

DEMARCHE SCIENTIFIQUE

2.1.1. Les tempêtes de 1999 en France

Les tempêtes de décembre 1999, Lothar et Martin, ont été des plus virulentes pour le secteur forestier français induisant des perturbations environnementales, économiques et sociétales importantes (Birost et al., 2009). Avec des vents supérieurs à 140 km/h, 1,7 million d'hectares de forêts, soit 11 % de la forêt française, ont été exposés à des vents violents (Wencélius, 2002). La France est le pays qui a connu le plus de dégâts devant l'Allemagne et la Suisse avec 45 départements fortement touchés (**Figure 2**) et 7 % de la surface forestière endommagée (Inventaire Forestier National, 2003). Parmi les régions françaises, la Lorraine et l'Aquitaine ont été les plus touchées, les dégâts inventoriés dans ces régions ont représenté un tiers des dégâts nationaux.

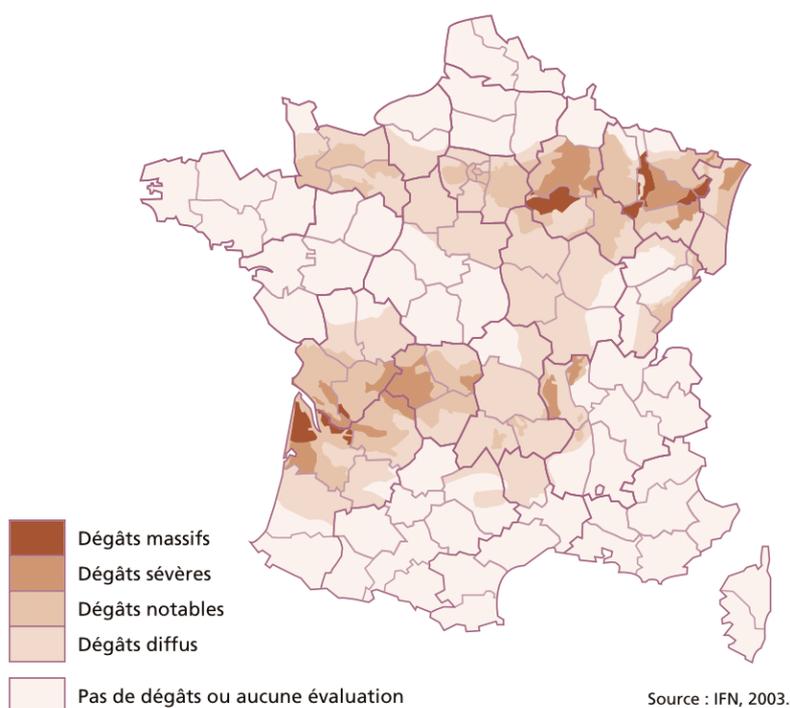


Figure 2 | Représentation de la sévérité des dégâts par généralisation des cartes départementales. Source : Inventaire Forestier National, 2003.

Le volume de dégâts induits par les tempêtes s'élève à 97 millions de m³ de chablis, composés à 55 % de résineux et 45 % de feuillus. Cette estimation a été réalisée dans les forêts dont le couvert a été détruit à au moins 10 %. Les dégâts diffus n'ont donc pas été pris en compte alors que Pignard et al. (2009) ont soulevé leur importance car ils représentent une part conséquente du volume endommagé. En les prenant en compte, ils estiment un volume total de probablement 176 millions de m³ de chablis, soit 8,3 % du volume de bois sur pied des forêts françaises. Ce volume ne représente que les dégâts induits directement par les tempêtes. Bien que l'estimation soit difficile, en prenant en compte les chablis secondaires facilités par la tempête (*e.g.* attaques de scolytes), le volume de bois endommagé serait bien plus élevé.

2.1.2. Les observatoires de la dynamique de végétation après tempête

Les observatoires de la dynamique de végétation après tempêtes sont des réseaux de placettes permanentes qui ont été mis en place à la suite des tempêtes de 1999 dans l'optique d'étudier la dynamique spontanée non assistée de la végétation au sein de trouées post-tempête sur une période de 15 à 20 ans. L'objectif principal était d'identifier d'éventuelles situations de blocage de la régénération naturelle et de définir des itinéraires sylvicoles à la suite d'intempéries climatiques comme les tempêtes. Trois réseaux, répondant à différents questionnements et couvrant différentes zones géographiques, ont été mis en place :

- **Observatoire des Peuplements Dévastés Alsace-Lorraine** : réseau de 121 unités expérimentales installées en 2001 par le LERFoB³, l'ONF⁴ et le CRPF⁵ Grand Est, en Alsace et en Lorraine sur des peuplements fortement impactés par les tempêtes. En 2018-2019, 74 unités expérimentales sont encore disponibles.
- **Observatoire des Peuplements Dévastés National** : réseau national de 65 unités expérimentales installées en 2001 par l'ONF, le CNPF-IDF⁶ avec l'aide du LERFoB, dans des peuplements fortement impactés par les tempêtes dans les autres régions françaises. En 2018-2019, 40 unités expérimentales sont encore disponibles.
- **Observatoire des Peuplements Mités** : réseau de 107 unités expérimentales installées en 2004 en Lorraine par les mêmes partenaires, sur des peuplements plus faiblement impactés. En 2018-2019, 72 unités expérimentales sont encore disponibles.

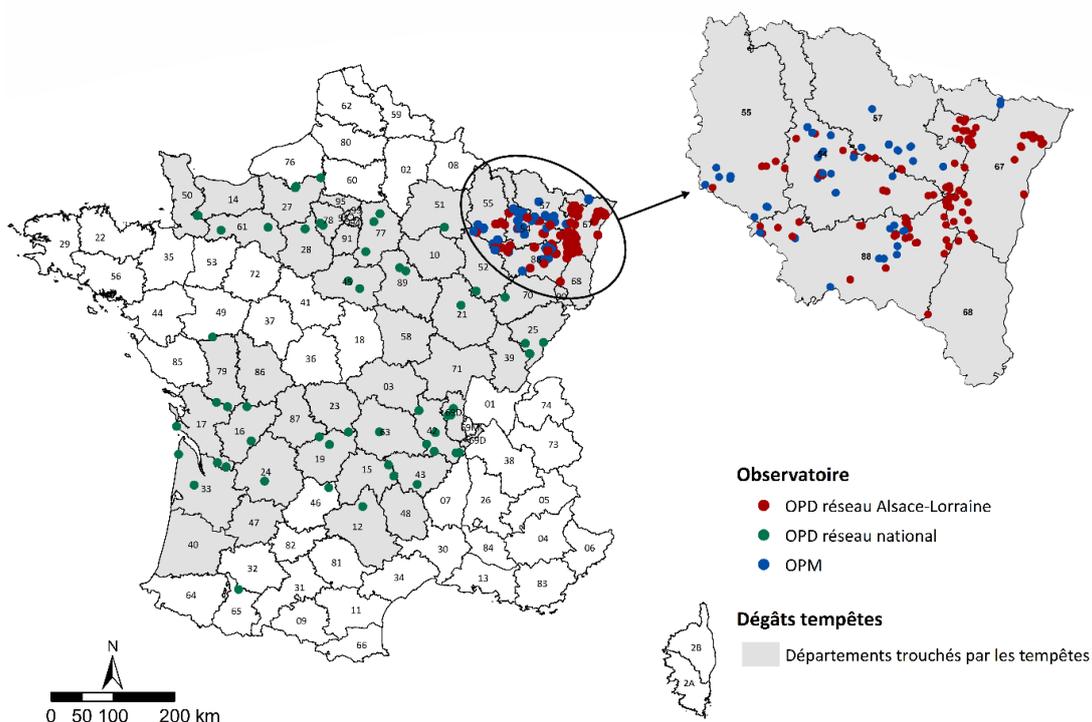


Figure 3 | Carte des unités expérimentales installées à la suite des tempêtes de 1999. Les unités expérimentales des deux réseaux OPD ont été installées en 2002 et celles du réseau OPM en 2004.

³ Laboratoire d'Étude des Ressources Forêts-Bois, qui aujourd'hui est devenu l'unité mixte de recherche SILVA

⁴ Office National des Forêts

⁵ Centre Régional de la Propriété Forestière

⁶ Centre National de la Propriété Forestière - Institut pour le Développement Forestier

2.1.2.1. Observatoire des peuplements dévastés

2.1.2.1.1. Critères de choix des sites

Par convention dans la suite du texte, sauf mention contraire, l'observatoire des peuplements dévastés (OPD) fait référence à l'ensemble de l'OPD Alsace-Lorraine et l'OPD National. L'OPD a été mis en place dans des peuplements fortement touchés par les tempêtes de 1999, avec au moins 90 % du volume sur pied impacté. Toutes les unités expérimentales sont installées dans des trouées d'au moins 2 ha, avec une majorité dépassant les 5 ha. Les unités expérimentales ont été établies dans des peuplements où la régénération préexistante était *a priori* peu ou pas présente et qui étaient considérées comme des sites potentiellement problématiques par le gestionnaire forestier. L'échantillonnage visait l'obtention un large gradient stationnel, basé sur l'analyse du pH du sol avec un minimum à 3,7 et un maximum à 8,1 pour l'horizon de surface, et de type de peuplements pré-tempête, basé sur l'avis des gestionnaires forestiers et sur l'analyse des souches. Le nombre d'unité expérimentale par modalité est présenté **Tableau 2**.

Tableau 2 | Répartition des unités expérimentales de chaque réseau en fonction du peuplement pré-tempête et du niveau d'acidité du sol. La classe « résineux introduits » correspond aux unités expérimentales de moins de 500 m d'altitude avec un peuplement pré-tempête résineux ainsi que toutes les UE avec du douglas ou du pin noir au-dessus de 500 m d'altitude.

		PEUPLEMENT PRE-TEMPETE							Résineux introduits	Autres mélanges
		HET	CHE	CHE - HET	SAP	EPC	SAP - EPC	PSY		
OPM										
	3,8 ≤ pH < 4,5	8	5	1	0	0	0	0	4	3
	4,5 ≤ pH < 5,5	6	24	2	0	0	0	0	3	0
	5,5 ≤ pH ≤ 7,9	10	18	9	0	0	0	0	14	0
OPD Alsace-Lorraine										
NIVEAU ACIDITE DU SOL	3,7 ≤ pH < 4,5	23	5	4	6	10	5	0	31	2
	4,5 ≤ pH < 5,5	5	5	1	0	0	0	0	1	0
	5,5 ≤ pH ≤ 8,1	14	1	2	0	0	0	0	7	0
OPD National										
	3,8 ≤ pH < 4,5	4	1	0	2	0	0	1	13	2
	4,5 ≤ pH < 5,5	1	5	1	1	3	4	0	10	2
	5,5 ≤ pH ≤ 7,7	3	0	4	0	1	2	0	3	1

Les abréviations correspondent à : HET = hêtre, CHE = chênes, SAP = sapin pectiné, EPC = épicéa, PSY = pin sylvestre.

2.1.2.1.2. Historique des actions menées

Le réseau des observatoires OPD est un projet complexe réunissant de nombreux partenaires, des moyens financiers et humains importants et nécessitant une coordination sur plusieurs années. Les protocoles réalisés ont évolué au cours du temps, à la fois pour ajouter des données manquantes et pour s'adapter à l'évolution de la régénération. Plusieurs études et

publications ont été réalisées depuis l'installation des observatoires, dans lesquelles sont décrits plus ou moins complètement les protocoles adoptés (Lacombe et al., 2009; Mengin, 2006; Quiñones-Nadler et al., 2005; Van Couwenberghe, 2008, 2010, 2011). L'historique des actions menées au sein du réseau depuis sa création est répertorié **Tableau 3**.

Tableau 3 | Historique des actions menées au sein des deux réseaux OPD (Alsace-Lorraine et National). Cet historique provient du rapport intitulé « Observatoire des dynamiques naturelles après tempête Réseau Lorraine Alsace » rédigé par L. Van Couwenberghe en 2007 et complété par L. Dietz.

DATE	ACTION REALISEE
2001 - 2002	Mise en place du protocole
Été 2002 - 2003	Installation des unités expérimentales et première campagne de mesures
2003 - 2004	Archivage et analyse des données
Mars 2004	Comité de pilotage pour les questions liées à la remesure et de l'installation d'un dispositif complémentaire
Été 2004	Mesures complémentaires sur l'âge des semis et sur les souches par deux stagiaires BTS
Octobre 2004	Bilan des résultats, prévision de la remesure en 2005 et de la mise en place d'enclos
Janvier - avril 2005	Adaptation du protocole pour la deuxième campagne, comité de pilotage
Été 2005	Deuxième campagne de mesures
Octobre 2005 - janvier 2006	Archivage de données, construction de la base de données, analyse de données, choix des sites pour les enclos
Février 2006	Comité de pilotage, présentation premier document ¹
Février - juillet 2006	Nettoyage de la base de données, remesures sur le terrain, installation des 7 enclos et mesures en Lorraine
Août 2006 - 2007	Analyses de la 2ème série de mesures, présentation des résultats, rédaction du rapport final ²
Automne 2007	Intégration des données Alsace-Lorraine dans une base qui contient les données du réseau national
2011	Soutenance de thèse L. Van Couwenberghe basée sur les données du réseau ³

¹ Quiñones-Nadler et al. (2005), ² Lacombe & Van Couwenberghe, 2010; Van Couwenberghe, 2007a, 2007b, 2008), ³ Van Couwenberghe (2011)

2.1.2.1.3. Organisation des unités expérimentales

Le schéma des unités expérimentales OPD est équivalent quelle que soit la taille de la trouée. Ce sont des sites de 90 m de côté (0,8 ha) avec une zone tampon de 5 m. Quatre placettes circulaires de 10 m de rayon, numérotées de 1 à 4, sont installées à 30 m par rapport au centre de l'unité expérimentale aux grades 50 (placette 2), 150 (placette 3), 250 (placette 4) et 350 (placette 1) (**Figure 4**). Au sein de chaque placette, trois placeaux circulaires de 2 m de rayon, numéroté A, B et C, dont les centres ont été installés à 0 gr (A), 133 gr (B) et 266 gr (C) à 9 m par rapport au centre de la placette considérée.

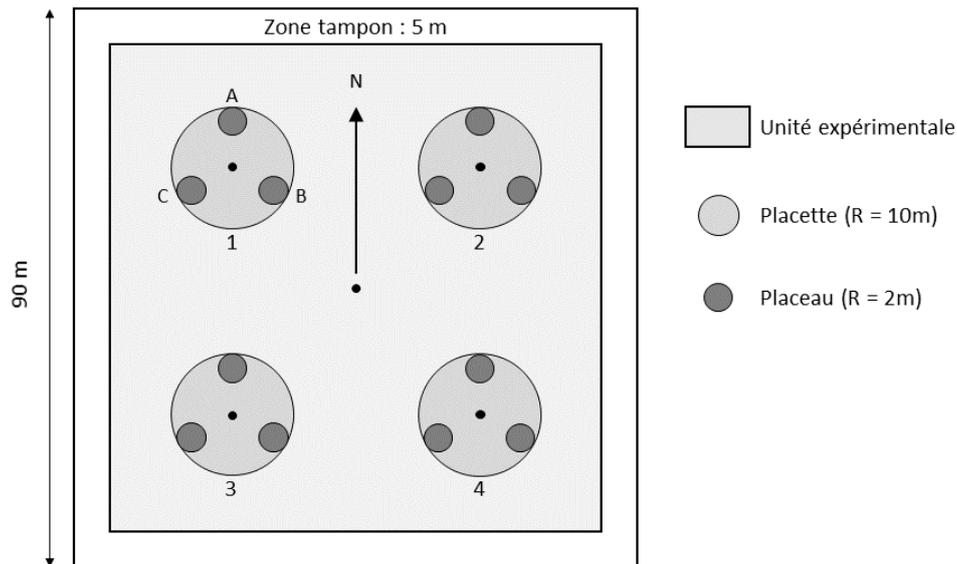


Figure 4 | Schéma d'un dispositif de l'observatoire des peuplements dévastés.

2.1.2.2. Observatoire des peuplements mités

2.1.2.2.1. Choix des sites

L'objectif de ce deuxième réseau est d'étudier la dynamique de végétation au sein de forêts peu à moyennement impactées par les tempêtes de 1999. Ainsi, le réseau de l'observatoire des peuplements mités (OPM) regroupe des peuplements forestiers ayant subi des dégâts qui ont touché 10 à 50 % de leur surface de manière plus ou moins diffuse. L'OPM regroupe un ensemble d'unités expérimentales installées dans des trouées de 0,008 à 1 ha en Lorraine, à l'étage collinéen (< 500 m d'altitude), ayant une pente inférieure à 10-20 % et en excluant les fonds de vallons ombragés. Les unités expérimentales ont été sélectionnées de manière à obtenir une variété de peuplements pré-tempête sur un large gradient trophique. Ainsi, 107 unités expérimentales ont été installées sur 40 sites, 2 à 4 unités expérimentales par site, selon le schéma **Figure 5**.

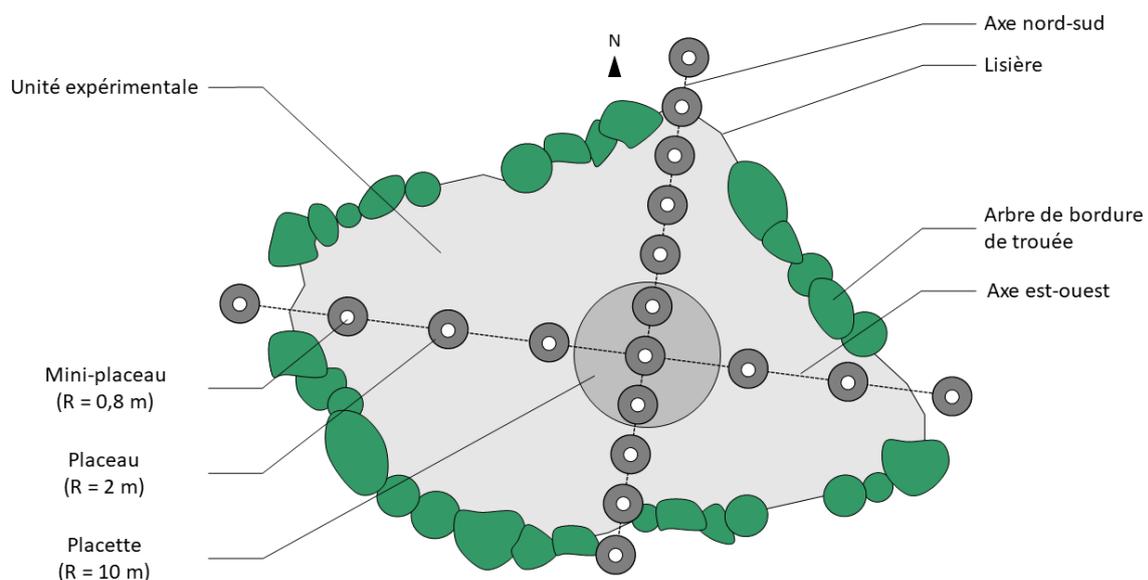


Figure 5 | Schéma d'un dispositif de l'observatoire des peuplements mités.

2.1.2.2.2. Historique des actions réalisées

Le réseau OPM a été mis en place après le réseau OPD, pour permettre une évaluation de l'effet des dégâts diffus qui représentent une part importante des dégâts forestiers induits par les tempêtes de 1999, en Lorraine ils représentent 20 % des forêts touchées (Pignard et al., 2009). Les unités expérimentales ont été installées en 2004 et deux campagnes de mesures ont été réalisées en 2004-2005 et 2009. Le **Tableau 4** présente les différentes étapes du projet.

Tableau 4 | Historique des actions menées au sein du réseau OPM. Cet historique provient du rapport intitulé « Observatoire des peuplements mités, 1ère phase de mesures 2003-2006, Rapport final » rédigé par A. Mengin en 2006 et complété par L. Dietz.

DATE	ACTION REALISEE
2002 - 2003	Mise en place du protocole
2004 - 2005	Installation du réseau, mesures sur le terrain et archivage des données
2005 - 2006	Analyse des données de la première campagne ¹
2009	Deuxième campagne de mesures sur le terrain
2011	Soutenance de thèse L. Van Couwenberghe basée sur les données du réseau ²

¹ Mengin (2006), Van Couwenberghe et al. (2008, 2010), ² Van Couwenberghe (2011)

2.1.2.2.3. Organisation des unités expérimentales

Les unités expérimentales du réseau OPM sont regroupées si possible par trois en fonction de la taille de la trouée. Ainsi, pour chaque site une petite trouée, une trouée moyenne et une grande trouée ont été regroupées dans un triplet localisé dans la même forêt. La **Figure 6** présente la répartition de la taille de la trouée en fonction de la classification petite, moyenne ou grande.

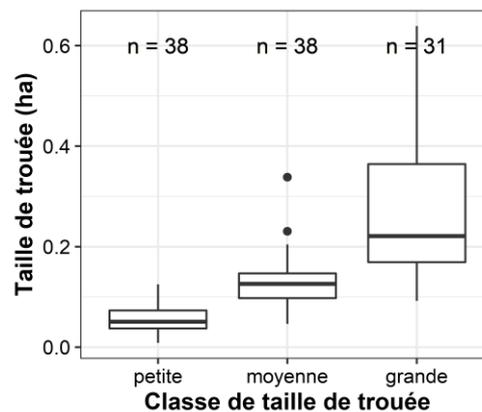


Figure 6 | Classe de taille de trouée de l'observatoire des peuplements mités en fonction de la taille mesurée sous ArcGis.

Quelle que soit la taille, le design expérimental est le même (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). La trouée a été délimitée par le tronc des arbres géolocalisés, appelés « arbres de bordure », qui ont permis de réaliser une bordure de trouée sous ArcGis et de calculer le barycentre de la trouée. Le barycentre représente le « centre » de la trouée, où une placette

circulaire de 10 m de rayon a été délimitée. Deux axes ont ensuite été installés, à 5 gr (axe nord-sud) et à 105 gr (axe est-ouest) par rapport au nord. Sur l'axe nord-sud, des placeaux circulaires de 2 m de rayon ont été matérialisés tous les 6 m alors que sur l'axe est-ouest des placeaux de 2 m de rayon ont été matérialisés tous les 12 m. Cette densité de placeaux plus élevée sur l'axe nord-sud a été décidée à l'origine car le gradient de microclimats attendus est plus important sur ce gradient que sur le gradient est-ouest. Enfin, au centre de chaque placeau, un mini-placeau circulaire de 0,8 m de rayon a été délimité pour permettre l'inventaire des semis. Le nombre de placeaux par unités expérimentales varie entre 10 et 27 avec une moyenne de 13 placeaux.

2.1.3. Unités expérimentales remesurées en 2018-2019

L'objectif des réseaux étant d'étudier la dynamique spontanée de la végétation, toutes les unités expérimentales où des travaux ont été réalisés ont été considérées comme « non remesurables ». Ainsi, avant de débiter la campagne de mesures 2018-2019, les gestionnaires des différentes forêts (domaniales, communales et privées) ont été contactés et sollicités pour remplir une fiche d'état des lieux permettant d'identifier s'il y a eu intervention sylvicole ou non dans les unités expérimentales. La fiche d'état des lieux envoyée aux gestionnaires est disponible en **Annexe 1**. Cette fiche a permis d'identifier 60 unités expérimentales, dont 20 du réseau OPM, 28 du réseau OPD Alsace-Lorraine et 12 du réseau OPD National, sur lesquelles il y avait eu une intervention, et qui ont donc été éliminées dans le programme de terrain 2018-2019.

Pour toutes les unités expérimentales pour lesquelles les fiches n'ont pas été remplies par les gestionnaires, une évaluation de leur préservation a été menée directement par l'équipe de terrain. Le choix de supprimer ou non l'unité expérimentale a été fait de la manière suivante :

- OPD : si au moins deux placeaux sont impactés par des travaux sylvicoles, la placette est supprimée ; si plus de deux placettes sont impactées par des travaux, l'unité expérimentale est supprimée.
- OPM : si plus de 50 % des placeaux d'un axe ou la placette centrale sont impactés par des travaux sylvicoles, l'unité expérimentale est supprimée.

Les fiches saisies par les gestionnaires et les critères de sélection appliqués sur le terrain, ont amené à supprimer 48 unités expérimentales du réseau OPD Alsace-Lorraine, 24 unités expérimentales du réseau OPD National et 35 unités expérimentales du réseau OPM. À cela s'ajoute 1 unité expérimentale qui n'a pas pu être mesurée en 2018-2019 car elle était trop isolée. La **Figure 7** présente les différents travaux menés dans les parcelles éliminées et le nombre d'unités expérimentales associées.

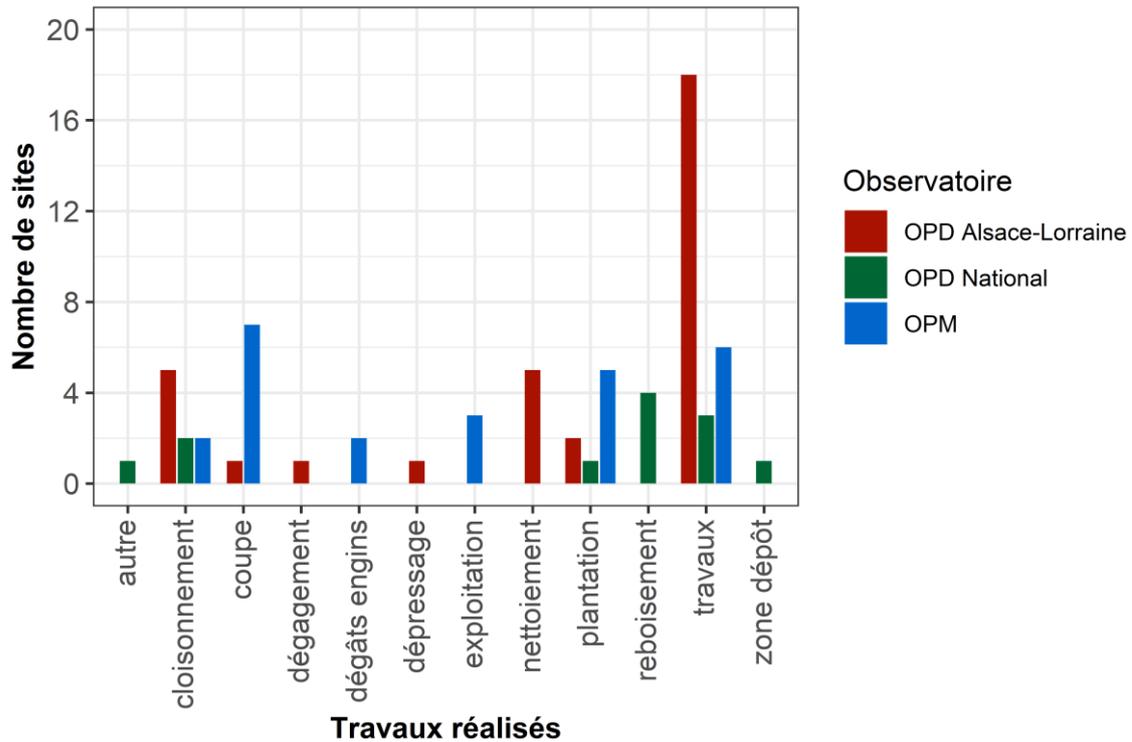


Figure 7 | Classification des unités expérimentales non remesurées en fonction des travaux réalisés. La mention « travaux » regroupe les unités expérimentales pour lesquelles plusieurs interventions différentes ont été réalisées ou les unités expérimentales sans précision sur la nature des travaux ; la mention « autre » désigne l'unité expérimentale remesurable mais qui n'a pas été mesurée car trop isolée.

2.1.4. Unités expérimentales étudiées en 2018-2019

2.1.4.1. Répartition géographique

La zone étudiée se trouve en zone tempérée de la France métropolitaine et couvre la longitude allant de 1°O à 8°E et une latitude allant de 44°N à 49°N. L'ensemble des 186 unités expérimentales étudiées en 2018-2019, dont 74 du réseau OPD Alsace-Lorraine, 40 du réseau OPD National et 72 du réseau OPM, sont installées dans 25 départements français (**Figure 8**). Cette zone d'étude permet de balayer un large gradient climatique car elle prend en compte à la fois des régions sous influence climatique océanique, semi-continentale et montagnarde. Le nombre d'unités expérimentales installées au sein de chaque département est détaillé en **Annexe 2**. L'altitude des unités expérimentales couvre un gradient de 8,6 m à 1385 m.

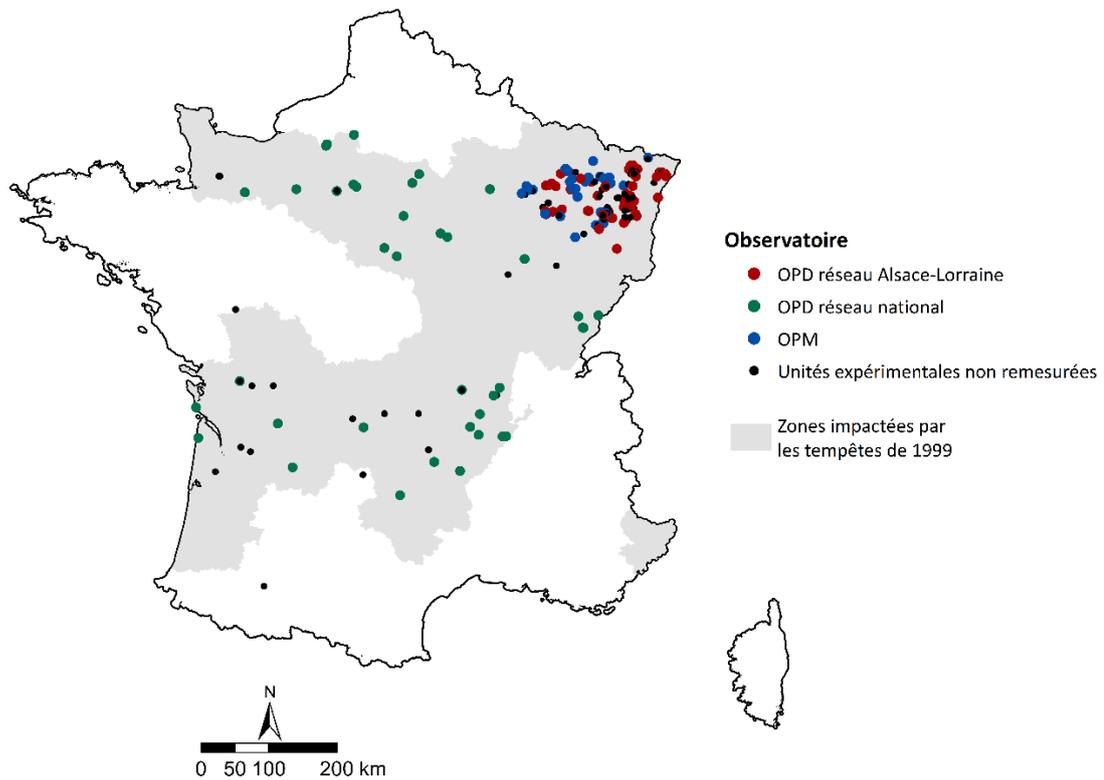


Figure 8 | Carte des unités expérimentales mesurées et non remesurées en 2018-2019 sur les trois observatoires.

Les 186 unités expérimentales remesurées en 2018-2019 ont permis de couvrir de larges gradients de pH, d'altitude et de températures. La répartition du nombre d'unités expérimentales en fonction des différents gradients est présentée sur la **Figure 9**.

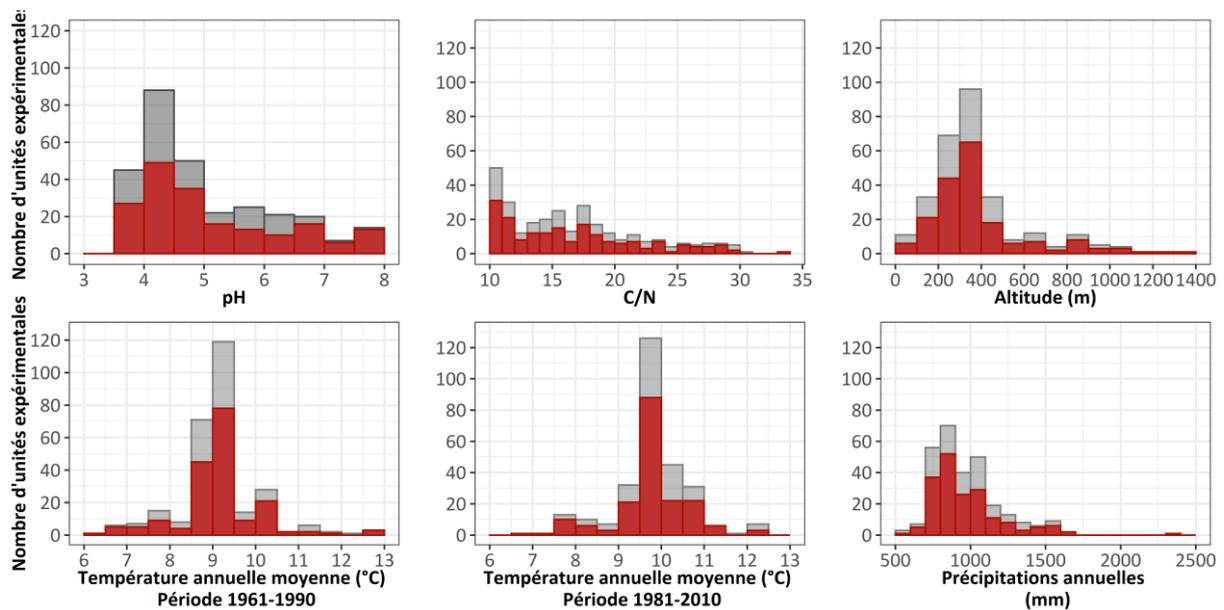


Figure 9 | Nombre d'unités expérimentales remesurées en fonction des gradients édaphiques, climatiques et altitudinaux. En gris, les unités expérimentales OPD et OPM installées en 2002, en rouge, les unités expérimentales remesurées en 2018-2019.

2.1.4.2. Gradient climatique

Pour évaluer la variabilité climatique entre les unités expérimentales, le modèle AURELHY de Météo-France a été utilisé (Benichou & Le Breton, 1987). Le modèle AURELHY regroupe un ensemble de données climatiques mensuelles calculées au pas kilométrique sur deux périodes : 1961-1990 et 1981-2010. Pour chaque unité expérimentale, une extraction sous le logiciel de cartographie ArcGis (version 10.4.1; ESRI Inc., Redlands, CA, USA) de la température moyenne mensuelle a été réalisée pour les deux périodes.

2.1.4.3. Caractérisation édaphique

La caractérisation édaphique de chaque unité expérimentale s'est faite en deux étapes. Dans un premier temps, une fosse pédologique a été creusée au centre de chaque unité expérimentale lors de la première campagne de mesures (2002 pour les OPD, et 2004 pour les OPM) pour réaliser une description détaillée du sol. Ainsi une description par horizon a été réalisée en relevant les variables suivantes : la profondeur du plafond et du plancher (cm), la texture, la structure, la compacité, l'humidité, la nature, la taille et le pourcentage d'éléments grossiers, la profondeur d'apparition d'hydromorphie faible, moyenne ou forte (cm). La classification faible, moyenne et forte de l'hydromorphie a été faite selon la classification suivante :

- Hydromorphie faible : profondeur (cm) d'apparition des premières taches ocre ou décolorées au sein de la matrice.
- Hydromorphie moyenne : profondeur d'apparition (cm) d'un horizon à taches ocre et décolorée sans matrice visible.
- Hydromorphie forte : profondeur d'apparition (cm) d'un horizon gris ou bleuté ou d'un horizon tourbeux lié à une nappe permanente.

Selon cette classification, un même profil de sol peut avoir une profondeur d'apparition d'hydromorphie faible, moyenne et forte. Par la suite, les unités expérimentales ont été séparées en deux classes : présence ou absence d'hydromorphie.

Un prélèvement de sol a été réalisé sur l'horizon 0-5 cm de profondeur lors de la première campagne de mesure, ce qui a permis dans un second temps de faire des mesures en laboratoire du pH-H₂O, de la disponibilité en carbone et en azote selon les protocoles NF ISO 10390, NF ISO 10694 and NF ISO 13878 respectivement. Le pH-H₂O de l'horizon A du sol (pH) et la fertilité (C/N) sont disponibles pour chaque unité expérimentale.

2.1.4.4. Caractérisation de la trouée

2.1.4.4.1. Taille de la trouée

L'estimation de la taille de la trouée a été faite à l'aide du logiciel de cartographie ArcGis. Deux protocoles différents ont été appliqués en fonction du réseau. Pour l'OPM, l'identification et la localisation des troncs arbres de bordures a permis de tracer la bordure des trouées et ainsi d'estimer sa taille. Dans le cas de l'OPD, les trouées étant trop grandes (> 2 ha) pour inventorier les arbres de bordures, la taille des trouées a été estimée à l'aide des images satellites Landsat-5

(U.S. Geological Survey) en comparant les images prises avant et après 1999. Les trouées ont ainsi pu être délimitées et leurs surfaces calculées. Le gradient de taille de trouée s'étend de 0,008 ha à 557 ha sur l'ensemble des observatoires.

Le **Tableau 5** présente l'amplitude (moyenne, minimum et maximum) des variables climatiques, édaphiques et de caractérisation de la trouée, en fonction du réseau étudié.

Tableau 5 | Récapitulatif des gradients climatiques, édaphiques et de caractérisations de la trouée obtenus avec les 186 unités expérimentales mesurées en 2018-2019. La moyenne est représentée en gras et les valeurs entre crochets représentent le minimum et le maximum de chaque gradient.

		OBSERVATOIRES		
		OPM 24 sites 72 UE	OPD Alsace-Lorraine 74 UE	OPD National 40 UE
BILAN CLIMATIQUE	Température moyenne annuelle (°C) Modèle Aurelhy, période 1961-1990	9,14 [8,75 - 10,0]	8,9 [6,8 - 10,2]	9,5 [5,6 - 12,9]
	Température moyenne annuelle (°C) Modèle Aurelhy, période 1981-2010	9,8 [9,2 - 10,6]	9,6 [7,7 - 10,9]	10,2 [6,7 - 13,5]
BILAN NUTRITIONNEL	pH	5,5 [3,8 - 7,9]	4,9 [3,7 - 8,1]	5,0 [3,9 - 7,7]
	Disponibilité en azote	14 [11 - 28]	18 [10 - 30]	20 [12 - 34]
BILAN LOCALISATION	Taille de trouée (ha)	0,15 [0,008 - 0,6]	58,3 [1,4 - 557]	26,3 [2,2 - 161]
	Altitude (m)	330 [215 - 584]	390 [121 - 984]	453 [8,6 - 1385]

2.1.4.4.2. Peuplement pré-tempête

La composition du peuplement pré-tempête a été estimée à dire d'expert par les gestionnaires forestiers et en se basant sur l'analyse des souches lors de la première campagne de mesures. Cette caractérisation est importante car le peuplement présent avant la tempête a eu une influence sur la composition de la banque de graines et de la régénération préexistante. À partir des données fournies lors de la première campagne de mesures, neuf classes de peuplements pré-tempête ont été différenciées (**Tableau 6**).

Tableau 6 | Répartition des unités expérimentales de chaque réseau en fonction du peuplement pré-tempête. La classe « résineux introduits » correspond aux unités expérimentales de moins de 500 m d'altitude avec peuplement pré-tempête résineux ainsi que toutes les UE avec du douglas ou du pin noir au-dessus de 500 m d'altitude.

	PEUPLEMENT PRE-TEMPETE								Autres mélanges
	HET	CHE	CHE - HET	SAP	EPC	SAP - EPC	PSY	Résineux introduits	
OPM	20	32	7	0	0	0	0	11	2
OPD Alsace Lorraine	24	7	3	4	7	3	0	26	0
OPD National	6	4	2	3	2	5	1	14	3

Les abréviations correspondent à : HET = hêtre, CHE = chênes, SAP = sapin pectiné, EPC = épicéa, PSY = pin sylvestre.

2.1.5. Présentation synthétique du protocole de mesures

2.1.5.1. Objectifs

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'analyser la dynamique de la végétation observée au sein de trouées forestières et d'évaluer les modifications induites par le changement climatique sur cette dynamique. Ces apports scientifiques fournissent un socle de connaissances dans le cadre du projet « Optimisation des travaux sylvicoles post-tempête » 2017-2020 qui a pour finalité d'aboutir à des conseils de gestion pour obtenir une reconstitution d'un peuplement de qualité dans le cadre spécifique du renouvellement forestier post-tempête. Pour ce faire, nous avons souhaité étudier les deux observatoires de la dynamique de végétation post-tempête simultanément. L'OPD et l'OPM ont été conçus séparément, avec des objectifs et un protocole qui leur sont propres. Ce sont des protocoles qui ont évolué dans le temps pour permettre une adaptation des mesures en fonction des stades de la régénération. En 2018, nous avons souhaité comparer les deux observatoires pour permettre une évaluation de l'effet de la sévérité de la perturbation sur la dynamique de la régénération. Ainsi, un troisième protocole a été conçu de manière à intégrer au mieux l'ensemble des variables mesurées dans les précédentes campagnes de mesures dans les deux observatoires et pour permettre une adaptation des mesures en fonction de l'avancé de la régénération. Le protocole de mesures présenté ci-dessous est une version synthétique des protocoles réalisés au cours des trois campagnes de mesures⁷.

2.1.5.2. Inventaire des tiges ligneuses

Les tiges ligneuses ont été inventoriées sur les placeaux de 2 m de rayon (**Figure 4 ; Figure 5**). Toutes les tiges lignifiées vivantes de la liste **Annexe 3** et d'une hauteur supérieure à 10 cm ont été identifiées et décrites. Les tiges de franc pied et les cépées sont prises en compte, chaque brin de cépée étant considéré comme une tige distincte. Le protocole de mesures des diamètres et des hauteurs de tiges a évolué dans le temps et diffère en fonction des observatoires OPD et OPM. Dans le cas de l'OPD et pour les deux premières campagnes de mesures, la hauteur des tiges est estimée par classe de 50 cm et seules les tiges supérieures à 3 m de hauteur ont une mesure de diamètre à 1,30 m. Dans le cas de l'OPM (campagne 1 et 2), la hauteur des tiges inférieures à 1,50 m a été estimée par classe de 10 cm sur les mini-placeaux (R = 0,80 m). Pour les tiges supérieures à 1,50 m, la hauteur a été estimée par classe de 50 cm et le diamètre à 1,30 m a été mesuré⁸ sur les placeaux (R = 2 m). En 2018-2019, nous avons souhaité homogénéiser les mesures de diamètres et de hauteurs. Ainsi, pour toutes les tiges supérieures à 1,30 m de hauteur, le diamètre a été mesuré à hauteur de poitrine (DBH), c'est-à-dire à 1,30 m. La mesure de la hauteur a été réalisée sur deux tiges par essence par placeau, précision au centimètre, celle ayant le plus gros diamètre et celle ayant le diamètre médian. Le **Tableau 7** synthétise le nombre de tiges inventoriées au cours des trois campagnes de mesures.

⁷ Une version détaillée du protocole est disponible en ligne sur le site du projet

⁸ NB : absence de mesure de diamètres et de hauteur pour la deuxième campagne de mesure de l'OPM

Tableau 7 | Nombre de tiges inventoriées au cours des trois campagnes de mesures pour les 186 unités expérimentales OPD et OPM remesurés en 2018-2019.

	CAMPAGNE 1	CAMPAGNE 2	CAMPAGNE 3
Nombre total de tiges	27838	61551	31330
Nombre de tiges avec une mesure de diamètre	1587	2892	12978
Nombre de tiges avec une mesure de hauteur	27721	26996	4532

2.1.5.3. Relevés floristiques

Les relevés floristiques ont été réalisés à l'échelle de la placette (R = 10 m) et à l'échelle des placeaux (R = 2 m) (**Figure 4 ; Figure 5**) pour les trois campagnes de mesures. Ce sont des inventaires exhaustifs de toutes les plantes vasculaires présentes sur la placette. Une note de recouvrement selon l'échelle de Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, 1932) a été attribuée à chaque espèce inventoriée dans chaque relevé en fonction de trois strates de hauteurs : la strate inférieure 0-0,5 m, la strate intermédiaire 0,5-2 m et la strate supérieure > 2 m. L'échelle de Braun-Blanquet est une échelle en 6 classes représentant un pourcentage de recouvrement de l'espèce **Tableau 8**. Les espèces relevées au sein des trois observatoires lors des trois campagnes de mesures sont répertoriées **Annexe 4**, un total de 553 espèces différentes ont été relevées.

Tableau 8 | Échelle de Braun-Blanquet et pourcentage de recouvrement associé. (source : Braun-Blanquet 1932). Le seuil de nombre de pieds pour les notes + et 5 est une adaptation de l'échelle initiale de Braun-Blanquet.

NOTE	POURCENTAGE DE RECOUVREMENT
+	Moins de 5 pieds, recouvrement inférieur à 5 %
1	Recouvrement inférieur à 5 %, plus de 5 pieds
2	Recouvrement compris entre 5 et 25 %
3	Recouvrement compris entre 25 et 50 %
4	Recouvrement compris entre 50 et 75 %
5	Recouvrement supérieur à 75 %

Le recouvrement est estimé par la projection verticale de la surface des organes aériens sur le sol (ou le ciel) sans tenir compte des superpositions. Par convention, toutes les espèces herbacées⁹, quelle que soit leur hauteur maximale, sont comprises dans la strate inférieure 0-0,5 m. L'appartenance d'un individu ligneux ou d'une liane à une strate est définie par la hauteur de son bourgeon le plus haut et son recouvrement représente son couvert total.

2.1.5.4. Recouvrement total de la végétation

Le recouvrement total de la végétation a été évalué sur les placeaux (R = 2 m) et les placettes (R = 10 m) des unités expérimentales (**Figure 4 ; Figure 5**) pour les trois campagnes de mesures. Pour la caractérisation du couvert total de la végétation, chaque strate est considérée comme un bloc indépendant des autres strates. Le recouvrement est estimé par la projection verticale sur le sol de l'ensemble des organes aériens (toutes espèces confondues) contenus dans

⁹ La séparation espèces herbacées et ligneuses se réfère à la Flore Forestière Française (Rameau et al., 1989)

le volume de cette strate sans tenir compte des superpositions. Il s'agit d'un pourcentage de recouvrement attribué selon les strates suivantes :

- Le sol nu : correspondant au pourcentage de recouvrement de la litière, du sol nu et des mousses.
- La strate 0-0,5 m : pourcentage de recouvrement occupée par la projection au sol de la végétation totale de hauteur inférieure à 0,5 m.
- La strate 0,5-2 m : pourcentage de recouvrement occupée par la projection au sol de la végétation totale de hauteur supérieure à 0,5 m et inférieure à 2 m.
- La strate > 2 m : pourcentage de recouvrement occupée par la projection au sol de la végétation totale de hauteur supérieure à 2 m.

2.1.5.5. Inventaire de l'encombrement

L'encombrement est défini comme l'ensemble des rémanents morts provenant de la tempête, quel que soit leur diamètre. Le pourcentage de recouvrement de l'encombrement ainsi que sa hauteur maximale sont évalués sur les placeaux (R = 2 m) et les placettes (R = 10 m) (**Figure 4** ; **Figure 5**) pour les trois campagnes de mesures.

2.1.5.6. Nouveauté du protocole 2018-2019

De nouvelles données ont été mesurées lors de la campagne de 2018-2019 dans l'objectif de pouvoir à la fois estimer la qualité du peuplement obtenu et de faire une comparaison des communautés floristiques avec un peuplement non impacté par les tempêtes. Dans le cas de la mesure de qualité, elle a été ajoutée en 2018-2019 car la régénération naturelle a atteint un stade suffisamment avancé pour que cette mesure soit fiable dans le temps, ce qui n'était pas le cas lors des premières campagnes de mesures. À l'inverse, le suivi temporel des communautés végétales dans les forêts non impactées par les tempêtes aurait été pertinent pour mieux évaluer l'effet des tempêtes sur la flore en comparant celle-ci à la flore de peuplements non perturbés. Ces mesures n'ayant pas été intégrées dans les premiers protocoles de mesures, nous avons donc fait le choix de l'ajouter pour la troisième campagne.

2.1.5.6.1. Estimation de la qualité de la régénération

La qualité des tiges est une variable importante pour estimer la réussite ou non de la régénération pour les gestionnaires forestiers. Elle peut se définir en fonction d'un ensemble de critères morphologiques, qui, relativement aux objectifs sylvicoles, permettent d'identifier quels sont les arbres d'avenir. Ainsi, un arbre d'avenir rassemble un ensemble de potentialités satisfaisantes pour former le peuplement final. En 2018-2019, 19 ans après l'ouverture de la canopée, les mesures suivantes de qualité ont été réalisées sur les tiges ayant un DBH supérieur à 5 cm.

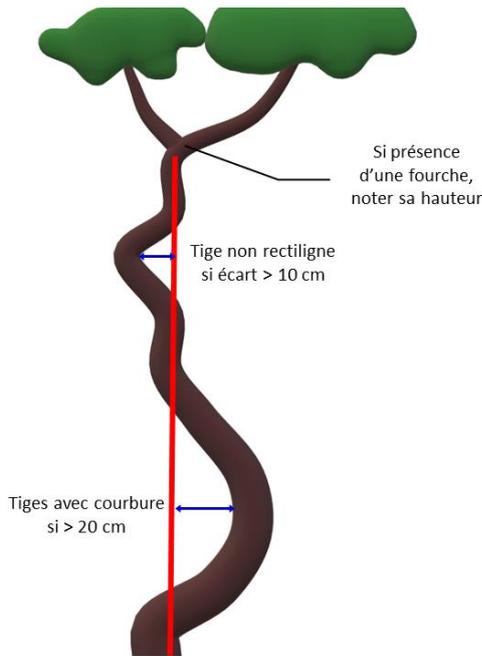


Figure 10 | Illustration de la mesure de rectitude, de courbure basale et de la présence de fourche. Schéma adapté d'après un schéma original de L. Laurent.

- La présence de dégâts ongulés.
- La présence d'une fourche et sa hauteur.
- Le nombre de branches de plus de 3 cm de diamètre.
- La présence d'une courbure basale, et son écart à la verticalité en cm (si supérieure à 20 cm).
- La rectitude de la tige.
- La présence de signes de maladies (chancre, chararose, autre).
- La présence de cassure sur l'ensemble de la tige.

Dans l'objectif d'obtenir un nombre suffisant de tiges avec une description complète pour évaluer la qualité, au moins 10 tiges, toutes essences confondues, de plus de 5 cm de DBH doivent être relevées par placette (4 placettes pour les OPD donc 40 tiges, 1 placette par OPM donc 10 tiges). Si le nombre de tiges n'est pas atteint dans les placeaux, l'inventaire des tiges de plus de 5 cm de DBH est complété par des arbres situés sur la placette, en prenant dans l'ordre les tiges les plus proches du centre de la placette jusqu'à ce que le nombre cible de tiges soit atteint (Figure 11).

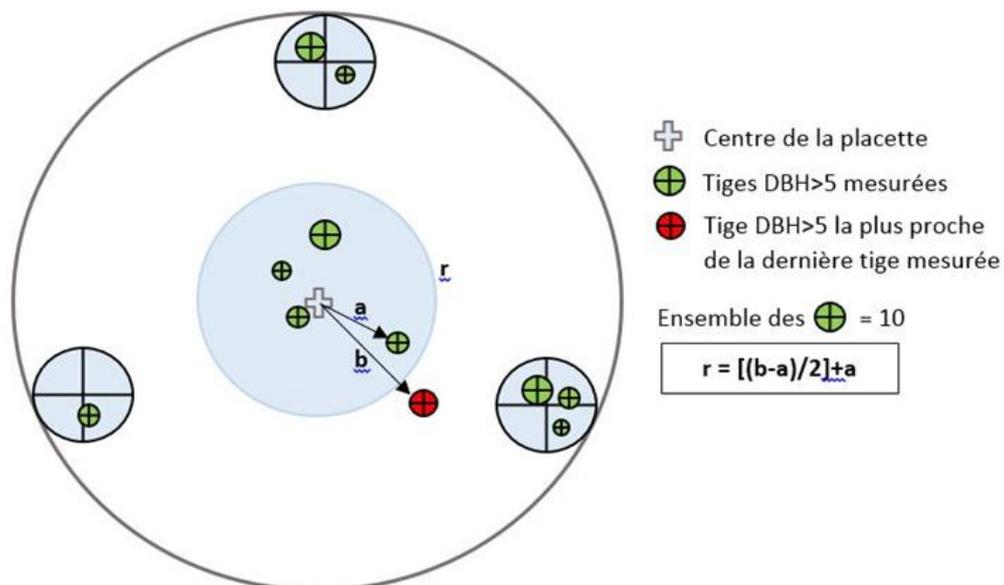


Figure 11 | Illustration de la placette centrale pour la mesure de qualité de tiges à DBH > 5 cm. Cette illustration présente l'exemple d'une des quatre placettes OPD, le même système est appliqué pour les placeaux et la placette des unités expérimentales OPM. Schéma conçu par L. Laurent.

2.1.5.6.2. Placette de référence en peuplement non impacté par les tempêtes

Nous avons souhaité étudier l'impact des perturbations sur les communautés végétales forestières. Pour ce faire, une placette de référence a été installée dans un peuplement non impacté par la tempête à proximité de chaque unité expérimentale dans l'optique de réaliser une comparaison. Un certain nombre de mesures ont été réalisées sur cette placette pour contrôler que les conditions environnementales entre placette de référence et trouée étaient équivalentes et permettaient de faire une comparaison. La placette de référence a été placée à au moins 30 m de la bordure de la trouée ou de la lisière de la forêt. L'exposition, la pente, l'altitude, le peuplement environnant et le sol ont été contrôlés pour correspondre au mieux aux conditions des unités expérimentales à laquelle les placettes de référence étaient associées. Au total, de 152 placettes de références ont été installées et mesurées. 34 unités expérimentales n'ont pas eu de référence car il n'était pas possible d'en installer une à proximité. Une placette de 10 m de rayon ainsi que deux placeaux à 0 gr et 133 gr par rapport au centre de la placette ont été installés. Un relevé floristique selon le protocole défini au §2.1.5.3 (page 37) a été réalisé sur la placette et les deux placeaux.

2.1.5.6.3. Réduction du nombre de placettes et placeaux à mesurer

Dans l'optique de simplifier, et surtout limiter la durée des mesures sur chaque site, des placettes et/ou placeaux n'ont pas été mesurés en 2018-2019 (**Figure 12**). Dans le cas de l'OPM, seuls les placeaux répartis tous les 12 m ont été pris en compte, à l'exception du dernier placeau de l'unité expérimentale et du placeau sous couvert qui sont systématiquement mesurés. Dans le cas de l'OPD, les mesures concernant les relevés floristiques, le recouvrement total de la végétation et de l'encombrement ont été réalisées sur une placette (par défaut la première) et ensuite sur deux placeaux (A et B) sur les quatre placettes. En ce qui concerne les mesures dendrométriques, elles ont été réalisées sur les 12 placeaux et 4 placettes.

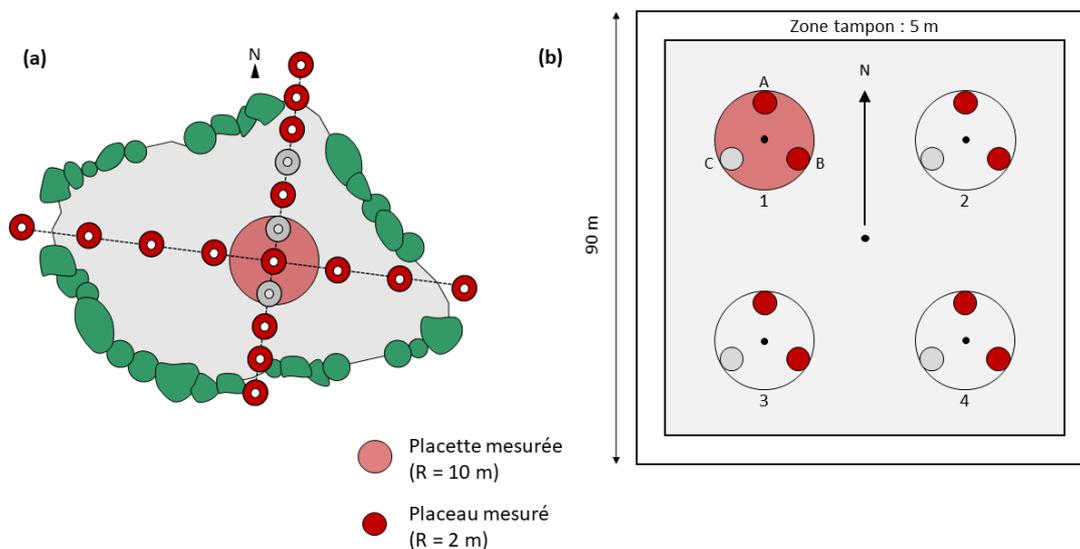


Figure 12 | Réduction du nombre de placettes et placeaux mesurés en 2018-2019. La réduction concerne (a) les relevés floristiques et les mesures dendrométriques pour l'OPM, (b) les relevés floristiques pour l'OPD.

Outre le gain de temps, les simplifications et modifications réalisées dans le nouveau protocole de mesures permettent de rendre plus comparable les deux dispositifs. Les surfaces échantillonnées sont équivalentes quelle que soit l'origine OPD ou OPM de l'unité expérimentale. Le **Tableau 9** permet de faire la synthèse des différentes mesures réalisées en 2018-2019.

Tableau 9 | Synthèse des mesures réalisées dans les deux observatoires durant les campagnes de terrain 2018 et 2019.

ÉCHELLE DE MESURE	MESURES REALISEES		
Unité expérimentale OPD : 0,8 ha OPM : 1 trouée	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vérification si l'unité expérimentale est mesurable et re-matérialisation des placeaux ▪ Prélèvement de sol 		
Mini-placeaux et placeaux OPD : R = 2 m OPM : R = 0,8 m puis R = 2 m	Inventaire tiges ligneuses <ul style="list-style-type: none"> ▪ Inventaire et identification de toutes les tiges > 10 cm de hauteur ▪ Mesure du diamètre pour les tiges > 1,30 m de hauteur ▪ Note de qualité pour les tiges avec un DBH > 5 cm ▪ Mesure de la hauteur de la tige qui a le plus gros diamètre pour chaque essence ▪ Mesure de la hauteur de la tige qui a le diamètre médian pour chaque essence 	Inventaire floristique <ul style="list-style-type: none"> ▪ Identification de toutes les espèces présentes ▪ Note d'abondance/dominance selon les strates 0-0,5 m, 0,5-2 m et > 2 m ▪ Pourcentage de recouvrement total de la végétation selon les strates 0-0,5 m, 0,5-2 m et > 2 m ▪ Pourcentage de recouvrement de l'encombrement 	
Placette OPD : R = 10 m OPM : R = 10 m	Si moins de 10 tiges avec une note de qualité sur les placeaux, complément à 10 tiges sur la placette avec les tiges de DBH > 5 cm	<i>Cf. inventaire sur mini-placeaux et placeaux</i>	
Placette de référence floristique OPD : R = 10 m OPM : R = 10 m	Description du sol <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sondage avec la tarière et description des horizons ▪ Prélèvement de sol sur 0-5 cm de profondeur 	Inventaire floristique <i>Cf. inventaire sur mini-placeaux et placeaux</i>	Peuplement Tour relascopique par essence pour caractériser la surface terrière

2.1.6. Choix des unités expérimentales en fonction des chapitres

En fonction des chapitres et des gradients environnementaux étudiés, nous n'avons pas mené les différentes études sur les mêmes unités expérimentales.

Le **chapitre 3** concernant l'évaluation de la dynamique spontanée de la régénération ligneuse post-tempête a été réalisé dans la région Grand Est, en regroupant l'OPD Alsace-Lorraine et l'OPM, pour un total de 145 unités expérimentales. Les unités expérimentales de l'OPD National se trouvent dans des conditions environnementales, et notamment climatiques, trop éloignées de

celles de la région Grand Est, ne permettant pas de mener une analyse de l'effet de la taille des trouées sans biais lié à la répartition des sites de l'OPD et de l'OPM.

Le **chapitre 4** sur la caractérisation de la régénération du chêne, du charme et du hêtre 19 ans après les tempêtes, a été mené sur l'ensemble des trois réseaux (OPD Alsace-Lorraine, OPD National et OPM) mais en excluant les unités expérimentales ayant un peuplement pré-tempête résineux autochtones ou résineux introduits. Cette sélection a permis de réaliser l'étude dans le cadre de la régénération des peuplements à composition « naturelle » dans la zone d'étude. Au total, 108 unités expérimentales ont été étudiées dans ce chapitre.

Enfin, le **chapitre 5** sur l'effet des perturbations sur la dynamique de végétation forestière en contexte de changements climatique a été mené sur l'ensemble des trois réseaux mais uniquement sur les unités expérimentales pour qui une placette de référence sous couvert forestier non impacté par la tempête a pu être installée en 2018-2019, soit un total de 152 unités expérimentales. Ce choix a été dicté du fait de l'importance de la comparaison avec la placette de référence dans les résultats.

2.1.7. Bases de données extérieures

Des bases de données extérieures ont été incluses dans l'analyse dans le cadre du **chapitre 5** pour évaluer l'évolution de la composition des communautés végétales forestières au sein des trouées et des forêts non perturbées. Ces bases, réalisées à l'échelle de la France ou de l'Europe, ont permis de calculer des indicateurs caractérisant les préférences climatiques et de disponibilité en lumière des communautés végétales forestières dans des contextes écologiques variés. La méthode de calcul a été développée dans le **chapitre 5** §5.6.1 (page 103).

2.1.7.1. EcoPlant

EcoPlant est une base de données phytoécologiques conçue par le laboratoire LERFoB en 2002 pour analyser la distribution des espèces végétales en fonction des conditions et ressources du milieu en France (Gégout et al., 2005). Elle regroupe un ensemble de données concernant (i) des inventaires floristiques, (ii) des variables écologiques mesurées (profil de sol, analyses physiques et chimiques du sol), (iii) une description de la végétation, (iv) des coordonnées géographiques et (v) des informations standardisées sur la manière dont les relevés phytoécologiques ont été réalisés. Environ 9800 relevés ont été répertoriés et proviennent de 152 études réalisées entre 1922 et 2011.

2.1.7.2. Sophy

Sophy est une base de données phytosociologiques créée en 1978 et destinée à décrire les groupes socio-écologiques chez les végétaux (Brisse et al., 1995). Elle regroupe plus de 32000 placettes installées en forêts et inventoriées entre 1914 et 2000. Les données relevées concernent (i) des inventaires floristiques exhaustifs, (ii) des coordonnées géographiques et (iii) des informations standardisées sur le protocole utilisé lors des relevés.

2.1.7.3. Indices d'Ellenberg

Des indices floristiques permettant d'estimer les facteurs environnementaux ont été définis par Ellenberg (Ellenberg et al., 1992) sur la flore présente en Europe centrale et de l'est. À chaque espèce, une note entre 1 et 9 (à 12 pour l'humidité du sol), reflétant la tolérance de l'espèce pour la variable considérée, a été attribuée pour : la lumière (L), la température (T), la continentalité (K), l'humidité édaphiques (F), le pH (R), les nutriments azotés (N) et la salinité (S). Dans notre étude, nous nous sommes servis principalement de l'indice de lumière, 1 représentant les espèces sciaphiles et 9 les espèces héliophiles.

2.2. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES

2.2.1. Vérification et correction des bases

La première étape du traitement des données a été la vérification et la correction des données prises. Toutes les données aberrantes, en termes de hauteur ou diamètre, ont été systématiquement retirées de l'analyse.

Une attention particulière a été donnée à l'identification des espèces ligneuses de la liste **Annexe 3**. La correction de l'espèce a été réalisée en deux étapes. La première consiste à vérifier la cohérence entre les espèces des relevés floristiques et celles des relevés dendrométriques, les deux relevés étant réalisés par des groupes différents. Ensuite, la cohérence entre campagne de mesures a été vérifiée. Les étapes de corrections pour chaque espèce sont détaillées en **Annexe 5**.

Pour un certain nombre d'espèces ligneuses, nous avons fait le choix de les regrouper sous « *sp.* » car l'identification sur le terrain était difficile et ne nous semblait pas fiable. Ainsi, les bouleaux (*Betula pendula* & *Betula pubescens*) ont été regroupés dans « *Betula sp.* », les chênes (*Quercus petraea* & *Quercus robur*) ont été regroupés dans « *Quercus sp.* », les saules (*Salix alba*, *Salix atrocinerea*, *Salix aurita*, *Salix caprea*, *Salix cinerea*, *Salix fragilis*, *Salix trianda* & *Salix viminalis*) ont été regroupés dans « *Salix sp.* » et les tilleuls (*Tilia cordata* & *Tilia platyphyllos*) ont été regroupés dans « *Tilia sp.* » pour toutes les analyses exceptées les calculs de richesse spécifique.

L'objectif de l'étude étant d'évaluer la régénération naturelle après tempête, les tiges avec un DBH supérieur à 20 cm de diamètre, 218 tiges soit 1,6 % des tiges mesurées, ont été retirées de l'analyse car nous les avons considérées comme étant des individus appartenant aux peuplements présents avant les tempêtes de 1999. De la même manière, dans le cas de l'étude des hauteurs des tiges, un seuil à 13 m de hauteur a été appliqué. Ainsi, 447 tiges ont été supprimées de l'analyse des hauteurs, soit 10 % des tiges mesurées avec une hauteur en 2018-2019. Ce seuil reflète une limite au niveau du matériel de mesures, nous avons à notre disposition des perches de mesures de 13 m. Ainsi, pour les tiges supérieures à 13 m, la différence entre la hauteur de la perche et le haut de l'arbre a été estimée à l'œil nu, ce qui représente une imprécision de mesures trop élevée pour inclure ces tiges dans l'analyse.

Enfin, seules les plantes vasculaires ont été considérées dans cette étude. Ainsi toutes les bryophytes relevées ont été retirées de l'analyse.

2.2.2. Présentation synthétique des analyses réalisées

Chaque chapitre a une section matériels et méthodes plus développée. Ci-dessous, une présentation succincte des analyses réalisées au sein de chaque chapitre.

Le **chapitre 3** a pour objectif de réaliser une description globale de la dynamique spontanée de la régénération post-tempête obtenue au sein des trouées. Ainsi, la diversité en essences, la composition, la densité et le diamètre moyen ont été calculés pour permettre une vue d'ensemble de la régénération obtenue en fonction de variables stationnelles (acidité du sol), de la taille de la trouée et du peuplement pré-tempête. Pour limiter le gradient climatique, seuls les sites présents dans la région Grand Est ont été sélectionnés dans cette étude.

La comparaison de la régénération obtenue du chêne, du hêtre et du charme 19 ans après ouverture de la canopée a été réalisée sur l'ensemble des unités expérimentales qui avaient un peuplement pré-tempête composé de feuillus (**chapitre 4**). La présence, la densité, la hauteur et le diamètre des trois essences ont été évalués par une approche par modélisation. Plusieurs facteurs environnementaux (acidité du sol, disponibilité en azote, taille de la trouée, distance à la lisière, composition du peuplement pré-tempête, indice de compétition) ont été testés pour identifier les variables du milieu qui ont le plus d'influence sur la régénération de chacune des trois essences.

Enfin, au sein du **chapitre 5**, la composition des relevés floristiques au sein des trouées de la première et de la troisième campagne a été comparée. Cette comparaison a également concerné les placettes présentes en trouées et sous forêts non perturbées pour la troisième campagne. Cette comparaison a été réalisée par le biais de la bioindication à l'aide des valeurs indicatrices de lumière d'Ellenberg et de la température moyenne annuelle d'EcoPlant. Une approche par modélisation a été réalisée pour tester l'effet de la taille de la trouée et de l'altitude.