



# DONNÉES MODIS ET LANDSAT 5 : APPLICATION SUR L'ÉVALUATION MORPHOLOGIQUE ET PHÉNOLOGIQUE DES IMPACTS DE LA TEMPÊTE KLAUS SUR LA FORêt DES LANDES

Clément Heintz, Maxime Rinaldo Adande, Gauthier Grimmer

## INTRODUCTION

L'un des principaux risques naturels dans les régions extratropicales sont les tempêtes hivernales intenses, qui représentent l'une des catastrophes naturelles les plus coûteuses en Europe. Elles sont responsables de dommages socio-économiques, tant sur les structures construites par l'Homme que sur les zones forestières. Des exemples récents d'épisodes de violentes tempêtes de vent qui ont causé des dommages importants et des pertes économiques substantielles dans le sud-ouest de l'Europe sont les tempêtes Klaus (janvier 2009 ; Liberato et al., 2011), Xynthia (février 2010 ; Liberato et al., 2013), Gong (janvier 2013 ; Liberato, 2014) et Stéphanie (février 2014 ; Ferreira et al., 2014).

Ces événements météorologiques sont issus de l'évolution d'une perturbation atmosphérique, ou dépression, le long de laquelle s'affrontent deux masses d'air aux caractéristiques distinctes (température, teneur en eau). De cette confrontation naissent notamment des vents pouvant être très violents. On parle de tempête lorsque les vents dépassent 89 km/h (soit 48 nœuds, degré 10 de l'échelle de Beaufort) (Dossier Départemental des Risques Majeurs en Haute-Vienne, 2010).

Les 23 et 24 janvier 2009, la tempête Klaus a frappé le Sud-Ouest de la France et le Nord-Ouest de la péninsule ibérique. La tempête Klaus représente l'événement météorologique extrême mondial le plus couteux de l'année 2009 (Liberato et al. 2011). Elle a pour origine un cyclone subtropical. Ces phénomènes se renforcent en remontant vers l'Europe, provoquent des vents violents et des précipitations importantes sur la partie occidentale du continent européen. En janvier 2009, le phénomène dépressionnaire s'est installé dans le golfe de Gascogne et a provoqué des vents extrêmement violents sur les côtes du

Sud-Ouest de la France. Ces vents ont provoqué d'importants dégâts dans le massif forestier landais. En effet, 43 % de la surface forestière productive de la forêt des Landes, qui produit du bois, a été affectée par la tempête (IGN, 2010). Soit sur les 1,3 million d'hectares de forêt productive, 595 000 hectares ont été endommagée.

Le massif forestier landais (figure 1) est grandement dominé par des peuplements de pin maritime (Pottier, 2014). Entre 2007 et 2011, ils représentaient plus de 78 % des peuplements des Landes (Observatoire des forêts de France : IGN, 2023). Après la tempête Klaus, le pin maritime représentait 92 % du volume de dégâts observé, soit 37,6 millions de mètres cubes sur 40,9 (IGN, 2010). La nuit du 24 janvier 2009, la tempête Klaus renverse 223 000 hectares de pin maritime, soit 20% du massif forestier Landais (Banos et Deuffic, 2021).

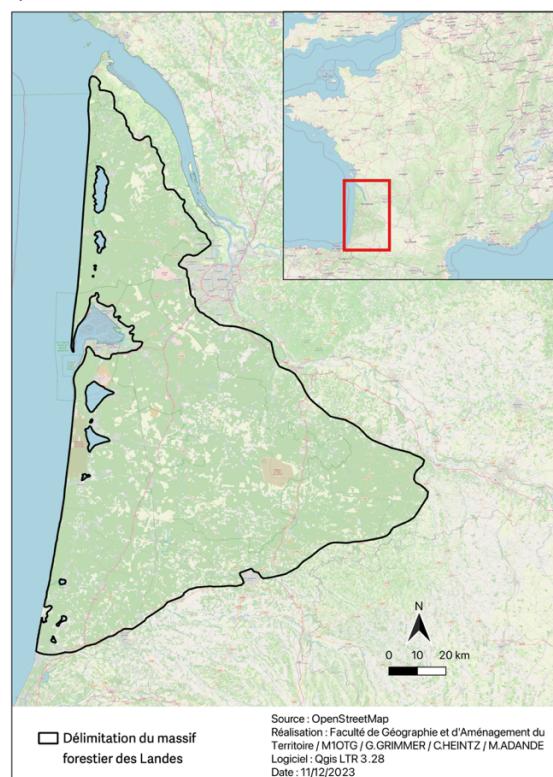


Figure 1 : Carte de contexte de la zone d'étude, Landes (40)

Un système forestier se décrit par différents points de vue. L'aspect morphologique étudie la forêt du point de vue de sa forme : sa superficie, sa canopée, ses strates... L'aspect phénologique s'intéresse aux fonctionnements du vivant à travers des variations de phénomènes périodiques : l'évolution de sa productivité en fonction des saisons, du cycle de vie des parcelles...

Pour observer ces différents aspects, des variables biophysiques sont exploitables à partir d'images satellites. Le programme MODIS permet d'utiliser entre autres le Leaf Area Index (LAI) et le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Le satellite Landsat 5 permet d'extraire des images du sol en couleurs réelles.

Ainsi la ligne conductrice de cette étude sera de savoir **comment la télédétection peut aider à évaluer les impacts de la tempête Klaus, tant du point de vue morphologique que phénologique, sur la forêt des Landes à court et moyen terme ?** Pour se faire une partie de ce travail sera dédiée à savoir si (1) **la morphologie de la forêt des Landes a été impactée par la tempête Klaus et cela se retrançrit à travers le LAI.** La seconde partie aura pour objectif de savoir si (2) **le fonctionnement phénologique de la forêt landaise est impacté par la tempête Klaus et cela proportionnellement aux dégâts morphologiques.**

## 1. JEU DE DONNÉES

### 1.1 : Acquisition de la donnée forestière

Les images satellitaires utilisées dans l'acquisition de la donnée forestière sont issues des données Landsat 5 TM. Au total, quatre images ont été utilisées afin d'encadrer l'événement de la tempête Klaus ayant eu lieu le 24 janvier 2009. Du fait de la situation géographique, la zone d'étude présente une couverture nuageuse importante. Pour pallier ce problème, une sélection manuelle de deux images par an a été effectuée dans l'objectif d'acquérir une donnée plus complète sur les dates voulues.

Le jeu d'images, projeté sur le système coordonnées WGS 84 / UTM Zone 30N, présente une résolution spatiale de 30 m, quant à l'emprise, elle est de 5 096 454, 39 ha. Avant la mise en place de la classification d'occupation du sol, un masque de nuage (à partir de la bande QA\_Cloud) a été appliqué sur l'ensemble des images (annexe 2).

### 1.2. Acquisition du LAI à partir de MODIS

Le Leaf Area Index (LAI) traduit « le ratio de la surface totale supérieure des feuilles à la surface du sol sur laquelle la végétation se développe ». Cet indice permet de renseigner sur la quantité de biomasse, la densité de peuplement ou alors la santé de végétation (Herrault, 2023).

Les valeurs de LAI ont été extraites par l'intermédiaire du catalogue MODIS. Les valeurs utilisées correspondent aux valeurs maximales de février 2009. La résolution de la donnée est de 500 mètres et s'applique sur une emprise de 2,5 km x 2,5 km.

### 1.3. Acquisition du NDVI à partir de MODIS

Le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) permet de décrire la composition chlorophyllienne des végétaux en lien avec la « vigueur des écosystèmes, leur biomasse [et] leur fonctionnement » (Herrault, 2023).

Les valeurs de NDVI sont aussi extraites du catalogue MODIS. Les valeurs utilisées sont les valeurs maximales annuelles entre 2008 et 2023. La résolution est de 250 mètres et son emprise est de 2,5 km x 2,5 km.

## 2. MÉTHODE

### 2.1. Zone étudiée

La zone étudiée (figure 1) se situe au sud-ouest de la France dans le département des Landes (région de Nouvelle-Aquitaine). Elle s'étend de 46°N à 43,5°N et de 1,5°O à 0,5°E et sa surface est de 1 182 863, 574 ha. Les températures moyennes oscillent entre 6°C en janvier et 21°C en été soit une amplitude thermique moyenne de 15°C. Quant aux précipitations, la moyenne est estimée à 943 mm à l'est dans les terres et à 1 237 mm le long de la côte (Météo France, 2015).

La situation géographique des Landes est un facteur d'influence sur le climat présent. Dans un premier temps, la forêt occupe une situation sur le littoral atlantique qui détermine une bande littorale sous l'influence d'un « climat océanique franc » (Joly et al., 2010) avec des précipitations plus marquées et également soumis aux vents. Dans un second temps, la position intermédiaire entre le Massif central et les Pyrénées jouent un rôle déterminant sur les vents. L'effet Venturi (effet

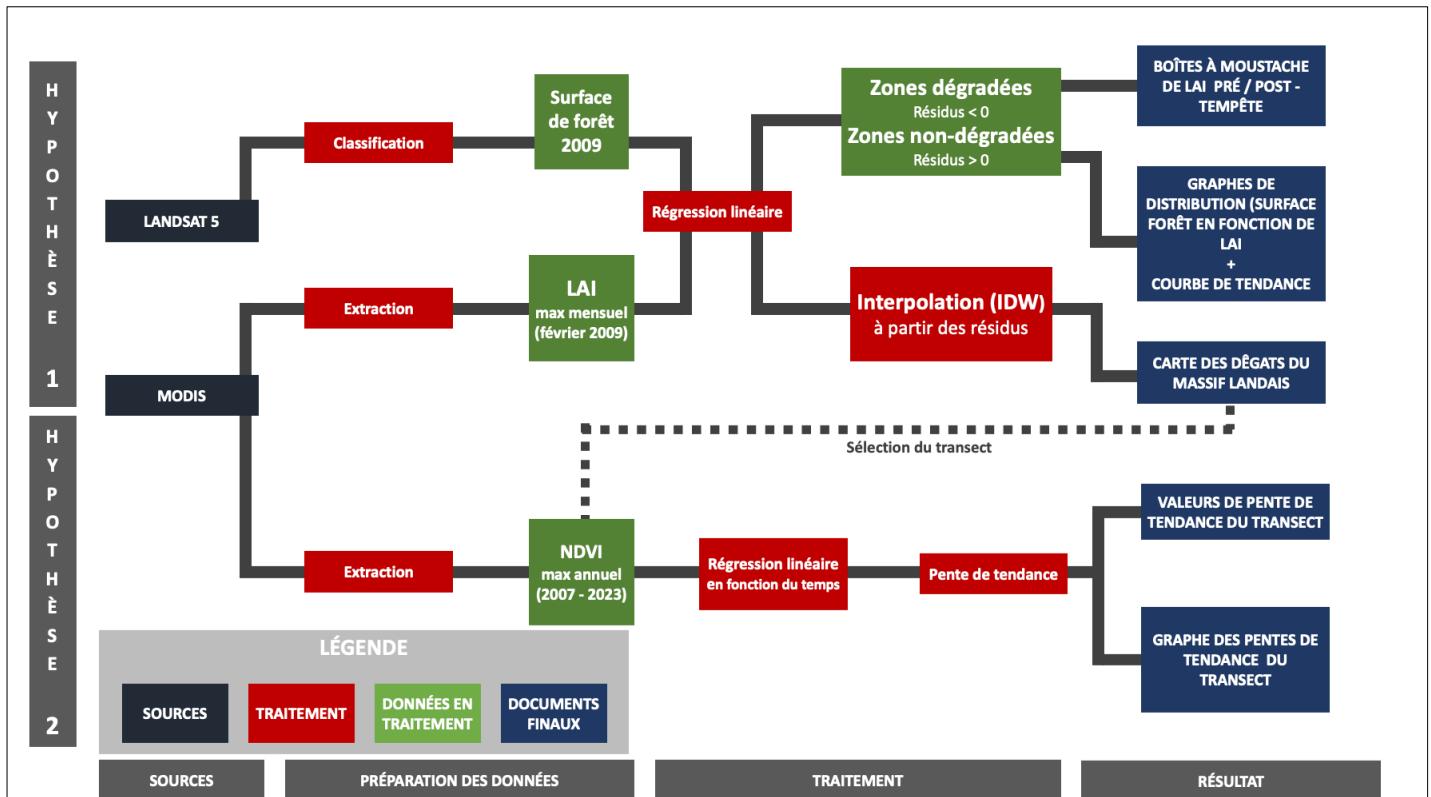


Figure 2 : Organigramme de traitement

d'étranglement des vents par le relief) permet l'accélération de ces derniers et donc la mise en place de la tramontane, altérant alors le climat (Joly et al., 2010).

## 2.2. Les caractéristiques de la forêt des Landes

Avec sa forme triangulaire, la forêt landaise s'établie sur une superficie de 10 000 km<sup>2</sup>. Marquée par une « exploitation sylvicole intensive » le massif forestier se démarque par son uniformité d'essence d'arbre, majoritairement des pins maritimes (*Pinus Pinaster Aiton*) (Pottier, 2014).

Le pin forestier, faisant partie de la famille des résineux, est caractérisé par une hauteur de 20 à 30 mètres et une longévité moyenne pouvant atteindre les 500 ans. Sa morphologie se démarque par un « tronc assez droit, à ramifications latérales horizontales » et une cime claire (Rameau et al., 2008).

## 2.3. Hypothèse n°1 : détection des zones de dégâts dans la forêt landaise

### 2.3.1. Échantillonnage de la zone d'étude

Pour apprécier l'ampleur des dégâts de la tempête sur la forêt la sélection des données s'est faite sur un échantillonnage de la zone d'étude sur

un total de 38 points (annexe 1) formant un quadrillage.

2.3.2. Classification de l'occupation du produit et des erreurs de la classification du sol de l'occupation du sol du massif forestier Landais en avril 2008 (F-score : 85%, Rappel : 78%, Précision : 95%). La classification de l'occupation du sol se répartie en quatre catégories : Eau, Sols nus, Forêts, Végétation basse. Le modèle a été établie sur l'image satellite du 04/2008 (figure 3) et a été appliquée sur l'ensemble des images (annexe 2). Ce choix se justifie sur l'essence des arbres (pins maritimes) qui connaissent peu de variations morphologiques et phénologiques selon les saisons. Ainsi le modèle développe un F-score de 85%, un rappel moyen de 78% et une précision moyenne de 95%. Avec une justesse globale de 85% le modèle est relativement acceptable mais une partie est biaisée par la présence de nuages (figure 3, encadrés « A » et « C ») impactant essentiellement le rappel des sols nus (60%) et de la végétation basse (53%) montrant ainsi l'utilité de compléter l'acquisition de la données forestières avec d'autres images satellite.

Afin de récolter la donnée forestière, chaque point correspond à une emprise de 6,25 km<sup>2</sup> (2,5 km \* 2,5 km) par laquelle ont été découpées les classifications pour échantillonner

les surfaces de forêts (en hectare) pour chaque point.

### 2.3.3. Analyses statistiques entre les surfaces forestières et le LAI

**2.3.3.1. Régression linéaire.** Dans le but d'évaluer les zones ayant subies des dégâts à la suite du passage de la tempête, une régression linéaire a été utilisée pour établir une tendance générale entre les surfaces forestières et le LAI en prenant en compte tous les points. Équation de la droite de régression :

$$y = 111,87x + 58,196$$

À partir de l'équation, les nouvelles surfaces forestières ont été calculées pour en déterminer les résidus :

$$\text{résidus} = \text{area}_{\text{observée}} - \text{area}_{\text{prédite}}$$

### 2.3.3.2. Boîte à moustache.

En plus de la régression linéaire, des boîtes à moustache du LAI avant et

après tempête ont été réalisées afin d'observer si une différence peut être remarquée.

**2.3.3.3. Test de Shapiro-Wilk et test de Wilcoxon.** À partir de la distribution des valeurs du LAI avant et après la tempête, le test de Shapiro-Wilk permet de vérifier la normalité des distributions. Aussi, si la distribution des LAI ne suit pas la loi normale, un test de Wilcoxon sera effectué entre la distribution avant et après la tempête dans le but de vérifier si une différence significative s'établie entre elles.

### 2.3.4. Carte d'interpolation par l'inverse de la distance (IDW) des résidus

Dans l'objectif de repérer les zones du massif forestier touchées par la tempête Klaus, une interpolation IDW a été effectuée sur les résidus de la régression linéaire entre les surfaces forestières et le LAI. La formule de l'IDW se présente ainsi :

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^p} \right)}$$



Figure 3 : Produit et erreurs de la classification du sol de l'occupation du sol du massif forestier Landais le 04/2008 (F-score : 85%, Rappel : 78%, Précision : 95%)

L'utilisation de cette méthode d'interpolation se justifie notamment par son utilité lorsque les données utilisées sont espacées et homogènes.

## 2.4. Hypothèse n°2 : étude du NDVI sur le long terme (2007 – 2023)

### 2.4.1. Sélection des points de mesure du NDVI par un transect

La sélection des points de mesure du NDVI s'effectue sur un transect (annexe 1). Au total, 21 points ont été sélectionnés. Le transect a été établi dans le but d'échantillonner le NDVI de manière homogène dans les zones touchées par la tempête (figure interpolation), les zones dites « épargnées » et les zones intermédiaires.

Pour chaque point, le NDVI maximum annuel a été relevé de 2007 à 2023 dans le but d'observer les tendances qui peuvent s'établir avant et après la tempête.

### 2.4.2. Analyses statistiques du NDVI par transect

**2.4.2.1. Test de Mann Kendall.** Le test de Mann Kendall à 95 % de confiance a été utilisé afin d'établir la validité de la tendance entre les valeurs de NDVI et le temps pour chaque point d'observation du transect.

**2.4.2.2. Coefficient de pente.** Si une tendance est confirmée par le test de Mann Kendall, la pente de la tendance (slope ou coefficient de pente) est calculée pour caractériser l'évolution temporelle du NDVI.

## 3. RÉSULTATS

### 3.1. Hypothèse n°1

#### 3.1.1. Baisse du LAI après la tempête

**3.1.1.1. Observation des distributions.** D'emblée, l'étude des boîtes à moustache de la distribution du LAI (figure 4) indique une tendance à la baisse après la tempête. La médiane des valeurs du LAI avant la tempête se situe environ à 1,40 tandis que celle après la tempête se trouve à 1,15.

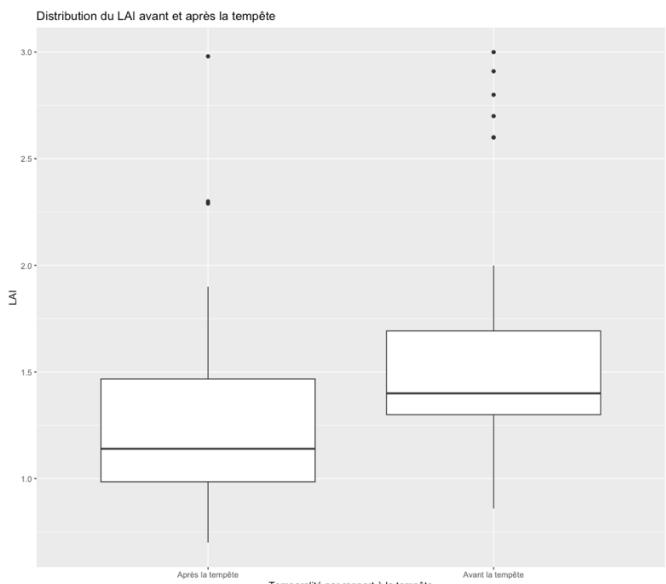


Figure 4 : Boîtes à moustache de la distribution du LAI avant et après la tempête (indice de Wilcoxon  $V = 668,5$ ,  $p$ -value =  $1,599e-05$ )

**3.1.1.2. Différence significative entre la distribution du LAI avant et après tempête.** Le modèle de régression entre le LAI et les surfaces forestières (en ha) a été appliqué sur les échantillons avant et après (figure 4) la tempête pour déterminer s'il y a une différence significative entre les deux droites de régression.

Le test de Shapiro a révélé que la distribution des valeurs de LAI est non-normale (figure 5). Le test de Shapiro-Wilk effectué sur la distribution du LAI avant tempête présente un  $p$ -value de  $1,479e^{-05}$ , alors inférieur à 0,05, l'hypothèse de normalité est donc rejetée. Concernant le LAI après tempête, le  $p$ -value étant de  $4,042e^{-05}$  il est possible de faire la même interprétation que le précédent résultat.

La non-normalité des valeurs permet alors de réaliser un test de Wilcoxon pour vérifier la significativité de la différence entre les valeurs de LAI pré-tempête et post-tempête. Avec un  $p$ -value sortant de  $1,599e^{-05}$  l'hypothèse nulle peut être alors rejetée. Autrement dit, la distribution des valeurs de LAI pré et post-tempêtes sont significativement différentes.

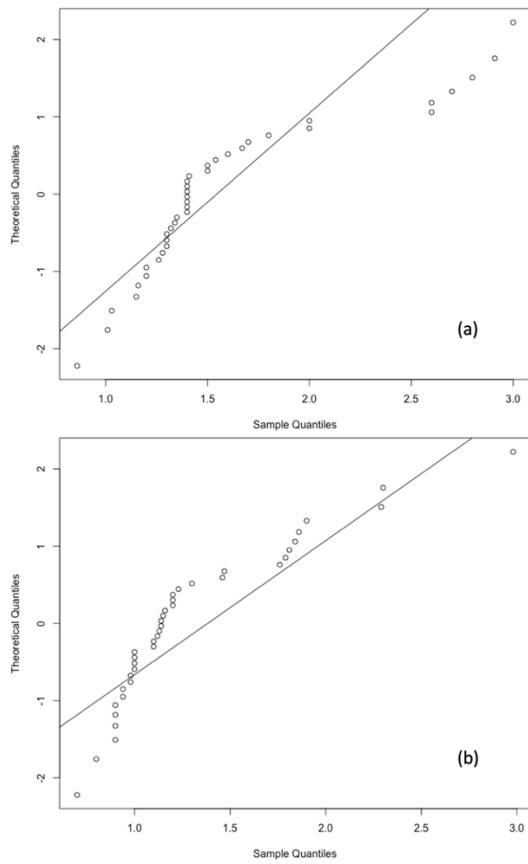


Figure 5 : distribution des valeurs de LAI avant la tempête (a) et après (b) en fonction d'une distribution théorique normale ( $p\text{-value} = 1,479\text{e-}05$  et  $4,042\text{e-}05$ )

### 3.1.2. Détection des zones de dégât

3.1.2.1. Modèle de régression global entre les surfaces forestières et le LAI. Le modèle de régression (figure 6) établi une tendance générale

des surfaces forestières théoriques selon un LAI donné. Le coefficient de corrélation global  $R^2$  est de 0,2355 laissant alors apparaître une certaine corrélation entre les deux variables. À partir la droite de régression calculée, les résidus du modèle pour les points après tempête sont calculés pour estimer les tendances d'occupation du sol par la forêt à la suite de l'événement météorologique.

Ainsi, les points comportant des résidus négatifs ont leurs surfaces forestières qui ont été surestimées par le modèle indiquant qu'en réalité il y a moins de forêt que prévu. Dans le cas inverse, si les résidus sont positifs, le modèle a sous-estimé la réalité, signalant une surface forestière plus importante que prévu.

3.1.2.2. Spatialisation des résidus pour repérer les zones de dégât. L'interpolation des résidus permet ainsi la spatialisation les zones de dégâts sur la forêt des Landes par suite du passage de la tempête Klaus.

Aussi, plusieurs zones se dégagent de la carte d'interpolation (figure 7). Les zones de dégâts occupent le sud et l'est du massif forestier avec une orientation sud-ouest, nord-est. Une autre zone de dégât est également identifiée au nord de la zone d'étude. Concernant les zones peu ou pas touchées par la tempête, elles se localisent sur les extrémités de la zone étudié. Elles sont majoritaires à l'ouest et quelques zones sont également remarquable au sud-ouest du massif forestier.

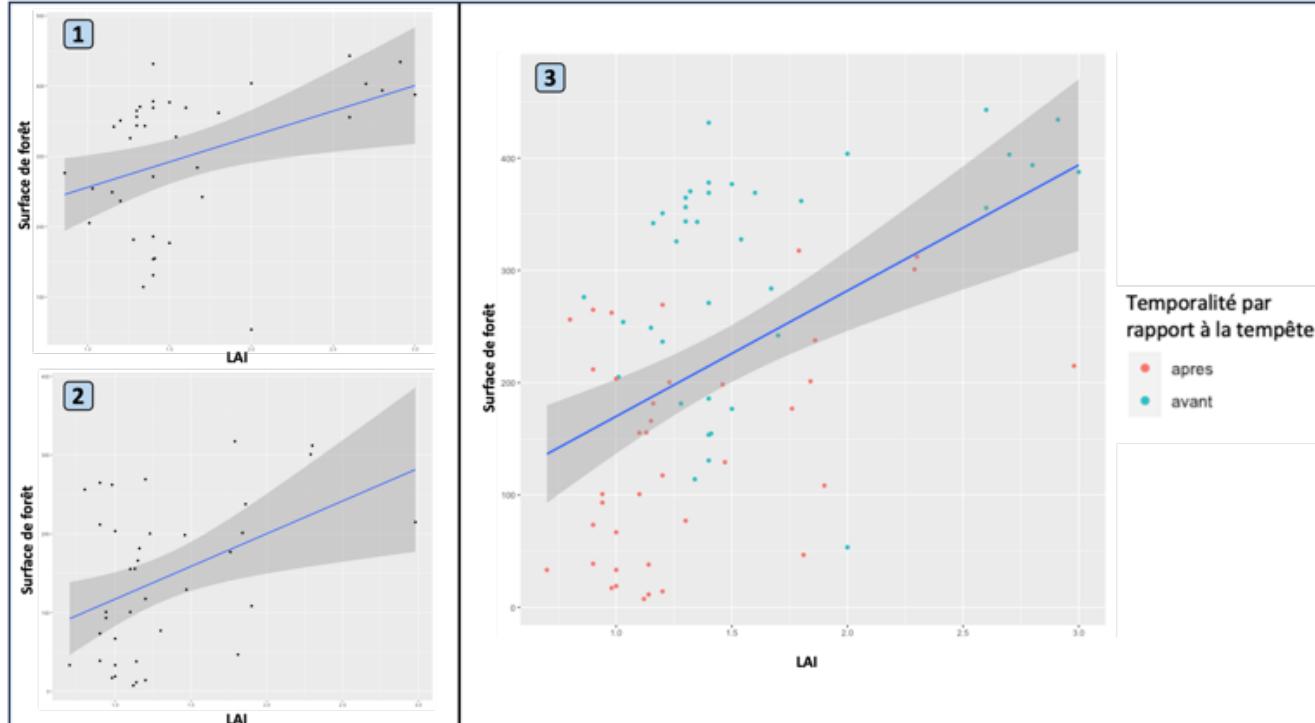


Figure 6 : Distribution de la surface forestière en fonction du LAI pré-tempête (1), post-tempête (2) et tout confondu (3). (En bleu : régression linéaire.  $R^2$  pré-tempête : 0,1629,  $R^2$  post-tempête : 0,1804,  $R^2$  global : 0,2355)

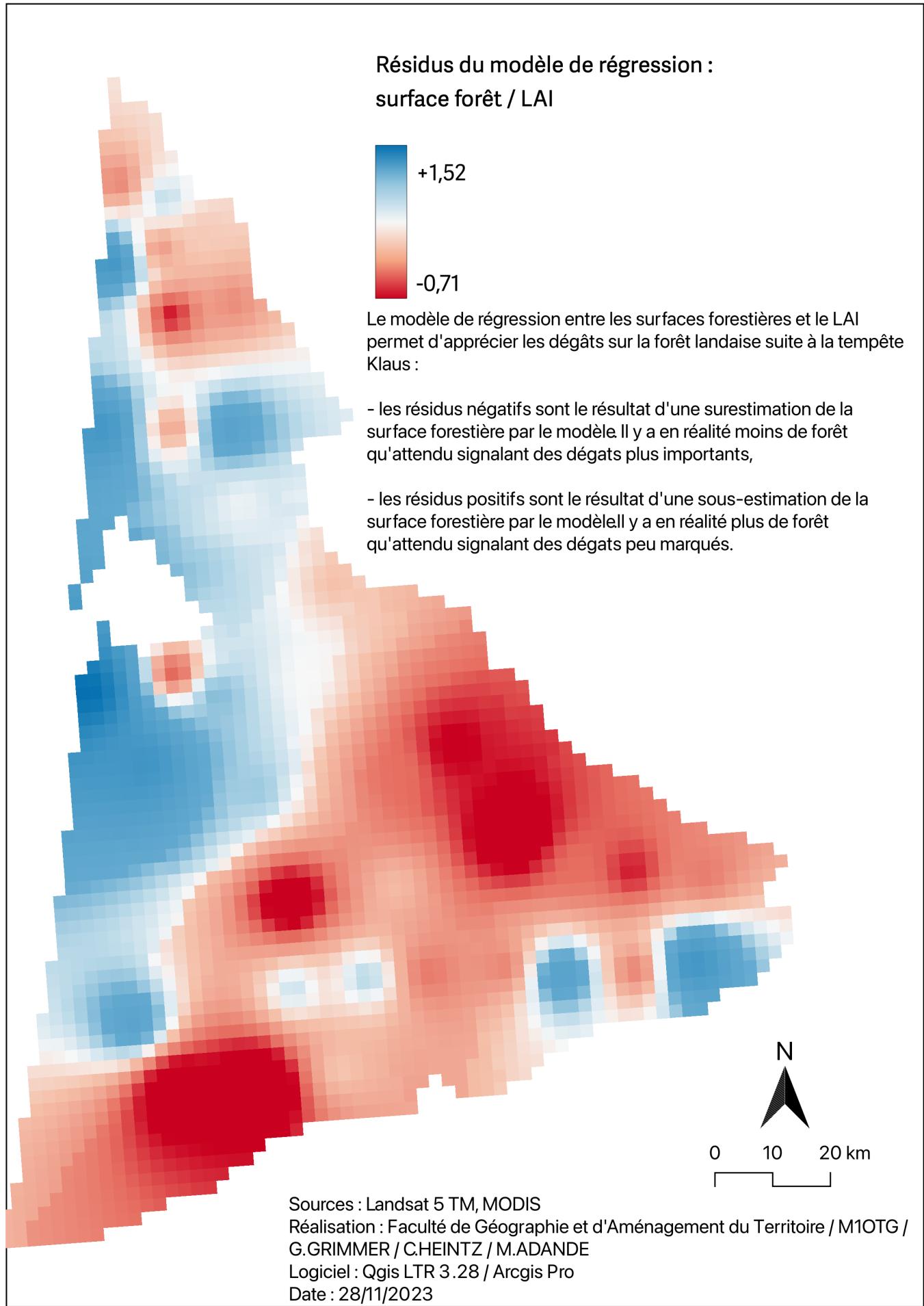


Figure 7 : Carte des dégâts de la tempête Klaus sur la forêt des Landes par interpolation des résidus du modèle de régression linéaire entre les surfaces forestières et le LAI

Transect	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9
Mann-Kendall	non	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui
Pente de tendance	/	/	/	/	/	0.0033	0.004	0.0075	0.006

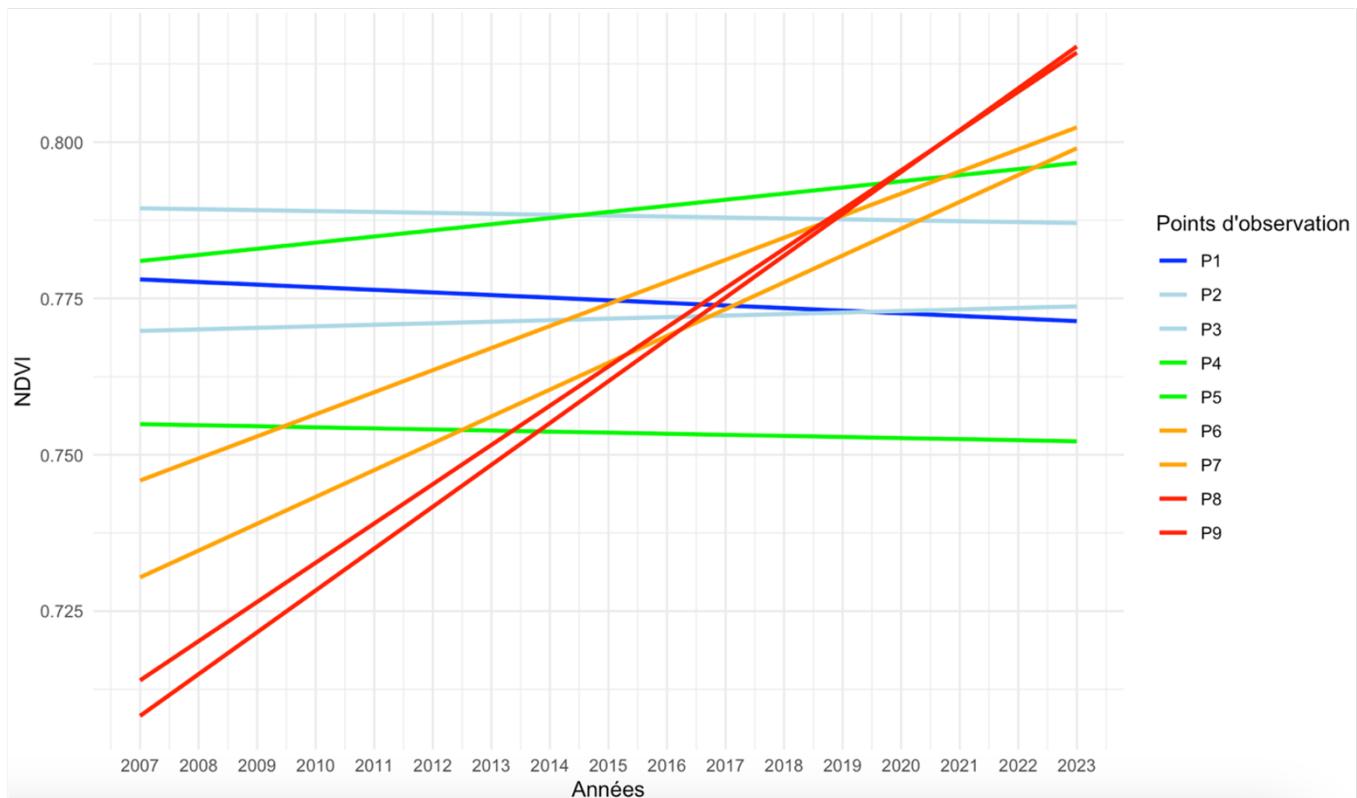


Figure 8 : Résultats du test de Mann-Kendall, du coefficient de la pente de tendance et de l'évolution du NDVI sur le long terme

### 3.2. Hypothèse n°2

#### 3.2.1. Différentes dynamiques de NDVI à travers le transect

Le transect représente un gradient de dégât qui traverse d'Ouest en Est la forêt landaise en son cœur (annexe 1 ; figure 7)). Le point n°1 représente une zone pas touchée par la tempête, les points n°2 et n°3 représentent des zones peu touchées, les points n°4 et n°5 représentent des zones moyennement touchées, les points n°6 et n°7 représentent des zones fortement touchées et les points n°8 et n°9 représentent des zones très fortement touchées.

Pour les points les plus endommagés, soit les points 6, 7, 8 et 9, l'évolution du NDVI observée a tendance à augmenter entre 2007 et 2023 (figure 8). Entre les points très fortement touchés, en rouge, et les points fortement touchés, en orange, la croissance est plus marquée selon les dégâts.

Les points 1, 2, 3, 4 et 5 ont des valeurs de NDVI qui ont tendance à stagner entre 2007 et

2023. La stagnation se traduit visuellement par des tendances croissantes très faibles, voire des tendances décroissantes.

3.2.2. NDVI : Tendance croissante pour les zones endommagées et tendance à la stagnation pour les zones peu endommagées

Les valeurs de NDVI des points du transect considérés comme avec un NDVI stagnant n'expriment aucunes tendances statistiques (test de Mann-Kendall) (figure 8). Sur le transect, seuls les points fortement et très fortement endommagés dégagent des tendances de NDVI significatives en fonction du temps.

Les valeurs de pente de tendance des points fortement endommagés (point 6 et 7) sont respectivement de 0.0033 et 0.004. Pour les points très fortement endommagés (point 8 et 9), les valeurs sont considérablement supérieures dans notre contexte. En effet, les valeurs montent à 0.0075 et 0.006.

L'absence de tendance pour les points le moins touchés par la tempête confirme les

tendances de stagnation observées visuellement. Les valeurs positives de pente de tendance confirment les tendances croissantes des points plus fortement touchés. De plus, elles informent de la faiblesse des croissances dans le temps et différencient les points les plus durement touchés avec des valeurs de pente plus importantes.

## 4. DISCUSSION

4.1. Hypothèse 1 : La morphologie de la forêt des Landes a été impactée par la tempête Klaus et cela se retrançrit à travers le LAI

4.1.1 Une classification de l'occupation du sol forestier

Dans l'optique de mesurer la surface forestière en 2009, une classification a été produite. Cette méthode est parfaitement adaptée dans le cadre de l'étude des impacts d'une tempête (McKenzie et al. 2023). La situation des peuplements de pin maritime a pu être étudiée et a permis une analyse croisée avec le LAI.

4.1.2. Une baisse du Leaf Area Index (LAI) à la suite du passage de la tempête Klaus

À la suite du passage de la tempête Klaus le 23 et le 24 janvier, une différence significative du LAI se fait observer sur les zones étudiées avant et après la tempête.

L'utilisation du LAI est adéquate dans l'optique d'étudier l'évolution morphologique d'une forêt majoritairement composée de conifères et les résultats obtenus sont satisfaisants (Law et al. 2001).

L'étude des boîtes à moustache (figure 4) met en évidence une baisse du LAI à la suite du passage de la tempête qui se retrançrit sur la distribution des valeurs. Avant l'événement météorologique, la médiane du LAI est de 1,40 alors que celle après est de 1,15. Cette tendance s'observe également sur les maxima et les minima. Avant la tempête les valeurs de LAI observée sont établies entre 2 et 0,75 alors qu'après elles sont comprises entre 1,75 et 0,45.

Dans l'idée d'appuyer ces observations, un test de Wilcoxon a permis de valider la différence significative entre les deux distributions (avant et après tempête) de valeurs du LAI. Un test de Shapiro permet de démontrer si les valeurs suivent

une loi normale ou non. Dans le cas présent, les LAI avant et après la tempête n'adoptent pas la gaussienne attendue, autrement dit, elles n'ont pas de distribution normale (p-value avant tempête : 1,48e-5 / p-value après tempête : 4,04e-5). Ainsi le test de Wilcoxon (p-value : 1,6e-5) démontre qu'une différence significative entre les deux jeux de LAI est présente et démontre une baisse des valeurs mesurées après la tempête.

Cette première approche de l'impact de la tempête Klaus sur la forêt landaise met en avant le fait que le LAI connaît un déclin marqué à court terme. Or, le LAI a subi des perturbations également sur le long terme signalant une dégradation forestière prolongée de 2009 à la mi-2012 (D. C. Shamambo et al. 2019).

4.1.3. Une répartition hétérogène des dégâts sur la forêt

Bien qu'ait été établie l'impact de la tempête sur le LAI, les dégâts estimés ne se répartissent pas de manière homogène sur le massif forestier.

Afin d'estimer les dégâts de la tempête, un modèle de régression linéaire a été calculé entre le LAI observé et les surfaces forestières ( $R^2$  : 0,23). Les résidus du modèle de régression constituent ainsi les dégâts potentiels de la tempête. Les résidus négatifs (figure 4, encadré « 3 ») représentent alors les points ayant subi le plus de dégâts alors que les résidus positifs sont les points qui ont subi le moins de dégâts.

L'interpolation (IDW) des résidus met en évidence une hétérogénéité de la répartition spatiale de ces-derniers et donc des dégâts (figure carte interpolation). Aussi, se démarquent deux zones du massif majoritairement touchées par la tempête. La principale zone occupe la place centrale de la forêt avec une tendance spatiale qui s'illustre du sud-ouest au nord-est. La deuxième partie de la forêt touchée par la tempête se situe au nord (à proximité de Bordeaux) mais occupe une superficie mineure comparée à la première. À l'inverse, des zones « épargnées » sont également remarquables, la plus importante étant à l'est du massif, à proximité du littoral. Bien que les LAI observés soient bien supérieurs par rapport à ceux des zones de dégâts, l'interpolation a pu être sous l'influence de la présence des lacs (figure 3) qui ont perturbé la prise d'échantillon sur ces zones.

Ces différentes zones sont également mises en perspective à la carte de dégâts de l'IGN (annexe 3) où sont établis plusieurs indices de dégâts (annexe : carte IGN) qui confirment les résultats de l'interpolation IDW des résidus du modèle de régression linéaire. Certaines différences peuvent apparaître entre les deux analyses notamment à l'est du massif forestier mais la tendance centrale des dégâts se retrouve et les dégâts restreints sur les extrémités de la forêt sont également présents. Les différences s'expliquent notamment par la méthode d'acquisition de la donnée forestière qui a pu être perturbée par la présence conséquente de nuage (figure 2 : classification) mais également par la méthode d'interpolation employée. Bien que l'IDW présente un avantage dans la méthode exploratoire utilisée dans cette étude, une régression géostatistique (par régression linéaire) aurait pu être plus efficace en prenant en compte un nombre plus important de variable comme la longitude.

4.2 Hypothèse n°2 : : le fonctionnement phénologique de la forêt landaise est impacté par la tempête Klaus et cela proportionnellement aux dégâts morphologiques

#### 4.2.1. Un suivi sur le temps long de la forêt des Landes du NDVI après la tempête

L'utilisation du LAI permet avant tout d'estimer les impacts morphologiques subis par les pins lors de la tempête. Le NDVI, justifie son utilisation car il représente un marqueur de santé de la végétation (Meneses-Tovar, 2011). En effet, le NDVI apporte un point de vue sur le fonctionnement phénologique des arbres et ainsi estime si leur santé a été impactée ou non par la tempête. Cet indice correspond à la part d'énergie émise par rapport à la part d'énergie reçue ainsi une « baisse dans le vert reflète une baisse du NDVI » (Meneses-Tovar, 2011). Ce paramètre biophysique décrit la composition chlorophyllienne des végétaux. Il donne un indice sur la vigueur des écosystèmes étudiés, leur biomasse et leur fonctionnement.

De plus, le rendement du NDVI dans la mesure des tendances phénologiques est meilleur dans le contexte des forêts de pin denses que dans n'importe quel autre environnement forestier (Clerici, Weisseiner, et Gerard 2012). De ce fait, le

contexte landais est parfaitement adapté à l'utilisation du NDVI.

Entre 2007 et 2023, un suivi de tendances phénologiques a été effectué avec le NDVI. Sur une échelle de temps décennale, le NDVI est ainsi utile pour identifier des tendances phénologiques (Lopatin, Kolström, et Specker, 2006).

#### 4.2.2. Une croissance du NDVI pour les zones les plus dégradées

À partir du NDVI annuel maximum, des tendances phénologiques ont pu être identifiées entre 2007 et 2023. Sur la période post-tempête (2009-2023), la productivité de la végétation augmente proportionnellement à la dégradation observée. Les parties les plus dégradées du transect ont les tendances de NDVI qui augmentent le plus (valeurs de pente 0.006 et 0.0075). Les parties légèrement moins dégradées ont des tendances de NDVI qui augmentent moins (0.0033 et 0.004). Les parties du transect moyennement touchées ou légèrement touchées ne dégagent aucune tendance, ce qui est interprété comme une stagnation du NDVI.

L'impact de la tempête sur le fonctionnement phénologique de la forêt est observé. Une chute du NDVI, et donc de la productivité après la tempête est attendue (Fagherazzi et al. 2019). Les parcelles les plus dégradées adoptent des tendances de régénération de la végétation (Fagherazzi et al. 2019).

La production chlorophyllienne des parcelles occupées par des peuplements jeunes est croissante. En réponse, le NDVI mesuré suit une tendance croissante. Au niveau des parcelles occupées par des peuplements matures, la production chlorophyllienne a tendance à baisser. Le NDVI mesuré a donc tendance à baisser. Dans le contexte post-tempête, les parcelles jeunes correspondent aux zones fortement dégradées et les parcelles matures correspondent aux zones peu dégradées (Herrault, 2023).

Cette régénération de la végétation s'inscrit sur le temps long et s'observe encore actuellement en 2023. Théoriquement, la hausse de la productivité après un événement météorologique extrême comme la tempête Klaus entraîne des périodes régénératrices sur plusieurs décennies (Steenrod et Battaglia 2023).

#### 4.2.3. Quels effets sur la gestion forestière ?

La forêt des Landes est fortement anthropisée et presque exclusivement réservée à la sylviculture. L'exploitation du pin maritime étant la pratique majoritaire.

Après la tempête Klaus de 2009, les processus de gestion de la forêt des Landes ont été impactés. En effet, à la place d'une révolution du modèle sylvicole en place, a été observée une intensification de ses pratiques (Banos et Deuffic 2020). Les autorités en place ont, par les processus de sorties de crise, encouragé l'intensification de l'exploitation sylvicole en monoculture, caractéristique de la forêt des Landes.

## 5. CONCLUSION

Le massif landais, quasiment exclusivement composé de peuplements de pin maritime a été touché, la nuit du 24 janvier 2009, par une sévère tempête hivernale, la tempête Klaus. Des vents extrêmement violents et des précipitations très importantes ont fortement endommagé la forêt.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Banos, V., Deuffic, P. (2020) . Après la catastrophe, bifurquer ou persévéérer ? Les forestiers à l'épreuve des événements climatiques extrêmes. Natures Sciences Sociétés 28 (3 4): 226 38.  
<https://doi.org/10.1051/nss/2021008>.
2. Clerici, N, Weissteiner, C. J., Gerard, F. (2012). Exploring the Use of MODIS NDVI-Based Phenology Indicators for Classifying Forest General Habitat Categories. Remote Sensing 4 (6): 1781 1803.  
<https://doi.org/10.3390/rs4061781>.
3. Dossier Départemental des Risques Majeurs en Haute-Vienne (DDRM). (2010). Le risque d'événements climatiques en Haute-Vienne. 14p.  
[https://www.hautevienne.gouv.fr/contenu/telechargement/5349/36895/file/5ddrm\\_risqueevnsclimatiques5B1%5D.pdf](https://www.hautevienne.gouv.fr/contenu/telechargement/5349/36895/file/5ddrm_risqueevnsclimatiques5B1%5D.pdf)
4. Fagherazzi, S., Nordio, G., Munz, K., Catucci, D., Kearney, W. (2019). Variations in Persistence and Regenerative Zones in Coastal Forests Triggered by Sea Level Rise and Storms. Remote Sensing 11 (août): 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11172019>.
5. Ferreira, J. A., Liberato, M. L. R., Ramos, A. M. (2016). On the relationship between atmospheric water vapour transport and extra-tropical cyclones development. Physics and Chemistry of the Earth, Part A/B/C vol. 94 (08). 56-65.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474706516000048>
6. Herrault, P.-A. (2023). Bases Physiques en Traitement du signal : Optique de la végétation (Master 1 OTG – 2021/2022. [Cours de Master 1 OTG].  
[https://moodle.unistra.fr/pluginfile.php/436541/mod\\_resource/content/2/optiqueVegetation.pdf](https://moodle.unistra.fr/pluginfile.php/436541/mod_resource/content/2/optiqueVegetation.pdf)

À partir d'observations satellites MODIS, des paramètres biophysiques Leaf Area Index (LAI) et le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), les répercussions morphologiques et phénologiques ont été observée. De plus, une classification supervisée a été appliquée au massif landais à partir des images Landsat 5 afin d'extraire les surfaces forestières.

Pour les mêmes parcelles forestières, les valeurs de LAI sont significativement inférieures après la tempête. À l'aide des résidus de la régression linéaire entre les valeurs de LAI et des surfaces forestières, par interpolation, ont été cartographiés les dégâts de la tempête à l'échelle des Landes.

En se basant sur les dégâts prédis, un gradient de dégradation a été mis en place. Les parcelles les plus endommagées enregistrent des hausses plus prononcées du NDVI que les parcelles moins dégradées qui stagnent. La production végétative s'accroît en fonction du temps dans les zones de régénération et stagne dans les zones préservées.

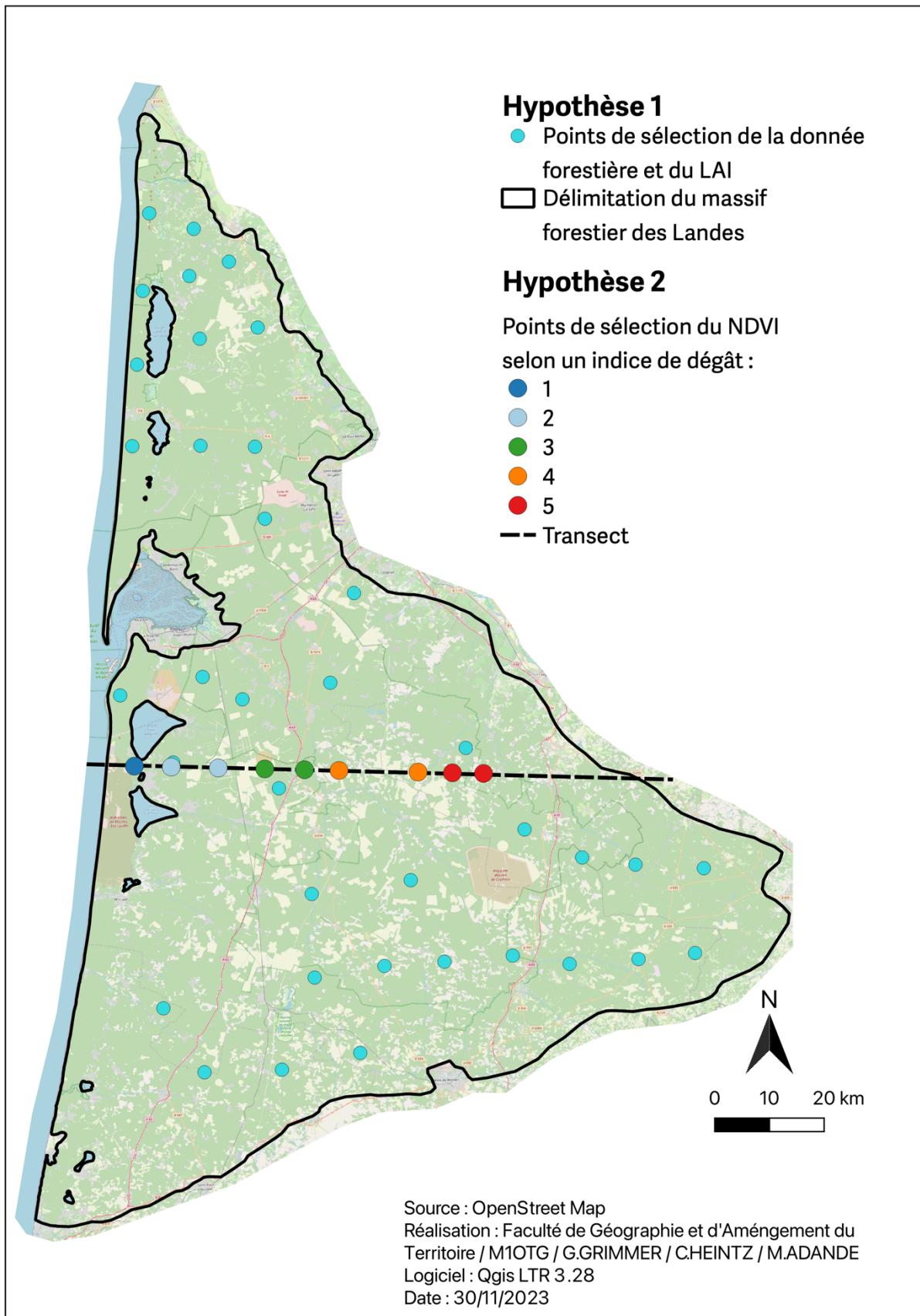
7. IGN. (2010). Évaluation des dégâts de la tempête Klaus. 16p. [https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/tempete\\_klaus.pdf](https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/tempete_klaus.pdf)
8. IGN, ministère de l'Éducation, de la Jeunesse et des Sports. (2020) Forêt et développement durable : 4 études de cas. Édugéo : Cahier pédagogique forêts, 43p. <https://www.edugeo.fr/uploads/teaching-book/file/8be80493fd7503b0cd4cbce0c07fa600.pdf>
9. IGN. (2023). Observatoire des forêts françaises. Consulté le 9 décembre 2023. <https://foret.ign.fr/>
10. Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE). (2012). Étude prospective Massif des Landes de Gascogne à l'horizon 2050. 8p. [https://sigesaqi.brgm.fr/IMG/pdf/prospectivemassiflandesgascogne-bdef\\_1\\_.pdf](https://sigesaqi.brgm.fr/IMG/pdf/prospectivemassiflandesgascogne-bdef_1_.pdf)
11. Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M., Wavresky, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. Cybergeo, 501. <https://journals.openedition.org/cybergeo/23155>
12. Law, B.E., Van Tuyl, S., Cescatti, A., Baldocchi, D. D. (2001). Estimation of Leaf Area Index in Open-Canopy Ponderosa Pine Forests at Different Successional Stages and Management Regimes in Oregon. Agricultural and Forest Meteorology 108 (1): 1-14. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00226-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00226-X)
13. Liberato, M., Pinto, J., Trigo, I., Trigo, R. (2011). Klaus - An exceptional winter storm over northern Iberia and southern France. Weather 66 (December): 330-34. <https://doi.org/10.1002/wea.755>.
14. Lopatin, E., Kolström, T., Spiecker, H. (2006). Determination of Forest Growth Trends in Komi Republic (Northwestern Russia): Combination of Tree-Ring Analysis and Remote Sensing Data. Boreal Environment Research 11 : 341-353. <https://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber11/ber11-341.pdf>
15. Meneses-Tovar, C. L. (2011). NDVI as Indicator of Degradation. Unasylva, vol. 62(02). 39-46. <https://www.fao.org/3/i2560e/i2560e07.pdf>
16. McKenzie, Z., Kumler, M. P., Ma, R., Williams, K., Hayes, W. K. (2023). Eyes from the sky : Application of satellite-based indices to assess vegetation casualty on Grand Bahama Island one year post-Hurricane Dorian. Remote Sensing Application: Society and Environment, vol. 32(11), 101044. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101044>
17. Nourtier, M. (2012). La vulnérabilité du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) à la sécheresse en milieu méditerranéen selon les propriétés hydriques du sol. Sciences agricoles. Université d'Avignon, 2011. Français. 253 p. <https://theses.hal.science/tel-00927093>
18. Pottier, A. (2014). Le massif forestier des Landes de Gascogne, un patrimoine naturel ? Le regard des gestionnaires. Annales de géographie 2014/4 (n° 698), pages 1016 à 1038. <https://www.cairn.info/revue-annales-de-geographie-2014-4-page-1016.htm&wt/src=pdf>
19. Ramaeau, J.-C., Mansion, D., Dumé, G., Gauberville, C., Bardat, J., Bruno, É., Keller, R. (2008). Flore Forestière Française : guide écologique illustré (tom3), région méditerranéenne. Institut pour le développement forestier. 2422p. <https://books.google.fr/books?id=P282nNjQq50C&lpg=PA2313&dq=pinus%20pinaster&pg=PA343#v=onepage&q=pinus%20pinaster&f=false>

20. Shamambo, D. C., Bonan, B., Calvet, J.-C., Albergel, C., Hahn, S. (2019). Interpretation of ASCAT Radar Scatterometer Observations Over Land : A Case Study Over Southwestern France. *Remote Sensing*. 11, 2842. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/23/2842>
21. Steenrod, C. L., Battaglia, L. L. (2023). Immediate and Long-Term Responses of Coastal Vegetation to Extreme Storm Events along the Northern Gulf of Mexico. Preprint. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2932125/v1>.

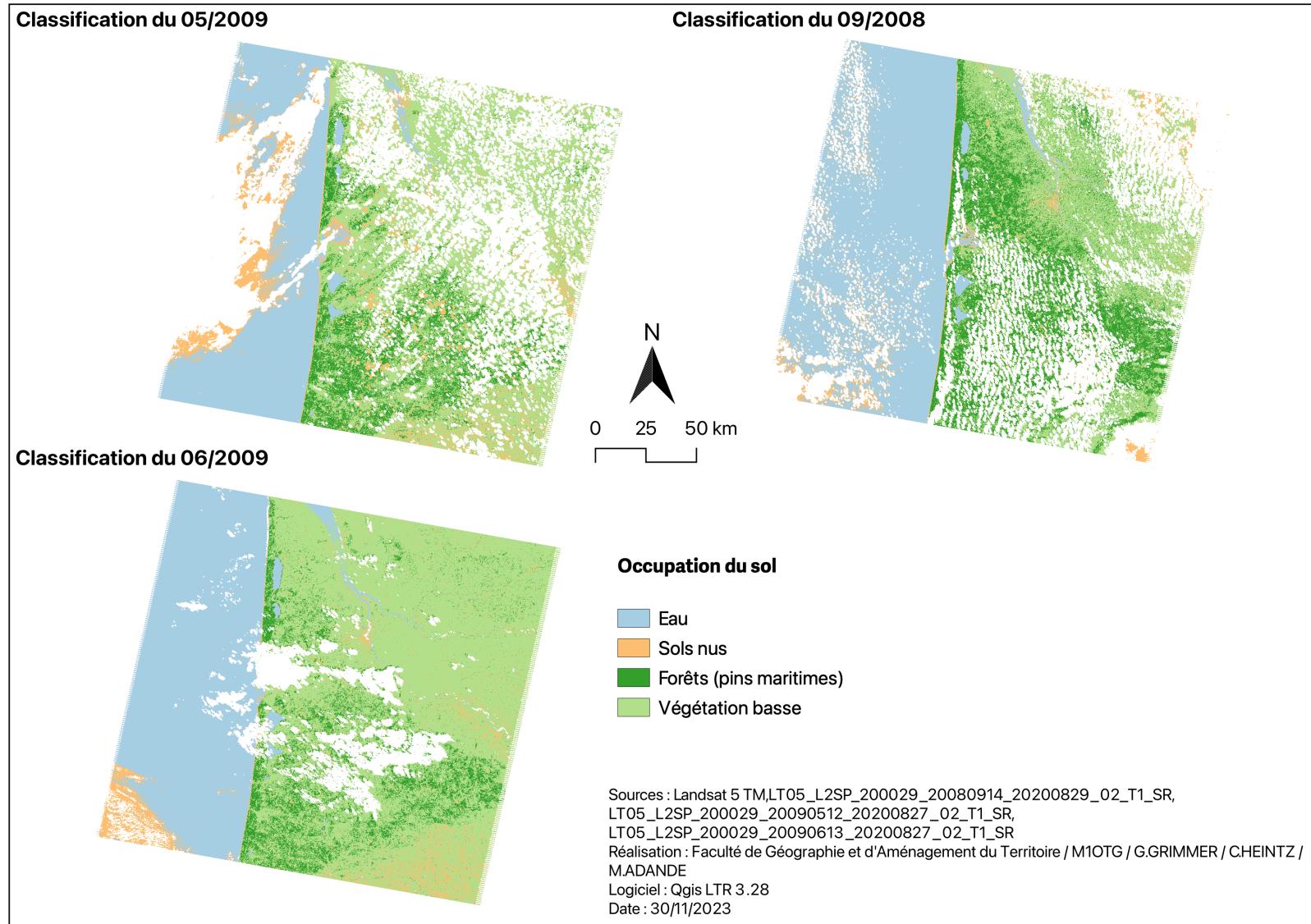
## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de contexte de la zone d'étude, Landes (40)	1
Figure 2 : Organigramme de traitement.....	3
Figure 3 : Produit et erreurs de la classification du sol de l'occupation du sol du massif forestier Landais le 04/2008 (F-score : 85%, Rappel : 78%, Précision : 95%)	4
Figure 4 : Boîtes à moustache de la distribution du LAI avant et après la tempête (indice de Wilcoxon V = 668,5, p-value = 1,599e-05).....	5
Figure 5 : distribution des valeurs de LAI avant la tempête (a) et après (b) en fonction d'une distribution théorique normale (p-value = 1,479e-05 et 4,042e-05)	6
Figure 6 : Distribution de la surface forestière en fonction du LAI pré-tempête (1), post-tempête (2) et tout confondu (3). (En bleu : régression linéaire. R2 pré-tempête : 0,1629, R2 post-tempête : 0,1804, R2 global : 0,2355 ) .....	6
Figure 7 : Carte des dégâts de la tempête Klaus sur la forêt des Landes par interpolation des résidus du modèle de régression linéaire entre les surfaces forestières et le LAI	7
Figure 8 : Résultats du test de Mann-Kendall, du coefficient de la pente de tendance et de l'évolution du NDVI sur le long terme .....	8
Annexe 1 : Carte d'échantillonnage de la donnée forestière et du LAI (hypothèse 1) et du NDVI (hypothèse2)	
Annexe 2 : Carte du modèle de classification appliqué aux différentes dates de la zone étudiée	
Annexe 3 : Carte des dégâts observées après la tempête Klaus (IGN)	

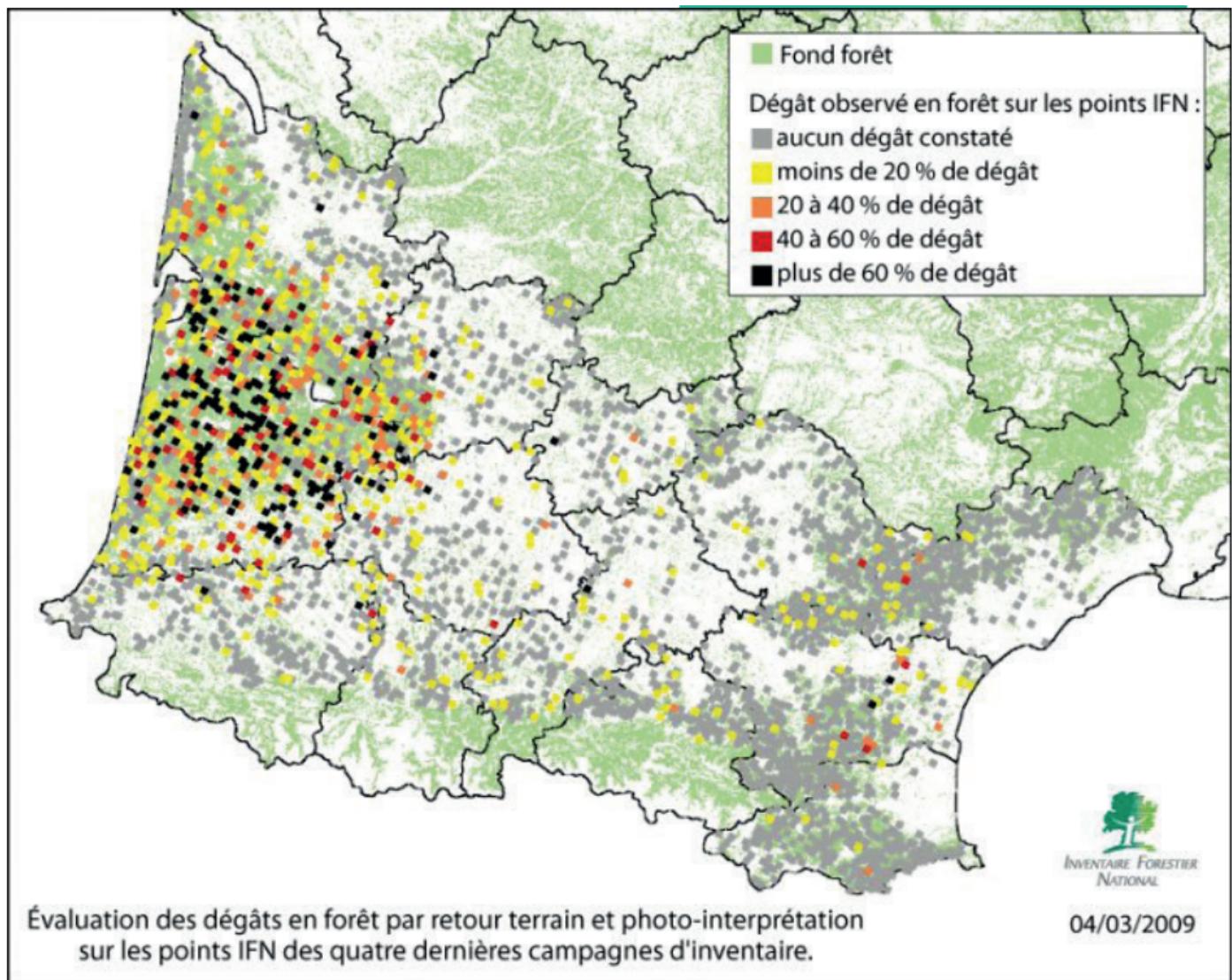
## ANNEXES



Annexe 1 : Carte d'échantillonnage de la donnée forestière et du LAI (hypothèse 1) et du NDVI (hypothèse2)



Annexe 2 : Carte du modèle de classification appliqué aux différentes dates de la zone étudiée



Annexe 3 : Carte des dégâts observées après la tempête Klaus (IGN)