences financières attendues d'éventuels changements de pratiques contractuelles, notamment en termes de répartition des risques et coûts associés pris par chaque acteur (pépiniériste, reboiseur, propriétaire).
3. Réaliser une concertation entre les acteurs concernés, pour définir des solutions partagées (choix des indicateurs météorologiques, choix des critères de décisions) et mettre en place une démarche de gestion adaptative, pour réévaluer en temps réel les performances des indices et des critères choisis.

Afin de contribuer au premier objectif, nous avons développé une démarche d'évaluation de la pertinence d'un grand nombre de variables météorologiques candidates. Leur diversité relevait à la fois de la variété des grandeurs météorologiques mobilisées mais aussi des périodes temporelles sur lesquelles elles portaient (variables printanières, estivales, automnales, mensuelles, trimestrielles, semestrielles). L'évaluation de leur intérêt a reposé sur une approche de modélisation visant à identifier les variables météorologiques les plus aptes à prédire le taux de mortalité des plants. Ce travail de modélisation a d'abord été réalisé en explorant, à l'échelle nationale, les liens statistiques entre des taux de mortalité collectés depuis 2007 par le Département de la santé des forêts (DSF) et la palette de variables météorologiques candidates produites par Météo-France. L'objectif étant d'obtenir un classement des variables selon leur capacité à prédire la mortalité des plants, mesurée statistiquement. La robustesse des résultats obtenus a ensuite été appréhendée en s'appuyant, cette fois, sur des données régionales de constats de reprise collectés par les gestionnaires forestiers.

Les indices météorologiques jugés les plus pertinents et prometteurs à l'issue de cette première étape de modélisation ont ensuite été mobilisés pour construire cinq règles de définition contractuelle de la sécheresse dans les garanties de reprise. Ces cinq définitions nous permettent de formuler un ensemble de propositions opérationnelles de nouvelles conditions de garanties de reprise qui devront faire l'objet d'un choix par les acteurs de la filière. Afin d'éclairer ce choix, nous avons tenté de

l'accompagner d'éléments d'aide à la décision et à la négociation entre les acteurs produits par la construction de scénarios rétrospectifs (« que ce serait-il passé, du point de vue des garanties de reprise, si telle définition avait été mise en œuvre par le passé ? ») et d'une analyse de sensibilité illustrant l'effet du choix de la valeur du seuil de déclenchement sur les proportions de chantiers qui auraient été garantis ou non. Ces éléments sont ensuite complétés par une réflexion autour d'autres implications opérationnelles s'appuyant en partie sur les échanges organisés au cours du programme avec les acteurs du reboisement.

6. Matériels et méthodes

6.1. Matériels

6.1.1. Variable réponse : taux de mortalité des plants

La variable réponse utilisée dans le cadre de cette étude est le taux de mortalité observé après plantation. L'origine des données est multiple. Un premier jeu de données a été fourni par le Département de la Santé des Forêts (DSF), un deuxième par l'ONF et enfin un dernier jeu de données est issu de plusieurs coopératives forestières via le Groupe Coopération Forestière (GCF).

Les prochains paragraphes présentent et décrivent les données issues de chaque source.

6.1.1.1. Suivi annuel des plantations du DSF

Origine des données

Depuis 2007, le Département de la Santé des Forêts (DSF) complète son évaluation de l'état sanitaire des forêts françaises par un suivi de la réussite des plantations forestières. Cette mission a pour objectif d'évaluer l'importance relative de différents facteurs sur la survie de jeunes plants lors de leur première saison de végétation (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017).

La base de données DSF sur les plantations couvre l'ensemble de la France métropolitaine, pour la période de 2007 à 2021. Au cours de ces 15 années, 600 à 1000 sites ont été échantillonnés annuellement, avec 100 plants observés pour chaque site.

Nous disposons donc d'une information rétrospective sur la reprise des plantations évaluée par le DSF, avec des observations de 2007 à 2021.

Le constat de reprise est effectué en fin de première saison de végétation (en octobre-novembre) sur des parcelles d'au moins 1 ha. Le correspondant observateur choisit dans son secteur d'activité un échantillon de parcelles selon leur répartition géographique dans le secteur, l'antécédent cultural, l'essence de reboisement, le type de plant, etc. Les observations sont réalisées sur 100 plants de la même essence sélectionnés au hasard afin de ne pas privilégier les arbres atteints d'un symptôme.

Plusieurs critères sont notés afin d'appréhender au mieux les potentiels facteurs de stress ou de mortalité des plants :

- les facteurs biotiques (insectes, champignons, rongeurs, gibier)
- les facteurs abiotiques (gel, sécheresse..), qui ont pu affecter le plant
- l'antécédent cultural, le type de plants, les travaux préparatoires et les traitements effectués après plantation, etc

A chaque plant mort, une raison unique est définie comme cause de la mortalité, malgré le fait que ces causes soient souvent multiples (Boutte 2021). Il s'agit de la seule base de données de cette envergure temporelle et spatiale disponible, avec des données géo-référencées et un protocole national assez homogène dans le temps.

Sur la période 2007-2021, 84 % de la mortalité relevée était d'origine abiotique, 6 % due aux animaux et plus de 5 % aux insectes (Tableau 1). **Afin de se concentrer sur le phénomène qui nous intéresse ici – la sécheresse – seules les mortalités de plants qui ont été attribuées à la sécheresse, la chaleur, ou à un phénomène abiotique indéterminé ont été retenues dans l'échantillon analysé.**

Tableau 1 : Pourcentage de plants morts toutes essences confondues sur la période 2007-2021 par type de dommage.

Type de dommage	nb plants morts	% plants morts
Dégât d'origine abiotique	100 903	84.41
Dégât dû à des grands mammifères	7 508	6.28
Dégât d'origine entomologique	6 674	5.58
Dégât dû à des mammifères	1 646	1.38
Dégât d'origine sylvicole	950	0.79
Dégât d'origine pathologique	838	0.70
Autre symptôme	493	0.41
Dégât dû à des végétaux	270	0.23
Inconnu ou indéterminé	244	0.20
Dégât dû à d'autres animaux	16	0.01

L'échantillon a également été réduit en sélectionnant 16 essences principales, pour lesquelles les données recueillies l'était en quantité suffisante pour pouvoir mener les analyses : Chêne pédonculé (*Quercus robur*), Chêne sessile (*Quercus petraea*), Chêne rouge (*Quercus rubra*), Hêtre (*Fagus sylvatica*), Peupliers (*Populus*), Robinier (*Robinia pseudoacacia*), Cèdre de l'atlas (*Cedrus atlantica*), Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), Épicéa commun (*Picea abies*), Épicéa de Sitka (*Picea sitchensis*), Mélèze d'Europe (*Larix decidua*), Mélèze hybride, Pin à l'encens (*Pinus taeda*), Pin maritime (*Pinus pinaster*), Sapin pectiné (*Abies alba*) et Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*).

Il s'agit des principales essences de reboisement commercialisées en France. Ensemble, elles totalisent 92 % des plants vendus lors des trois dernières campagnes, entre 2018 et 2021².

² d'après les statistiques diffusées par le ministère de l'Agriculture (<https://agriculture.gouv.fr/statistiques-annuelles-sur-les-ventes-de-graines-et-plants-forestiers>)

Description des données

De 2007 à 2021, les 16 espèces retenues sont réparties sur 10 404 chantiers de plantation. Le douglas, le chêne sessile et le pin maritime représentent à eux trois 60 % des plantations notées (

Figure 1).

Espèce	Code espèce	nb plantations
Douglas	DOU	2 847
Chêne sessile	CHS	2 124
Pin maritime	PM	1 278
Peuplier	POPU	794
Mélèze européen	MEE	533
Cèdre de l'Atlas	CEA	415
Epicéa commun	EPC	380
Pin sylvestre	PS	373
Chêne rouge	CHR	283
Hêtre	HET	281
Chêne pédonculé	CHP	244
Robinier	ROB	224
Mélèze hybride	MEH	211
Sapin pectiné	SP	147
Pin taeda	PAE	137
Epicéa de Sitka	EPS	133

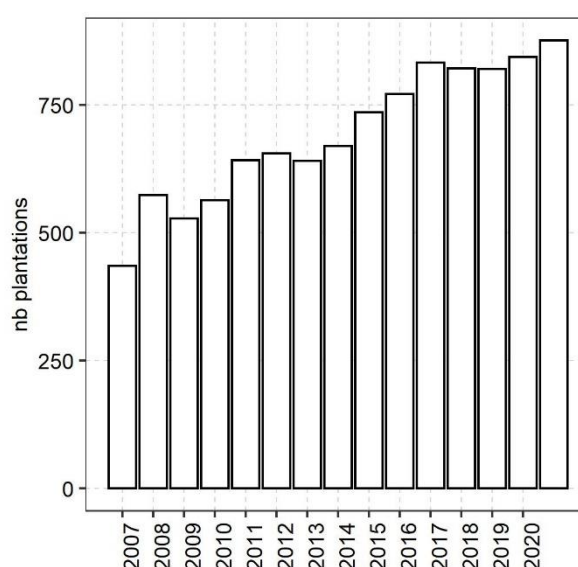


Figure 1 : Nombre de plantations notées par essence (gauche). Nombre annuel de plantations notées toutes essences confondues (droite). Le code de chaque essence, utilisé dans la suite du rapport est indiqué.

Il est important de souligner que la méthode d'échantillonnage de cet observatoire recèle deux fragilités :

1. Les correspondants observateurs choisissent les plantations suivies parmi celles dont ils ont connaissance et orientent ce choix afin que les essences moins couramment plantées soient également sondées. Le cas du Pin maritime, première essence de reboisement mais seulement troisième en nombre de plantations notées, l'illustre de façon évidente.
2. L'échantillonnage est stratifié géographiquement selon les périmètres de travail des correspondants et non par l'intensité de l'activité de reboisement de chaque région.

Cela conduit au fait que **la moyenne de l'ensemble des données recueillies une année ne peut pas, en toute rigueur, être considérée comme représentative de la population de l'ensemble des chantiers de reboisement en France**. Dans la suite, les moyennes, toutes essences confondues, sont donc à interpréter avec précaution.

Toutefois, au regard de la répartition spatiale par essence des plantations pour l'ensemble de la période (Figure 2), nous ferons l'hypothèse qu'elles sont représentatives lorsqu'on les analyse par essence. Par ailleurs, les plantations notées étant choisies en début d'année, indépendamment de la météo qui suivra, nous admettons que la méthode d'échantillonnage du DSF n'occasionne pas de biais dans la relation météo – mortalité.

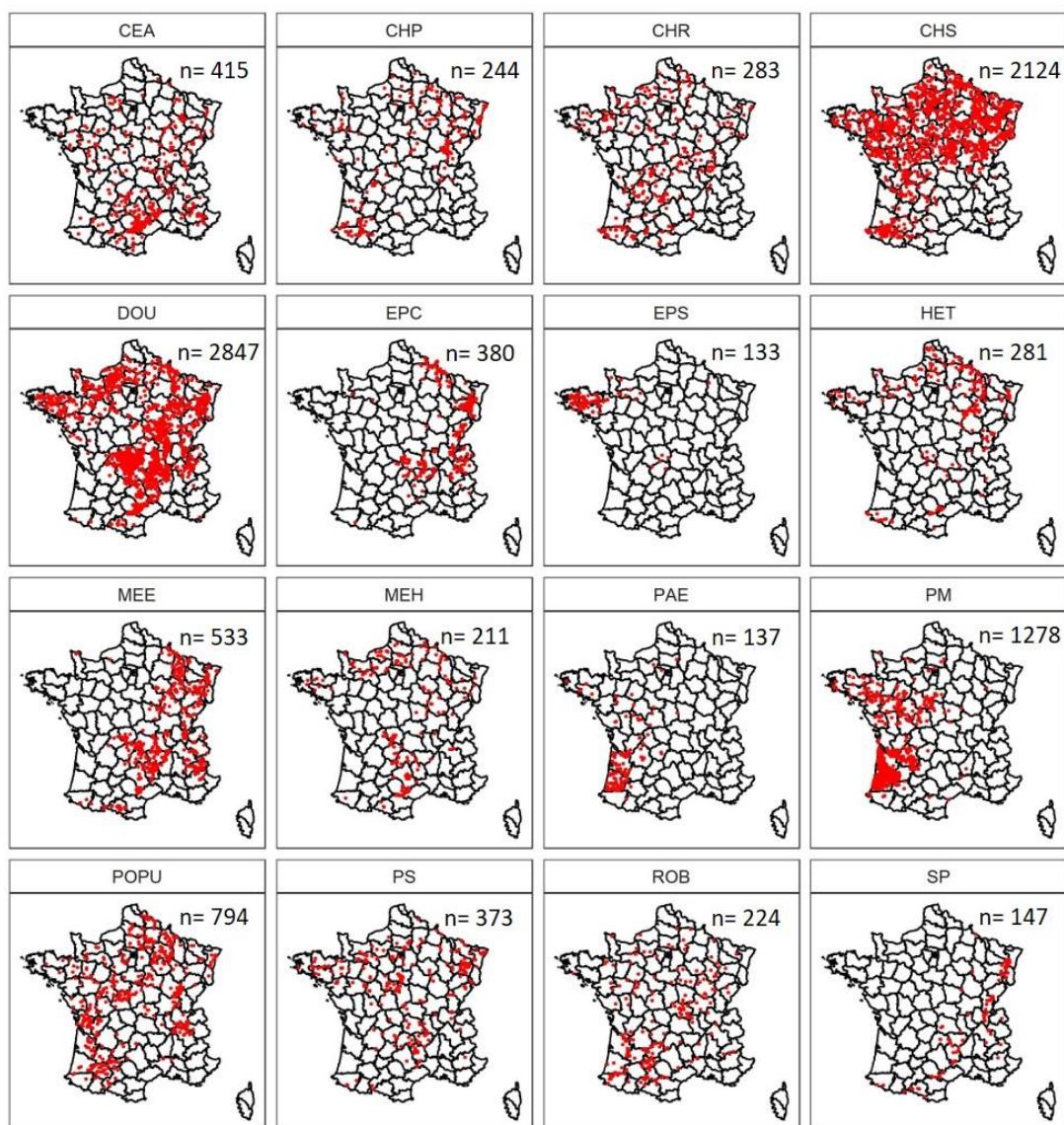


Figure 2 : Localisation par espèce des plantations notées toutes années confondues de 2007 à 2021 (n = nombre de plantations). La signification des abréviations se trouve dans la Figure 1.

Pour l'ensemble des plantations étudiées, toutes essences confondues, on observe au cours de la période 2007-2021 une distribution du taux de mortalité très déséquilibrée avec de nombreux chantiers sans fortes mortalités (Figure 3). On note que malgré des mortalités atteintes de 100 %, les plantations étudiées présentent une mortalité abiotique moyenne de 8,5 %. La rareté des cas de forte mortalité, en général, témoigne d'une assez bonne maîtrise du processus de reboisement, à l'échelle de la filière, qui fait du recours à la garantie de reprise l'exception plutôt que la règle.

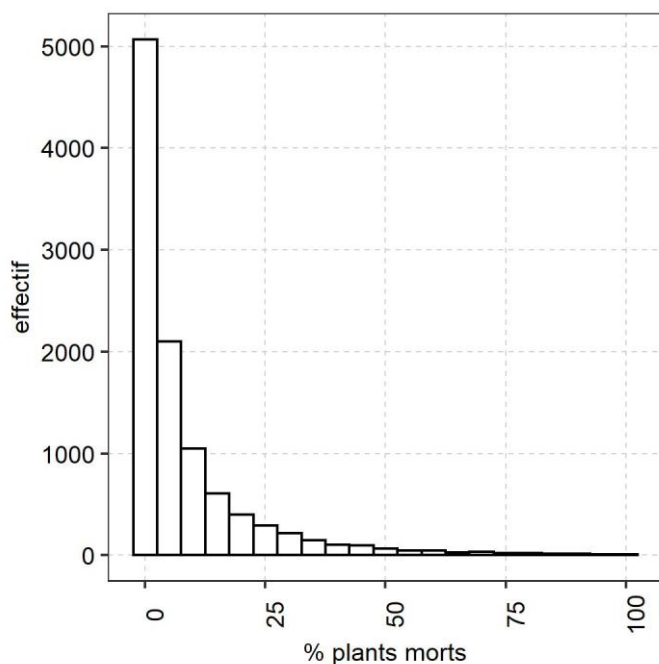


Figure 3 : Distribution du pourcentage de plants morts de causes abiotiques (code DSF : chaleur, sécheresse, abiotique) par chantier, toutes essences confondues observé sur la période 2007-2021.

La distribution des taux de mortalité étant asymétrique (beaucoup de chantiers avec une mortalité notée à 0 %), la médiane apparaît comme un descripteur statistique plus approprié que la moyenne. En examinant la Figure 4, on constate que la mortalité médiane sur l'ensemble de la période d'étude diffère très peu entre essences. Cependant, en examinant cette figure, on constate également que l'amplitude des boîtes à moustache, qui représente l'amplitude de la mortalité de plants entre les chantiers, varie entre les essences. Plus particulièrement, on voit que toutes les essences ne présentent pas la même proportion de chantiers à forte mortalité.

Notons enfin que la distribution fortement déséquilibrée d'une variable que l'on cherche à modéliser constitue, en général, un problème méthodologique. De plus, du fait de la forme log-normale de la distribution, les événements porteurs d'enjeux en terme de garantie (mortalité > 20 %) constituent des événements rares.

En disposant de ces données de reprise de plantations, nous effectuons une analyse rétrospective de la mortalité des plants sur 15 ans. Disposer d'une période temporelle si longue offre une meilleure variabilité interannuelle de la mortalité ainsi que des aléas de sécheresse.

La répartition interannuelle de la mortalité des plants toutes essences confondues (Figure 5) permet de distinguer cinq années marquées par une plus forte mortalité abiotique : 2011, 2015, 2018,

2019 et 2020. Pour observer la mortalité annuelle moyenne des plants par essence se référer à l'Annexe 1.

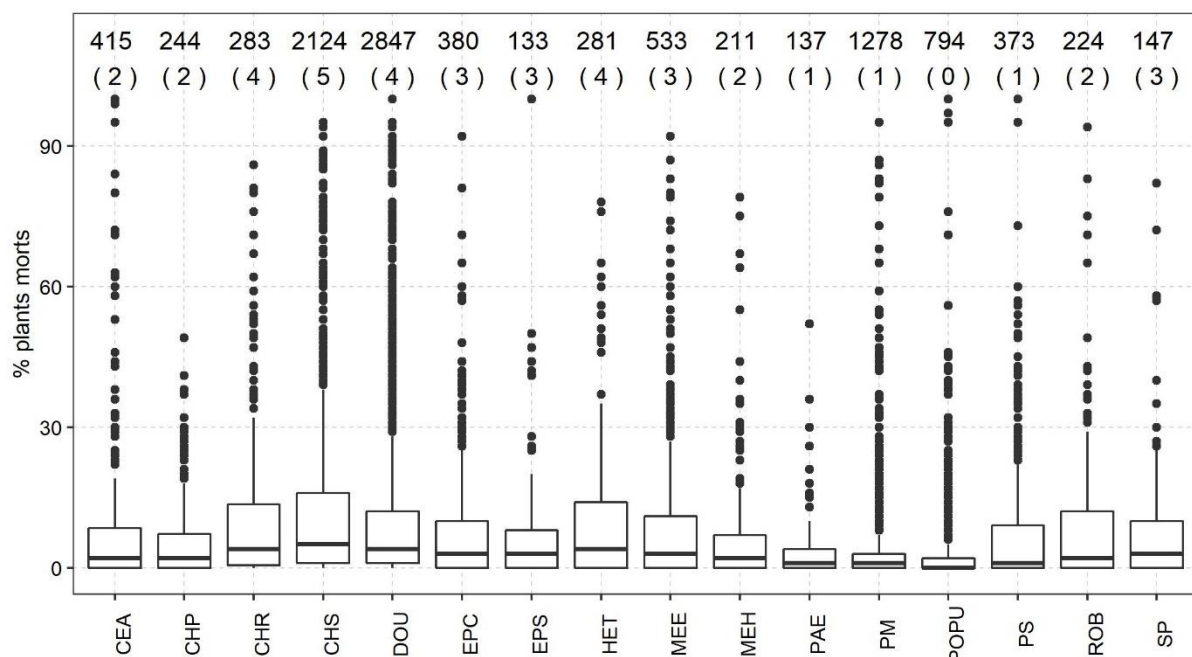


Figure 4 : Distribution du pourcentage de plants morts par essence, toutes années confondues (2007-2021). Se situent en haut de la figure le nombre de plantations observées et la mortalité médiane en parenthèses.

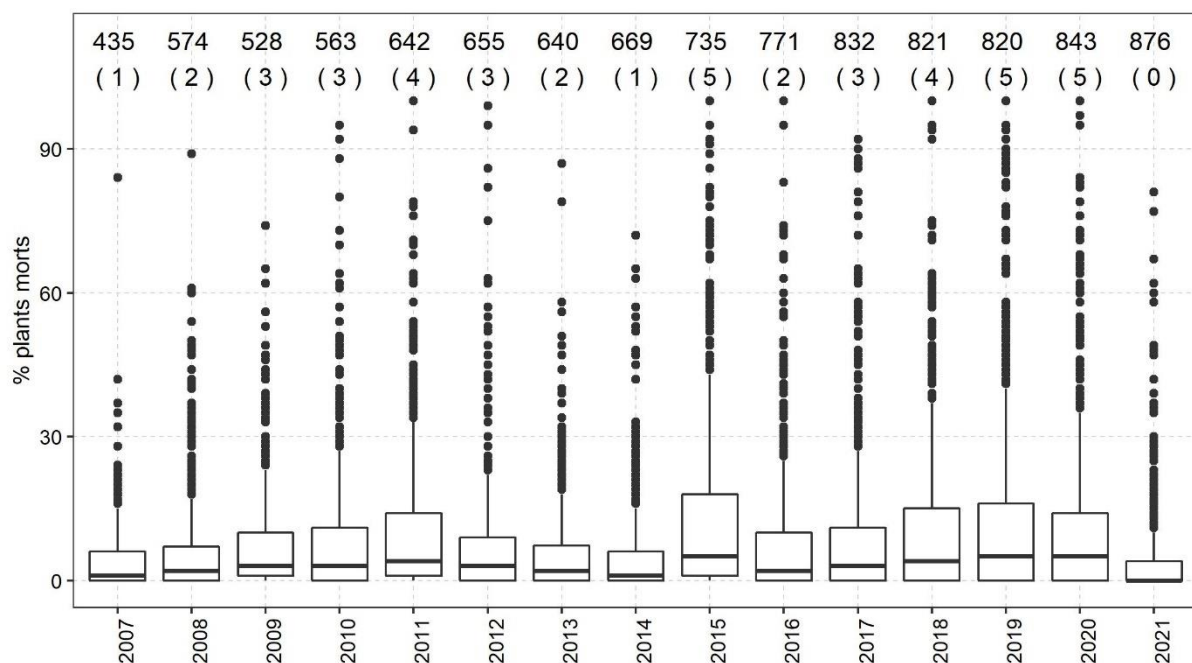


Figure 5 : Distribution du pourcentage de plants morts par année, toutes essences confondues sur la période 2007-2021. Se situent en haut de la figure le nombre de plantations observées et la mortalité médiane en parenthèses.

6.1.1.2. Constats de reprise des gestionnaires

Plusieurs organismes de gestion forestière collectent des données de constats de reprise de plantations qui peuvent constituer des jeux de données pour évaluer la robustesse des résultats basés sur les données du DSF.

L'Office national des forêts (ONF), réalise le constat de reprise des plantations qu'il encadre à l'issue de la première saison de végétation. Dans le cadre de notre étude, les agences de Bourgogne-Franche-Comté et Haute-Marne nous ont transmis leurs données de mortalité de plants. Le Groupe Coopération Forestière (GCF) représente les principales coopératives forestières et à ce titre a pu fournir des données sur l'ensemble du territoire métropolitain sur lequel elles effectuent des opérations de reboisement pour leurs adhérents (voir carte des chantiers Figure 6).

Grâce à ces deux sources nous sommes en mesure de constituer une véritable base de données pluriannuelles, géo-référencées et couvrant une large zone (de climat suffisamment variable). La création de cette base de données a nécessité, en amont et en aval, un travail de compilation et d'harmonisation des données important. En effet, ces données sont généralement collectées de façon dispersée par les opérateurs de terrain pour leurs besoins contractuels sans toujours être centralisées de façon organisée.

Les données produites par les gestionnaires distinguent parfois les causes de mortalité (a minima selon si elles relèvent ou non de la responsabilité de l'entreprise). Néanmoins, il est évident que leurs constats de reprise ne détaillent pas aussi précisément les causes de mortalité de chaque plant, comme le fait le DSF, privilégiant l'observation d'un plus grand nombre de plants dans chaque chantier. C'est pourquoi, afin de compiler les données fournies par les gestionnaires forestiers, nous n'avons retenu que leur taux de mortalité total, confondant l'ensemble des causes possibles. Contrairement aux données du DSF, nous manipulons ici une mortalité qui n'est donc pas seulement abiotique. Même si les causes abiotiques sont probablement majoritaires (cf. Tableau 1), la mortalité comprend aussi des dégâts de gibier, d'insectes, etc. Cet aspect fragilisera la comparaison des résultats. En revanche, les données des gestionnaires sont établies de façon relativement exhaustive sur la base de la liste des chantiers qu'ils encadrent. Cela leur confère un degré de représentativité de la population des plantations (par exemple des plantations dans les forêts publiques de Franche-Comté de 2015 à 2021) plus élevé que les données du DSF (par exemple des plantations dans les forêts publiques de Franche-Comté de 2015 à 2021).

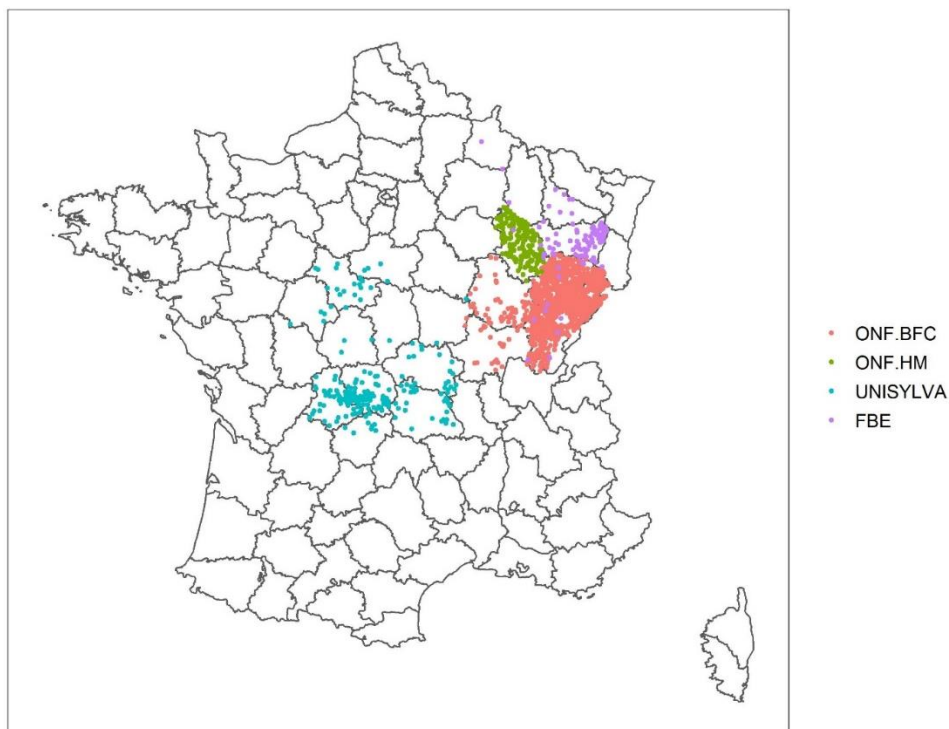


Figure 6: Localisation des plantations toutes essences confondues. Le code couleur indique les différentes sources de données. FBE : Forêts et Bois de l'Est ; ONF.BFC : ONF de Bourgogne-Franche-Comté ; ONF.HM : ONF de Haute-Marne.

a) Plantations en forêt publique

Origine des données

Les données de constat de reprise proviennent des plantations en forêts publiques de :

- Haute-Marne de 2007 à 2021 (509 chantiers)
- Franche-Comté de 2015 à 2021 de façon quasi-exhaustive et d'une partie seulement de la région en 2012 et 2014. S'y ajoute une partie des constats de reprise de l'Agence Bourgogne-Est pour 2020 et 2021 (3 603 chantiers au total).

Ce jeu de 4 112 chantiers, fourni par l'ONF, offre l'opportunité de travailler sur un ensemble de plantations géographiquement plus denses que le DSF (Figure 6). Contrairement au DSF, il n'y a pas de distinction de cause de mortalité. La localisation géographique de ces données a légèrement perdu en précision dû à l'impossibilité de lier facilement la base avec celle du parcellaire. Elles sont donc localisées au barycentre de chaque forêt. Ceci a généralement très peu de conséquences sur les analyses, les forêts étant majoritairement plus petites que la maille des données météorologiques (8 x 8 km) et les valeurs de mailles voisines étant très proches (corrélations spatiales des grandeurs météorologiques).

Nous avons retenu un échantillon plus restreint parmi ces données en sélectionnant les essences pour lesquelles nous disposons de suffisamment de données. La liste des essences retenues se trouve dans le Tableau 2. Les pratiques de reboisement, notamment le choix des essences, étant très dépendantes des régions, plusieurs essences bien représentées dans le suivi annuel du DSF sont absentes (Pin maritime, Peupliers, ...). A contrario, ces données permettent d'analyser la reprise

d'essences trop peu observées par le DSF (cas du merisier, de l'alisier et des grands érables – sycomore et plane regroupés).

Description des données

Les 12 espèces principales, parmi 66 différentes utilisées, correspondent à 3 621 plantations (soient 88 % des plantations). Le chêne sessile représente à lui seul 33 % des données disponibles.

Sur l'ensemble des plantations étudiées, toutes essences confondues, on observe une distribution très asymétrique, à l'image de celle du DSF, avec une très grande majorité de chantiers à faibles taux de mortalité (Figure 7). On note que malgré des mortalités atteintes de 100 %, les plantations présentent une mortalité moyenne de 20 % (mortalité médiane = 12 %) contre 8,7 % pour le jeu de données du DSF. Cet écart s'explique largement par le fait que l'on travaille sur une mortalité toutes causes confondues, que la composition en essence est très différente à l'échelle régionale et que les données se concentrent sur les dernières années, les plus difficiles climatiquement.

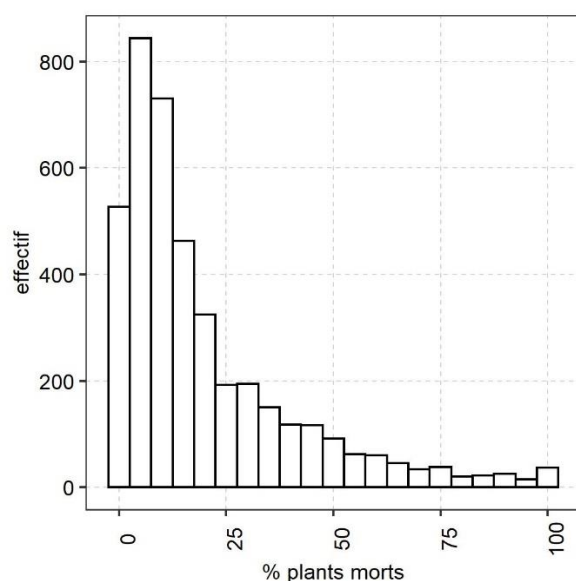


Figure 7 : Distribution du pourcentage de plants morts toutes essences et années confondues. Données issues de l'ONF (Bourgogne-Franche-Comté et Haute-Marne).

En examinant la Figure 8, on constate que la mortalité médiane sur l'ensemble de la période d'étude diffère entre essences. La plus forte mortalité étant observée chez le Pin sylvestre (29 %) et la plus faible chez les grands érables (ERA, 6 %).

Malgré une variabilité interannuelle de la mortalité des plants plus faible toutes essences confondues (Figure 9), on note tout de même, à partir de 2014 (période pour laquelle nous disposons de plus de données), quatre années marquées par une plus forte mortalité : 2015, 2018, 2019 et 2020 avec une mortalité médiane variant entre 15 % et 20 %.

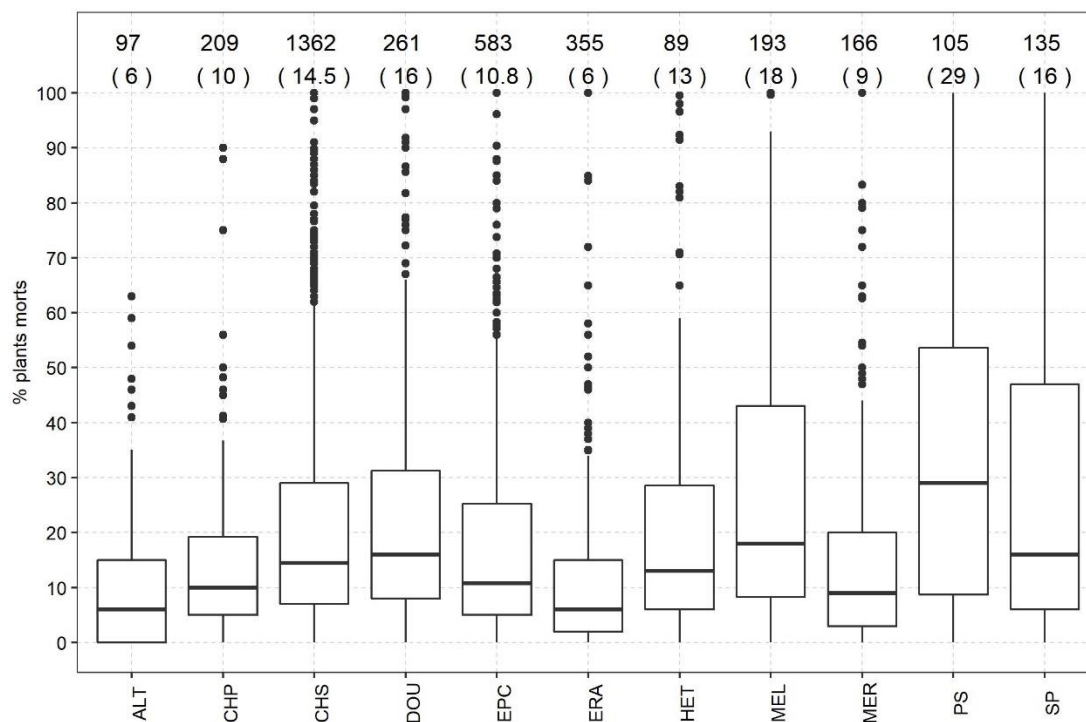


Figure 8 : Pourcentage de plants morts toutes années confondues. Se situent en haut de la figure le nombre de plantations observées et la médiane entre parenthèses. Données issues de l'ONF (Bourgogne-Franche-Comté et Haute-Marne).

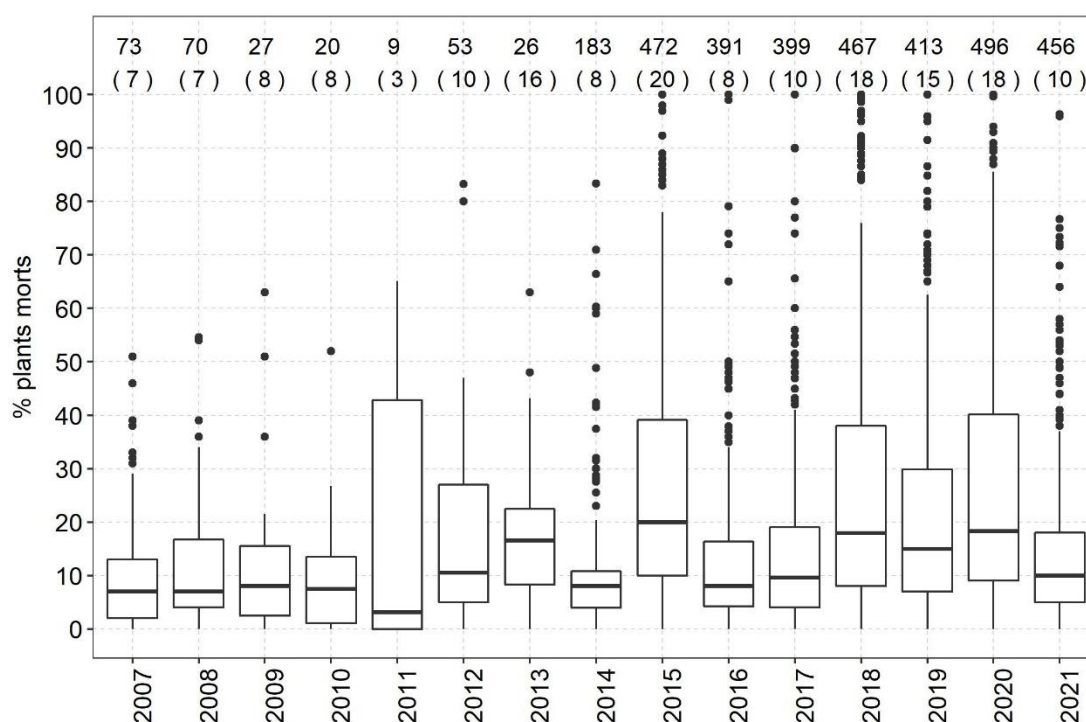


Figure 9 : Pourcentage de plants morts toutes essences confondues sur la période 2007-2021. Se situent en haut de la figure le nombre de plantations observées et la médiane entre parenthèses. Données issues de l'ONF (Bourgogne-Franche-Comté et Haute-Marne).

b) Plantations en forêt privée

Origine des données

Les données rassemblées dans la base de données du GCF sont issues de trois coopératives forestières (Figure 6) : Forêt et Bois de l'Est (FBE), Unisylva (UNI) et Alliance Forêts Bois (AFB). Dans ce rapport, seules les données de FBE et Unisylva ont été utilisées dans les analyses. Les constats de reprise de FBE couvrent la période 2015 à 2021. Ceux de Unisylva, 2007 à 2019. Les données d'Alliance Forêts Bois offraient la possibilité de travailler sur une vaste zone géographique et une longue période mais l'homogénéisation avec les autres bases de données n'a pas été possible. Elles n'ont donc pas été valorisées dans le cadre de ce travail. En plus des constats de reprise, les coopératives ont pu fournir des informations sur le type de matériel végétal (racines nues, godet), sur la présence ou non de préparation du sol ainsi que la saison de plantation.

c) Données finalement retenues

Face au faible nombre d'observations pour certaines essences selon les sources de données (Tableau 2), nous avons fait le choix de réunir les observations issues de l'ONF et des coopératives. Ensemble, elles constituent un jeu de données plus complet et couvrant une surface géographique plus importante.

Parmi l'ensemble des données fournies par les gestionnaires, nous avons centré l'étude sur les 12 essences les plus représentées disposant d'un minimum de 80 observations (83 plantations pour le Cèdre de l'Atlas). **Au total, nous avons constitué un jeu de données comportant 4 101 constats de reprise réalisés par des gestionnaires forestiers.**

Tableau 2 : Nombre de plantations par espèce et source de données. Les données proviennent de trois organismes : Forêt et Bois de l'Est (FBE), Unisylva (UNI) et l'Office national des forêts Bourgogne-Franche-Comté et Haute-Marne (ONF). Les mélèzes divers regroupent Mélèze d'Europe, Mélèze du Japon et Mélèze hybride.

Espèce	Code espèce	UNI	FBE	ONF
Alisier torminal	ALT	6	0	97
Cèdre de l'Atlas	CEA	16	1	66
Chêne pédonculé	CHP	4	1	209
Chêne sessile	CHS	21	10	1 362
Douglas	DOU	29	67	261
Epicéa commun	EPC	5	69	583
Hêtre	HET	5	0	89
Pin sylvestre	PS	35	3	105
Sapin pectiné	SP	10	3	135
Grands érables	ERA	0	0	355
Mélèzes divers	MEL	179	16	193
Merisier	MER	0	0	166

6.1.2. Variables explicatives

6.1.2.1. Variables climatiques

Les données météorologiques proviennent de Météo-France. Les coordonnées de chaque plantation ont été projetées sur une maille systématique de 8 x 8 km correspondant à la résolution du maillage Safran³. Dans le cadre de notre étude nous utilisons différents indicateurs météorologiques modélisés sur l'ensemble du territoire pour la période 2007-2021, sur les mois d'avril à octobre couvrant la saison de végétation.

Nous avons ainsi à disposition des données de précipitation, température, évapotranspiration ainsi que des indices standardisés de sécheresse des sols et des précipitations (Soubeyroux et al. 2012) à différents intervalles de temps (quotidien, mensuel, plurimensuel).

a) Précipitations et évapotranspiration

La base de données Safran de Météo-France produit des cumuls de précipitations mensuels modélisés sur la maille 8 x 8 km. Celles-ci comprennent les cumuls de pluies mais aussi de précipitations efficaces (permettant de contribuer à la recharge des eaux souterraines). L'évapotranspiration étant aussi calculée, nous avons également calculé un bilan hydrique simple correspondant à la différence Précipitation-Evapotranspiration potentielle (P-ETP).

b) Indices de sécheresse

Pour l'étude de l'impact de la sécheresse sur la mortalité des plants il est nécessaire de pouvoir décrire le phénomène de sécheresse. Malheureusement, il n'y a pas de définition unique ou généralement acceptée. Le choix de l'indicateur est dépendant de l'étude. Il est possible de définir la sécheresse en termes de conditions météorologiques, hydrologiques ou agricoles. Ceci a donné lieu à un grand nombre d'indices de sécheresse retrouvés dans la littérature. Ces indices permettent de représenter de façon numérique l'intensité des sécheresses. Ces derniers sont calculés par Météo-France à partir de valeurs climatiques pour un lieu et une période donnée.

SPI : Indice standardisé de sécheresse des précipitations

Le Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee et al. 1993), est un indice permettant de quantifier une sécheresse météorologique. Il s'agit d'un indice de probabilité reposant uniquement sur les précipitations et qui est largement utilisé au niveau international. Le calcul de l'indice SPI en un lieu est basé sur un historique de précipitations pour une période de référence. Ici, cette période porte sur 30 ans, entre 1981 et 2010. A cette série est ajustée une distribution de probabilité. Les probabilités sont standardisées de sorte qu'un SPI de 0 indique une quantité de précipitation médiane (par rapport à la climatologie moyenne de la période de référence). L'indice est négatif pour les sécheresses qui sont définies comme un déficit de précipitations par rapport à la normale climatique dans un lieu donné. Il prend une valeur positive pour les conditions plus humides que la normale (Figure 10).

³ <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/165>

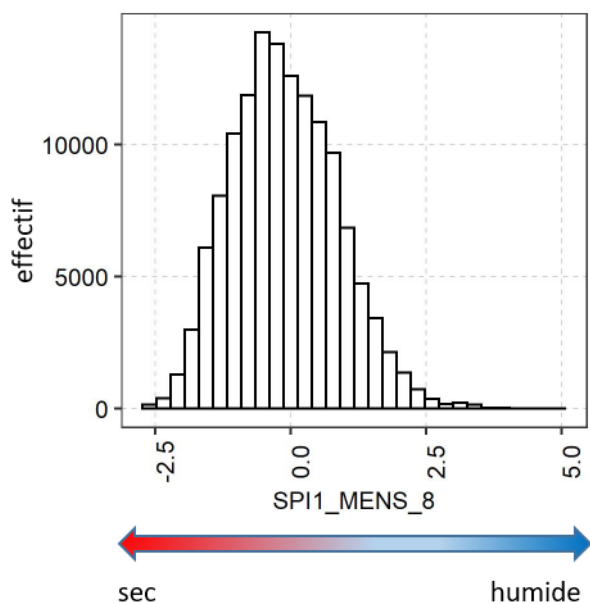


Figure 10: Distribution de l'indice de sécheresse météorologique SPI d'août (SPI1_MENS_8) sur l'ensemble des mailles recouvrant le territoire métropolitain de 2007 à 2021.

Les principaux avantages du SPI sont : premièrement qu'il requiert pour son calcul seulement les données de précipitations mensuelles ; deuxièmement que la normalisation permet de déterminer le degré d'exceptionnalité d'une sécheresse à un endroit donné (voir encadré 1). En cela, il peut être comparé entre régions aux climats différents.

SWI : Indice d'humidité des sols

L'indice d'humidité des sols⁴, SWI (pour Soil Water Index) permet d'évaluer les sécheresses agricoles. Cet indice de sécheresse hydrologique analyse l'incidence des sécheresses sur la recharge des eaux souterraines.

Il est défini comme suit :

$$SWI = \frac{W - W_{wilt}}{W_{fc} - W_{wilt}}$$

où W est le contenu en eau du sol, W_{wilt} le contenu en eau au point de flétrissement et W_{fc} le contenu en eau du sol à la capacité au champ. Un SWI supérieur à 1 indique un sol non stressé (l'humidité du sol dépasse la capacité au champ), alors qu'une valeur de 0 indique l'impossibilité pour les plantes de transpirer (l'humidité est inférieure au point de flétrissement) (Figure 11).

⁴ <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/183>

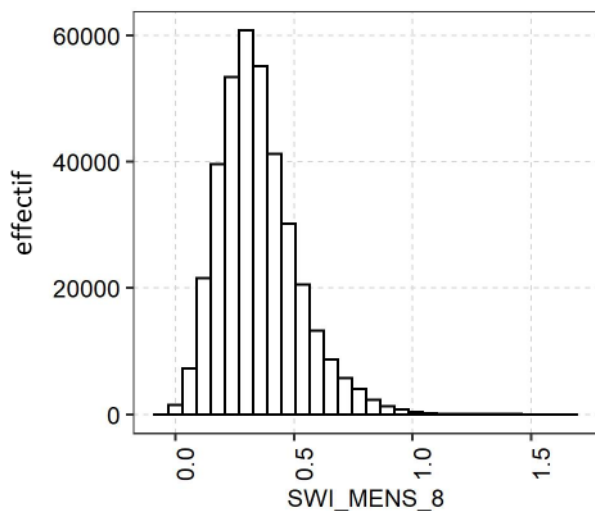


Figure 11 : Distribution de l'indice d'humidité des sols du mois d'août (SWI1_MENS_8) sur l'ensemble des mailles recouvrant le territoire métropolitain de 2007 à 2021.

SSWI : Indice standardisé de sécheresse des sols

L'indice standardisé de sécheresse des sols (SSWI) s'inspire des travaux réalisés pour le calcul de l'indice SPI (Vidal and Wade 2009). Il s'agit ici de projeter la distribution statistique de l'indice de sécheresse des sols (SWI) pour chaque mois de l'année sur une distribution normale centrée réduite. Utiliser l'indice normalisé permet ainsi d'appréhender la rareté d'un épisode de sécheresse.

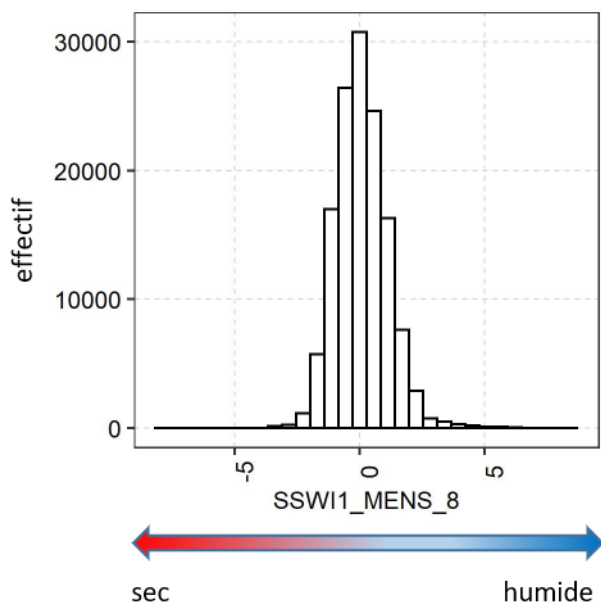


Figure 12 : Distribution de l'indice de sécheresse des sols standardisé SSWI d'août (SSWI1_MENS_8) sur l'ensemble des mailles recouvrant le territoire métropolitain de 2007 à 2021.

SPEI : Indice standardisé de précipitations et d'évapotranspiration

Afin d'évaluer la relation entre le climat et la mortalité, nous avons calculé un dernier indice de sécheresse : l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) (Vicente-Serrano et al. 2010). Cet indice repose sur les mêmes bases que le SPI complété par l'effet de la température, pour tenir compte de celle-ci dans la progression de la sécheresse par un calcul élémentaire du bilan hydrique. Ce calcul a été effectué grâce au package SPEI (Beguería and Vicente-Serrano 2017) dans le logiciel R version 4.1.1 (R Core Team 2019).

Le SPEI est calculé, pour une période donnée, sur la base de la différence (D) entre les précipitations mensuelles et l'évapotranspiration potentielle ($D = P - ETP$), données calculées et fournies par Météo-France. Les valeurs de D ont également été agrégées à différentes échelles de temps de 3 à 6 mois. Le SPEI est alors exprimé comme un indice standardisé, avec des valeurs négatives indiquant une sécheresse sur l'échelle de temps considérée et par rapport aux valeurs médianes pour la période de référence 1981-2010 (exemple de l'indice du mois d'août dans la Figure 13).

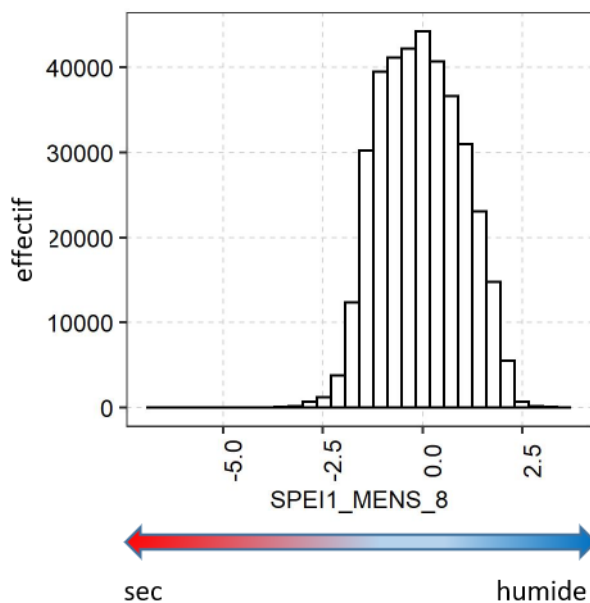


Figure 13 : Distribution de l'indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé SPEI d'août (SPEI1_MENS_8) sur l'ensemble des mailles recouvrant le territoire métropolitain de 2007 à 2021.

Il faut toutefois noter que les propriétés du sol ne sont pas prises en compte dans le calcul. En effet, il ne comprend pas de mesure de la réserve utile en eau, mais nous l'avons choisi ici sur la base de la preuve qu'il surpasse d'autres indices traditionnels tels que l'indice de gravité de la sécheresse du palmier et l'indice de précipitation standardisé (Bachmair et al. 2015; Blauhut et al. 2016).

1 Pourquoi travailler avec des indices standardisés ?

Le fait que l'indice soit standardisé permet de déterminer le caractère peu fréquent d'un épisode de sécheresse en cours (Tableau 3), ainsi que la probabilité d'une précipitation suffisante pour y mettre fin (McKee et al., 1993). Le degré d'exceptionnalité de la sécheresse à un endroit donné, par rapport au climat de référence à cet endroit, concourt alors à définir la sévérité de l'épisode. Cela permet aussi à l'utilisateur de comparer en toute confiance des sécheresses passées et actuelles entre des zones climatiques et géographiques différentes, quand il évalue selon quelle fréquence un épisode de sécheresse donné se produit.

Tableau 3: Interprétation de la valeur de l'indice et sa probabilité d'occurrence

Indice SPI	Catégorie	Nombre de fois sur 100 ans	Fréquence
de 0 à -0,99	Sécheresse légère	33	1/3 ans
de -1,00 à -1,49	Sécheresse modérée	10	1/10 ans
de -1,5 à -1,99	Sécheresse sévère	5	1/20 ans
< -2,0	Sécheresse extrême	2	1/50 ans

Un événement de sécheresse *au moins* modérée, d'indice inférieur à -1, a théoriquement une probabilité cumulée d'occurrence d'environ 17 % soit une fréquence de l'ordre de 1/6 ans.

Par ailleurs, il est important de mentionner que l'utilisation du SPI permet de perfectionner l'utilisation, qui existe notamment chez les Experts forestiers de France, du rapport P/N = précipitations/normales climatiques en le rendant plus générique et en introduisant une relation à la fréquence des événements qui est centrale lorsqu'il s'agit de piloter des risques.

Les indices SPI, SSWI et SPEI sont définis mensuellement, mais également pour des périodes glissantes de 3 et 6 mois. La nomenclature utilisée précise, après le nom de l'indice, la durée de la période d'application (1, 3, 6 : indice respectivement mensuel, trimestriel ou semestriel) suivie du dernier mois bornant celle-ci. Par exemple, le SPI3_8 correspond à l'indice standardisé des précipitations calculé pour les trois mois précédant le mois d'août inclus, portant donc sur juin, juillet et août.

c) Températures

Afin d'évaluer l'effet des fortes températures estivales sur la survie des plants à l'automne, plusieurs variables élaborées ont été créées à partir des modélisations journalières de températures maximales fournies par le modèle Safran.

- TX.6, TX.7, TX.8 : moyenne mensuelle des températures maximales quotidiennes des mois de juin, juillet et août ;
- TX.JJA : moyenne trimestrielle des températures maximales quotidiennes (ensemble de la période de juin à août) ;
- TX.max.JJA : température quotidienne maximale atteinte sur la période de juin à août ;
- HI.DD.X : somme des degrés.jour dépassant un seuil de température choisi sur la période de juin à août (X= 35, 38, 40 °C).

6.1.2.2.Réserve utile en eau du sol

La réserve utile correspond à la part de la réserve en eau dans le sol extractible par les racines des arbres. La RU d'un échantillon de sol, est la différence de contenu en eau entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement et s'exprime en mm. Dans notre cas, la réserve utile (RU) du sol provient du programme ClimEssences. Les données sont issues d'un raster en Lambert 93, d'une résolution de 1 km² calculé à partir des données de l'[ESDB](#) (Panagos et al. 2012). L'utilisation de la RU nous permet d'agréger plusieurs informations en un paramètre : profondeur du sol, texture, teneurs en éléments grossiers...

6.1.2.3.Pratiques et techniques de plantation

Grace au suivi effectué par le DSF nous avons accès pour chaque plantation à des informations concernant l'itinéraire technique mis en œuvre (date de plantation, travaux préparatoires et d'entretien). Sur l'ensemble des plantations conservées pour l'étude, 19 modalités de traitements ont été appliquées. Afin de faciliter l'analyse et équilibrer le nombre d'observations par type de traitement nous avons regroupé les différents traitements en 6 catégories :

- CONC : Dégagement mécanique, dégagement manuel, dégagement herbicide
- GIB : Protection et répulsif gibier
- HER : Velpar, fusilade, autre phytocide homologué
- INS : Marshal S plantation, Marshal S pépinière, K- Othrine plantation, K- Othrine pépinière, Forester, Suxon forest, Merit forest, Karaté forêt, autre insecticide homologué
- PAI : Paillage
- BAR : Barrière physique hylobe

De la même manière que pour les traitements nous avons regroupé les différents types de travaux préparatoires effectués sur chaque plantation en 6 catégories :

- REMA : andainage, incinération
- BROY : broyage
- SOL : Sous solage, labour, travail superficiel, Minipelle en potet travaillé, autre travail du sol
- HERBI : glyphosate, autre herbicide homologué
- FERAM : fertilisation, amendement
- ENG : engrillagement

Afin de faciliter la compréhension des analyses nous avons listé dans le Tableau 4 les variables disponibles pour l'analyse de chaque jeu de données.

Tableau 4: Récapitulatif des variables disponibles pour chaque jeu de données.

Variable	Code	DSF	ONF	GCF	FBE
Essence	lib_ess	x	x	x	x
Type de plant (Godet, Racines nues)	type_plant	x		x	
Réserve utile en eau	RUmm	x			
Date de plantation	Mois	x		x	x
<i>Traitements</i>					
Barrière physique	TRT_BAR	x			
Dégagement mécanique, manuel, herbicide	TRT_CONC	x			
Protection et répulsif à gibier	TRT_GIB	x			
Herbicides	TRT_HER	x			
Insecticides	TRT_INS	x			
Paillage	TRT_PAI	x			
<i>Travaux sur la plantation</i>					
Technique de préparation du sol	Tech_prepa_sol			x	
Broyage	TRV_BRO	x			
Engrillagement	TRV_ENG	x			
Fertilisation et amendement	TRV_FERAM	x			
Herbicides	TRV_HERBI	x			
Andainage et incinération	TRV_REMA	x			
Travail du sol	TRV_SOL	x			
<i>Températures</i>					
Température maximale juin/juillet/août	TX.6/7/8	x	x	x	x
Température maximale moyenne sur juin-juillet-août	TX.JJA	x	x	x	x
Température maximale sur juin-juillet-août	TX.max.JJA	x	x	x	x
Somme des températures journalières $\geq 35/38/40^{\circ}\text{C}$ sur JJA	HI.DD.35	x	x	x	x
<i>Précipitations</i>					
Précipitations totales mensuelles (mm)	PRETOTM_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
Evapotranspiration potentielle (mm)	ETP_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
Pluie efficace (cumul quotidien, en mm et dixième)	PE_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
<i>Indicateurs sécheresse</i>					
Indice de sécheresse météorologique mensuel	SPI1_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
Indice de sécheresse météorologique cumulé sur 3 mois	SPI3_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
Indice de sécheresse météorologique cumulé sur 6 mois	SPI6_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
Indice de sécheresse des sols mensuel	SWI_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
Indice standardisé de sécheresse des sols mensuel	SSWI1_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
Indice standardisé de sécheresse des sols cumulé sur 3 mois	SSWI3_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x

Indice standardisé de sécheresse des sols cumulé sur 6 mois	SSWI6_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
Indice de précipitations et d'évapotranspiration standardisé mensuel	SPEI1_4/5/6/7/8/9/10	x	x	x	x
Indice de précipitations et d'évapotranspiration standardisé cumulé sur 3 mois	SPEI3_6/7/8/9/10	x	x	x	x
Indice de précipitations et d'évapotranspiration standardisé cumulé sur 6 mois	SPEI6_9/10	x	x	x	x

6.2.Méthodes

Pour répondre aux objectifs de l'étude, nous avons évalué rétrospectivement les relations entre le taux de mortalité des plants à l'automne et les conditions météorologiques sur plusieurs jeux de données. Pour cela, nous avons évalué dans un premier temps un large panel d'indicateurs susceptibles de caractériser les épisodes de sécheresse ayant des conséquences négatives sur la reprise des plants. L'idée étant de rechercher parmi ces nombreuses variables (Tableau 4), dans le cadre d'une modélisation, lesquelles permettent de prédire avec le plus de satisfaction le taux de mortalité abiotique des plants suivis par le DSF. Après avoir ainsi identifié un ou plusieurs indicateurs pertinents, nous avons évalué la robustesse et la généralité des sorties du modèle en utilisant des jeux de données indépendants composés des constats de reprise de l'ONF et de GCF.

6.2.1.Méthode d'analyse : Random Forest

Pour identifier les meilleurs prédicteurs de la mortalité de plants à l'automne par plantation et pour chaque espèce nous avons choisi de travailler avec un modèle d'apprentissage de forêts aléatoires. Nous avons utilisé l'algorithme de forêt aléatoire (Random Forest) « simple » développé par Breiman (Breiman 2001). Cette méthode de modélisation possède l'avantage d'être non paramétrique, c'est-à-dire de ne pas reposer sur des hypothèses de forme de relation entre variables que nous ne connaissons pas *a priori*. Théoriquement, la méthode est aussi en mesure de s'affranchir plus avantageusement que les méthodes statistiques traditionnelles (modèles linéaires, modèles non linéaires) des liens de corrélations entre variables. Elle permet également l'expression d'effets seuils pour certaines variables, ce qui n'est pas généralement le cas lors de l'utilisation de méthodes paramétriques standard.

La performance des modèles ainsi que l'importance des variables dans la qualité de la prédiction sont mesurées par le critère de l'erreur quadratique moyenne (MSE). Ce critère permet d'obtenir un classement des variables selon leur importance et contribue ainsi à identifier les variables les plus pertinentes pour notre travail.

Pour décrire les relations entre les prédicteurs sélectionnés et la variable d'intérêt (le taux de mortalité), nous avons utilisé le package "PDP" (Greenwell 2017). Ces résultats sont illustrés avec des graphiques de dépendance partielle (« partial dependence plot » en anglais, PDP). Un diagramme de dépendance partielle (PDP) montre le sens de la relation entre la réponse et le prédicteur (« toutes choses étant égales par ailleurs ») ainsi que sa forme, linéaire, monotone ou plus complexe. Pour une valeur prédictive donnée, le PDP indique quel est l'effet marginal moyen sur la prédiction. Nous avons

utilisé les diagrammes de dépendance partielle (PDP) pour analyser le sens positif ou négatif de l'effet des prédicteurs utilisés et de leur amplitude.

Toute cette procédure est répétée pour chaque jeu de données. Nous avons utilisé le logiciel R version 4.1.1 (R Core Team 2019) pour toutes nos analyses statistiques.

6.2.2. Calibration à l'échelle nationale : DSF

L'étape d'analyse et de prospection des relations entre la mortalité des plants et le climat a été faite sur les données de suivi de mortalité effectué par le DSF. Il s'agit de la seule base de données d'envergure nationale avec des observations s'étalant de 2007 à 2021 pour plusieurs essences avec un protocole homogène dans le temps. De plus, nous disposons pour ces observations d'une distinction des causes présumées de mortalité biotiques et abiotiques ainsi que des travaux préparatoires et des traitements effectués.

Face au nombre de prédicteurs disponibles, nous avons conduit quatre étapes successives de sélection de variables aboutissant à un modèle simplifié le plus pertinent possible.

6.2.2.1. Etape 1 : modèle maximal (116 variables)

Dans un premier temps, nous avons procédé à une étape de prospection parmi tous les prédicteurs disponibles dans la base de données du DSF (voir Tableau 4) liée aux données de Météo-France. L'objectif est d'obtenir un premier classement des variables selon leur importance et d'en retenir une sélection plus restreinte en identifiant, par l'interprétation des résultats, des variables prometteuses (celles qui ont des capacités prédictives intéressantes) et en laissant de côté des variables redondantes ou trop peu explicatives du taux de mortalité.

Dans cette première étape, nous avons introduit à la fois des grandeurs climatiques élémentaires c'est-à-dire potentiellement mesurables (températures maximales, cumul des précipitations, précipitations efficaces, évapotranspiration potentielle, indice d'humidité des sols), et des grandeurs élaborées ou issues de calculs (cas des indices standardisés de sécheresse) présentées dans le Tableau 4. Nous prospectons ainsi sans *a priori* parmi l'ensemble de la liste des variables météorologiques candidates. La puissance de la méthode d'analyse choisie « Random Forest » nous permet d'identifier les prédicteurs des taux de mortalité de plants ainsi que les fenêtres temporelles (groupes de mois) les plus discriminants en lien avec les espèces étudiées.

L'inconvénient est le risque de confusions entre facteurs, par exemple entre précipitations et indices de sécheresse. Un autre inconvénient de cette approche est l'augmentation importante du nombre de prédicteurs dans le modèle et la présence de nombreuses variables très corrélées entre elles. Rappelons que l'algorithme de forêts aléatoires sélectionne des variables sous forme d'une liste de prédicteurs pouvant être redondants. La présence du grand nombre de prédicteurs corrélés entre eux par construction dans l'analyse peut rendre l'interprétation des résultats difficile. Le modèle pouvant sélectionner à la fois les indices de déficit hydrique et des variables élémentaires utilisées pour calculer ces mêmes indices, il devient donc difficile de distinguer le véritable effet de chaque prédicteur. Il conviendra de toute façon de garder à l'esprit que les liens mis en évidence (et recherchés) resteront corrélatifs et pas directement explicatifs de phénomènes physiologiques.

Pour illustrer les résultats, nous présentons dans la Figure 14 le classement de l'importance des 35 meilleurs prédicteurs pour expliquer les taux de mortalité. Les noms des prédicteurs dans cette figure se trouvent dans le Tableau 4. On voit dans un premier temps que, parmi les 116 prédicteurs explorés, l'essence est la meilleure variable pour expliquer les différents taux de mortalité de plants. Notons que cette sélection des 35 meilleures variables prédictives ne fait apparaître, après l'essence, que des indices standardisés et pose la question de leur supériorité vis-à-vis des variables météorologiques élémentaires. On remarque néanmoins que la présence d'un grand nombre de prédicteurs empêche le modèle de dégager nettement un ou plusieurs prédicteurs spécifiques pour expliquer la mortalité des plants.

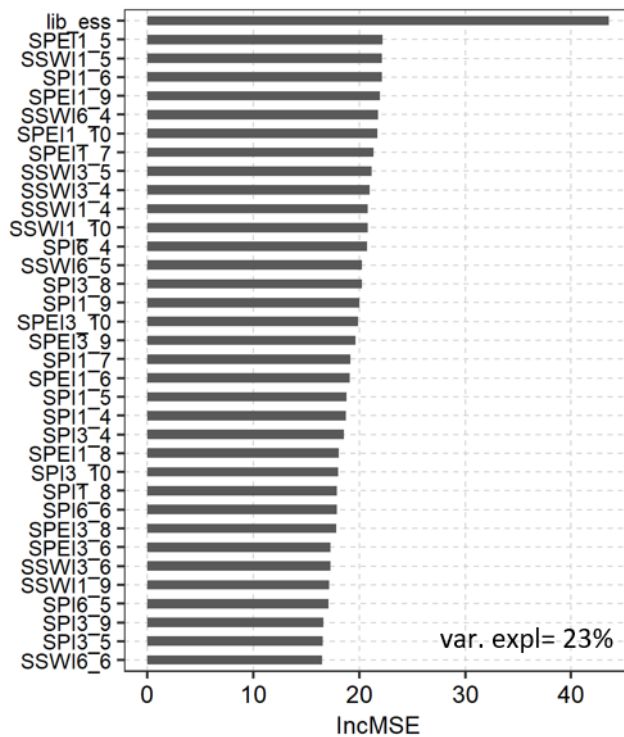


Figure 14 : Classement des prédicteurs de la mortalité de plants toutes essences confondues sur la période 2007-2021 sur le jeu de données du DSF. Pour faciliter la représentation nous avons fait le choix de ne représenter que les 35 premières variables du classement sur les 116 intégrées dans le modèle.

6.2.2.2. Etape 2 : modèles avec variables élémentaires versus élaborées

Dans un second temps, nous avons testé l'intérêt d'utiliser des variables standardisées (indices de sécheresse) comparées aux grandeurs météorologiques élémentaires (précipitations, évapotranspiration potentielle, humidité des sols) pour modéliser l'effet du stress hydrique sur la mortalité des plants. Pour cela nous avons construit deux modèles à partir de ces sous-ensembles distincts de variables et comparé les résultats. L'objectif de cette étape est de savoir si l'utilisation seule de variables élémentaires ou standardisées impacte la qualité des modèles car leur nature est foncièrement différente (en termes de sens et d'applications). Les pourcentages de variance expliqués présentés dans la Figure 15 nous montrent que la qualité des modèles est légèrement inférieure lorsque l'on utilise les variables standardisées. Au regard des attentes opérationnelles du projet, nous avons fait le choix, malgré une légère perte de performance du modèle construit à partir des indices de sécheresse, de nous concentrer par la suite sur ce type de variables et d'ignorer les

grandeurs élémentaires. En effet, travailler avec les indices standardisés de sécheresse permet de comparer les indices entre différents climats de façon plus générique et laisse donc entrevoir des applications et une acceptabilité plus aisées à l'échelle de la filière française. Ce choix nous permet aussi de traduire l'indice en « temps de retour » de l'événement (encadré 1), ce qui peut être très intéressant quand on parle de risque.

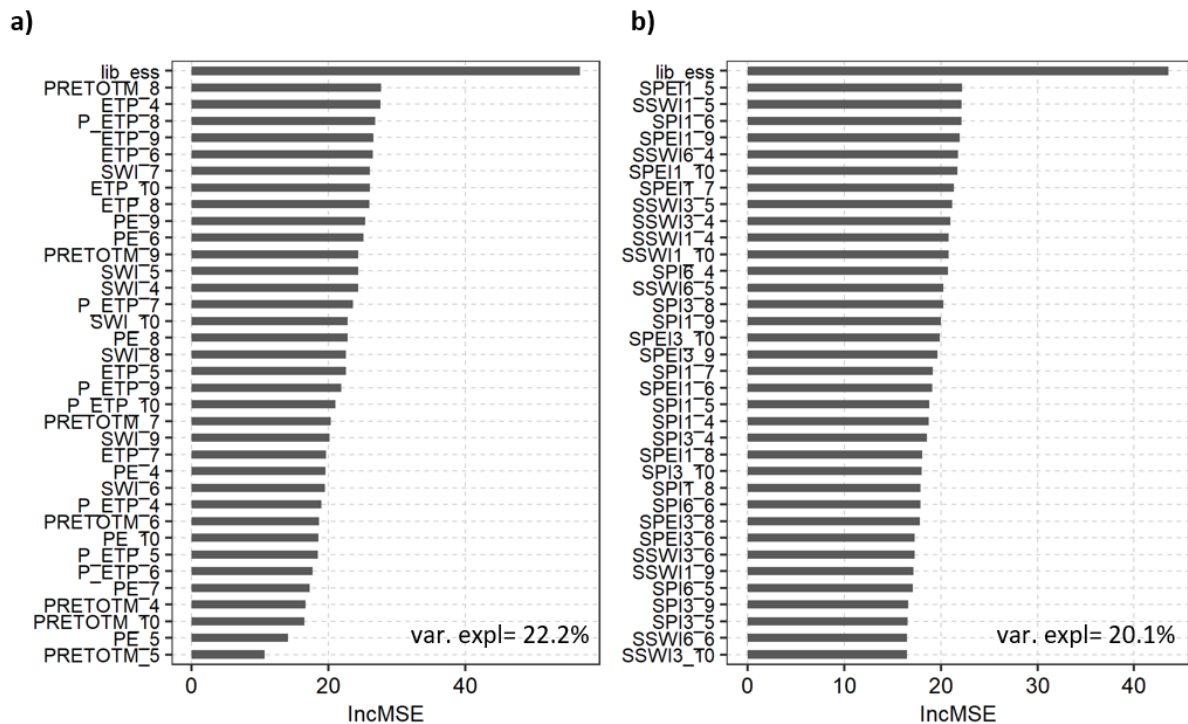


Figure 15 : Classement des prédicteurs de la mortalité de plants toutes essences confondues sur la période 2007-2021 sur le jeu de données du DSF. A gauche, le classement des prédicteurs issu du modèle construit à partir des variables « absolues ». A droite le classement des 35 meilleurs prédicteurs issu du modèle construit à partir des variables standardisées.

Ces résultats suggèrent – par l'absence de distinction marquée entre de nombreuses variables – que les modèles sont globalement surparamétrés par un nombre trop important de variables. L'examen des diagrammes de dépendance partielle de chaque variable nous a conduit à sélectionner parmi des variables, d'importance équivalente, plus intéressantes car montrant une forme de relation avec les taux de mortalité ayant du sens et une amplitude substantielle. A titre d'exemple, la Figure 16 compare les relations entre la mortalité et deux indices, l'un portant sur la période de mars à mai (SSWI_MENS_5), l'autre sur la période estivale de juin à août (SPI3_MENS_8). L'indice de sécheresse des précipitations estival conduit à une relation ayant une amplitude d'effet supérieure. Ce type de comparaisons nous a poussé, pour la suite, à revenir à une approche centrée sur le fonctionnement de l'arbre, c'est-à-dire en ne conservant que les variables portant sur la saison de végétation (d'avril à octobre).

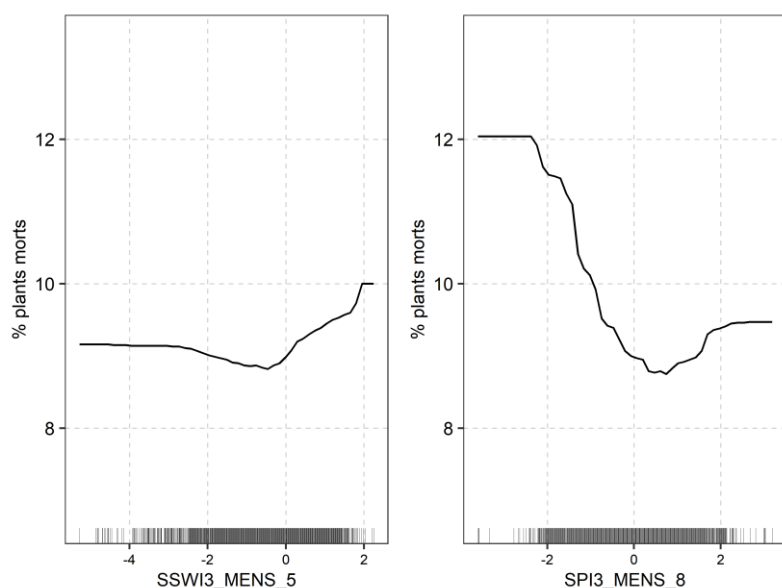


Figure 16 : Comparaison des diagrammes de dépendance partielle du SSWI3_5 et du SPI3_8 issus du modèle comprenant uniquement les indices standardisés. Ces variables se classent respectivement 9^{ème} et 15^{ème} par ordre d'importance dans le modèle (cf. b) ci-dessus).

Les prédicteurs ont alors été sélectionnés sur des périodes spécifiques, excluant le repos végétatif et limitant les chevauchements entre les périodes afin d'éviter les redondances entre variables. En effet, par exemple, deux indices trimestriels consécutifs reposent sur 2/3 de données en commun pour leur calcul. Nous avons donc cherché à éviter cette configuration. Nous avons aussi exclu les variables mensuelles qui partagent les données nécessaires à leur calcul avec les variables trimestrielles ou semestrielles. Par la suite, nous nous concentrerons donc sur l'utilisation dans les modèles des indices standardisés portant sur les périodes illustrées dans la Figure 17 ci-dessous.

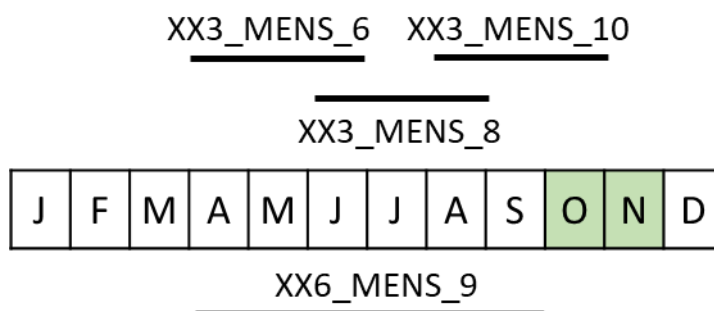


Figure 17 : Schéma synthétique des périodes retenues pour les prédicteurs climatiques. XX3_Mens_8 signifie que l'indice XX comprend le cumul de pluviométrie du mois d'août ainsi que des deux mois précédents (juin et juillet). En vert, la période de constat.

6.2.2.3. Etape 3 : Modèles avec ou sans températures

Enfin nous souhaitons effectuer un dernier test avant d'entamer les analyses. En 2020, selon le rapport annuel du DSF, pour « 60 % des 12 721 plants morts d'origine abiotique, la mortalité est imputable à la sécheresse et pour 40 % la mortalité est complexe ». Dans le cas des mortalités dues à des causes abiotiques, on peut supposer qu'une part de cette mortalité est le résultat d'une sécheresse ou de

fortes températures. Cependant, l'interaction entre ces deux facteurs, notamment en période estivale, rend le diagnostic de mortalité du plant difficile.

Introduire les prédicteurs décrivant les épisodes de chaleurs exceptionnelles permet de tester de manière grossière les liens entre épisodes caniculaires et la mortalité des plants. Il est cependant difficile de distinguer un effet température d'un effet de sécheresse du sol. C'est pourquoi nous avons construit deux modèles de prédiction de la mortalité des plants, avec et sans les prédicteurs liés aux températures maximales estivales (cf. 6.1.2.1c)Températures).

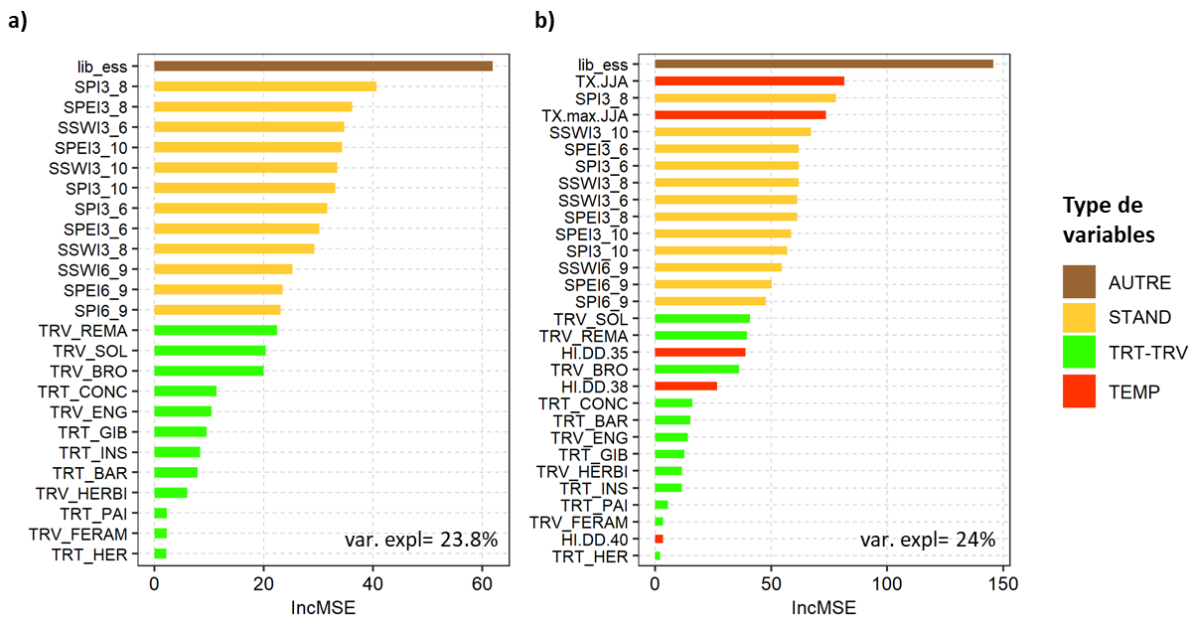


Figure 18 : Classement des prédicteurs de la mortalité de plants toutes essences confondues sur la période 2007-2021 sur le jeu de données du DSF. A gauche, le classement des prédicteurs issu du modèle construit sans les variables de températures. A droite le classement des prédicteurs issu du modèle issu du modèle construit avec les variables de températures. Le code couleur permet d'identifier les différents groupes de prédicteurs. En rouge, les prédicteurs liés aux températures maximales, en vert les travaux et traitement effectués sur les plantations, en jaune les variables standardisées et en brun l'espèce. Le détail de chaque code est disponible dans le Tableau 4.

Après l'essence, les trois premières variables, en termes d'importance dans le modèle, sont la température maximale moyenne sur juin-juillet-août (TX.JJA), l'indice standardisé de sécheresse des précipitations cumulé sur juin-juillet-août (SPI3_8) et la température maximale absolue sur la période juin-juillet-août (TX.max.JJA) (Figure 18). Globalement, l'ajout des températures dans les modèles de mortalité n'augmente pas tellement les performances du modèle (cf. proportion de variance expliquée, Figure 18) et ne constitue donc pas une information supplémentaire décisive dans la prédiction. Cependant, l'analyse plus approfondie de l'effet marginal des variables de températures maximales, comme par exemple la température quotidienne maximale atteinte dans l'été, illustrée Figure 19, fait état d'une relation croissante, au-delà de 30 °C de maximum, entre la température et la mortalité. Cette relation – de l'ordre d'un point de pourcentage de mortalité supplémentaire par degré supplémentaire de maximum de température – ainsi que l'interaction avec l'indice de sécheresse des précipitations suggèrent que les fortes températures pourraient être un élément d'aggravation de l'effet de la sécheresse estivale sur les plantations.

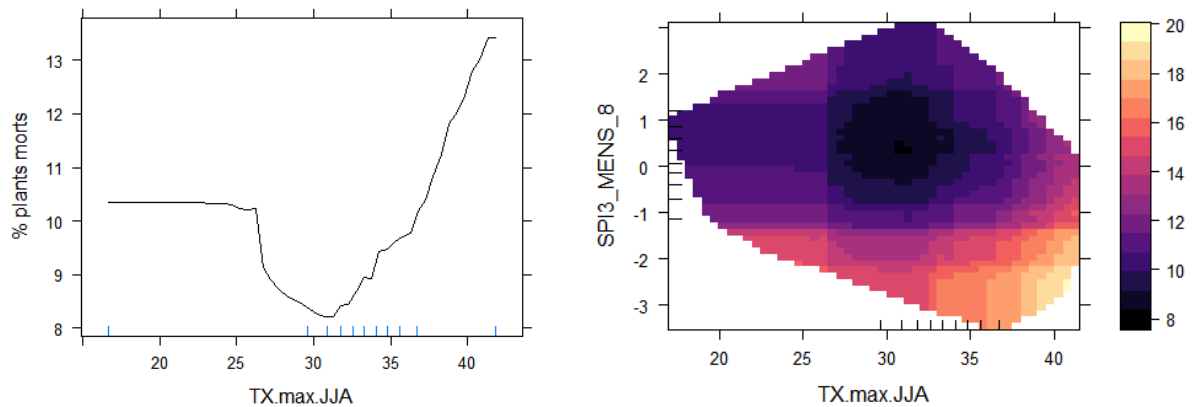


Figure 19 : Effet marginal sur les prédictions du taux de mortalité de la température quotidienne maximale estivale (TX.max.JJA). A gauche : diagramme de dépendance partielle montrant l'effet dans le modèle de cette variable « toutes choses égales par ailleurs ». Les marques bleues représentent les déciles de la distribution des données. A droite : diagramme de dépendance partielle à deux dimensions montrant l'interaction entre l'indice estival de sécheresse standardisé des précipitations (SPI3_MENS_8) et la température maximale (TX.max.JJA). Les taux de mortalités prédits sont représentés par l'échelle des couleurs. Les marques noires représentent la distribution des données pour chaque variable. La surface colorée correspond au domaine exploré par le jeu de données (absence de prédiction au-delà).

Toutefois, à ce stade, il reste difficile de départager les effets de la température de ceux la sécheresse. Notons à ce propos que les plantations ayant connu à la fois une sécheresse sévère et des températures de l'ordre de 40 °C sont rares parmi les données dont nous disposons. La robustesse des prédictions dans cette situation est donc à nuancer. Par ailleurs, la Figure 20 illustre les liens de corrélation entre l'indice de sécheresse des sols cumulé sur juin-juillet-août et les deux variables de températures TXmax.JJA et TX.JJA. Les étés les plus chauds ont eu tendance à être aussi les plus secs. Toutefois la relation montre une variabilité importante.

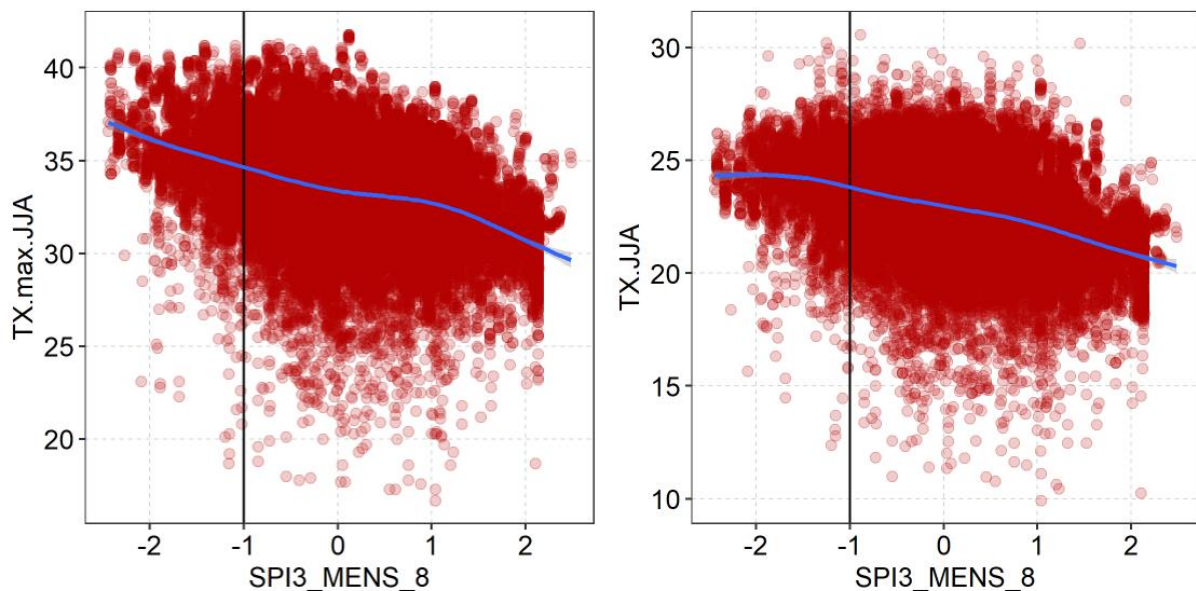


Figure 20 : Relation entre la température quotidienne maximale sur juin-juillet-août (TX.max.JJA, gauche) ou la moyenne des températures quotidiennes maximales sur juin-juillet-août (TX.JJA, droite) et l'indice standardisé de sécheresse des précipitations cumulé sur juin-juillet-août (SPI3_MENS_8). La moyenne glissante des relations est représentée par la courbe bleue. Le seuil de sécheresse se situe en dessous du seuil de -1 des indices standardisés, représenté par un trait vertical noir.

Suite à ces résultats et à une exploration plus poussée des données présentée dans l'encadré n°2, nous avons conclu que les variables susceptibles de caractériser les phénomènes de fortes chaleurs participaient peu, *dans les conditions de l'analyse*⁵, à prédire la mortalité abiotique des plants. De plus, comme nous pouvions nous y attendre (du fait de la corrélation spatiale des variables météorologiques), nous avons vérifié que les épisodes caractérisés par ces grandeurs sont en majorité confondus avec des épisodes de sécheresse qui seraient définis par le dépassement de seuils d'indices de sécheresse. La plus-value de l'utilisation d'indices de fortes chaleurs n'étant pas évidente, en l'état, nous avons décidé de ne pas inclure ces variables dans la modélisation des mortalités de plants.

⁵ Notre étude rétrospective porte sur la période 2007-2021 durant laquelle il semble que le déficit hydrique ait agi de manière limitante de façon plus importante que les fortes températures. En revanche, les effets physiologiques de températures très élevées sur les arbres reposant sur des effets de seuil, il est possible qu'à l'avenir cette composante prenne une part plus importante dans la mortalité des plants, indépendamment du déficit hydrique, à mesure que le climat se réchauffe et que ces seuils seront plus fréquemment dépassés.

L'étude de l'effet des sécheresses exceptionnelles sur la mortalité de plants amène la question de l'effet des fortes chaleurs qui ont pu, ces dernières années, produire des dégâts importants et soudains sur les reprises. Comme il est difficile de différencier l'effet de fortes chaleurs estivales des épisodes de sécheresse, nous ne nous sommes pas attardés sur ce point. Cependant, nous avons vérifié que les indices de sécheresse permettaient d'inclure, en bonne partie, les épisodes de grandes chaleurs de courte durée.

Pour cela, nous avons mis en relation deux indices de sécheresse estivaux (SPI et SPEI cumulés sur juin-juillet-août) avec la somme des températures journalières supérieures ou égales à 40 °C sur la période juin-juillet-août (HI.DD.40).

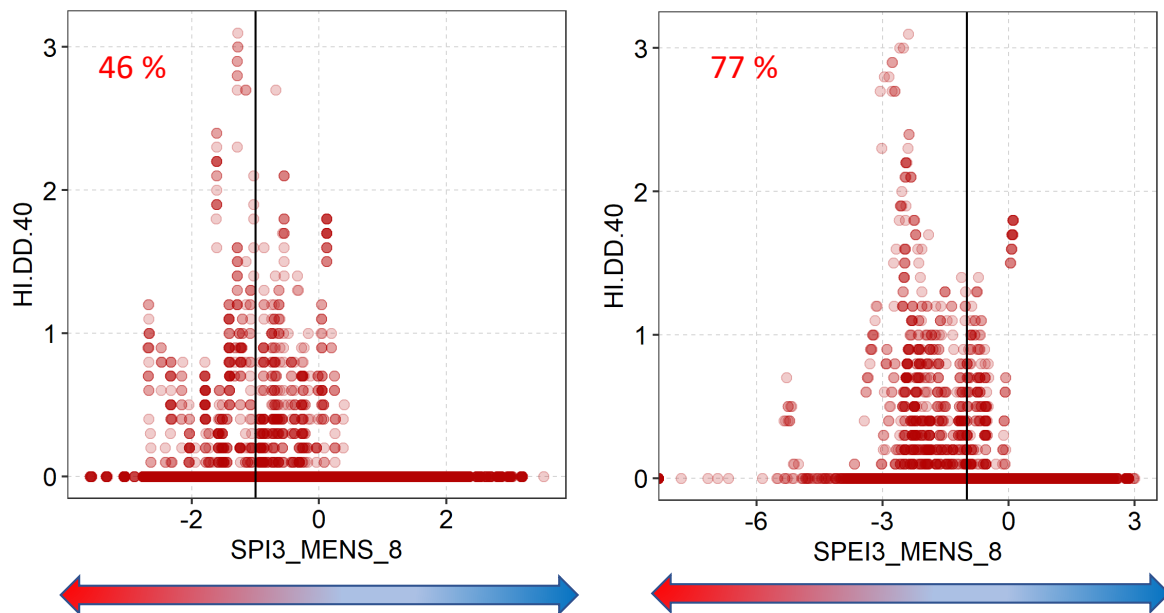


Figure 21 : Relation entre la somme des températures journalières supérieures ou égales au seuil de température sur la période JJA (HI.DD.40) et l'indice de sécheresse météorologique cumulé sur juin-juillet-août (SPI3_Mens_8, gauche) ou l'indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé (SPEI_3_Mens_8, droite). Le seuil de sécheresse se situe en dessous du seuil de -1 des indices.

En fonction de l'indice de sécheresse, 46 % à 77 % des points où la température journalière a été supérieure à 40 °C se situent sous le seuil de -1 de sécheresse (Figure 21). Cela signifie que les événements extrêmes de fortes températures pouvant impacter la survie des plants sont en bonne partie inclus dans les épisodes de sécheresse qui seraient définis par l'utilisation d'indices standardisés de sécheresse. Ceci s'explique par la corrélation spatio-temporelle entre épisodes de chaleur et de sécheresse.

6.2.2.4. Etape 4 : modèle final pour la calibration

Suite à ces différentes analyses nous avons abouti à la construction d'un modèle plus sobre en nombre de prédictors. Les modèles étaient globalement surparamétrés au départ du fait de l'évaluation d'un trop grand nombre de grandeurs météorologiques candidates (dont certaines étaient partiellement redondantes ou corrélées). Ces analyses exploratoires nous ont permis d'opérer une sélection judicieuse des variables, permettant de simplifier le modèle finalement retenu sans véritablement en dégrader la performance prédictive (mesurée par le pourcentage de variance expliquée) comme le montreront les résultats exposés par la suite.

En plus des prédictors climatiques ainsi « présélectionnés », nous avons conservé dans le modèle l'essence plantée (toujours la première variable explicative du taux de mortalité) et ajouté la réserve utile en eau, le type de plant (racines nues, godet), la saison de plantation ainsi que les types de travaux et traitements effectués sur la plantation. La liste des nouveaux prédictors est présentée dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Tableau des prédicteurs retenus dans les analyses pour modéliser le taux de mortalité des plants.

Variable	Code	DSF	ONF	GCF	FBE
Essence	lib_ess	x	x	x	x
Type de plant (Godet, Racines nues)	type_plant	x			
Réserve utile en eau	RUmm	x			
Date de plantation	Mois	x			
<i>Traitements</i>					
Barrière physique	TRT_BAR	x			
Dégagement mécanique, manuel, herbicide	TRT_CONC	x			
Protection et répulsif à gibier	TRT_GIB	x			
Herbicides	TRT_HER	x			
Insecticides	TRT_INS	x			
Paillage	TRT_PAI	x			
<i>Travaux sur la plantation</i>					
Technique de préparation du sol	Tech_prepa_sol				
Broyage	TRV_BRO	x			
Engrillagement	TRV_ENG	x			
Fertilisation et amendement	TRV_FERAM	x			
Herbicides	TRV_HERBI	x			
Andainage et incinération	TRV_REMA	x			
Travail du sol	TRV_SOL	x			
<i>Indicateurs sécheresse</i>					
Indice de sécheresse météorologique cumulé sur 3 mois	SPI3_6/8/10	x	x	x	x
Indice de sécheresse météorologique cumulé sur 6 mois	SPI6_9	x	x	x	x
Indice standardisé de sécheresse des sols cumulé sur 3 mois	SSWI3_6/8/10	x	x	x	x
Indice standardisé de sécheresse des sols cumulé sur 6 mois	SSWI6_9	x	x	x	x
Indice de précipitations et d'évapotranspiration standardisé cumulé sur 3 mois	SPEI3_6/8/10	x	x	x	x
Indice de précipitations et d'évapotranspiration standardisé cumulé sur 6 mois	SPEI6_9	x	x	x	x

6.2.3. Etude de cas : ONF et GCF

L'objectif de cette étape est d'évaluer la robustesse des résultats obtenus sur les données du DSF. Nous avons décidé d'analyser ensemble les données de mortalité de plants de l'ONF et des coopératives forestières. Cette démarche nous permet d'augmenter les effectifs pour améliorer la puissance de l'analyse mais aussi d'agrandir la zone d'étude. L'inconvénient de cette approche est l'impossibilité d'intégrer des prédicteurs autres que climatiques. En effet, les données issues de l'ONF ne nous permettent pas d'intégrer dans les modèles des prédicteurs tels que le traitement du sol ou le type de plant. La liste des prédicteurs intégrés dans le modèle est disponible dans le Tableau 5.

7. Résultats

7.1.1. Modélisation des mortalités de plants à l'échelle nationale (données du DSF)

Dans cette partie nous avons cherché à prédire les mortalités de plants observées, toutes essences confondues, avec les variables présentées dans le Tableau 5. Le classement des prédicteurs expliquant la mortalité de plants est présenté dans la Figure 22. Les noms des prédicteurs dans cette figure se trouvent dans le matériel et méthodes mais est également rappelé dans les passages suivants.

Sur la Figure 22, à gauche, se trouve le classement des variables prédisant le mieux la mortalité. **La première variable explicative est l'essence de reboisement (lib_ess)**, suivie par deux indices de sécheresse météorologique, **l'indice de sécheresse standardisé des précipitations** et l'indice standardisé de précipitations et d'évapotranspiration cumulés de juin à août (SPI3_8 et SPEI3_8) ainsi que la réserve utile en eau du sol (RU).

La description des relations entre la mortalité de plants et les prédicteurs est faite à partir des diagrammes de dépendance partielle (l'ensemble des variables étant présenté en Annexe 2). Le diagramme présenté dans la Figure 22 à droite permet de visualiser la relation entre la mortalité de plants et la variable d'intérêt (SPI3_8), tout en gardant les autres prédicteurs constants. Ici, la figure met en évidence l'existence d'une relation décroissante entre l'indice de sécheresse météorologique cumulé sur juin-juillet-août et la mortalité de plant. Pour rappel, un indice négatif signifie qu'il y a eu moins de précipitations que la normale donc que les conditions ont été particulièrement sèches au regard du climat habituel de chaque lieu de plantation. Par conséquent plus l'indice est négatif, plus la sécheresse a été localement exceptionnelle, plus la mortalité de plant est importante. A contrario, les excès de précipitations par rapport à la normale n'ont que peu d'effet sur la mortalité.

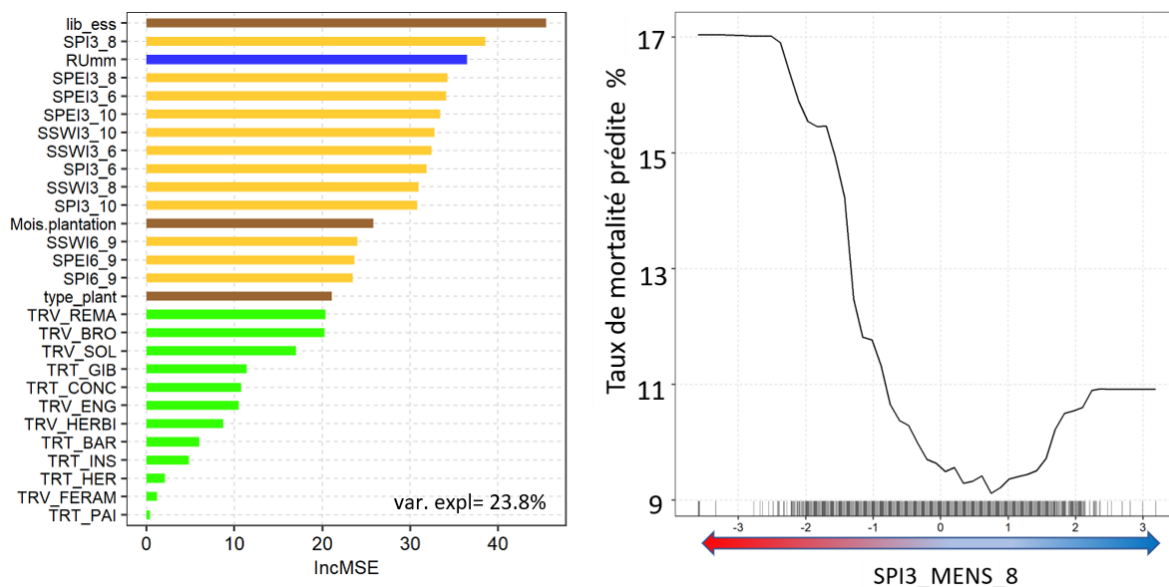


Figure 22 : A gauche : Le classement par ordre décroissant d'importance des prédicteurs de la mortalité de plants observée par le DSF, toutes essences confondues et sur la période 2007-2021. A droite : Le diagramme de dépendance partielle représentant l'effet marginal de l'indice de sécheresse météorologique (SPI3_8) sur la mortalité de plants. En bas du diagramme, contre l'axe des abscisses, est représentée la distribution du prédicteur.

Notons que le modèle ainsi obtenu explique environ 24 % de la variabilité du phénomène de mortalité abiotique. Cette performance doit être interprétée au regard de la variabilité du phénomène analysé. La mortalité des plants à l'issue de la première saison de végétation est un phénomène fortement aléatoire et difficile à prédire. Plusieurs résultats de réseaux expérimentaux en plantation⁶ illustrent bien ce phénomène : différents itinéraires techniques (se distinguant de façon plus fine que leur notation par le DSF) mis en œuvre dans une même parcelle, une même année peuvent donner des résultats de survie très contrastés. De même, un itinéraire technique donné mis en œuvre dans différents sites, une même année, peut aussi produire des résultats parfois très variables. Au regard de ces éléments, et dans une démarche de prédiction économe en variables d'un phénomène complexe (seulement prédit à partir de la météo et de quelques informations sur l'itinéraire technique), la performance du modèle nous paraît suffisante pour que celui-ci contribue à la réflexion et à l'élaboration d'éléments d'aide à la décision.

L'analyse par essence des relations entre taux de mortalité et indice standardisé des précipitations de juin-juillet-août (SPI3_8), nous conduit à proposer une typologie – discutable – en trois groupes d'essences.

Dans la Figure 23 on retrouve les espèces pour lesquelles on observe une réponse « forte » à l'indice de sécheresse. Pour chaque espèce on observe une augmentation continue et d'amplitude conséquente de la mortalité avec l'intensité de la sécheresse décrite par l'indice. C'est typiquement le cas du douglas et du chêne sessile, respectivement 2^{ème} et 3^{ème} essences de reboisement en France.

Les essences dans la Figure 24 présentent une faible réponse à l'indice de sécheresse SPI3_8. Cette amplitude de réponse limitée peut s'expliquer soit par le faible effectif de l'essence, soit par l'absence de fortes mortalités en général chez ces essences. C'est typiquement le cas du peuplier qui connaît de manière générale – c'est-à-dire pratiquement quelle que soit la météo de l'année – d'excellents taux

⁶ par exemple les réseaux Alter et Pilote coordonnés par le pôle RENFOR : <https://www6.inrae.fr/renfor/Reseaux-d-experimentation>

de reprise (mortalité moyenne entre 3,7 %). Cette essence possède la particularité dans le panel de concerner du matériel de reproduction très différent (plançons bouturés et non pas plants) et d'être en général installée dans des zones où la disponibilité en eau dans le sol compense les aléas météorologiques (en particulier dans les zones alluviales).

Enfin, la Figure 25 représente le groupe d'essences présentant une réponse plus modérée dans son amplitude à l'indice de sécheresse SPI3_8 même si l'on observe un tendance à l'augmentation de la mortalité en situation de sécheresse (indice négatif). Il s'agit aussi d'essences pour lesquelles le nombre de données peut rendre les relations plus fragiles. Le pin maritime, 1^{ère} essence de reboisement en France (de très loin) a été intégré à ce groupe. Sa rusticité, ainsi que la maîtrise d'itinéraires techniques éprouvés, lui confèrent d'excellentes aptitudes à la reprise de manière générale (seulement 4 % de mortalité abiotique en moyenne) et ceci dans une large gamme de conditions météorologiques de l'année.

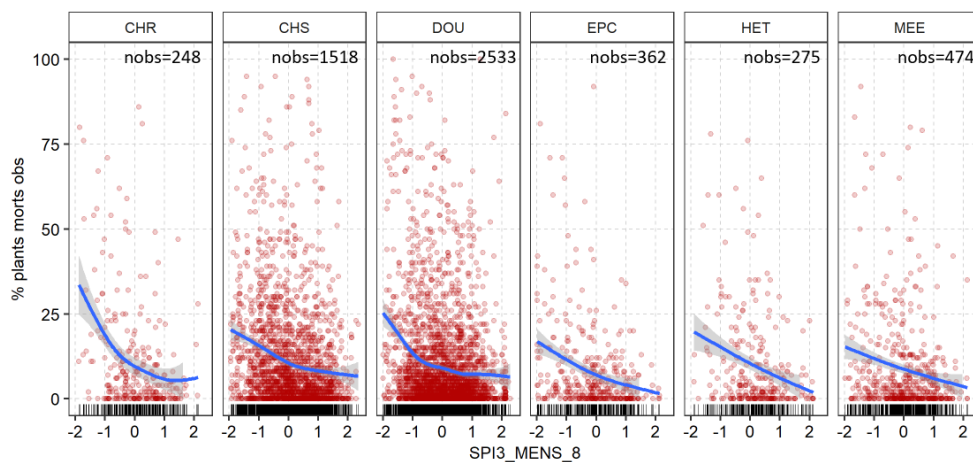


Figure 23 : Groupe d'espèces présentant une relation forte entre la mortalité de plants observés et l'indice de sécheresse météorologique cumulé sur juin-juillet-août (SPI3_8). EN rouge les observations, en bleu la courbe de tendance, en noir la distribution des mortalités observées.

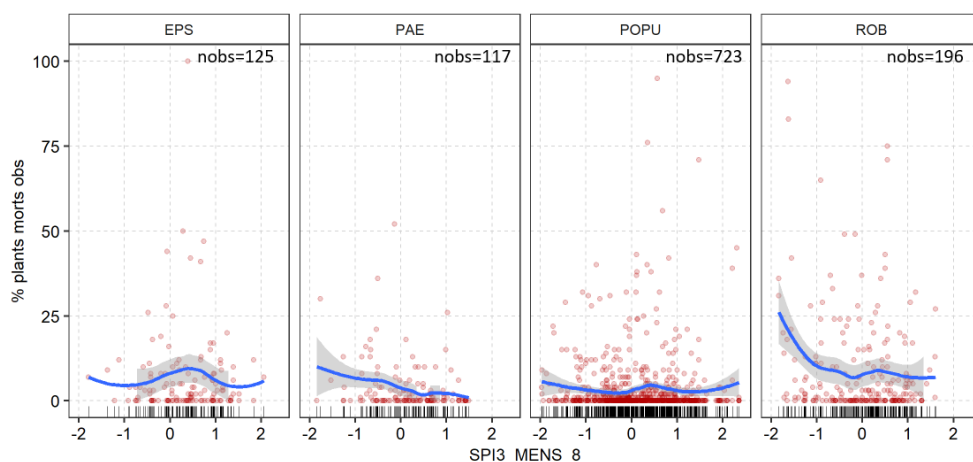


Figure 24: Groupe d'espèces présentant une relation faible entre la mortalité de plants observés et l'indice de sécheresse météorologique cumulé sur juin-juillet-août (SPI3_8). EN rouge les observations, en bleu la courbe de tendance, en noir la distribution des mortalités observées.

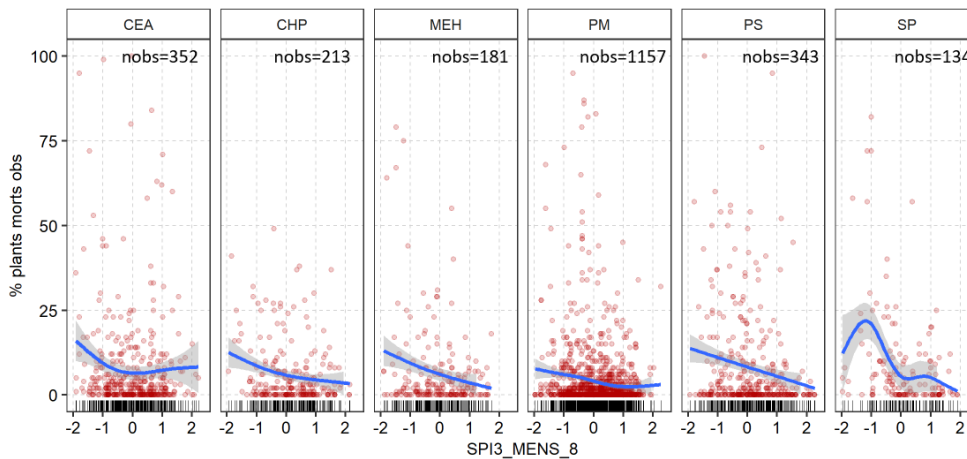


Figure 25: Groupe d'espèces présentant une relation moyenne entre la mortalité de plants observés et l'indice de sécheresse météorologique cumulé sur juin-juillet-août (SPI3_8). EN rouge les observations, en bleu la courbe de tendance, en noir la distribution des mortalités observées.

Un indice seul ou une combinaison d'indices ?

La difficulté à prédire la mortalité de plants de certaines essences avec l'indice de sécheresse des précipitations cumulé sur juin-juillet-août peut signifier que cet indice n'est pas forcément le plus adapté. En effet, l'indice SPI3_8 est basé uniquement sur les précipitations et ne prend pas en compte l'effet du sol. Or, l'indice standardisé de sécheresse des sols des trois mois d'été (SSWI3_8) pourrait aussi être un bon candidat à la définition des sécheresses dans les garanties de reprise. Certes, son importance dans le modèle toutes essences confondues est moindre que le SPI3_8 (Figure 22) mais il produit une relation marginale avec le taux de mortalité de la même forme (voir Annexe 2) et peut être mieux classé lorsqu'on réalise des modèles par essence (qui ne sont pas montrés ici). N'étant pas en mesure de départager fermement ces deux indices, qui ne sont peu corrélés, nous avons envisagé une utilisation combinée des deux. La Figure 26 présente l'effet de l'interaction entre les deux indices dans le modèle sur la mortalité des plants. Ce résultat suggère que l'utilisation simultanée des deux indices pourrait aider à discriminer de manière plus spécifique les épisodes de sécheresse conduisant à de fortes mortalités. Ainsi on voit sur la Figure 26 que la mortalité varie en fonction des deux prédicteurs. On peut donc imaginer créer, dans la pratique, différentes règles de définition de la sécheresse extrême plus ou moins exclusives pour discriminer les mortalités importantes (couleurs orange à jaune).

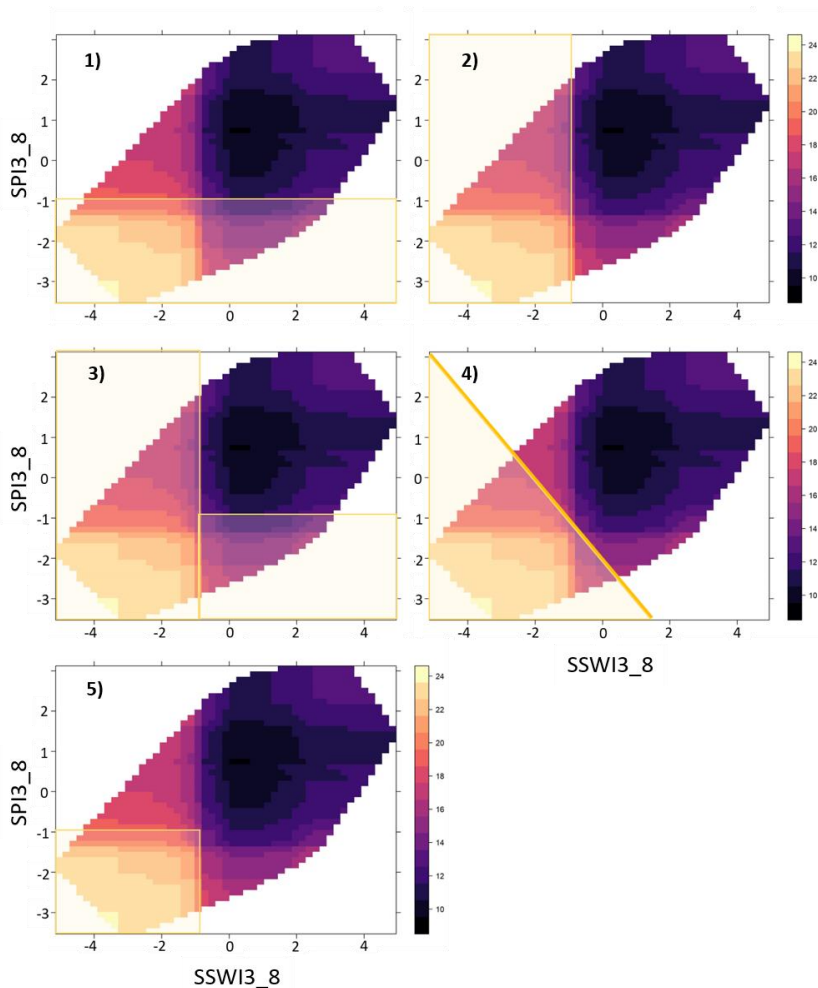


Figure 26 : Diagramme de dépendance partielle de la mortalité de plants et l'interaction de l'indice de sécheresse météorologique (SP3_8) et de l'indice de sécheresse des sols (SSWI3_8). En noir les faibles mortalités, en jaune les fortes mortalités prédites par le modèle. Différentes règles sont représentées pour discriminer les mortalités : 1) $SPI3_8 \leq -1$; 2) $SSWI3_8 \leq -1$; 3) $SSWI3_8$ ou $SPI3_8 \leq -1$; 4) $SSWI3_8 + SPI3_8 \leq -2$; 5) $SSWI3_8$ et $SPI3_8 \leq -1$.

Qu'en est-il des autres prédicteurs non climatiques ?

Malgré la troisième position de la réserve utile dans le classement des prédicteurs (Figure 22), cette dernière ne permet pas de discriminer les fortes mortalités. Le diagramme de dépendance partielle de la Figure 27 gauche, nous permet de comparer la réponse de la mortalité de plants à la réserve utile en eau (RUmm) et l'indice de sécheresse météorologique cumulé sur juin-juillet-août (SPI3_8). La réponse à la RU est bien plus faible que celle à l'indice de sécheresse. L'interaction de la réserve utile en eau et du SPI3_8 ne permet pas non plus de discriminer les mortalités importantes (Figure 27, droite).

Si l'on pouvait s'attendre à une interaction entre les deux, du fait d'un possible rôle compensateur du déficit de précipitation de la réserve en eau des sols, ces résultats vont à l'encontre de cette hypothèse. Cela pourrait s'expliquer par le fait que, durant leur première saison de végétation, les plants possèdent un système racinaire qui prospecte un faible volume de sol et qui ne leur donne pas encore accès à la totalité de la RU.

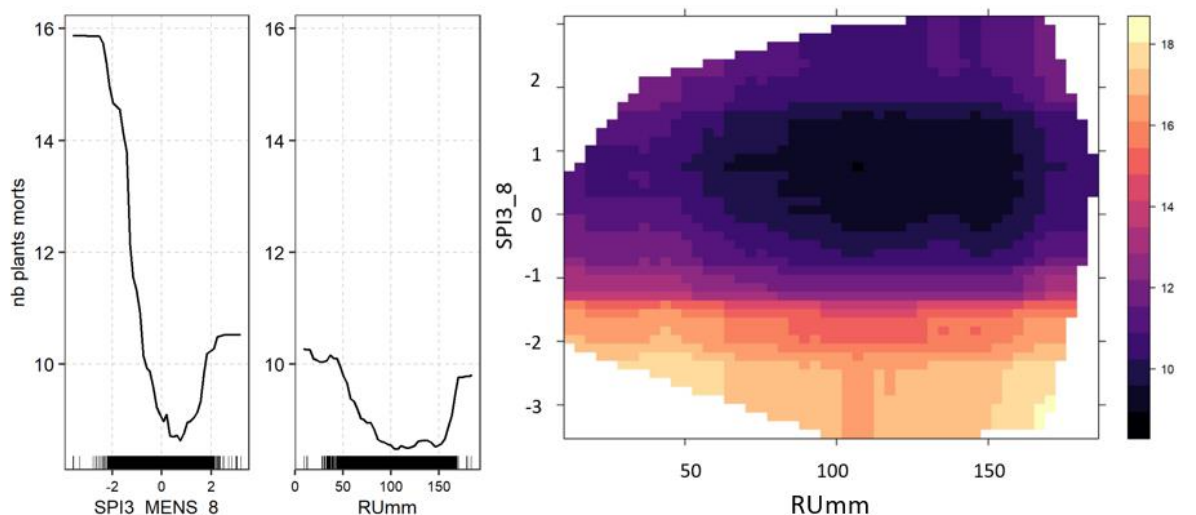


Figure 27 : A gauche : diagramme de dépendance partielle de la mortalité de plants et de l'indice de sécheresse météorologique (SPI3_8) ou de la réserve utile en eau (RUmm). A droite : diagramme de dépendance partielle de la mortalité de plants et l'interaction de l'indice de sécheresse météorologique (SPI3_8) et de la réserve utile en eau (RU). Dans le gradient à droite : en noir les faibles mortalités, en jaune les fortes mortalités. Le graphique montre l'augmentation de la mortalité de plant avec l'indice de sécheresse mais pas par rapport à la réserve utile.

Dans l'analyse de la mortalité des plants, toutes essences confondues, dont l'ensemble des effets est présenté en Annexe 2, **nous n'avons pas mis en évidence d'effets du type de plants, de la saison de plantation ou des traitements et travaux effectués sur les plantations**. Nous expliquons ce résultat soit par l'absence d'effets de ces prédicteurs sur la mortalité, soit par le déséquilibre du nombre d'observations par catégorie de facteur. Si l'on voulait tester proprement l'effet de ces facteurs, il faudrait s'assurer d'avoir assez d'observations dans chaque catégorie. **Ces descripteurs sont, du fait des pratiques usuelles dans la filière, largement confondus avec l'essence (qui est la première variable explicative)**.

Au regard de ces résultats, il nous apparaît que l'indice standardisé des précipitations (SPI) trimestriel d'été (juin-juillet-août) constitue un bon candidat mobilisable en réponse aux attentes opérationnelles du projet. Celui-ci s'avère être le meilleur prédicteur simple de la mortalité abiotique des plants. Le SPEI d'été, reposant sur le bilan P-ETP, pourrait aussi être un bon candidat (Figure 22, Annexe 2) mais n'est pas calculé et fourni de façon routinière par Météo-France. Son utilisation opérationnelle nécessiterait l'accès à de nombreuses données (celles de l'historique dans la période de référence) et la réalisation d'un calcul complexe. Nous avons considéré qu'il s'agissait d'un frein trop important à son utilisation.

L'indice standardisé de sécheresse des sols (SSWI) trimestriel d'été (juin-juillet-août), s'avère certes un peu moins performant pour prédire la mortalité mais semble apporter un complément d'information au SPI, du fait qu'ils ne sont pas trop corrélés. Cela tendrait à faire du couple de ces deux indices, utilisé selon des règles à définir (Figure 26), un critère pertinent de définition des épisodes de sécheresse extrême pour les plantations forestières.

La nécessité d'évaluer la robustesse de ces résultats nous conduit maintenant à présenter les résultats d'analyse reposant sur les données des questionnaires.

7.1.2. Modélisation des mortalités de plants à partir des données des questionnaires

L'objectif en travaillant avec ce jeu de données est de vérifier la robustesse des résultats obtenus sur les données du DSF en vérifiant la cohérence entre des résultats obtenus à grande échelle et à une échelle régionale.

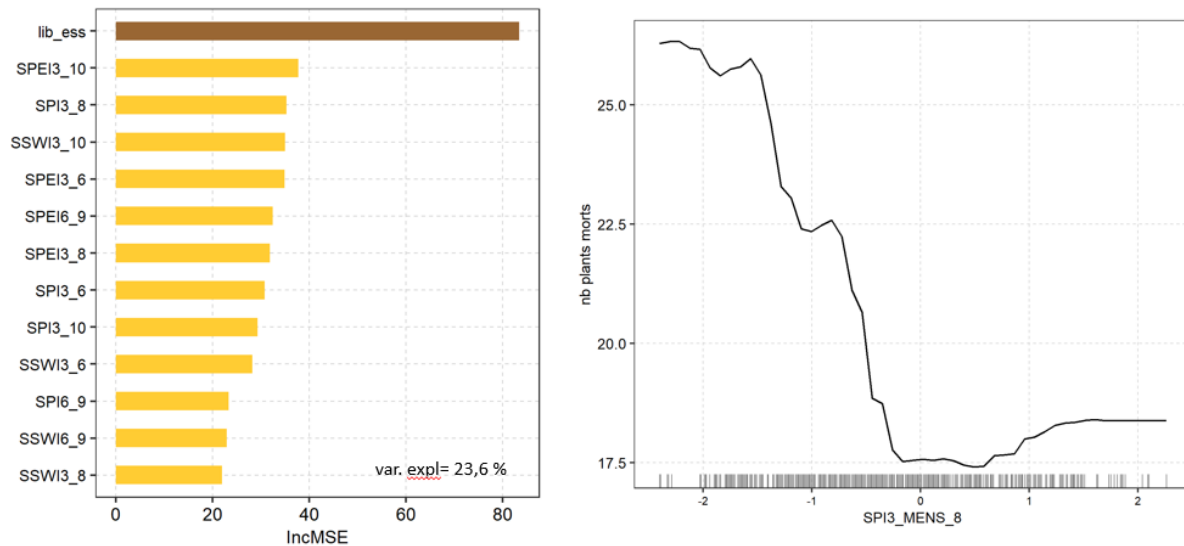


Figure 28 : A gauche, le classement par ordre décroissant d'importance des prédicteurs de la mortalité de plants observée sur le jeu de données des questionnaires (ONF et GCF), toutes essences confondues. A droite le diagramme de dépendance partielle représentant l'effet marginal de l'indice de sécheresse météorologique (SPI3_8) sur la mortalité des plants. En bas du diagramme, contre l'axe des abscisses, est représentée la distribution du prédicteur.

Ces résultats, avec toutes les réserves nécessaires à leur comparaison à ceux reposant sur les données du DSF (cf. Méthode), tendent à les conforter. Une fois de plus, l'essence apparaît comme le prédicteur principal de la mortalité. Nous affirmons ainsi sur un panel d'espèces un peu différent, que certaines essences sont, de manière générale, plus vulnérables au cours de la reprise de plantation.

Le SPI d'été se présente ici aussi en bonne place dans le classement d'importance des variables explicatives (Figure 28). La forme de sa relation avec le taux de mortalité est similaire : le taux de mortalité augmente à mesure que le déficit de précipitations est de plus en plus sévère.

Le classement des variables permet peu, seul, de qualifier les plus pertinentes pour le projet. Il est important d'analyser aussi la forme et l'amplitude des relations marginales entre chaque variable et le taux de mortalité. En cela, les SPEI des trois mois d'été (SPEI3_8) et des six mois de saison de végétation (avril à septembre, SPEI6_9) possèdent un certain intérêt également. Pour les raisons déjà évoquées, sans plus-value évidente par rapport au SPI, nous n'avons pas envisagé leur utilisation opérationnelle. On peut toutefois noter que le SSWI d'été se retrouve ici jugé moins pertinent dans la prédiction des mortalités élevées. Ce résultat permet de nuancer celui obtenu sur les données DSF.

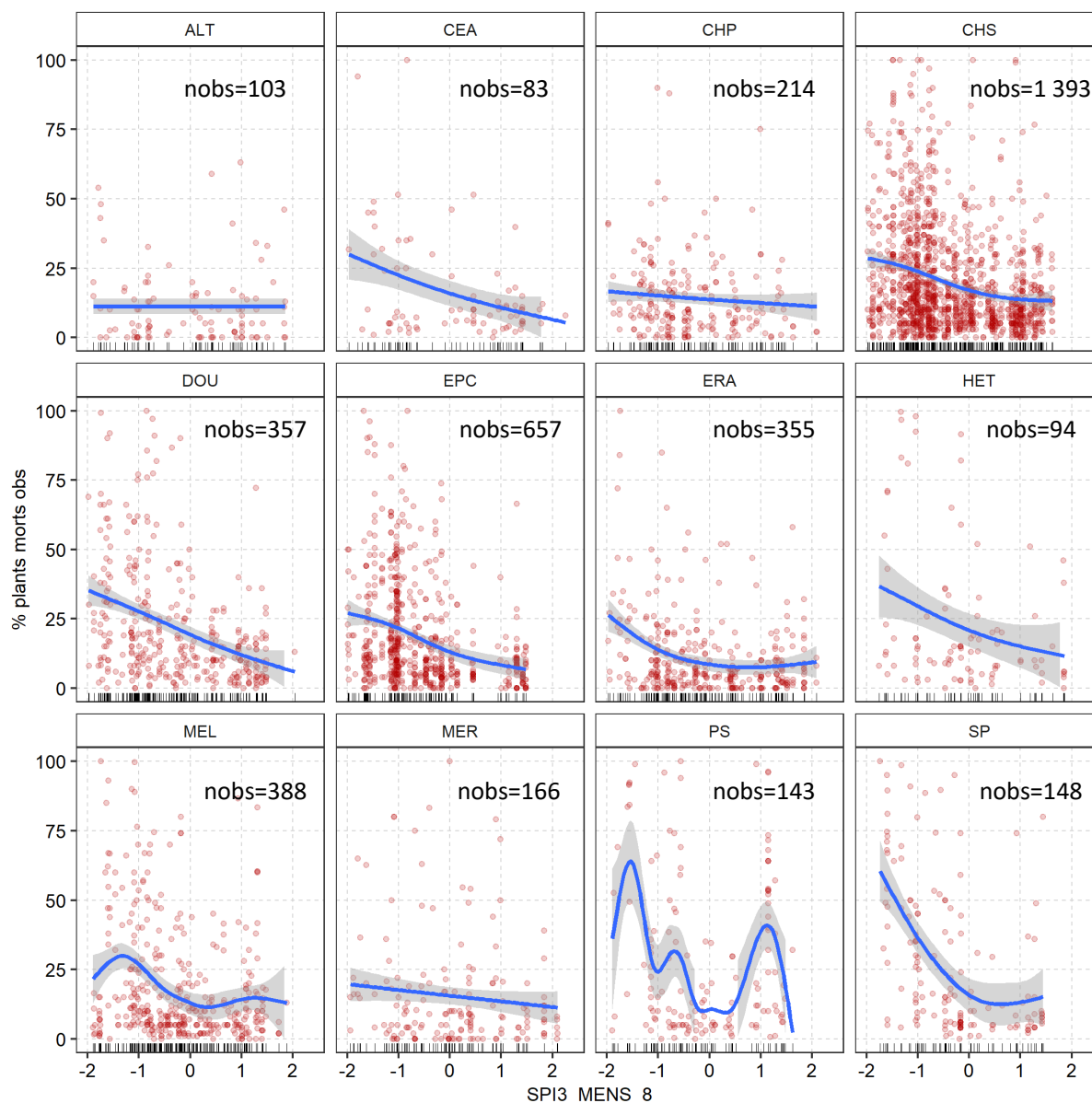


Figure 29 : Relation moyenne entre la mortalité de plants observés et l'indice de sécheresse météorologique cumulé sur juin-juillet-août (SPI3_8). En rouge les observations, en bleu la courbe de tendance, en noir la distribution des mortalités observées.

Lorsqu'on analyse la réponse moyenne de la mortalité au SPI par essence (Figure 29), nous retrouvons des comportements globalement similaires pour les espèces déjà décrites. Le chêne sessile, le douglas, le hêtre, l'épicéa commun, le mélèze montrent des mortalités en hausse à mesure que la sécheresse, au sens du SPI, s'aggrave.

Concernant les autres essences déjà étudiées, l'étude des données des gestionnaires apporte un éclairage intéressant pour trois d'entre-elles pour lesquelles les relations n'étaient pas claires. Le chêne pédonculé semble ici très peu sensible à la météorologie de l'année de reprise. Au contraire, le cèdre de l'Atlas et, de façon encore plus marquante, le sapin pectiné, apparaissent sensibles aux épisodes de sécheresse définis par le SPI d'été. Le cas du pin sylvestre reste difficile à déterminer.

Les données des gestionnaires apportent également un complément important à l'étude au sujet d'essences supplémentaires de feuillus précieux. Parmi eux, l'alisier torminal et le merisier, font état de bon taux de reprise en général, peu influencés par le SPI. Les grands érables (sycomore et plane

regroupés par facilité) conduisent aussi à des taux de reprise très satisfaisant mais l'analyse suggère tout de même un impact sur la mortalité des déficits hydriques les plus sévères.

En conclusion, de manière générale, l'étude des données régionales des gestionnaires conduit à confirmer la robustesse des résultats obtenus à l'échelle nationale, à partir des données du DSF.

8. Quelles applications opérationnelles envisager ?

A l'échelle de la filière française, les résultats obtenus précédemment (cf. effet marginal du SPI sur la mortalité, Figure 22) **nous conduisent à estimer grossièrement qu'un épisode de sécheresse sévère** (de temps de retour supérieur à 20 ans, c'est-à-dire de SPI inférieur à -1,5) **qui porterait sur l'ensemble du territoire produirait une mortalité supplémentaire de l'ordre de 5 % des plants installés cette année-là. Rapporté à un chiffre d'affaires de commercialisation des plants forestiers de l'ordre de 20 millions d'euros en 2021⁷, cela représenterait une perte de l'ordre de 1 million d'euros pour le secteur.** Cet ordre de grandeur, certes très grossier, a le mérite de nous aider à prendre la mesure des enjeux économiques concernant la garantie de reprise des plantations et des risques climatiques qui pèsent sur le secteur. Nos travaux visent, dans ce contexte, à permettre aux acteurs de converger vers des pratiques qu'ils jugeront suffisamment équitables du point de vue de la répartition de ces risques.

Dans cette partie, nous nous appuyons sur les résultats précédemment obtenus qui suggèrent que l'utilisation des indices standardisés estivaux de sécheresse des précipitations ou des sols semblent pertinents pour définir les conditions de sécheresses exceptionnelles dans le cadre des garanties de reprise. Nous chercherons à produire des éléments d'aide à la décision à destination des acteurs du reboisement dans la perspective d'un changement des pratiques reposant sur une utilisation opérationnelle de ces indices. Pour cela, nous avons mené une analyse de sensibilité afin d'appréhender l'effet de la formulation de la règle de définition de la sécheresse sur les garanties de reprise. Nous avons fait varier conjointement la combinaison des indices selon cinq règles différentes illustrées en Figure 26 ainsi que les valeurs de seuil de déclenchement. L'ensemble des combinaisons de règles obtenues a été appliqué à des scénarios rétrospectifs en vue d'objectiver les proportions d'exclusion de garantie au titre de la sécheresse qui auraient résulté de leur mise en œuvre. Ces éléments doivent permettre aux acteurs de négocier, en disposant d'un bon niveau d'information sur la répartition de la prise de risques, de nouvelles conditions de garanties.

Cette partie se terminera par plusieurs considérations diverses notamment issues des échanges entre acteurs que nous avons animés.

8.1. Quelle définition de la sécheresse exceptionnelle adopter ?

Une fois le ou les indice(s) identifié(s), il faut réfléchir au choix du seuil de déclenchement de la reconnaissance du caractère exceptionnel de la sécheresse et donc de l'absence de responsabilité de

⁷ Donnée aimablement communiquée par M. Bauchery, Président du Syndicat national des pépiniéristes forestiers qui représente environ 90 % des parts de marché du secteur.

l'entreprise de reboisement qui ne sera alors plus tenue par la garantie de reprise. Pour cela deux points de vue doivent être pris en compte : le point de vue de l'ETF et celui de son client, le propriétaire forestier. Pour aider les acteurs à mener une négociation éclairée afin de s'accorder sur un seuil de déclenchement, nous avons décidé de mener une analyse de sensibilité. Pour cela, nous avons appliqué un ensemble de règles nous paraissant envisageables aux observations du DSF. Nous avons ainsi construit un ensemble de scénarios rétrospectifs illustrant les conséquences sur les garanties de reprise qu'auraient eu ces règles si elles s'étaient appliquées à la filière pour la période de 2007 à 2021. Chaque scénario repose sur une règle de définition de la sécheresse exceptionnelle, elle-même définie par une combinaison d'indice(s) et un seuil de déclenchement. Les cinq combinaisons d'indices, envisagées suite à l'observation de l'interaction entre les SPI et SSWI d'été (Figure 26), sont les suivantes :

1. SPI3_8 < seuil
2. SSWI3_8 < seuil
3. SPI3_8 < seuil et SSWI3_8 < seuil (par simplicité, nous avons utilisé un seuil identique pour les deux indices mais l'utilisation de seuils distincts serait aussi possible)
4. SPI3_8 < seuil ou SSWI3_8 < seuil (même remarque)
5. SPI3_8 + SSWI3_8 < 2 x seuil (cela revient à être inférieur à une valeur seuil mais nous avons introduit le facteur multiplicatif (x2) par souci d'homogénéité des représentations graphiques)

Pour chacune de ces cinq règles d'utilisation des indices, seuls ou combinés, nous avons testé une large gamme de valeurs de seuil de déclenchement (de -2 à -0,5).

L'objectif de cette étape, dont les résultats sont présentés dans la Figure 30, est d'apporter des éléments d'aide à la décision, parmi plusieurs options dont nous avons évalué les effets selon trois critères définis ci-dessous.

1. Dans le cadre de chaque scénario, nous avons d'abord calculé le **pourcentage de plantations non garanties pour cause de sécheresse quelle que soit l'issue de plantation**, en jaune sur la Figure 30. Cela représente le risque pris, au moment de la décision de reboiser, par le propriétaire que la plantation ne soit finalement pas couverte par la garantie. L'objectif étant pour le propriétaire d'éviter que la probabilité que la plantation ne soit finalement pas garantie soit trop élevée.
2. Ensuite nous avons calculé le **pourcentage d'échecs non garantis pour raisons climatiques**, en bleu sur la figure. Il s'agit de la proportion, parmi les chantiers dont la reprise n'a pas atteint le taux garanti (80 % ici), des chantiers qui auraient été considérés en sécheresse exceptionnelle et pour lesquels l'entreprise n'aurait donc plus été tenue de devoir regarnir. Cette proportion constitue la part des chantiers nécessitant de faire appel à la garantie – donc portant les enjeux économiques liés à celle-ci pour les entreprises – pour lesquels l'absence de responsabilité de l'entreprise aurait été reconnue.
3. Enfin, la courbe violette permet d'affiner les enjeux économiques en représentant le **pourcentage des plants de regarnis nécessaires à l'atteinte du taux de reprise garanti qui n'auraient pas été à la charge des entreprises de travaux forestiers au titre d'une sécheresse définie comme exceptionnelle** (et qui auraient donc été à la charge des propriétaires forestiers).

Ces chiffres ont été calculés par essence à partir des données issues du DSF. Nous présentons ici leur moyenne pondérée par les ventes moyennes de plants en France sur la période 2018 à 2021 (3 saisons). Le détail des résultats par essence est présenté, pour chacune des cinq règles, en Annexe

3. Nous rappelons au lecteur que nous représentons ici uniquement la composante abiotique des mortalités observées.

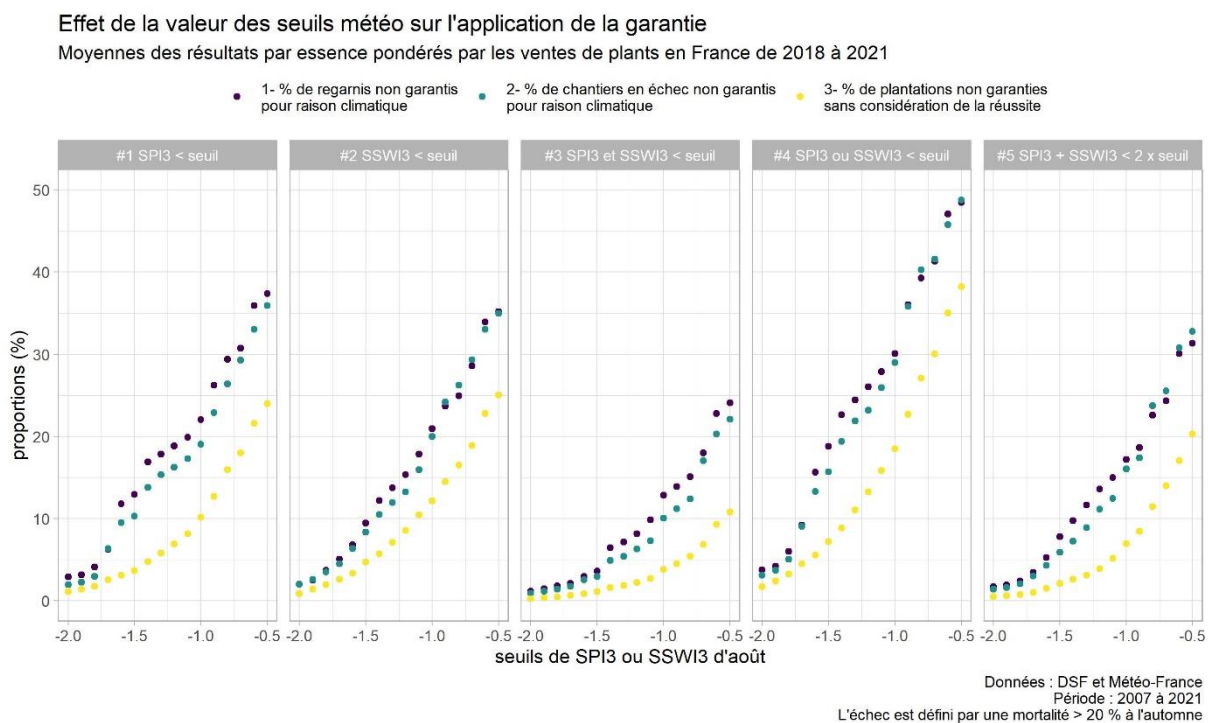


Figure 30 : Effet du choix d'une combinaison d'indices de sécheresse (SPI3_8, SSWI3_8) et de la valeur du seuil de l'indice sur l'application de la garantie de reprise. Cinq règles d'utilisation des indices comme définition de la sécheresse sont envisagées : les indices seuls (#1 et #2), les deux indices sont inférieurs à un seuil (#3), au moins l'un des deux est inférieur au seuil (#4) et la somme des deux est inférieure au double d'un seuil (#5).

Par exemple, si l'on considère un seuil de déclenchement de -1 pour les cinq règles de décision définissant les sécheresses exceptionnelles, on estime qu'on aurait obtenu, pour l'ensemble de la période de 2007 à 2021, en moyenne pour la filière du reboisement, les proportions d'absence de garanties présentées dans le Tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : Résultats (arrondis) issus de la figure ci-dessus en utilisant comme exemple un seuil d'indice de sécheresse de -1.

Exemple : seuil = -1	SPI3_08 < -1	SSWI3_08 < -1	SPI3_08 et SSWI3_08 < -1	SPI3_08 ou SSWI3_08 < -1	SPI3_08 + SSWI3_08 < -2
% plantations non garanties	10	12	4	19	7
% échecs non garantis	19	20	10	29	16
% plants à regarnir non garantis	22	21	13	30	17

De manière générale, cette analyse de sensibilité illustre la pertinence de ces indices qui définissent des domaines météorologiques ciblant pour partie spécifiquement les taux de mortalité abiotique les plus importants. Les échecs de plantations, n’atteignant pas le taux garanti, sont en effet, de l’ordre de deux fois plus probables et concernés par les situations de sécheresse définies de cette façon que l’ensemble de la population des plantations. Le degré de spécificité de l’indice se mesurant graphiquement par l’écart entre les courbes bleues ou violettes et les jaunes. Il varie bien sûr fortement selon l’essence (voir Annexe 3). En revanche, les règles de définitions testées discriminent assez peu, au sein des échecs, les plus sévères d’entre eux étant donné le faible écart entre taux d’échecs non garantis et taux de plants à regarnir non garantis.

Par ailleurs, pour une valeur de seuil donnée, la règle du « ET » nécessitant le dépassement du seuil simultanément par l’indice standardisé de sécheresse des précipitations et celui des sols s’avère être la plus stricte. La sécheresse ainsi définie a une moindre probabilité d’occurrence, par construction, et aurait donc concerné une plus faible proportion de chantiers dans l’ensemble de la période. A contrario, la règle du « OU » reposant sur le dépassement du seuil par au moins un des indices, propose une définition plus large et moins sévère de la sécheresse, de probabilité d’occurrence supérieure (1/5 environ pour l’ensemble des plantations contre 1/25 pour la règle « ET »). Les indices utilisés seuls ou leur somme se situent de façon intermédiaire entre ces deux règles.

Toutefois, une règle est définie par la combinaison d’indice(s) et le seuil de déclenchement. Il est donc tout à fait possible de définir des événements de fréquences (donc temps de retour moyen) similaires avec chacune des règles en jouant sur la valeur des seuils de déclenchement (voir Tableau 7 ci-dessous).

Tableau 7 : Seuils permettant d’approcher une proportion des plantations non garanties (quel que soit leur résultat) de 10 % selon chacune des cinq règles d’utilisation des indices de sécheresse.

Exemple : % de plantations non garanties ≈ 10 %	SPI3_08 < seuil	SSWI3_08 < seuil	SPI3_08 et SSWI3_08 < seuil	SPI3_08 ou SSWI3_08 < seuil	SPI3_08 + SSWI3_08 < 2 x seuil
seuil correspondant	- 1,0	- 1,1	- 0,55	- 1,35	- 0,85

L’Annexe 3 illustre le fait que le pin maritime, le pin taeda et l’épicéa de Sitka n’ont été que rarement concernés par des épisodes localement extrêmes et donc par des valeurs faibles de SPI ou SSWI estivaux (par exemple inférieures à -1). Ceci possiblement du fait que ces essences sont plutôt installées en climat océanique plus tamponné. Dans l’hypothèse où les garanties de reprise auraient reposé sur une condition d’exclusion définie par des indices de sécheresse, cette condition aurait été atteinte plus rarement que pour d’autres essences (comme en témoigne la comparaison des proportions de plantations non garanties parmi l’ensemble des plantations, courbes jaunes). Si les résultats présentés au 7.1.1 suggèrent de possibles effets d’aubaine importants liés à la mise en œuvre générique d’une garantie conditionnée par des indices météorologiques auxquels les mortalités de ces essences répondent (très) peu, ces éléments viennent les nuancer étant donné qu’on peut s’attendre à ce que les seuils de déclenchement soient plus rarement atteints dans les zones où elles sont habituellement installées.

L'ensemble de ces résultats doivent permettre d'objectiver, pour les acteurs du reboisement, les conséquences auxquelles on peut s'attendre, à l'échelle de la filière, dans la perspective d'un changement des pratiques qui conduirait à conditionner les garanties de reprise à une définition des sécheresses par un (ou deux) indice(s) météorologique(s). En particulier, ils permettent d'alimenter une négociation que nous avons souhaité éclairer au maximum en explorant, par la simulation, des scénarii rétrospectifs variés (5 règles d'utilisation des indices, une large gamme de seuils de déclenchement). Au-delà de ces considérations générales, en vue d'aider les acteurs à s'appropriier ces nouveaux concepts et à appréhender plus précisément leur possible fonctionnement, le paragraphe suivant s'attachera à présenter les rendus cartographiques annuels résultant de cette variété de scénarii rétrospectifs.

8.2. Simulation cartographique a posteriori de divers scénarios de garantie

8.2.1. A l'échelle nationale : données du DSF

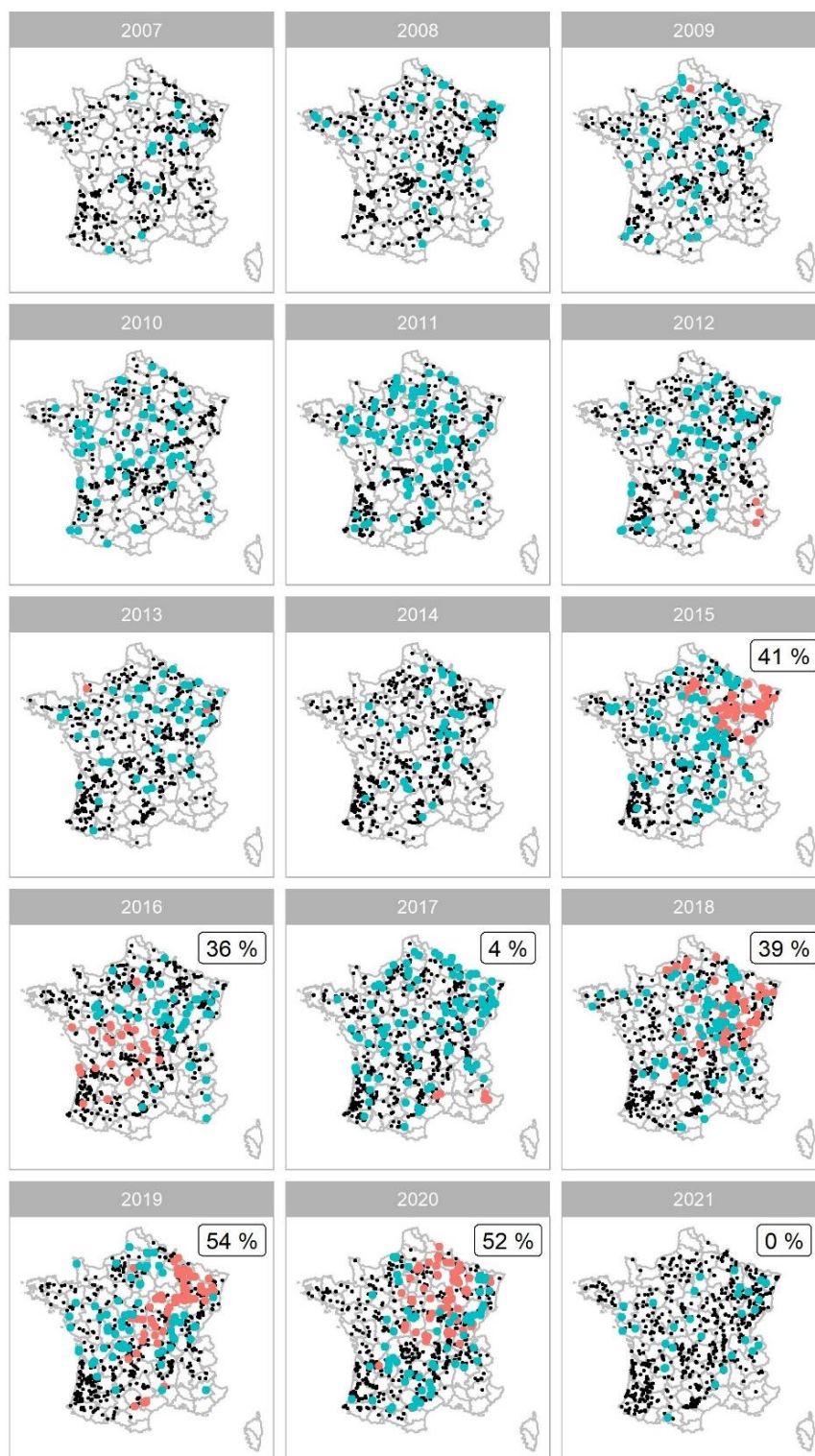
Nous représentons ici les scénarios de garantie et la façon dont ils auraient été mis en œuvre dans la période 2007-2021 de façon plus détaillée que la moyenne précédemment illustrée en exposant ceux-ci dans leur dimension spatio-temporelle. La démarche repose toujours sur les données du DSF et permet de donner une idée, chaque année, des secteurs géographiques qui auraient été concernés par une levée de garantie au titre d'une sécheresse exceptionnelle et un ordre de grandeur de la proportion des chantiers en échec qui auraient été concernés.

Par souci de synthèse, nous restituons ci-dessous uniquement la simulation d'une définition de la sécheresse reposant sur le dépassement du seuil de -1 pour le SPI d'été seul. Les résultats pour les quatre autres règles testées, au même seuil, se trouvent en Annexe 4.

Notons que, dans ce cas, les dispositions d'exclusion de garantie auraient principalement concerné le Nord-Est de la France en 2015, 2018, 2019 et 2020 ainsi que le bassin ligérien en 2016. Cette disposition n'aurait été déclenchée que de manière anecdotique les autres années, pas du tout en 2021, année dont l'été a été particulièrement humide pour l'ensemble du territoire. Le déclenchement de cette mesure aurait conduit, à exonérer les entreprises de la responsabilité des garanties pour environ la moitié des chantiers dits en échec (c'est-à-dire qui n'avaient pas atteint le taux de 80 % de reprise). Cette proportion est à interpréter comme un ordre de grandeur car elle est calculée directement à partir des données du DSF, sans pondération des ventes de chaque essence. Toutefois, la Figure 31 montre bien que le dispositif d'exclusion de garantie aurait principalement concerné les années reconnues à l'échelle de la filière comme ayant été particulièrement difficiles pour les plantations du fait des sécheresses.

La comparaison avec les quatre autres règles de définition de la sécheresse (Annexe 4) montre l'influence du choix de l'indice ou de la combinaison d'indices sur le périmètre géographique concerné par les conditions d'exclusion de garantie ainsi créées. Dans la continuité des résultats du paragraphe précédent, les définitions les plus sévères (règle du « ET ») conduisent à des périmètres plus restreints, pour un même seuil de déclenchement. Une bonne proportion des échecs reste couverte lors des années emblématiques excepté en 2016 et 2018. Ces deux années se distinguent par une discordance notable entre les deux indices SPI et SSWI qui ne sont pas forcément corrélés : certaines régions auraient été considérées en sécheresse exceptionnelle au sens d'un indice mais pas de l'autre. La sensibilité au choix de la formulation de la définition de la sécheresse s'avère alors importante dans la pratique.

Figure 31 : Scénario cartographique de l'utilisation d'une définition de la sécheresse exceptionnelle par un SPI d'été inférieur à -1. Chaque année, sont représentées les plantations observées par le DSF, parmi les 16 essences retenues, selon qu'elles ont atteint (points noirs) ou non 80 % de reprise. Les chantiers en échec (plus de 20 % de mortalité) sont représentés selon qu'ils auraient bénéficié (en bleu) ou pas de la garantie de reprise (en rouge). A partir de 2015 est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garanti.

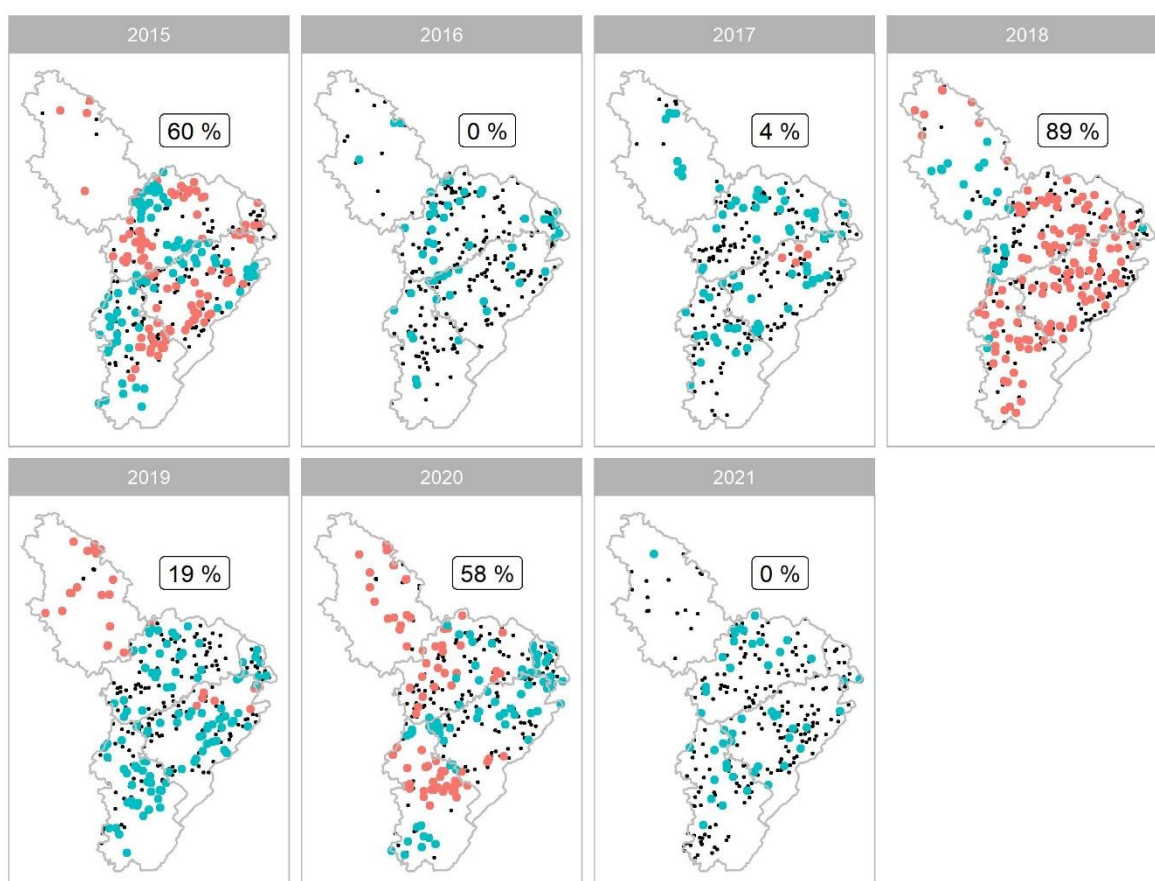


Données DSF et Météo-France

8.2.2.A l'échelle régionale : forêts publiques de Franche-Comté et Haute-Marne

Afin de compléter l'analyse spatiale rétrospective réalisée à l'échelle nationale à l'aide des données du DSF, nous avons répété la démarche sur un cas concret : les plantations en forêts publiques de Franche-Comté et Haute-Marne de 2015 à 2021. Les données fournies par l'ONF sont complètes pour cette période et cette région. Nous pouvons donc considérer les résultats comme représentatifs de la population des plantations réalisées en forêts publiques dans ce domaine spatio-temporel. En cela, ce cas d'étude apporte une véritable contribution en complément des analyses basées sur les données du DSF (dont on a déjà mis en avant les questions de représentativité posées par leur échantillonnage). Cette démarche produit une déclinaison régionale concrète des analyses précédentes.

Nous représentons ci-dessous la résultante du scénario rétrospectif qui aurait appliqué l'utilisation du SPI d'été comme condition d'exclusion de garantie pour cause de sécheresse exceptionnelle. Le dispositif aurait, ici, conduit à des proportions très significatives d'échecs de plantation sans bénéfice de la garantie en 2015, 2018 et 2020. Une très grande partie des regarnis nécessaires aurait alors été à la charge des propriétaires, notamment les collectivités dans cet exemple. L'exclusion pour motif de sécheresse aurait été appliquée dans une moindre mesure en 2019 (uniquement en Haute-Marne). Elle n'aurait pas été appliquée en 2021 (été particulièrement arrosé avec d'ailleurs peu d'échecs de plantation) ni 2016 et de façon anecdotique en 2017.



Données : ONF Franche-Comté et Haute-Marne et Météo-France

Figure 32 : Scénario cartographique de l'utilisation d'une définition de la sécheresse exceptionnelle par un SPI d'été inférieur à -1. Chaque année, sont représentées les plantations observées par l'ONF de Franche-Comté et Haute-Marne, toutes essences confondues, selon qu'elles ont atteint (points noirs) ou non 80 % de reprise. Les chantiers en échec (plus de 20 % de mortalité) sont représentés selon qu'ils auraient bénéficié (en bleu) ou pas de la garantie de reprise (en rouge). Est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis.

L'Annexe 5 rassemble les représentations des scénarios reposant sur les quatre autres règles d'utilisation des indices de sécheresse. Ces scénarios à seuil constant produisent une variabilité de la surface concernée par l'exclusion de garantie du fait de définitions plus ou moins sévères. Notons toutefois que nous retrouvons une dichotomie de comportement entre l'utilisation de l'indice de sécheresse standardisé des précipitations et celui des sols qui produisent des résultats contrastés en 2016 et 2019.

Ces résultats mettent en évidence qu'il semble, en bonne partie, possible de décharger les entreprises des surcoûts de regarnis occasionnés par les sécheresses grâce à l'adoption de conditions de garantie conditionnées par les indices de sécheresse. En corollaire, cela vient poser la question du report de la prise en charge de ce risque sur les propriétaires forestiers – bien souvent engagés dans un objectif de résultat – et par conséquent de l'assurance de ce risque.

8.3. Autres considérations opérationnelles

Au-delà des liens statistiques mis en évidence entre indices standardisés de sécheresse estivaux produits par Météo-France et la mortalité des plants, nous abordons ici diverses autres considérations opérationnelles. Celles-ci permettent d'appréhender plus largement les conséquences d'une adoption par la filière d'indices de sécheresse dans les conditions de garantie en plantation.

8.3.1. La résolution spatiale

D'un point de vue pratique, la résolution spatiale des données SAFRAN de Météo-France repose sur un maillage de 8 x 8 km. Cela représente en moyenne de l'ordre de 4 communes par maille. La grille peut paraître grossière au regard de la variabilité spatiale courante des stations forestières et de certains phénomènes climatiques localisés pouvant influencer la réussite des plantations (orages estivaux par exemple). Elle apparaît tout de même tout à fait acceptable au regard des pratiques existantes à l'heure actuelle faisant parfois référence à des arrêtés de calamité agricole ou de catastrophe naturelle (résolution municipale) ou à des données publiques de stations météorologiques de référence le plus souvent situées à plusieurs dizaines de kilomètres des chantiers. L'utilisation de ces données spatialisées permet par ailleurs de s'affranchir des limites administratives sur lesquelles sont assis les arrêtés de calamité agricole ou de catastrophe naturelle. Ces limites sont d'ordre géographique mais aussi administratives ce qui a un effet sur le déclenchement de la mesure pouvant être partiellement découplé de la météorologie (nécessité de demande de reconnaissance) et sur les délais (procédure et instruction de plusieurs mois, difficilement compatible avec la saisonnalité des plantations et la commande des regarnis).

8.3.2. Les avantages d'une approche générique

Nous souhaitons à nouveau souligner ici que l'usage d'indices standardisés apporte un degré de généralité particulièrement intéressant. En s'appuyant sur la notion de rareté de l'événement à un endroit donné, centrale dans l'étude des risques, ils permettent d'envisager une application simple à large échelle couvrant différents climats et plusieurs essences. Ce serait beaucoup plus difficile de mettre au point un système partagé reposant sur des grandeurs météorologiques absolues (précipitations du mois de mai par ex.) étant donné que leur effet sur les reprises de plantations dépend nettement plus du climat local et de l'espèce considérée. L'utilisation alternative de telles variables nécessiterait le développement de définitions de la sécheresse spécifiques à chaque espèce, à l'échelle régionale. Ce degré de complexité nous semble être un frein majeur vis-à-vis de l'objectif poursuivi et joue nettement en faveur de l'utilisation d'indices standardisés de sécheresse.

Le fait que la réserve utile en eau des sols ne soit pas apparue comme un déterminant important de la reprise des plantations, en comparaison de variables climatiques, permet d'envisager une généralité accrue du dispositif qui, dans le cas contraire, aurait nécessité d'être conditionné par une description

pédologique dans le cadre contractuel de chaque chantier et donc une transformation beaucoup plus profonde des pratiques.

8.3.3. Une expérience opérationnelle à l'ONF

Dans la durée du programme, sur la base de ses résultats préliminaires, l'ONF a mis en place dans ses appels d'offre une clause de garantie de reprise (constatée en septembre-octobre) excluant les épisodes de sécheresses exceptionnelles caractérisées par la règle $SPI3_{août} + SSWI3_{août} < -2$. Cette première application opérationnelle au cours des campagnes 2020-2021 et 2021-2022 a permis de valider la faisabilité de la méthode. L'ONF a acquis les données et produit une cartographie des zones considérées en sécheresse exceptionnelle dans le courant du mois de septembre de chaque année. Il s'agit d'un gain notable en terme de calendrier par rapport aux pratiques précédentes de reconnaissance de l'exceptionnalité des sécheresses. En effet les données Safran sont calculées quotidiennement par Météo-France et sont donc disponibles quasiment instantanément. L'Annexe 6 présente les cartographies produites dans ce cadre. L'été 2021 ayant été exceptionnellement arrosé, il n'a pas permis d'évaluer l'acceptabilité du dispositif par retour d'expérience. Cela a tout de même permis de conforter la faisabilité et en partie la pertinence en vérifiant que le dispositif d'exclusion de garantie n'a pratiquement pas été déclenché lors de cette année humide (ce qui est aussi un attendu). La reconduction de cette clause pour la saison de plantation 2021-2022 a, quant à elle, permis de confronter cette nouvelle pratique à des conditions de sécheresse extrêmes survenues dans une grande majorité du territoire et largement relayées par les médias. Cette première véritable confrontation aux conditions pour lesquelles la clause a été construite conduit à une reconnaissance de la sécheresse caractérisée sur 60 % du territoire. La zone ainsi définie concentrant une majorité des forêts publiques, elle couvre 75 % des surfaces de forêts relevant du régime forestier. Un retour partagé entre les acteurs du reboisement sur cette dernière expérience, en complément des résultats que nous présentons dans ce rapport, nous semble propice à une évaluation de la démarche et à la prise de décision vis-à-vis d'un éventuel changement des pratiques de garantie de reprise dans un cadre adaptatif.

8.3.4. La relativité de la définition des sécheresses dans le temps

Parmi le panel des diverses implications opérationnelles, nous nous devons d'attirer l'attention du lecteur sur le fait que les indices standardisés de sécheresse que nous avons utilisés sont calculés par rapport à une période de référence 1981 à 2010. La décennie 2011-2020 étant passée, Météo-France a engagé un travail de révision des normales climatiques en décalant la période de référence de 10 ans⁸. La période 1991-2020 est donc progressivement en train de remplacer la référence 1981-2010. Etant donné que ce glissement de période de référence conduit à inclure les dernières années qui ont connu des épisodes de sécheresse plus fréquents et plus intenses, ce changement ne serait pas neutre pour les valeurs prises par les indices standardisés de sécheresse. La mise en œuvre effective de ce changement par Météo-France impliquera certainement que les événements de sévérité équivalente au sens d'un indice de sécheresse résultent de conditions météorologiques absolues (cumuls de précipitations, humidité des sols) plus contraignantes. Toutefois, ce glissement aurait le mérite d'accompagner de plus près les changements climatiques en adaptant la définition des sécheresses extrêmes (basée sur une probabilité relative d'occurrence) à mesure de l'évolution de leur fréquence. En effet, si les épisodes extrêmes tendent à devenir la norme, le caractère exceptionnel des événements qui sous-tend la reconnaissance d'absence de responsabilité des entreprises dans la mortalité des plants sera probablement relativisé. Une nouvelle négociation de la définition de la

⁸ <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/de-nouvelles-normales-pour-qualifier-le-climat-en-france>

sécheresse (choix du ou des indices, seuil de déclenchement) pourrait être rendue nécessaire. Elle pourrait s'appuyer sur une reproduction de la méthodologie que nous avons développée dont l'intérêt sera conservé.

8.3.5. Réflexions autour d'une redistribution des prises de risques

L'hypothèse de l'adoption par la filière de conditions de garanties de reprise conditionnées par une nouvelle définition partagée des épisodes de sécheresses caractérisées constituerait un changement conséquent des pratiques actuelles. Ce changement produirait donc certainement une redistribution des risques climatiques pris par les acteurs du reboisement. Nous partageons dans ce paragraphe plusieurs éléments de réflexion à ce sujet. Ils découlent principalement des échanges entre acteurs que nous avons pu animer au cours du programme.

De manière générale, la construction de ce changement est motivée par l'objectif, largement partagé, de mieux reconnaître l'absence de responsabilité des entreprises de reboisement en cas de reprise insuffisante des plantations consécutive à une sécheresse extrême. Dans ce contexte et vu les pratiques en vigueur jusqu'ici, qui impliquaient en fait rarement une levée de la garantie, cette transformation devrait avoir pour conséquence un report de la prise en charge économique du risque météorologique vers leurs clients propriétaires forestiers. Partant de là, il devient primordial que la prise de décision soit éclairée – ce à quoi nous tentons de contribuer ici – partagée et débattue par les parties prenantes afin de rechercher un compromis acceptable pour chacun.

Par ailleurs, plusieurs acteurs craignent qu'un tel changement occasionne un certain nombre d'effets pervers. En particulier, les donneurs d'ordre peuvent être préoccupés par le développement d'effets d'aubaine qui permettraient de soustraire à la garantie de reprise des chantiers qui n'auraient pas été réalisés dans les règles de l'art, sur un motif météorologique a priori indépendant de la qualité du travail. La limitation de ce risque est une condition importante de la réussite du changement de pratique. Plusieurs éléments y contribueront :

- la capacité démontrée des indices de sécheresse à discriminer les surmortalités abiotiques,
- une faible probabilité théorique de déclenchement de la levée de garantie (courbes jaunes du 8.1) incitant les entreprises à conserver un niveau de qualité de travail élevé plutôt qu'à faire un pari hasardeux sur la météo à venir
- l'encadrement approprié des chantiers et leur réception en bonne et due forme par les donneurs d'ordre, dès la réalisation terminée, afin d'en contrôler la conformité aux exigences techniques fixées en amont

Il est important de garder à l'esprit que la surmortalité dans les zones de sécheresse n'est pas une fatalité puisqu'elles abritent aussi des chantiers aux taux de reprise satisfaisants (Figure 31) Figure 31 : Scénario cartographique de l'utilisation d'une définition de la sécheresse exceptionnelle par un SPI d'été inférieur à -1. Chaque année, sont représentées les plantations observées par le DSF, parmi les 16 essences retenues, selon qu'elles ont atteint (points noirs) ou non 80 % de reprise. Les chantiers en échec (plus de 20 % de mortalité) sont représentés selon qu'ils auraient bénéficié (en bleu) ou pas de la garantie de reprise (en rouge). A partir de 2015 est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis. . Si cela peut alimenter la crainte d'effets d'aubaine – puisqu'il est possible de réussir les plantations malgré la sécheresse – cela suggère aussi qu'il est certainement possible de mobiliser des leviers techniques en mesure de tamponner les effets météorologiques. Parmi ces leviers, la conception des projets de reboisement (choix de l'essence, analyse d'opportunité) ainsi que les moyens techniques mis en œuvre (par exemple travaux adéquats de préparation mécanisée du site) ont une influence notable sur la réussite des plantations en interaction avec la météo.

De ce point de vue, le propriétaire forestier qui est susceptible de supporter une part accrue des risques climatiques sera d'autant plus incité à mettre en œuvre les moyens les plus à même de contribuer à la réussite de sa plantation et à ne pas faire l'impasse sur ses exigences de qualité du travail. De plus, si l'acte de plantation devient plus risqué pour le propriétaire forestier, du fait d'un changement des conditions de garantie mais aussi des changements climatiques en cours, il y a un risque, face à des échecs coûteux, de découragement de ceux-ci qui n'est pas dans l'intérêt des entreprises. Cet aspect étant à nuancer par le fait que la prise de risque actuelle par les propriétaires est déjà conséquente dans un système de garantie où la franchise est importante (20 % des plants). Néanmoins, il est évident qu'aujourd'hui les entreprises de reboisement jouent un rôle, malgré elles, d'assureurs du risque permettant de le mutualiser (entre leurs clients). Le fait qu'elles ne souhaitent plus, dans l'ensemble, assumer ce rôle pose clairement la question de l'opportunité d'un recours alternatif, par les propriétaires forestiers, à un produit d'assurance qui serait à construire en vue de faire face collectivement aux risques de sécheresse en plantation.

Enfin, si nos travaux contribuent à une meilleure reconnaissance de l'absence de responsabilité des entreprises en cas de sécheresse, ils viennent naturellement interroger la responsabilité du propriétaire en particulier lorsqu'il est engagé auprès d'un financeur (Etat ou autre) à un objectif de résultat. Si les acteurs de la filière sont prêts à reconnaître l'absence de responsabilité des entreprises, il semblerait légitime que ce soit également le cas au profit du propriétaire pour qui l'atteinte des objectifs de résultat serait compromise par une sécheresse exceptionnelle. Il nous semble ainsi légitime de questionner les conditions d'attributions des soutiens financiers aux propriétaires forestiers par exemple en envisageant un nouveau compromis entre des objectifs de résultats et des objectifs de moyens (techniques mais aussi financiers pouvant aller, à ce sujet, jusqu'à l'exigence d'une souscription à un système d'assurance si une offre était créée) ou une révision des conditions d'éligibilité des regarnis aux aides financières. La possibilité de telles négociations devrait probablement être prise en compte dans le rapport de force qui a récemment émergé au sein de la filière autour de l'enjeu de la durée de la garantie de reprise et de la date à laquelle elle est constatée.

9.Limites de l'étude

Le programme REPLANT-CLIC a été construit en vue de produire des éléments d'aide à la décision dans un cadre temporel contraint par un contexte pressant les acteurs à adapter leurs pratiques du fait des risques climatiques devenus criants et d'un recours accru au reboisement stimulé par les dépérissements massifs et l'annonce d'aides financières substantielles de la part de l'Etat. L'exigence d'un calendrier serré pour répondre au mieux aux attentes pressantes exprimées par les acteurs dès 2019 nous a naturellement contraint à un certain nombre de limitations et à opérer des choix parmi les approfondissements possibles.

En particulier, nous avons rapidement exclu de notre travail l'exploration d'un panel de variables météorologiques plus large. Nous avons fait le choix de ne pas étudier l'indice de déficit hydrique forestier développé par AgroParisTech (Piedallu et al. 2019) à une résolution d'un kilomètre carré. De même, les indices de déficit hydriques produits par le modèle de bilan hydrique forestier BILJOU⁹, développé par INRAE (UMR Silva), pourraient avoir un intérêt pour la problématique qui nous concerne, mais n'ont pas été exploités du fait qu'ils n'étaient pas encore calculés de manière généralisée sur le territoire pour l'ensemble de la période d'étude (données disponibles aujourd'hui jusqu'en 2019). Ces indices sont des candidats intéressants mais nous avons préféré prioriser l'évaluation de variables produites de façon plus routinière et réactive par Météo-France. Nous n'avons

⁹ <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fr/>

pas non plus évalué des pratiques existantes comme la mobilisation d'arrêtés de catastrophe naturelle, calamité agricole ou de restrictions d'usages de l'eau faute d'un accès aisé à des informations spatialisées et exhaustives depuis 2007 pour la France entière.

La principale limitation méthodologique qui sous-tend notre travail réside dans la difficulté, de manière générale, à identifier les causes de mortalité des plants forestiers. Celles-ci sont souvent multifactorielles et complexes à distinguer de manière unanime. C'est particulièrement le cas des données de gestion que nous avons compilées « toutes causes de mortalité confondues » (donc y compris des causes relevant potentiellement de la responsabilité des entreprises c'est-à-dire de la qualité du travail réalisé). Mais c'est aussi le cas, dans une moindre mesure car mieux documentées, pour les observations du DSF parmi lesquelles les mortalités « abiotiques » contiennent aussi des causes indéterminées. Le nombre de données et leur amplitude spatio-temporelle nous a tout de même permis de mettre en évidence une composante de surmortalité liée à la sécheresse.

10. Perspectives, suites à donner

Notre travail a clairement montré l'utilité d'un monitoring documenté des reprises de plantations forestières qui doit à la fois inciter à assurer la poursuite, voire le développement, du suivi annuel du DSF mais aussi inciter les gestionnaires forestiers à mieux organiser, de façon circonstanciée, harmonisée et centralisée, la collecte des données qu'ils produisent lors de leurs constats de reprise. Ces séries de données peuvent permettre, dans une certaine mesure, de mieux comprendre les déterminants de la réussite des plantations. Nous ne pouvons d'ailleurs qu'encourager le DSF à publier ces données afin qu'elles soient utilisables par d'autres équipes scientifiques. Toutefois, la collecte de données issues des pratiques de gestion atteint ses limites si l'on souhaite évaluer, à partir de celles-ci, l'intérêt de certaines techniques innovantes ou minoritaires. En cela, il nous semble que l'approche expérimentale comparative garde un intérêt complémentaire.

Le temps imparti pour le projet nous a également poussés à ne pas analyser les données de mortalité mesurées en juin par le DSF, malgré que nous en disposions, et donc leur interaction avec la mortalité en fin de saison de végétation en lien avec la météo de l'été. Il s'agit du principal approfondissement qu'il serait souhaitable de poursuivre à l'issue du programme afin d'objectiver les conséquences d'une anticipation des constats de reprise au mois de juin souhaitée par plusieurs entreprises de reboisement afin de les affranchir de la météo estivale qu'elles ne maîtrisent pas. Il s'agit d'une solution adaptative face aux risques grandissant de sécheresses qui semble tout à fait pertinente lorsqu'elle porte sur la garantie de la qualité physiologique des plants fournis. En revanche, elle peut poser question lorsqu'il s'agit de garantir la qualité du travail d'installation des plants dont les conséquences apparaissent souvent plus tard. Ce phénomène aurait pu être appréhendé plus objectivement. Dans tous les cas, il nous semble que le propriétaire et son gestionnaire resteront tenus d'évaluer le taux de reprise de la plantation à l'issue de la saison de végétation (septembre-octobre) afin de s'assurer de l'atteinte de leurs objectifs de résultat et de dimensionner correctement, si besoin, les regarnis nécessaires.

Par ailleurs, la publication de ce rapport constitue une étape dans le processus d'adaptation des pratiques qui devra nécessairement être suivie d'une phase de discussion(s) entre les parties prenantes préalable à l'adoption de nouvelles pratiques de garantie de reprise, éventuellement aussi d'assurance du risque. Probablement que la conduite de ces changements aura tout intérêt à être conçue dans une démarche adaptative prévoyant des retours d'expérience et la possibilité d'ajustement en fonction de ceux-ci.

Enfin, il serait intéressant de poursuivre en 2023 le travail entamé afin de compléter les données avec la saison de végétation 2022 qui a, elle aussi, connu dans une très grande partie du pays une sécheresse

exceptionnelle au regard des conditions connues jusqu'alors¹⁰. Ceci permettrait de documenter avec d'autant plus d'informations les épisodes qui nous intéressent.

11. Conclusions

En conclusion, nous avons pu montrer que les indices standardisés de sécheresse estivale produits par Météo-France, en particulier l'indice standardisé de sécheresse des précipitations (SPI) et celui de sécheresse des sols (SSWI) couvrant les trois mois d'été, semblent les plus pertinents à mobiliser dans la définition des épisodes de sécheresse exceptionnelle dans le cadre des garanties de reprise des plantations forestières. Ces indices ont montré leur intérêt à la fois à partir de la série de données du DSF mais aussi de données régionales produites par les gestionnaires forestiers. Il nous semble qu'ils sont en mesure d'apporter une plus-value aux pratiques actuelles en réponse aux attentes qui ont pu être formulées par les acteurs, notamment du fait de leur généralité qui permet d'envisager une définition relativement simple et d'application large à la fois dans l'espace (application nationale) et pour de nombreuses essences.

Nous espérons avoir fourni des éléments factuels, grâce à une approche d'analyse de sensibilité, aptes à soutenir une discussion éclairée entre parties prenantes du reboisement. Ces résultats ont été conçus afin que ceux-ci soient en mesure d'adopter de nouvelles pratiques reposant sur l'utilisation de ces indices dont il restera collectivement à choisir une définition contractuelle (quelle combinaison d'indice(s) ? quel(s) seuil(s) de déclenchement ?).

Pour terminer, la méthode mise en œuvre confère à notre travail une certaine valeur prédictive dans un contexte de climat changeant. Les prédictions climatiques à moyen terme (2055, par exemple), et notamment celles portant sur les indices de sécheresse (Soubeyroux *et al.* (2012)¹¹), montrent que nous devons nous attendre, de manière générale, à une augmentation de la fréquence et de la sévérité des déficits hydriques estivaux (particulièrement pour ce qui est de l'indice de sécheresse des sols, dans une moindre mesure pour l'indice de sécheresse des précipitations). Compte tenu des liens que nous avons mis en évidence entre les indices de sécheresse estivale et la mortalité des plants lors de leur première saison de végétation, nous pouvons nous attendre à ce que les reboiseurs français soient de plus en plus confrontés au défi de réussir leurs plantations tout en faisant face à des risques de sécheresse estivale accrus. Cette perspective ne manquera certainement pas d'être un moteur important d'adaptation des pratiques et de développement d'innovations pour la filière.

¹⁰ voir par exemple le Bulletin de situation hydrologique de septembre 2022 : <https://www.eaufrance.fr/publications/bsh/2022-09>

¹¹ Les différentes prédictions de SPI et SSWI d'été sont également visualisables de façon interactive sur le site Drias : <http://www.drias-climat.fr/decouverte>

12. Valorisations et diffusion des travaux

Les travaux menés dans le cadre du programme REPLANT-CLIC et compilés dans ce rapport ont fait l'objet de plusieurs présentations ou restitutions au cours du programme. Nous pouvons citer :

- présentation du programme REPLANT-CLIC, interview de Clara Tallieu et Jonathan Pitaud, dans la revue Forêts de France (n° 650 de janvier-février 2022, pages 44-45)
- présentation de l'état d'avancement et de quelques résultats préliminaires au comité de suivi des programmes de France-Bois-Forêt, le 16 mars 2022
- présentation au réseau Recherche-Développement-Innovation et au réseau Graines et plants de l'ONF en webinaire interne (« Kfé de la RDI »), le 25 mars 2022
- présentation des résultats aux acteurs du reboisement parties prenantes du groupe de travail dédié créé sous l'égide de France-Bois-Forêts, le 8 avril 2022
- présentations du projet et de ses résultats aux équipes de recherche de l'UMR Silva, prévue le 1^{er} décembre 2022

Par ailleurs, une page web dédiée au projet a été créée dans le site web du pôle RENFOR : <https://www6.inrae.fr/renfor/Projets/REPLANT-CLIC>. Celle-ci constituera le support de diffusion publique du présent rapport.

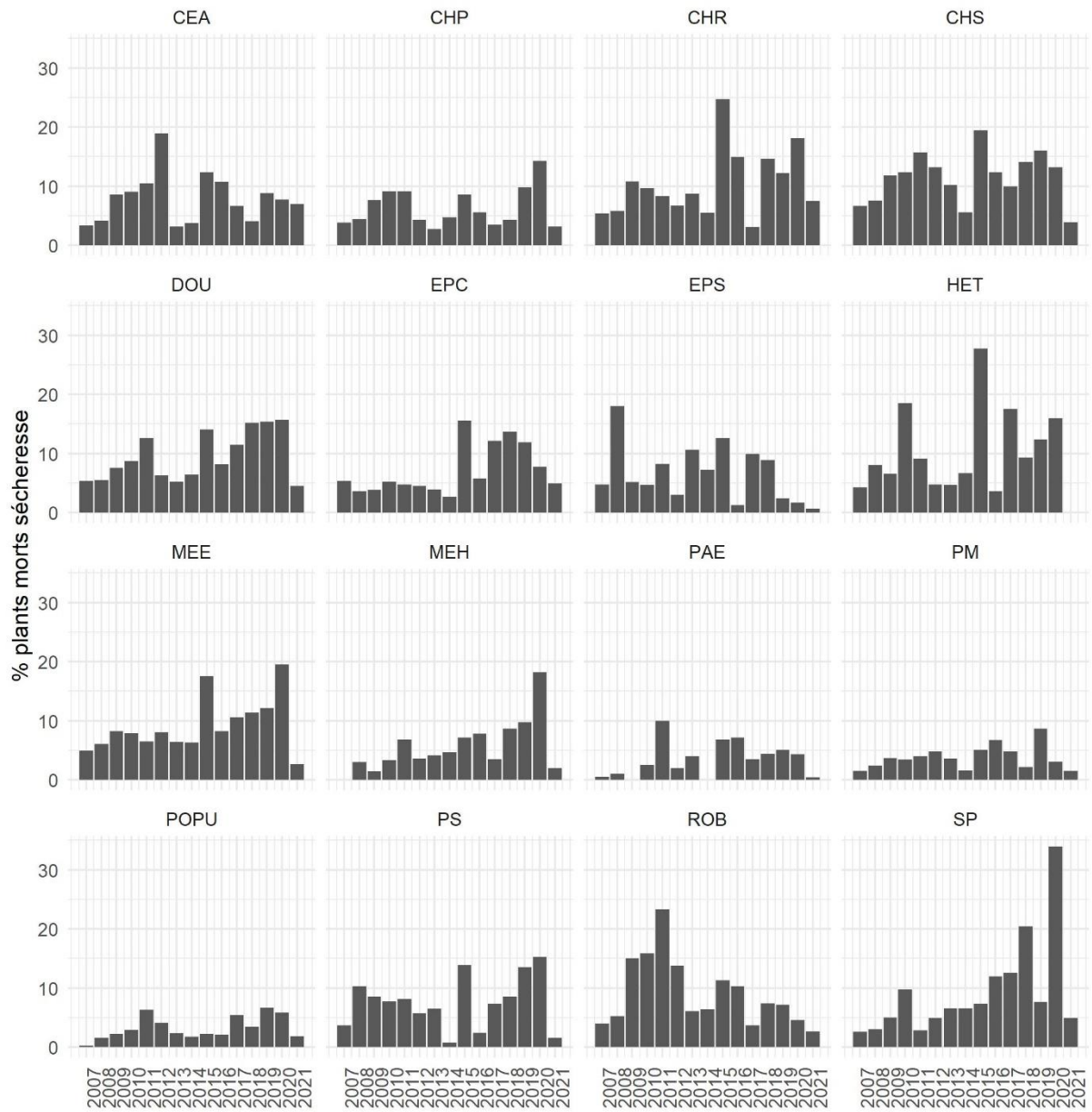
Enfin, nous n'avons pas été en mesure, à ce jour, de valoriser les résultats de manière synthétique dans la littérature technique ou scientifique. Ce travail de rédaction d'article(s) technique ou scientifique aurait l'intérêt de contribuer à capitaliser les résultats de notre travail et à les partager plus largement.

13. Références

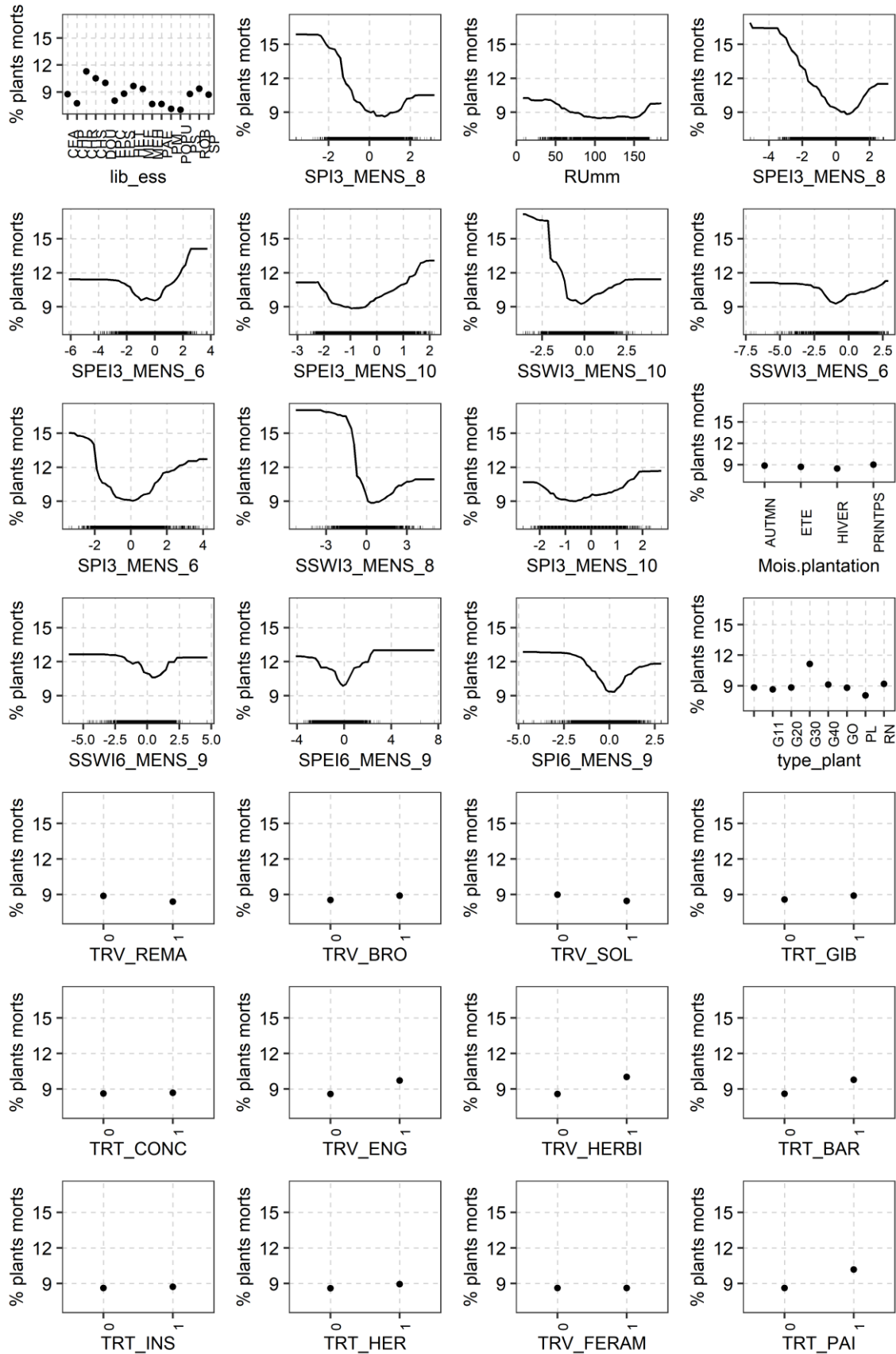
- Bachmair S, Kohn I, Stahl K (2015) Exploring the link between drought indicators and impacts. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 15:1381–1397. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1381-2015>
- Beguería S, Vicente-Serrano SM (2017) SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index
- Blauhut V, Stahl K, Stagge JH, et al (2016) Estimating drought risk across Europe from reported drought impacts, drought indices, and vulnerability factors. *Hydrol Earth Syst Sci* 20:2779–2800. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2779-2016>
- Boutte B (2021) REUSSITE DES PLANTATIONS FORESTIERES DE L'ANNEE 2020: 2020 est la plus mauvaise année au niveau de la reprise des plantations forestières depuis 2007
- Breiman L (2001) Random forests. *Mach Learn* 45:5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Greenwell BM (2017) pdp: An R package for constructing partial dependence plots. *R J* 9:421–436. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-016>
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc 8th Conf Appl Climatol* 17:179–183
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2017) Note de service DGAL/SDQSPV/2017-964 du 21/11/2017. Dispositif national de surveillance de la santé des forêts. <https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-2017-964>
- Panagos P, Van Liedekerke M, Jones A, Montanarella L (2012) European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy* 29:329–338. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003>
- Piedallu C, Chéret V, Denux JP, et al (2019) Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type. *Sci Total Environ* 651:2874–2885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.052>
- R Core Team (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing
- Soubeyroux J-M, Kitova N, Blanchard M, et al (2012) Sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie* 8:21. <https://doi.org/10.4267/2042/47512>
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim* 23:1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vidal J-P, Wade S (2009) A multimodel assessment of future climatological droughts in the United Kingdom. *Int J Climatol J R Meteorol Soc* 29:2056–2071

14. Annexes

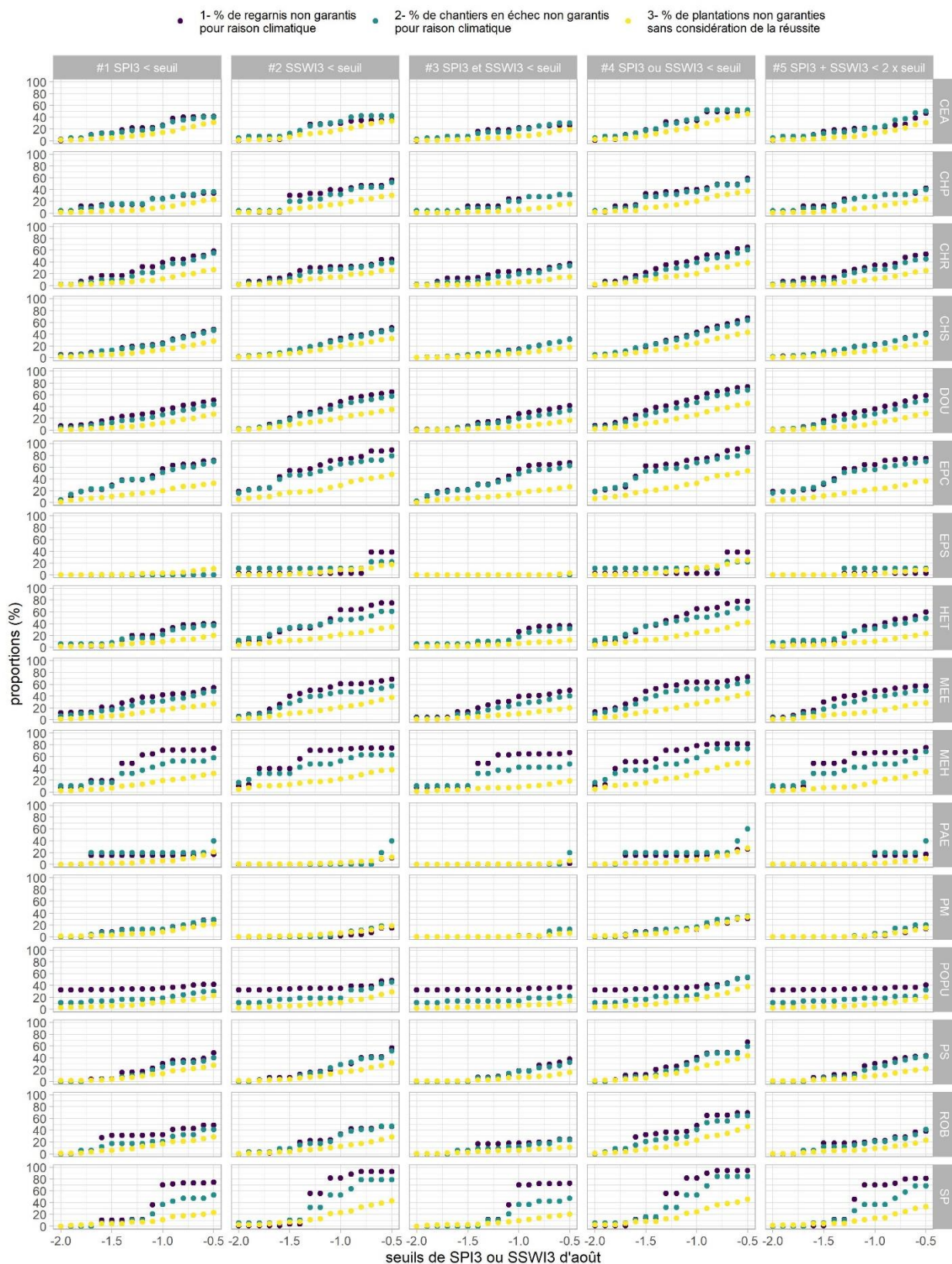
Annexe 1 : Pourcentage moyen de plants morts observés par espèce et par année sur le jeu de données du DSF (2007-2021).



Annexe 2 : Diagrammes de dépendance partielle des 28 variables utilisées, par ordre d'importance dans le modèle final, calibré sur les données du DSF. Les marques noires sur les axes des abscisses montrent la distribution des données (pour les variables numériques continues).



Annexe 3 : Effet, pour chaque essence, pour cinq règles de combinaison des indices de sécheresse SPI et SSWI, de la valeur du seuil de déclenchement sur les garanties de reprise (proportions de non-garantie)



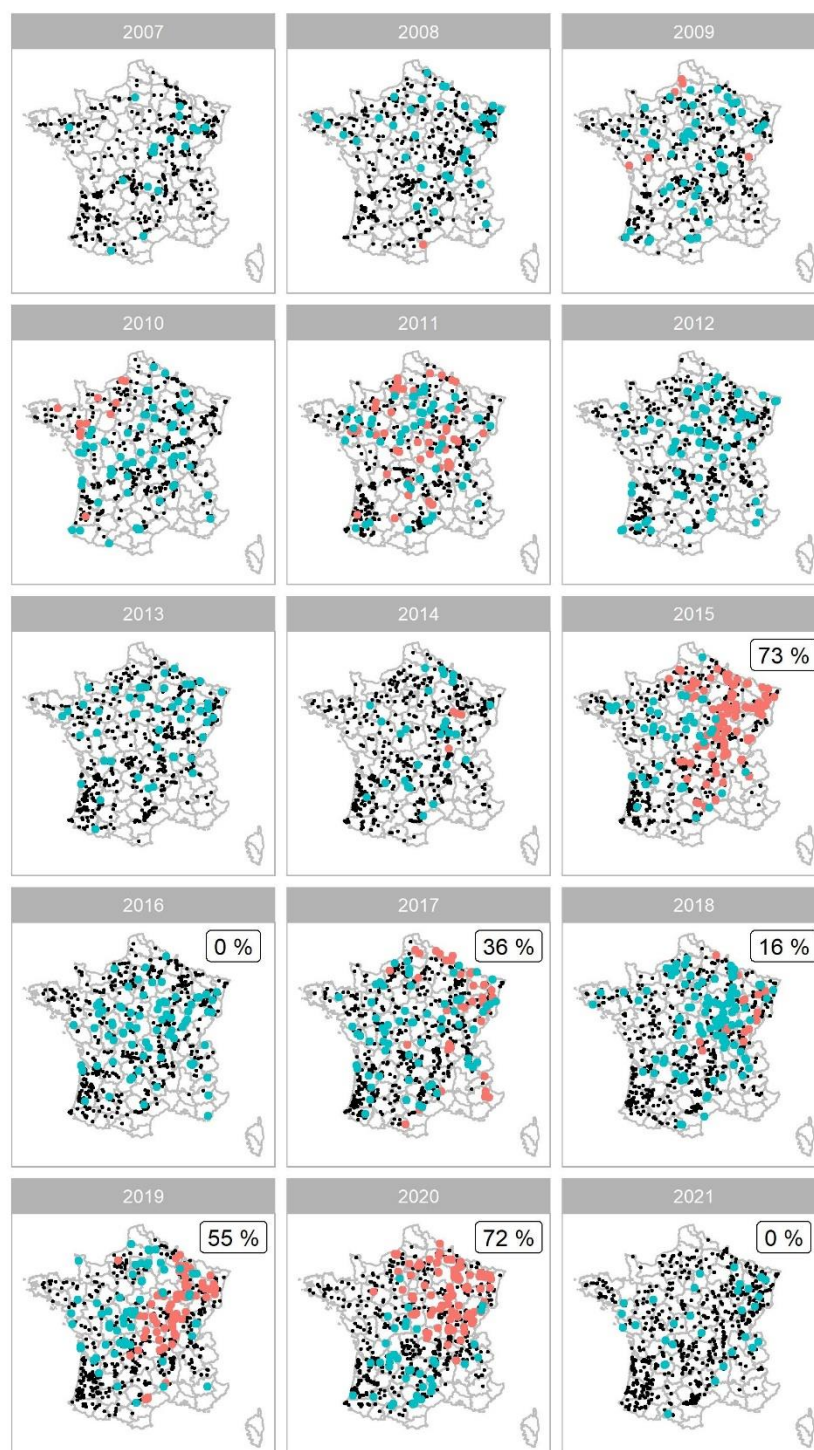
Données : DSF et Météo-France
Période : 2007 à 2021
L'échec est défini par une mortalité > 20 % à l'automne

Annexe 4 : Représentations cartographiques rétrospectives des échecs de plantations et simulation des conditions de garanties qui se seraient appliquées selon 4 règles d'utilisation d'indices de sécheresse

Cartes des échecs de plantations (toutes essences confondues)

Conditions de garanties simulées : sécheresse exceptionnelle si SSWI3 d'août < -1

Echecs avec application de la garantie de reprise ● non ● oui
(sous condition météorologique)

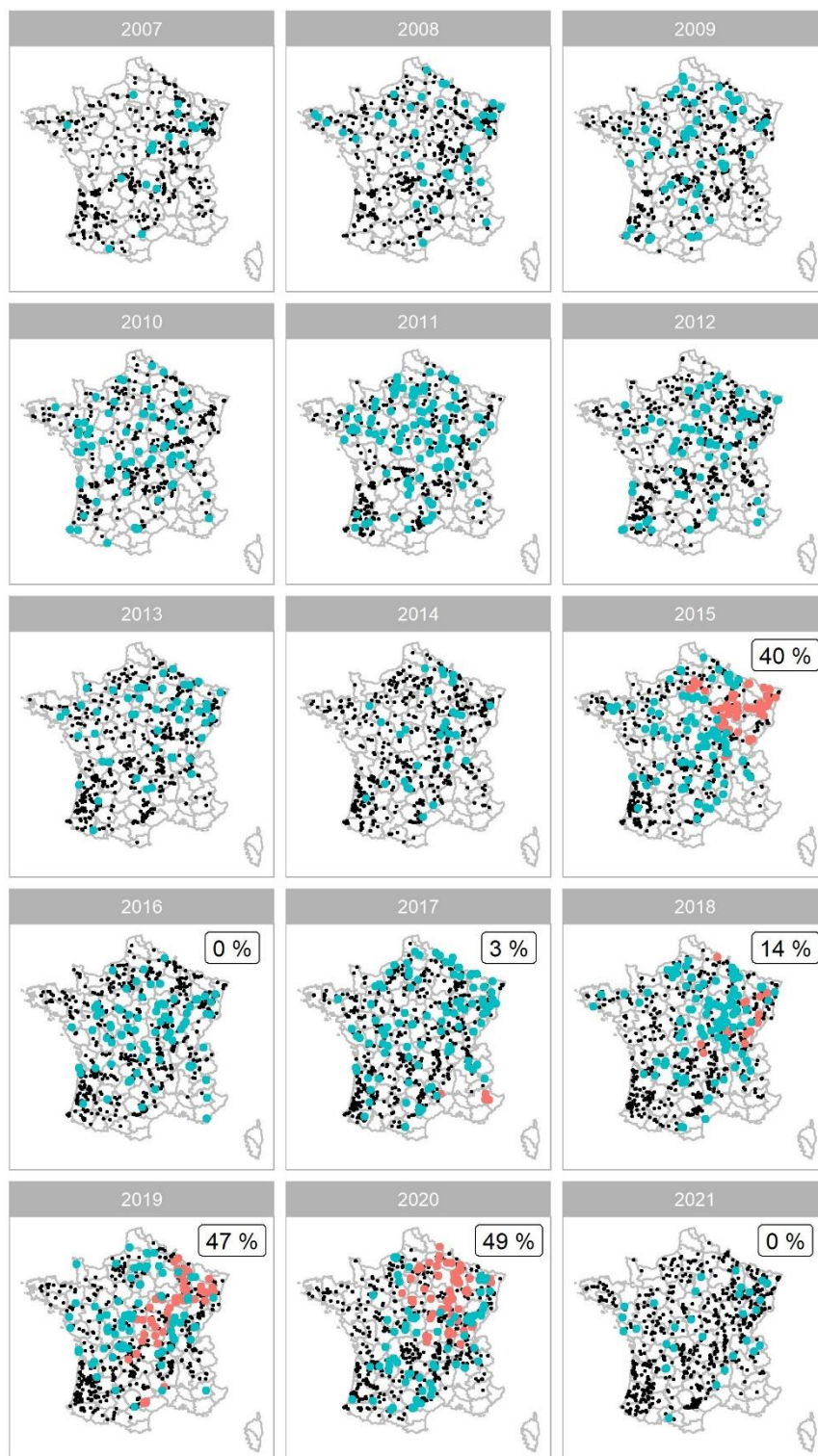


Données DSF et Météo-France
L'échec est défini par un taux de mortalité > 20 %
Les plantations ayant atteint 80 % de reprise sont représentées en noir
A partir de 2015, est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis

Cartes des échecs de plantations (toutes essences confondues)

Conditions de garanties simulées : sécheresse exceptionnelle si SPI3 et SSWI3 d'août < -1

Echecs avec application de la garantie de reprise ● non ● oui
(sous condition météorologique)

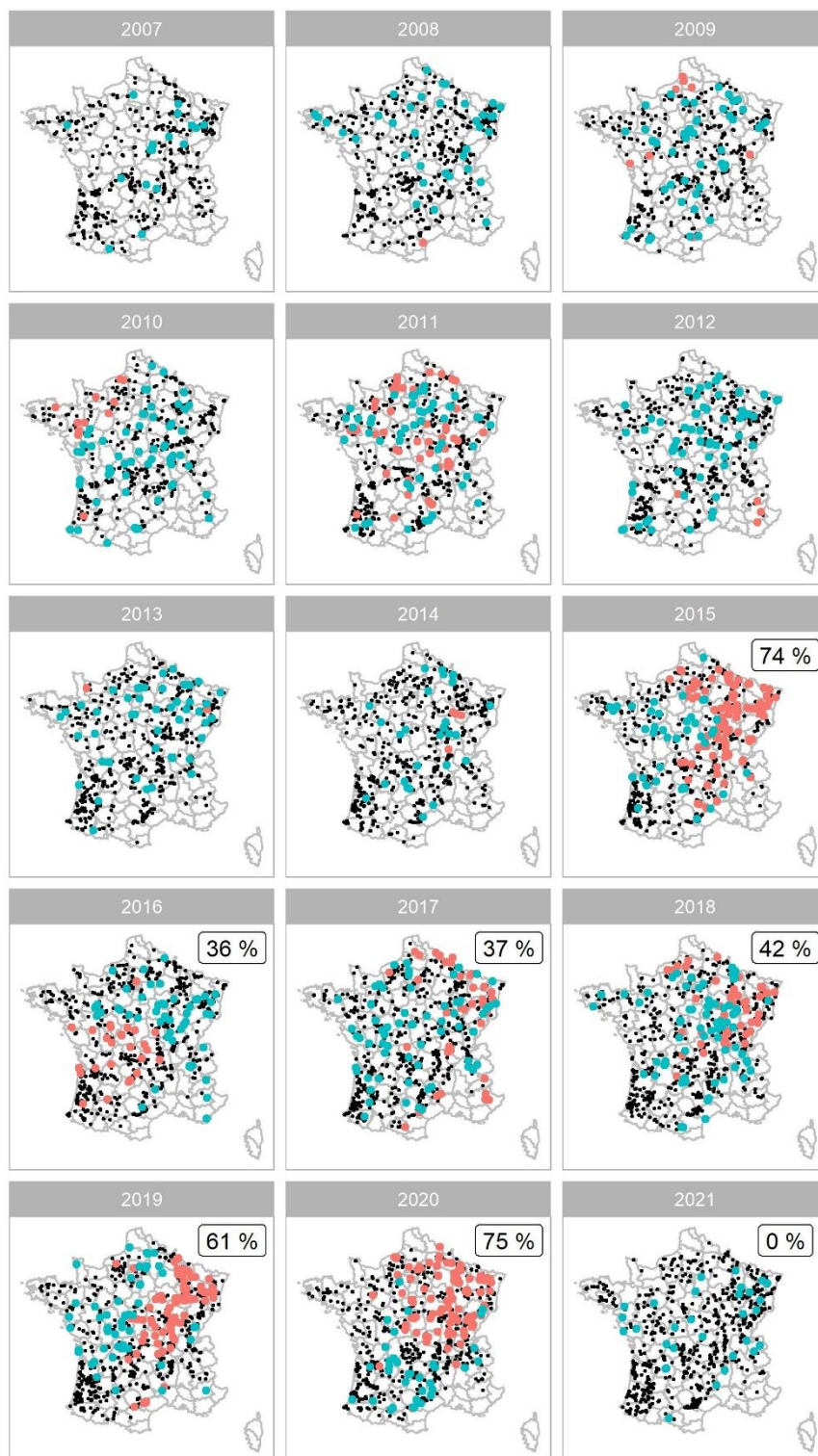


Données DSF et Météo-France
L'échec est défini par un taux de mortalité > 20 %
Les plantations ayant atteint 80 % de reprise sont représentées en noir
A partir de 2015, est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis

Cartes des échecs de plantations (toutes essences confondues)

Conditions de garanties simulées : sécheresse exceptionnelle si SPI3 ou SSWI3 d'août < -1

Echecs avec application de la garantie de reprise ● non ● oui
(sous condition météorologique)

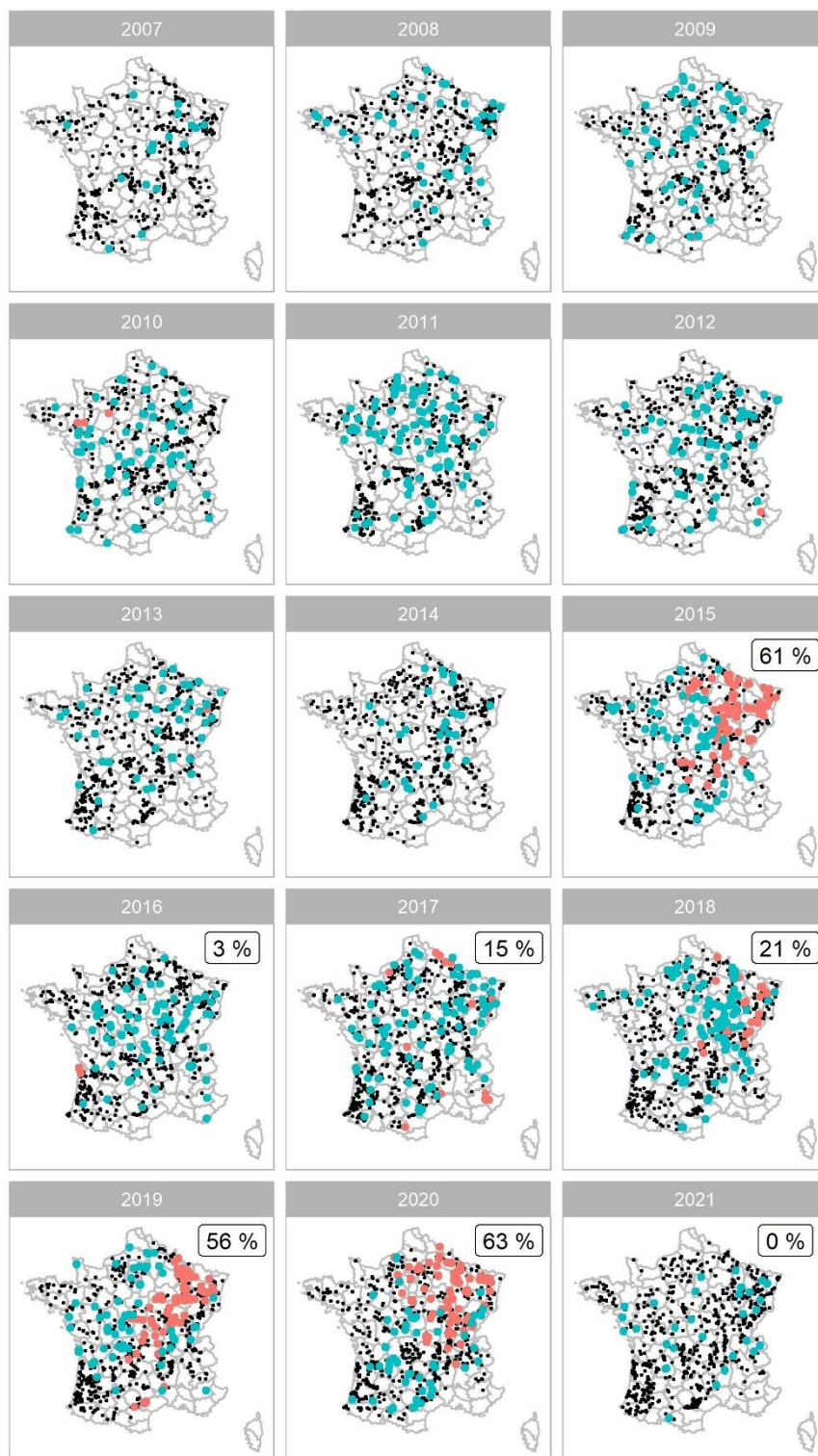


Données DSF et Météo-France
L'échec est défini par un taux de mortalité > 20 %
Les plantations ayant atteint 80 % de reprise sont représentées en noir
A partir de 2015, est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis

Cartes des échecs de plantations (toutes essences confondues)

Conditions de garanties simulées : sécheresse exceptionnelle si SPI3 + SSWI3 d'août < -2

Echecs avec application de la garantie de reprise ● non ● oui
(sous condition météorologique)



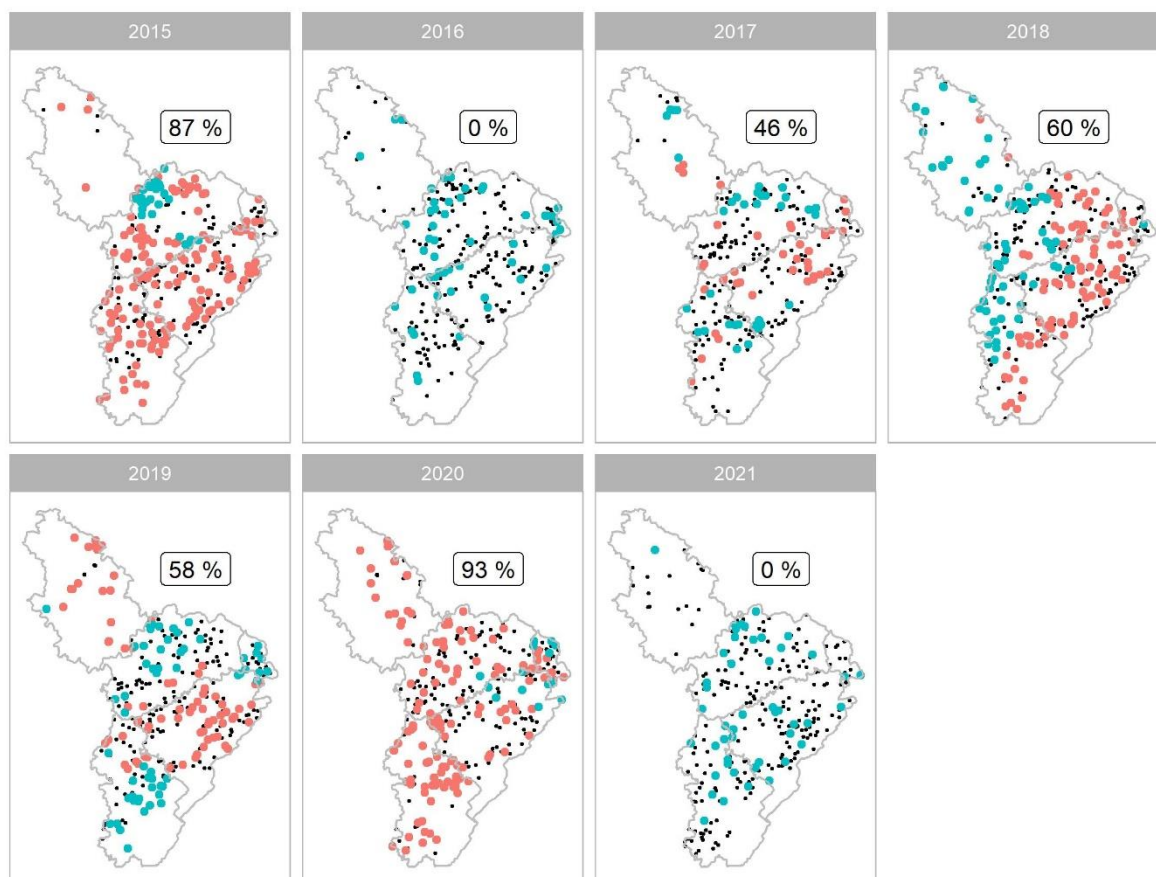
Données DSF et Météo-France
L'échec est défini par un taux de mortalité > 20 %
Les plantations ayant atteint 80 % de reprise sont représentées en noir
A partir de 2015, est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis

Annexe 5 : Représentations cartographiques rétrospectives des échecs de plantations dans les forêts publiques de Franche-Comté et de Haute-Marne et simulation des conditions de garanties qui se seraient appliquées selon 4 règles d'utilisation d'indices de sécheresse

Cartes des échecs de plantations (toutes essences confondues)
dans les forêts publiques de Franche-Comté et de Haute-Marne

Conditions de garanties simulées : sécheresse exceptionnelle si SSWI3 d'août < -1

Echecs avec application de la garantie de reprise ● non ● oui
(sous condition météorologique)

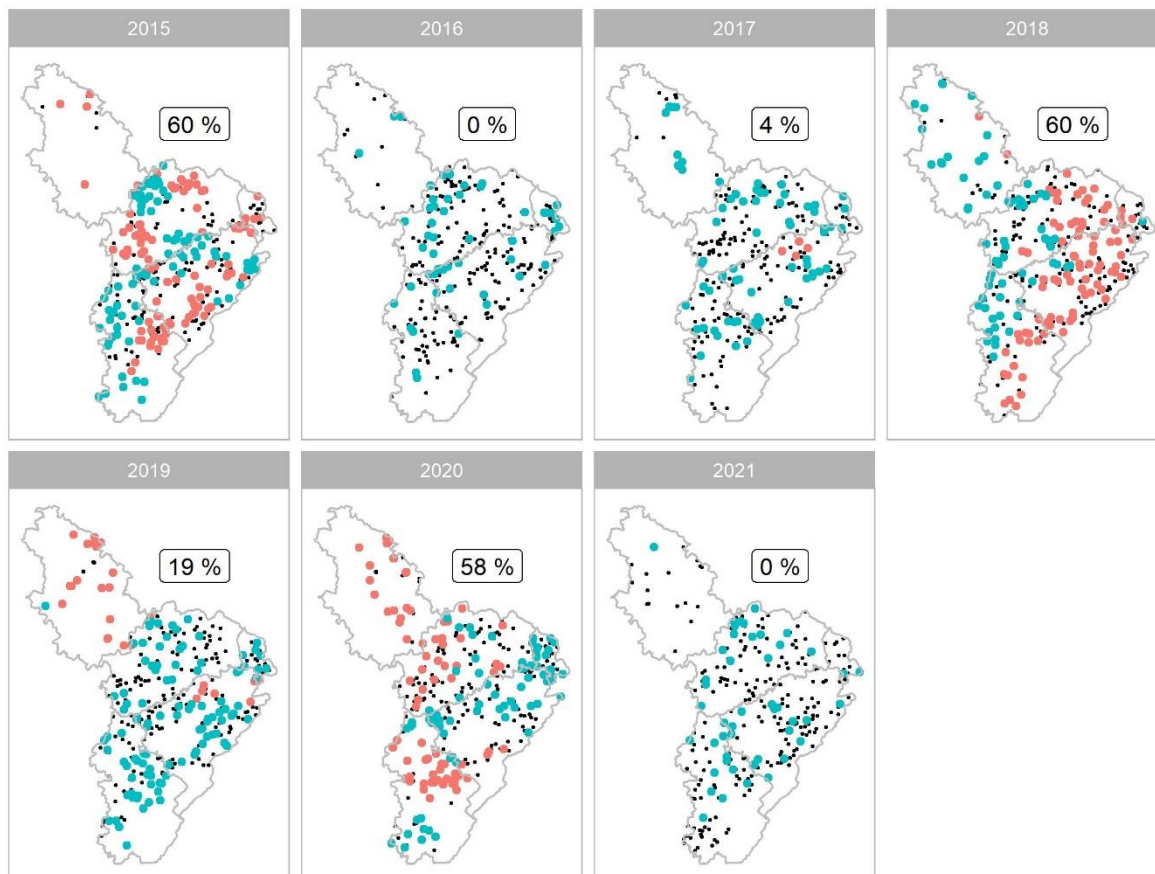


Données : ONF Franche-Comté et Haute-Marne et Météo-France
L'échec est défini par un taux de mortalité > 20 %
Les plantations ayant atteint 80 % de reprise sont représentées en noir
Chaque année, est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis

Cartes des échecs de plantations (toutes essences confondues) dans les forêts publiques de Franche-Comté et de Haute-Marne

Conditions de garanties simulées : sécheresse exceptionnelle si SPI3 et SSWI3 d'août < -1

Echecs avec application de la garantie de reprise ● non ● oui
(sous condition météorologique)

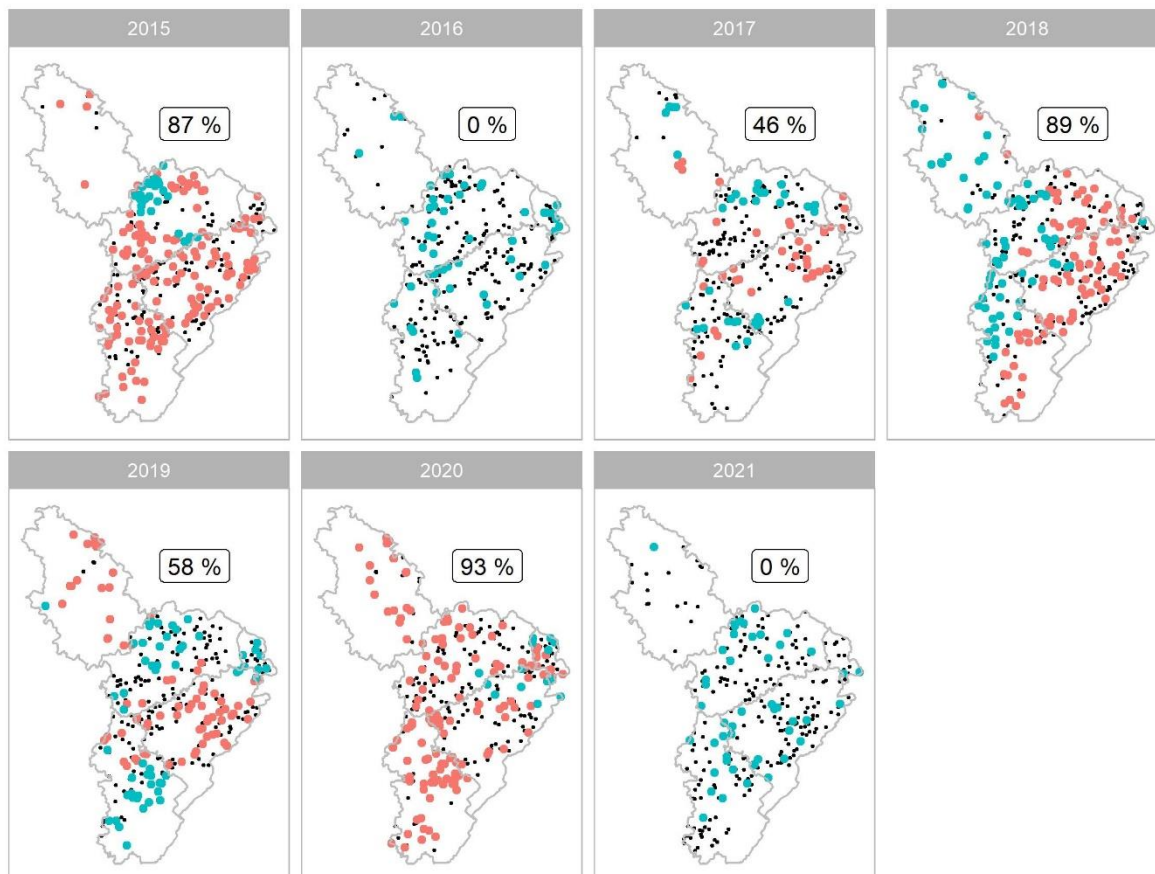


Données : ONF Franche-Comté et Haute-Marne et Météo-France
L'échec est défini par un taux de mortalité > 20 %
Les plantations ayant atteint 80 % de reprise sont représentées en noir
Chaque année, est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis

Cartes des échecs de plantations (toutes essences confondues) dans les forêts publiques de Franche-Comté et de Haute-Marne

Conditions de garanties simulées : sécheresse exceptionnelle si SPI3 ou SSWI3 d'août < -1

Echecs avec application de la garantie de reprise ● non ● oui
(sous condition météorologique)



Données : ONF Franche-Comté et Haute-Marne et Météo-France

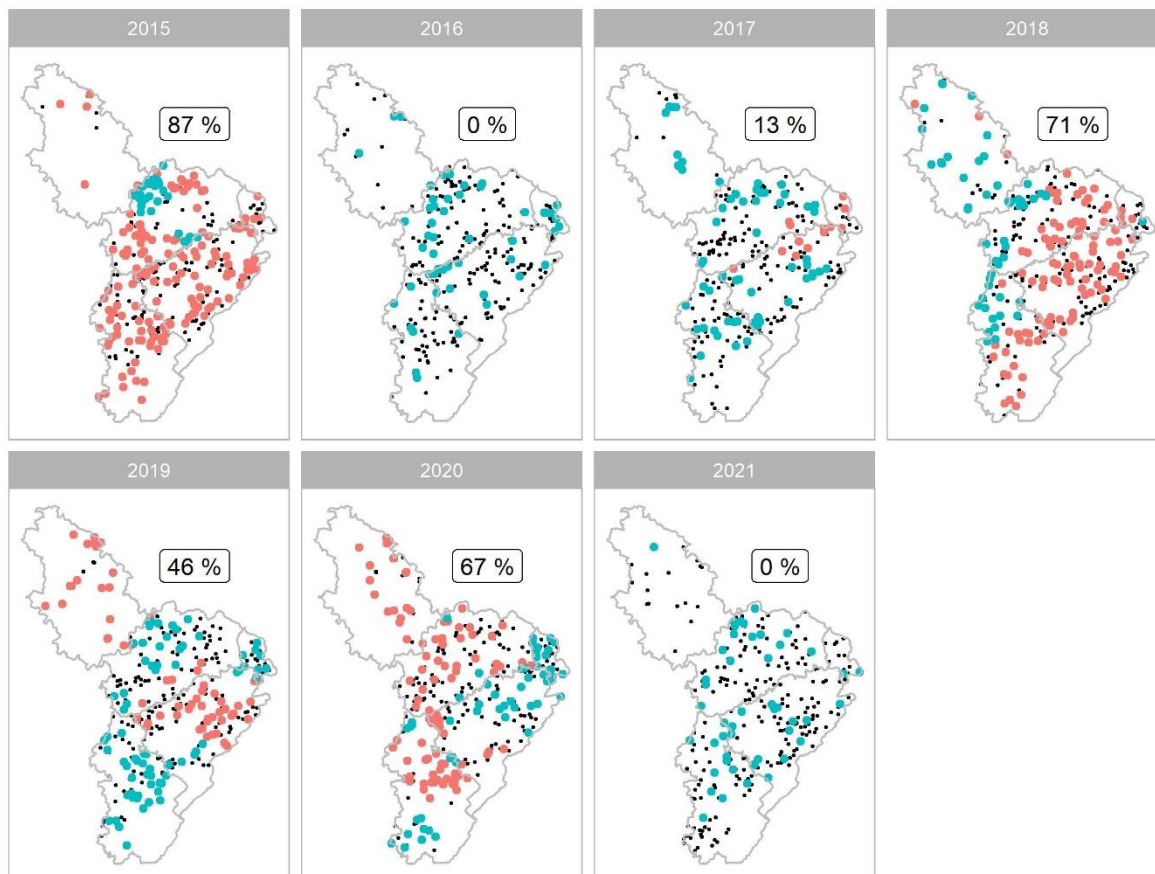
L'échec est défini par un taux de mortalité > 20 %

Les plantations ayant atteint 80 % de reprise sont représentées en noir
Chaque année, est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis

Cartes des échecs de plantations (toutes essences confondues) dans les forêts publiques de Franche-Comté et de Haute-Marne

Conditions de garanties simulées : sécheresse exceptionnelle si SPI3 + SSWI3 d'août < -2

Echecs avec application de la garantie de reprise ● non ● oui
(sous condition météorologique)

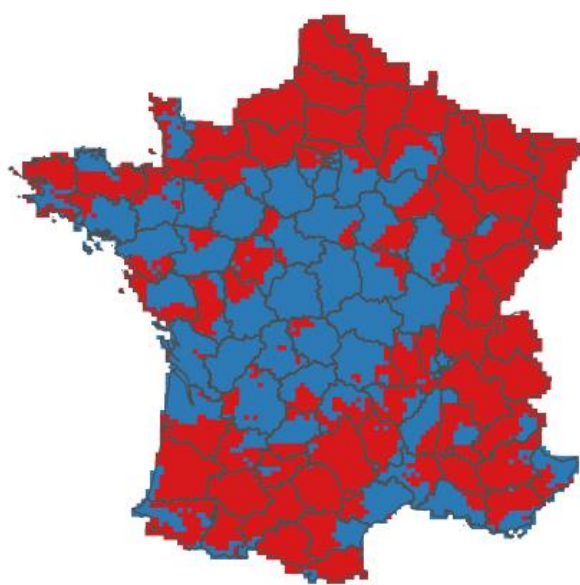


Données : ONF Franche-Comté et Haute-Marne et Météo-France

L'échec est défini par un taux de mortalité > 20 %

Les plantations ayant atteint 80 % de reprise sont représentées en noir
Chaque année, est affichée la proportion des échecs qui n'auraient pas été garantis

Annexe 6 : Cartes produites par l'ONF en 2021 et 2022 des zones de levée de garantie des reprises de plantation au titre de la sécheresse



Indice sécheresse caractérisée 2022

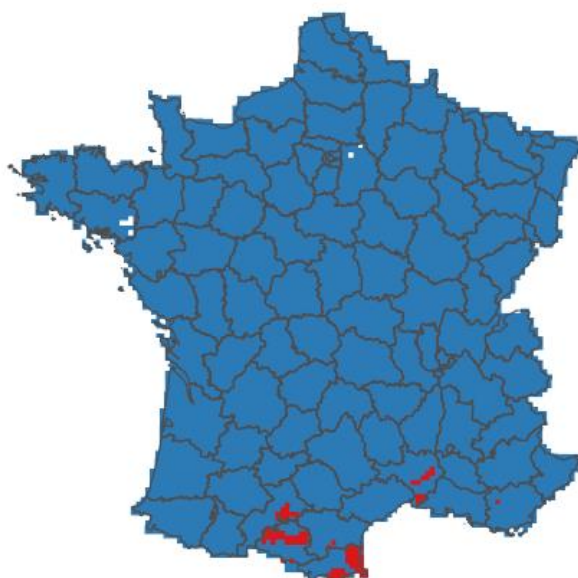
SPI3_août + SSWI3_août



Ces informations sont basées sur les données de Météo-France. Elles permettent seulement de caractériser le stress hydrique des plantations d'arbres des parcelles forestières gérées par l'ONF selon la méthode définie par l'ONF. En particulier, ces informations ne sont pas représentatives des retraits gonflement des sols argileux du dispositif de catastrophe naturelle, ni représentatives des analyses conduites dans le cadre du dispositif de calamités agricoles.



Jonathan Pitaud
13 septembre 2022



Indice sécheresse caractérisée 2021

SSWI3_août + SPI3_août



Ces informations sont basées sur les données de Météo-France. Elles permettent seulement de caractériser le stress hydrique des plantations d'arbres des parcelles forestières gérées par l'ONF selon la méthode définie par l'ONF. En particulier, ces informations ne sont pas représentatives des retraits gonflement des sols argileux du dispositif de catastrophe naturelle, ni représentatives des analyses conduites dans le cadre du dispositif de calamités agricoles.



Jonathan Pitaud
23 septembre 2021