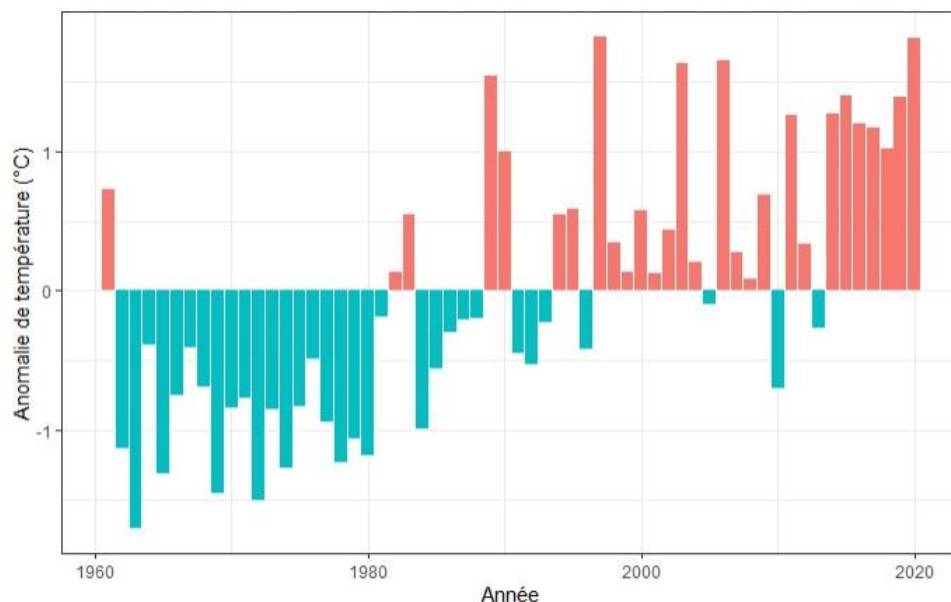


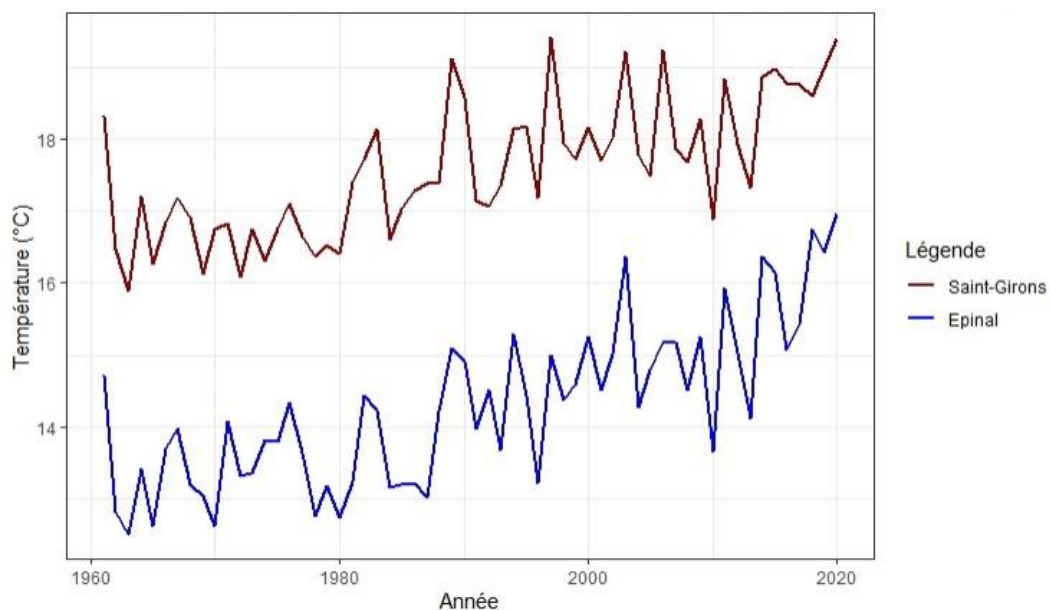
Annexes

1. Annexes du sujet 1 : Caractérisation de l'évolution du stock d'eau du sol en contexte de changements climatiques, avec l'objectif de caractériser l'évolution du bilan en eau au sein du parc des années 1960 jusqu'à aujourd'hui et d'évaluer l'impact potentiel des changements futurs

Annexe 1 : Evolution des anomalies des températures maximales annuelles à Saint-Girons



Annexe 2 : Comparaison d'évolution de la température maximale annuelle à Saint-Girons et Epinal



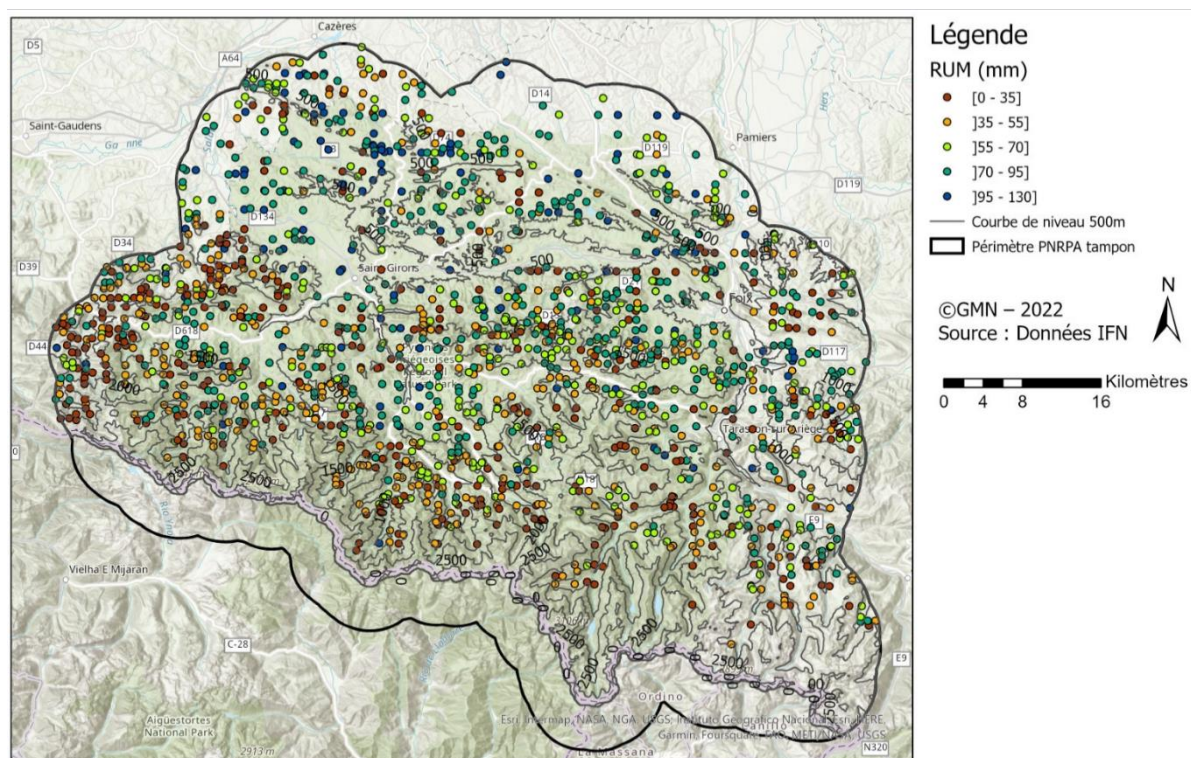
Annexe 3 : Liste détaillée des variables utilisées dans le modèle d'interpolation de la RUM et leur source

Type de données	Variable	Source	Opérations
Géologique	Géologie	BRGM	Simplifications des typologies en fonction de la capacité à s'éroder
Topographique	Altitude	MNT – BD Alti V2	Calcul à partir du MNT
Topographique	Indice de confinement	UMR SILVA	
Topographique	Cosinus exposition	MNT – BD Alti V2	Calcul à partir du MNT
Topographique	Indice de courbure à différentes résolutions (50m, 250m, 750m)	MNT – BD Alti V2	Calcul à partir du MNT
Topographique	Indice de position sur le versant (IPV)	UMR SILVA (Piedallu et al., 2022)	
Topographique	IPVZ (IPV selon alt)	UMR SILVA (Piedallu et al., 2022)	
Topographique	Pente à différentes résolutions (50m, 250m, 750m)	MNT – BD Alti V2	Calcul à partir du MNT
Topographique	Indice de Moore - indice d'érosion	UMR SILVA (Beven & Kirkby, 1979)	
Climatique	Evapotranspiration annuelle	BD Digitalis V3	Moyennés sur période 1961-2020
Climatique	Précipitations annuelles	BD Digitalis V3	Moyennés sur période 1961-2020
Climatique	Radiations annuelles	BD Digitalis V3	Moyennés sur période 1961-2020
Climatique	Températures annuelles	BD Digitalis V3	Moyennés sur période 1961-2020

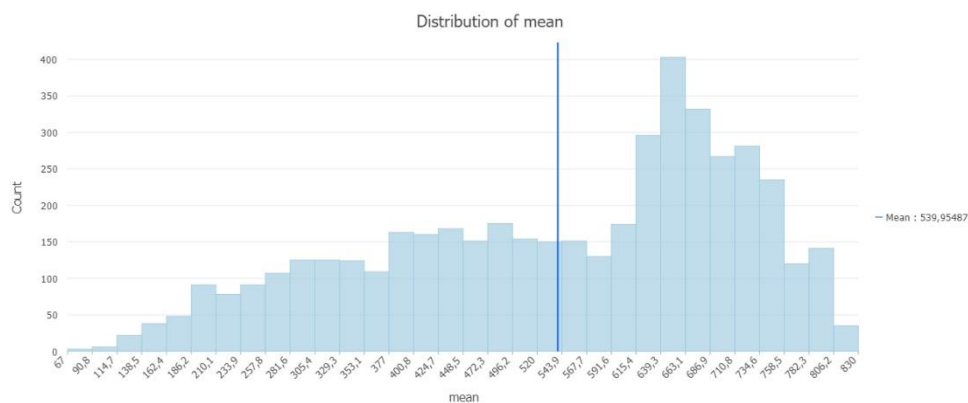
Annexe 4 : Tableau récapitulatif des paramètres de l'interpolation par krigeage

Méthode d'interpolation	Krigeage ordinaire
Nombre de voisins	10 minimum – 15 maximum
Nombre de lags	12
Taille des lags	1000 m
Type de modèle	Exponentiel
Root-Mean-Square	24,0843081821887
Average Standard Error	23,6790245979414

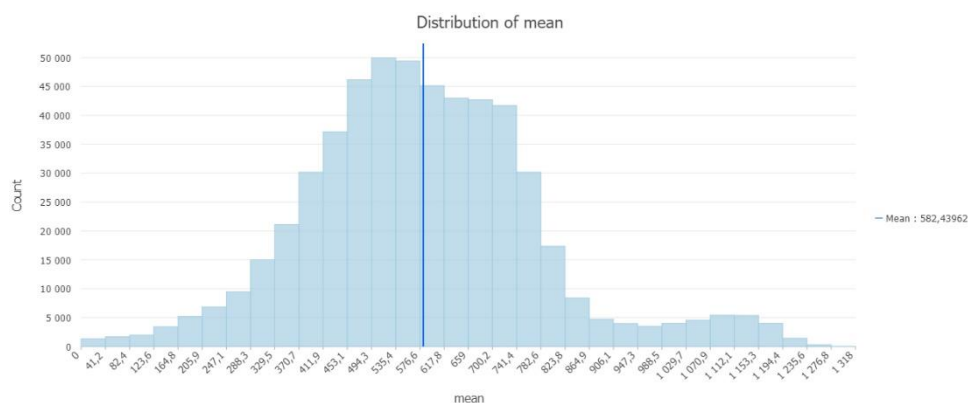
Annexe 5 : Cartographie des valeurs de RUM obtenues à partir des relevés IFN



Annexe 6 : Distribution des valeurs de déficit hydrique à l'échelle du PNRPA (a) et à l'échelle nationale (b)

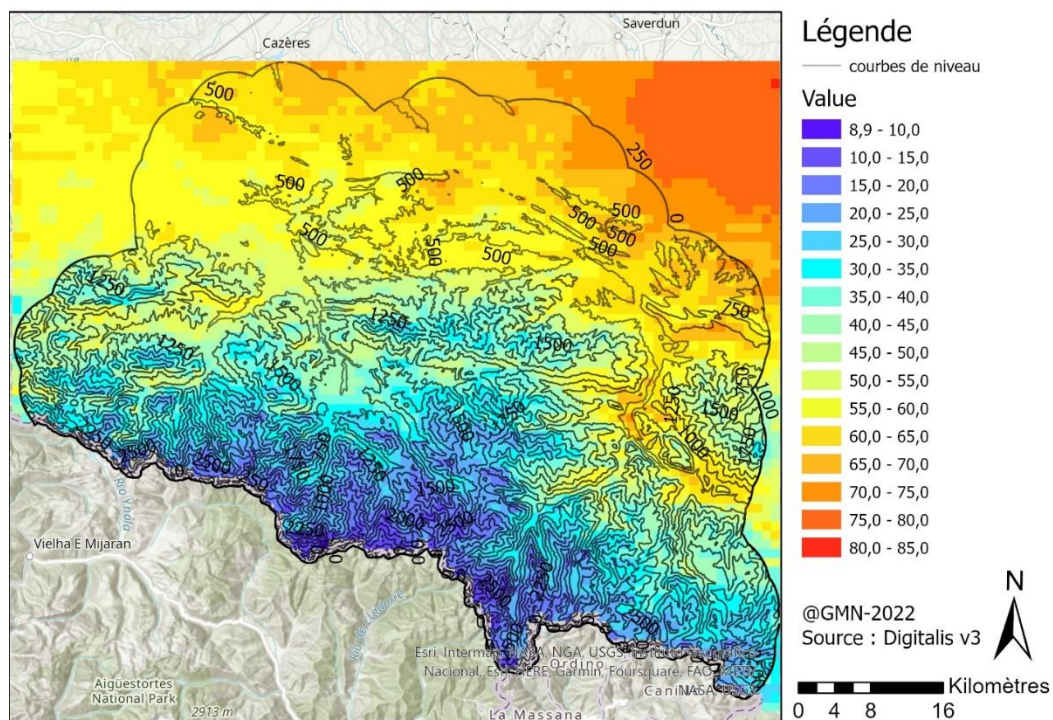


a) À l'échelle du PNRPA

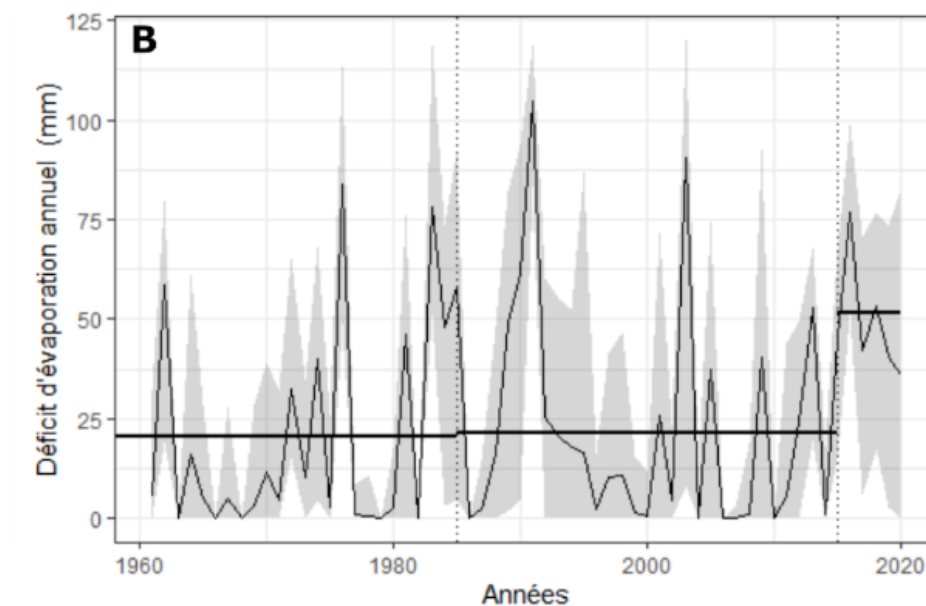


b) À l'échelle nationale

Annexe 7 : Carte de DE pour la période estivale de 1961-1986



Annexe 8 : Evolution du DE entre 1961 et 2020 dans la vallée de la Doller (Vosges) (GMN 2021 AgroParisTech, 2021)



Bibliographie de la partie 1 :

Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin

hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69.

<https://doi.org/10.1080/02626667909491834>

GMN 2021 AgroParisTech. (2021). *Vulnérabilité des peuplements de sapins des forêts de la Vallée de la Doller face au changement climatique (Massif des Vosges, Haut Rhin)* (p. 108).

[https://seafire.agroparistech.fr/lib/56a17ff9-db11-4a01-8d6c-](https://seafire.agroparistech.fr/lib/56a17ff9-db11-4a01-8d6c-27d5ea7228d6/file/1_DONNEES_FOURNIES/Rapport_et_annexes_GMN_CCRN2021/Rapport_2021_CCRN.pdf)

[27d5ea7228d6/file/1_DONNEES_FOURNIES/Rapport_et_annexes_GMN_CCRN2021/Rapport_2021_CCRN.pdf](https://seafire.agroparistech.fr/lib/56a17ff9-db11-4a01-8d6c-27d5ea7228d6/file/1_DONNEES_FOURNIES/Rapport_et_annexes_GMN_CCRN2021/Rapport_2021_CCRN.pdf)

Piedallu, C., Dallery, D., Bresson, C., Legay, M., Gégout, J.-C., & Pierrat, R. (2022). *Spatial vulnerability assessment of silver fir and Norway spruce dieback driven by climate warming* [Preprint]. In

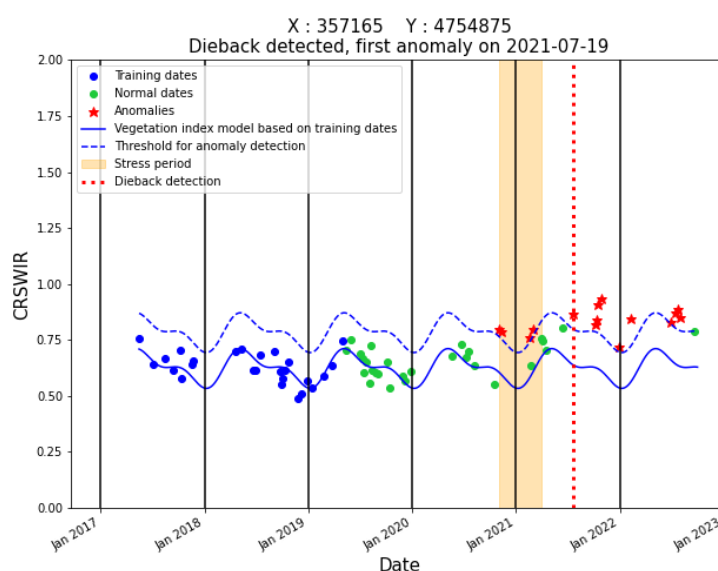
Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1528617/v1>

2. Annexes du sujet 2 : Evolution de la santé des peuplements par imagerie satellitaire pour identifier les zones dépérissantes et décrire leur évolution au cours du temps

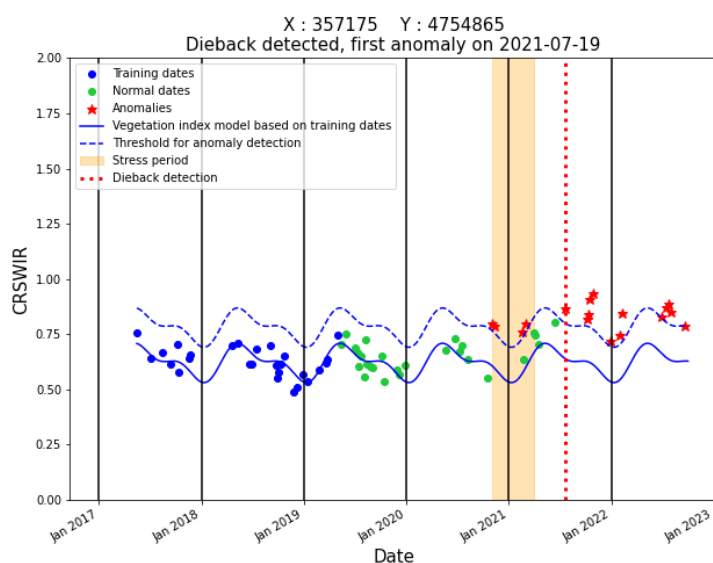
Annexe 9 : Modélisation de l'évolution du CRSWIR par *Fordead*

Cette Annexe contient des exemples illustratifs de sorties *Fordead* de modélisation du CRSWIR pour un pixel. Les trois Annexes 10A, 10B et 10C sont issues de trois pixels adjacents. Elles permettent de montrer la présence d'une cohérence spatiale dans la modélisation des pixels adjacents. Les trois graphiques sont quasiment identiques, ce qui montre une réaction spatiale cohérente à l'échelle du peuplement.

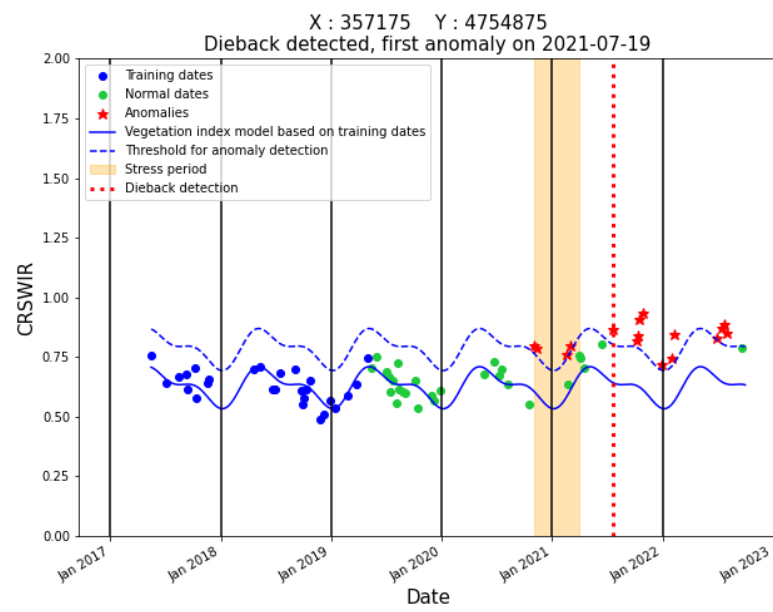
A)



B)



c)



Annexe 10 : Sorties possibles du package *Fordead*

Cette Annexe compile toutes les sorties *Fordead* y compris des éléments non présentés dans le rapport car non exploités. Ce document s'inspire de la documentation *Fordead* fournie sur le gitlab du package Python.

Dossiers où sont rangés les Sorties

Nom des fichiers créés

Sorties de l'étape 1 :

Dans le `data_directory` :

- `Tile info` (fichier) : informations relatives à la zone étudiée, dates utilisées, chemins des rasters... Il est importé par les étapes suivantes pour réutilisation de ces informations.
- Dans `VegetationIndex` (dossier) : un raster pour chaque date où l'indice de végétation est calculé pour chaque pixel
- Dans `Mask` (dossier) : un raster binaire pour chaque date où les pixels masqués valent 1, et les pixels valides 0.
- Dans `DataSoil` (dossier) (si `soil_detection` vaut True) : trois rasters :
 - o `Count_soil` : le nombre de dates successives avec des anomalies de sol
 - o `First_date_soil` : L'index de la première date avec une anomalie de sol de la dernière série d'anomalies de sol
 - o `State_soil` : Un raster binaire qui vaut 1 si le pixel est détecté comme sol (Au moins trois anomalies de sol successives)

Sorties de l'étape 2 :

Dans le `data_directory` :

- Dans `DataModel` (dossier) :
 - o `First_detection_date_index.tif` : un raster qui contient l'index de la première date qui sera utilisée pour la détection de dépérissement. Il permet de savoir pour chaque pixel quelles dates ont été utilisées pour l'apprentissage et lesquelles sont utilisées pour la détection.
 - o `Coeff_model.tif` : un stack à 5 bandes, une pour chaque coefficient du modèle de l'indice de végétation.
- Dans `TimelessMasks` (dossier) : un raster binaire `sufficient_coverage_mask.tif` qui vaut 1 pour les pixels où le modèle a pu être calculé, 0 si il n'y avait pas assez de dates valides

Sorties de l'étape 3 :

Dans le `data_directory` :

- Dans `DataDieback` :
 - o `Count_dieback` : nombre de dates successives avec des anomalies
 - o `First_date_unconfirmed_dieback` : L'index de la date du dernier changement d'état potentiel du pixel, date de première anomalie si le pixel n'est pas détecté comme un dépérissement, première non-anomalie si le pixel est détecté comme un dépérissement
 - o `First_date_dieback` : L'index de la première date avec une anomalie de la dernière série d'anomalies

- **State_dieback** : Un raster binaire qui vaut 1 si le pixel est détecté comme déperissant (Au moins trois anomalies successives)
- Dans **DataStress** :
 - **Dates_stress** : Un raster avec $\text{max_nb_stress_periods} \times 2 + 1$ bandes, contenant les indices de date de la première anomalie, et de retour à la normale pour chaque période de stress
 - **Nb_periods_stress** : Un raster contenant le nombre total de périodes de stress pour chaque pixel
 - **Cum_diff_stress** : Un raster à $\text{max_nb_stress_periods} + 1$ bandes contenant pour chaque période de stress la somme de la différence entre l'indice de végétation et sa prédiction, multipliée par le poids si **stress_index_mode** est "weighted_mean"
 - **Nb_dates_stress** : Un raster avec $\text{max_nb_stress_periods} + 1$ bandes contenant le nombre de dates non masquées de chaque période de stress.
 - **Stress_index** : Un raster avec $\text{max_nb_stress_periods} + 1$ bandes, contenant l'indice de stress de chaque période de stress (c'est la moyenne ou la moyenne pondérée de la différence entre l'indice de végétation et sa prédiction en fonction de **stress_index_mode**, obtenue à partir de **cum_diff_stress** et **nb_dates_stress**)
- Dans **DataAnomalies** : **Anomalies_YYYY-MM-JJ.tif** : rasters pour chaque date qui vaut True là où sont détectées les anomalies
- Dans **TimelessMasks** (si **stress_index_mode** est défini) : **too_many_stress_periods_mask** : un raster binaire valant 1 pour les pixels dont le nombre de périodes de stress est inférieur ou égal à **max_nb_stress_periods**, sinon 0

Sorties de l'étape 4 :

Dans le **data_directory** :

- Dans **TimelessMasks** : **Forest_Mask.tif** : raster binaire qui vaut 1 sur les pixels de forêt à étudier et 0 ailleurs

Sorties de l'étape 5 :

Dans le **data_directory/Results** :

- Si **multiple_files** (entrée) vaut False :
 - **periodic_results_dieback** (shapefile) : les polygones contiennent la période à laquelle la première anomalie a été détecté pour les zones déperissantes.

Si **conf_threshold_list** et **conf_classes_list** sont renseignés, les polygones contiennent également la classe d'intensité d'anomalie, discretisée et vectorisée à partir de l'indice de stress calculé lors de l'étape 3. **Cette classe contient donc l'état "final", calculé à la dernière date Sentinel-2 disponible.** Si le sol nu est détecté, l'indice de confiance n'est pas calculé et cet état final devient donc "Bare ground". Les zones atteintes avant **start_date** ou après **end_date** ne sont pas représentées.
 - **periodic_results_soil** (shapefile) (si **soil_detection** valait True lors de l'étape 1) : les polygones contiennent la période à laquelle la première anomalie de sol a été détecté **pour les zones détectées comme sol nu/coupe.** Les zones à nu avant **start_date** ou après **end_date** ne sont pas représentées.

- `confidence_index` (raster) : contient la valeur continue de l'indice de confiance
- `stress_periods` (shapefile) (Si `conf_threshold_list` et `conf_classes_list` sont renseignés) : les polygones contiennent pour chaque période de stress première anomalie a été détecté, ainsi que la classe d'intensité d'anomalie, discretisée et vectorisée à partir du `stress_index_mode` et de l'indice de stress calculé lors de l'étape 3
- Si `multiple_files` (entrée) vaut True :
 - `YYYY-MM-JJ` (shapefile) (date de fin de la période : par exemple, avec `start_date` = 2018-01-01, `end_date` = 2018-04-01 et `frequency` = "M", on aura les fichiers suivants: 2018-01-30.shp, 2018-02-28.shp et 2018-03-31.shp) : Chaque shapefile contient des polygones correspondant à l'état du peuplement à la fin de la période, même si les premières anomalies ont lieu avant `start_date`. L'état peut être 'Anomaly', "Bare ground" et 'Bare ground after anomaly' si si `soil_detection` valait True lors de la première étape, ou simplement "Anomaly" sinon.

Sorties des Timelapses :

Dans le `data_directory/Timelapses` :

- Si `zip_results` vaut True, les timelapses créés sont zippés dans un fichier Timelapses.zip. chaque polygone/point a un fichier .html avec comme nom de fichier la valeur dans la colonne `name_column` si réalisés à partir de `shape_path`, ou `x_y.html` si réalisé à partir de coordonnées.

Sorties des graphes montrant l'évolution de la série temporelle :

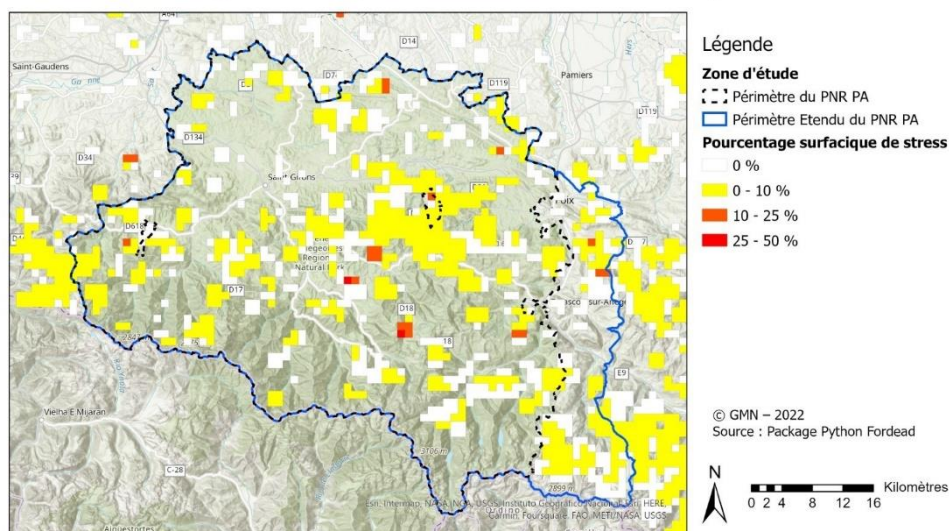
Dans le `data_directory/TimeSeries` :

- pour chaque point un fichier .png avec comme nom de fichier la valeur dans la colonne `name_column`, ou le format `Xx_coord_Yy_coord.png` si les coordonnées sont utilisées.

Annexe 11 : Evolution des zones de stress sur les forêts de résineux entre 2019 et 2021.
 Annexes 11 A) 2019 ; 10 B) 2020 ; 10 C) 2021

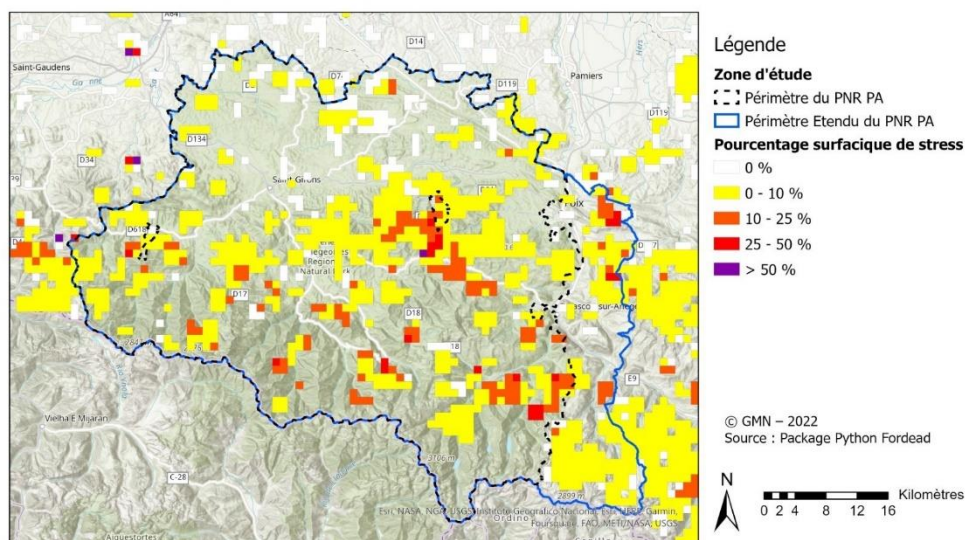
A)

Zones de stress détectées sur les forêts de conifères en 2019
 (calculé à partir de l'indice CRSWIR)



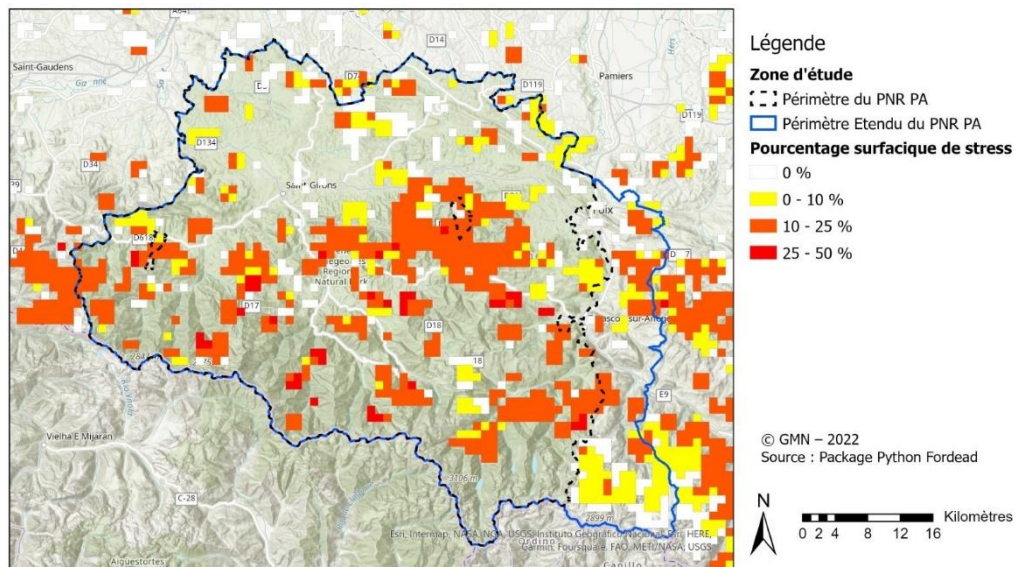
B)

Zones de stress détectées sur les forêts de conifères en 2020
 (calculé à partir de l'indice CRSWIR)



c)

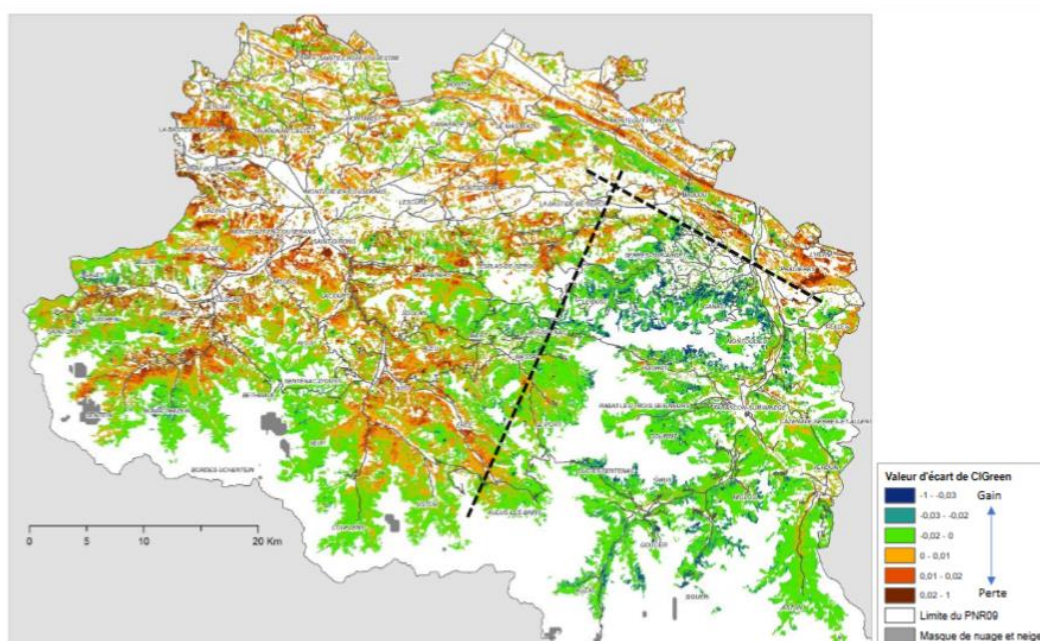
Zones de stress détectées sur les forêts de conifères en 2021 (calculé à partir de l'indice CRSWIR)



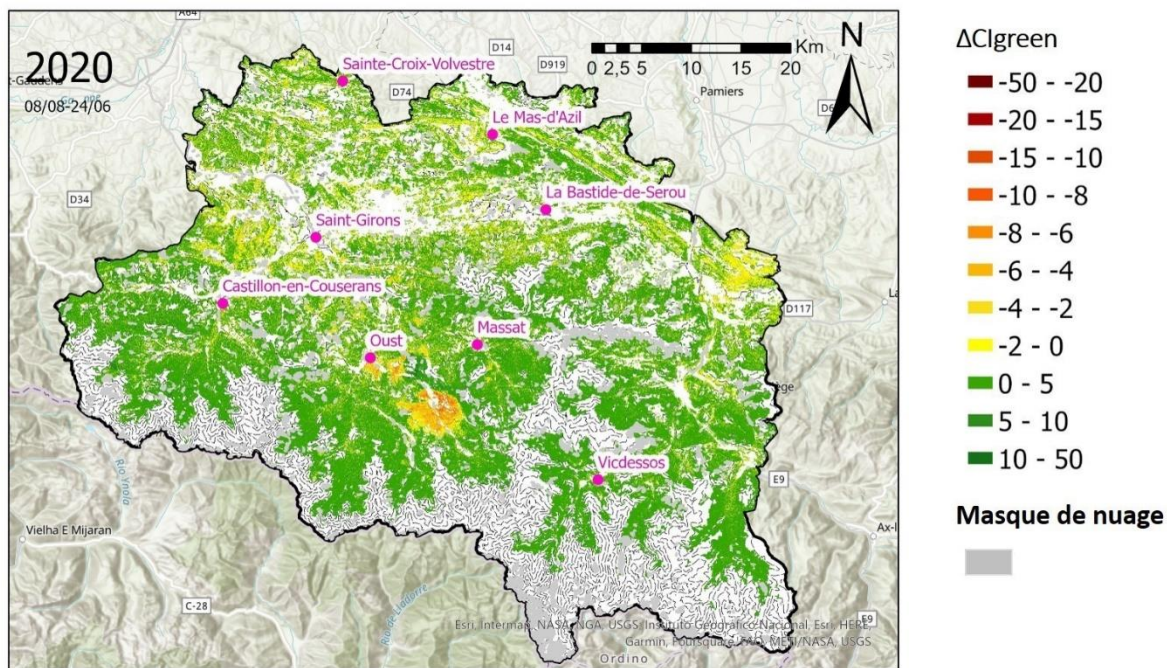
On observe qu'entre 2019 et 2021, il y a eu une augmentation de la surface stressée globale. Et celle-ci est répartie assez équitablement sur l'ensemble des unités forestières. Sans valeur extrême cependant.

Annexe 12 : Comparaison de nos calculs d'indices ΔCI_{green} à ceux de Véronique Chéret et Jean Philippe Denux

Nous avons cherché à vérifier si nous obtenions les mêmes résultats que ceux du rapport de l'école d'ingénieurs de Purpan. Cela a bien été vérifié pour l'année 2020 (Annexe 11A comparée à l'Annexe 11B) par une étude approfondie des deux cartes. A noter que nos dépigmentations sont des valeurs négatives sur l'Annexe 11B car nous avons calculé $\Delta CI_{green}(\text{août} - \text{juin})$ contrairement à Véronique Cheret et Jean Philippe Denux qui ont calculé $\Delta CI_{green}(\text{juin} - \text{août})$ sur la figure 1. La différence d'aspect à première vue s'explique par la normalisation des valeurs pour la figure 1 et par le choix différent de symbologie, Véronique Cheret et Jean Philippe Denux mettent davantage en avant les très faibles variations d'indice CI_{green} entre juin et août tandis que nous avons choisi des intervalles plus larges.

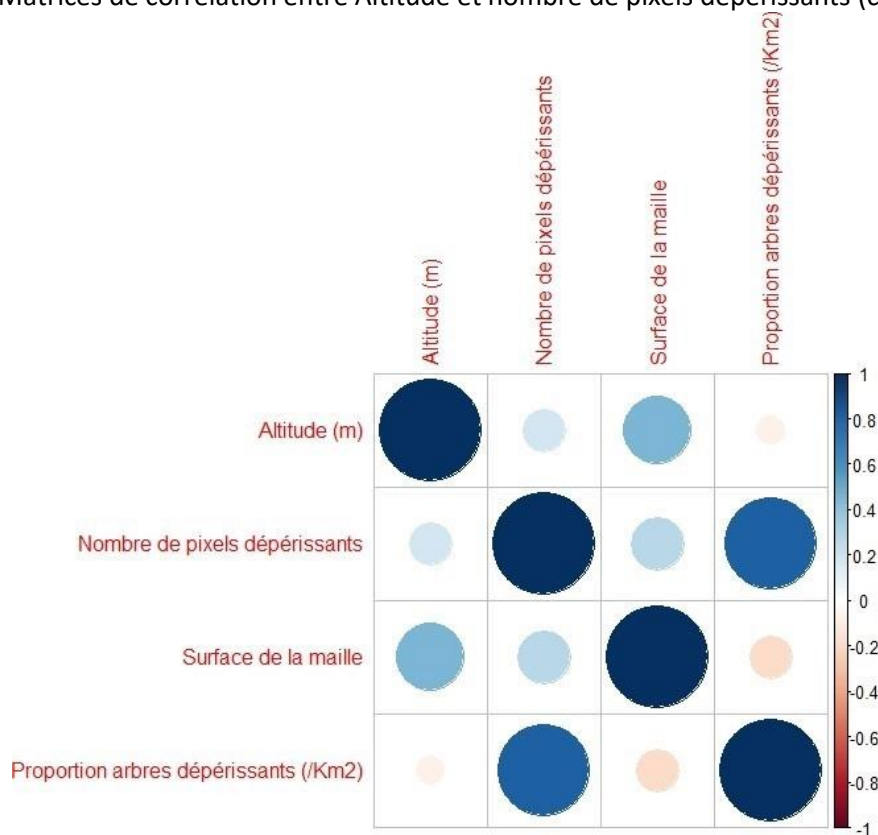


Annexe 12A : Carte de l'écart estival de CI_{green} normalisé en 2020 tirée du rapport de Véronique Cheret et Jean Philippe Denux sur la contribution de la télédétection pour le diagnostic de la vulnérabilité des forêts de feuillus sur le PNR (Véronique Cheret, Jean Philippe Denux, 2022)

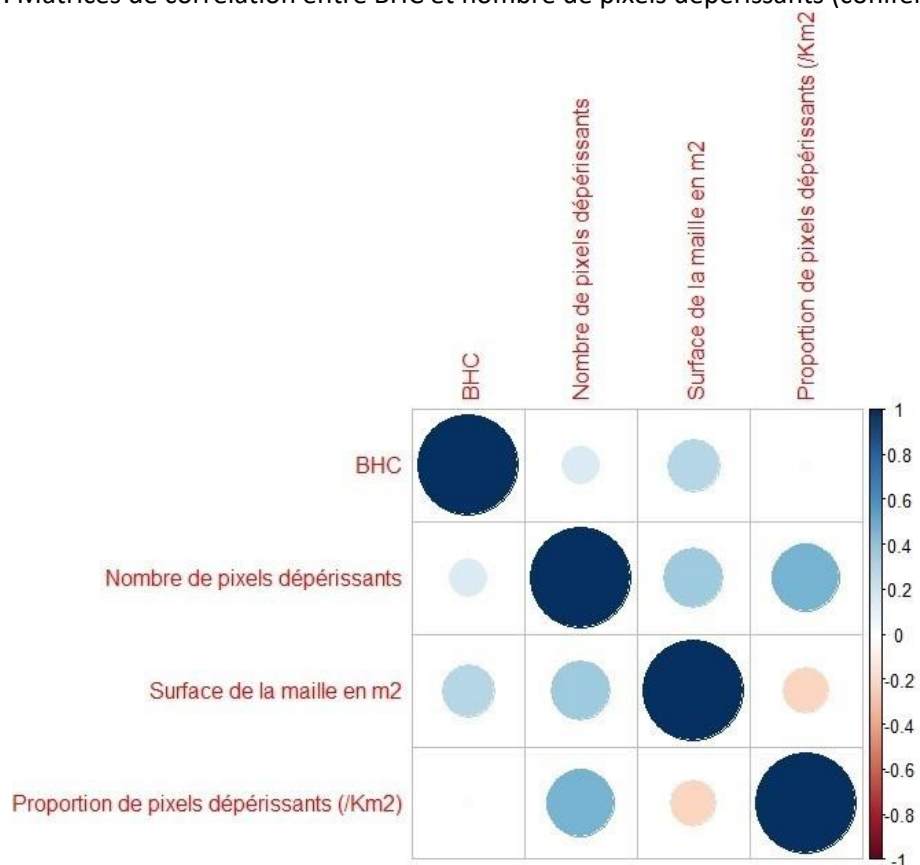


Annexe 12B : Carte du ΔCI_{green} de 2020

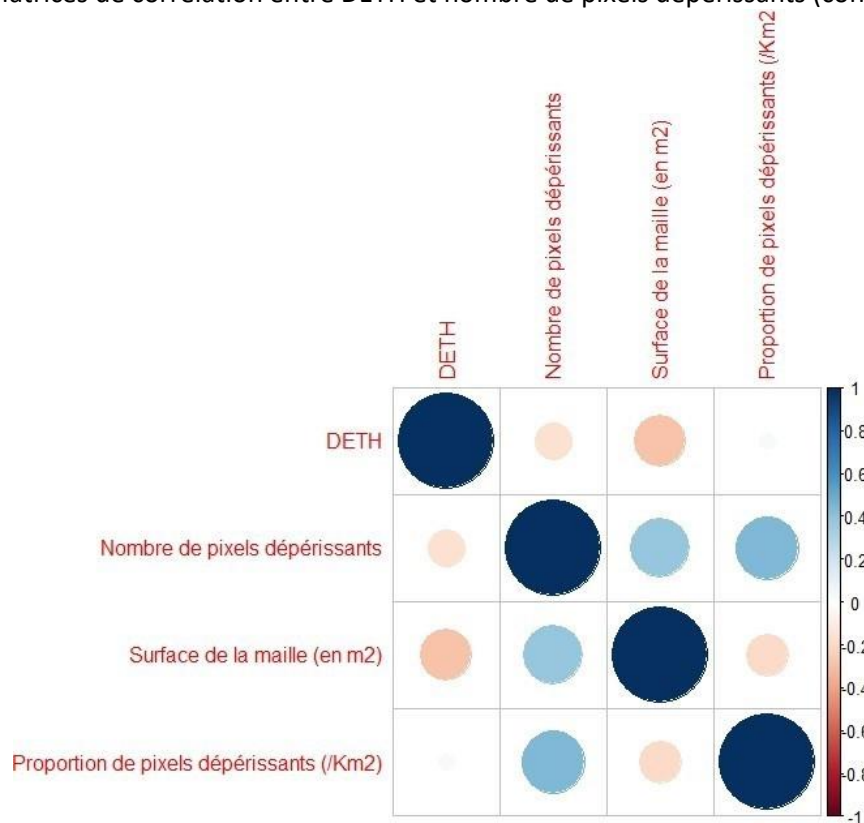
Annexe 13 : Matrices de corrélation entre Altitude et nombre de pixels dépérissants (conifères)



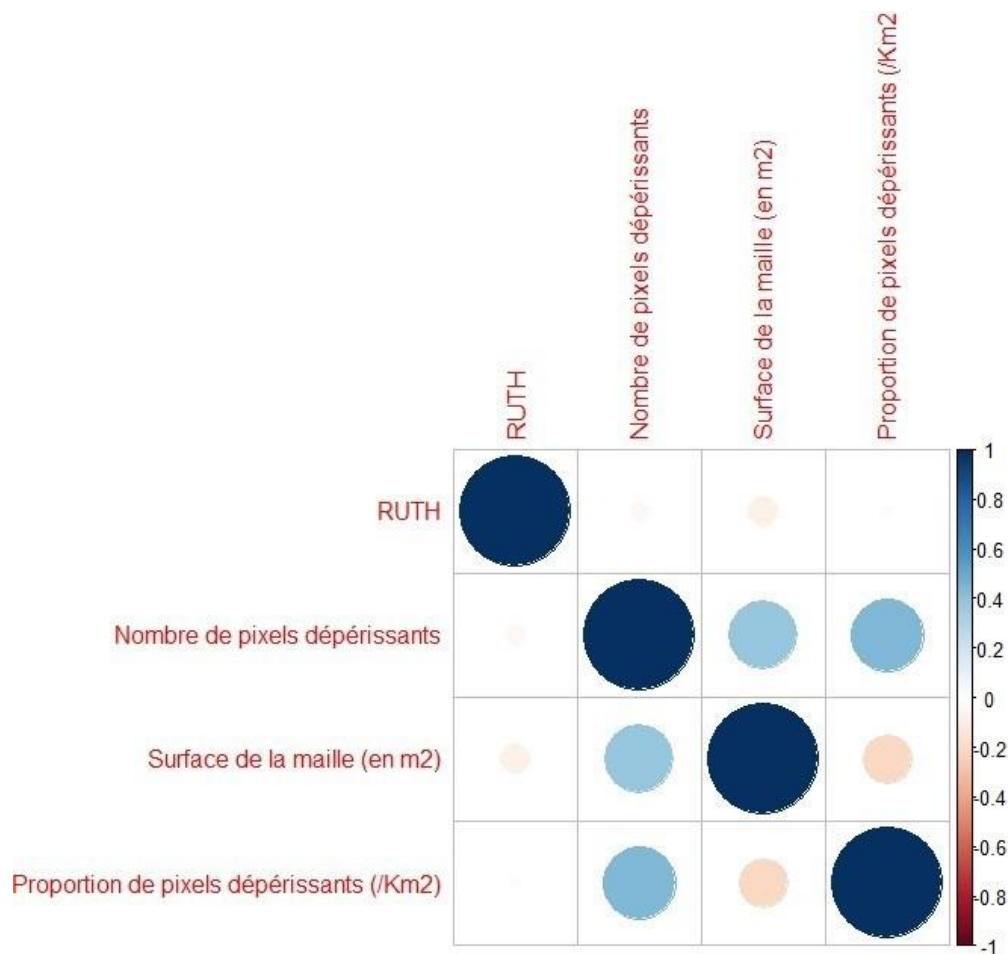
Annexe 14 : Matrices de corrélation entre BHC et nombre de pixels dépérissants (conifères)



Annexe 15 : Matrices de corrélation entre DETH et nombre de pixels dépérissants (conifères)



Annexe 16 : Matrices de corrélation entre RUTH et nombre de pixels dépérissants (conifères)



Annexe 17 : Modèle linéaire entre l'altitude et la proportion de pixels dépérissant

```
Call:
lm(formula = AltitudeC$`Proportion arbres dépérissants (/Km2)` ~
    AltitudeC$`Altitude (m)` )

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.04933 -0.03326 -0.01230  0.02009  0.42712

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  7.460e-02  3.875e-03  19.253  < 2e-16 ***
AltitudeC$`Altitude (m)` -8.428e-06  3.244e-06  -2.598  0.00951 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.04601 on 1076 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.006232, Adjusted R-squared:  0.005309
F-statistic: 6.748 on 1 and 1076 DF, p-value: 0.009514
```

Annexe 18 : Modèle linéaire entre le BHC et la proportion de pixels dépérissants

```
Call:
lm(formula = BHCC$`Proportion de pixels dépérissants (/Km2)` ~
    BHCC$BHC)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.7646 -0.6441 -0.4154  0.0894  8.5012

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  7.753e-01  5.240e-02  14.796  <2e-16 ***
BHCC$BHC     -8.808e-05  2.565e-04  -0.343   0.731
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.155 on 778 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.0001516, Adjusted R-squared:  -0.001134
F-statistic: 0.1179 on 1 and 778 DF,  p-value: 0.7314
```

Annexe 19 : Modèle linéaire entre le DETHC et la proportion de pixels dépérissants

```
Call:
lm(formula = DETHC$`Proportion de pixels dépérissants (/Km2)` ~
    DETHC$DETH)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.8257 -0.6729 -0.4007  0.1357  8.4603

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.6936691  0.1762070   3.937 9.37e-05 ***
DETHC$DETH   0.0006128  0.0008854   0.692   0.489
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.161 on 529 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.0009047, Adjusted R-squared:  -0.000984
F-statistic: 0.479 on 1 and 529 DF,  p-value: 0.4892
```

Annexe 20 : Modèle linéaire entre le DETHC et la proportion de pixels dépérissants

```
Call:
lm(formula = RUTHC$`Proportion de pixels dépérissants (/Km2)` ~
    RUTHC$RUTH)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.8275 -0.6739 -0.4028  0.1105  8.4435

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.8915282  0.2708614   3.291  0.00106 **
RUTHC$RUTH   -0.0002177  0.0007727  -0.282  0.77825
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.162 on 540 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.000147, Adjusted R-squared:  -0.001705
F-statistic: 0.07937 on 1 and 540 DF,  p-value: 0.7783
```

Annexe 21 : Modèle linéaire entre l'essence et la proportion de pixels dépérissant

```
Call:
lm(formula = ESSENCES$`Proportion de pixels dépérissants` ~ ESSENCES$ESSENCE)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.0524 -0.7755 -0.4870  0.1153 10.2431

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      1.06676    0.13418   7.950 7.3e-15 ***
ESSENCES$ESSENCEDouglas      -0.11977    0.20371  -0.588  0.5568
ESSENCES$ESSENCEMélèze      -0.26555    0.33128  -0.802  0.4230
ESSENCES$ESSENCEPin à crochets, pin cembro -0.82060    0.29893  -2.745  0.0062 **
ESSENCES$ESSENCEPin autre      -0.69457    0.81252  -0.855  0.3929
ESSENCES$ESSENCEPin laricio, pin noir      -0.12766    0.18149  -0.703  0.4820
ESSENCES$ESSENCEPin maritime      0.40299    0.70685   0.570  0.5688
ESSENCES$ESSENCEPin sylvestre     -0.29985    0.25062  -1.196  0.2319
ESSENCES$ESSENCEPins mélangés     -0.75990    1.39447  -0.545  0.5860
ESSENCES$ESSENCEsapin, épicéa     -0.05033    0.15589  -0.323  0.7469
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.388 on 713 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.01478, Adjusted R-squared:  0.002341
F-statistic: 1.188 on 9 and 713 DF, p-value: 0.2993

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
```

Annexe 22 : Sorties R: Analyse de modèle feuillu : modèle linéaire entre le type d'essence et la les valeurs de l'indice DeltaClgreen

```
Call:
lm(formula = Feuillus_DEP$Niveau_de_deperissement ~ Feuillus_DEP$ESSENCE)

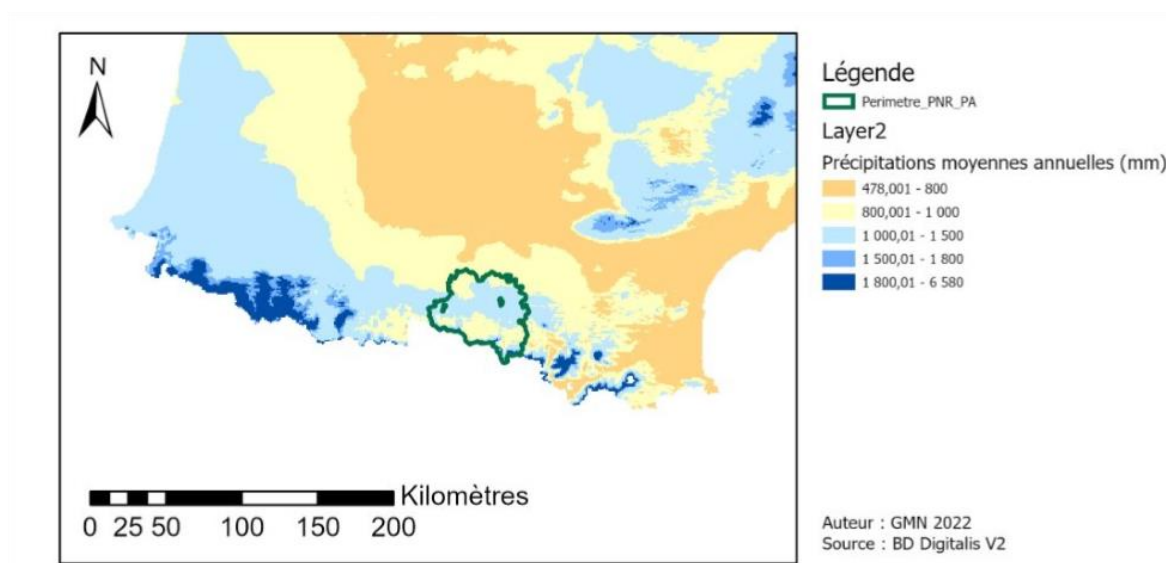
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-96.324  -1.324   0.901   2.676   8.540

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     -8.5397    0.2576  -33.15 <2e-16 ***
Feuillus_DEP$ESSENCEChênes décidus      3.6798    0.2585   14.24 <2e-16 ***
Feuillus_DEP$ESSENCEChênes sempervirents  4.5795    0.2995   15.29 <2e-16 ***
Feuillus_DEP$ESSENCEFeuillus      4.8634    0.2576   18.88 <2e-16 ***
Feuillus_DEP$ESSENCEHêtre      3.6389    0.2577   14.12 <2e-16 ***
Feuillus_DEP$ESSENCEPeuplier      5.6634    0.3020   18.76 <2e-16 ***
Feuillus_DEP$ESSENCERobinier      4.1045    0.2606   15.75 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

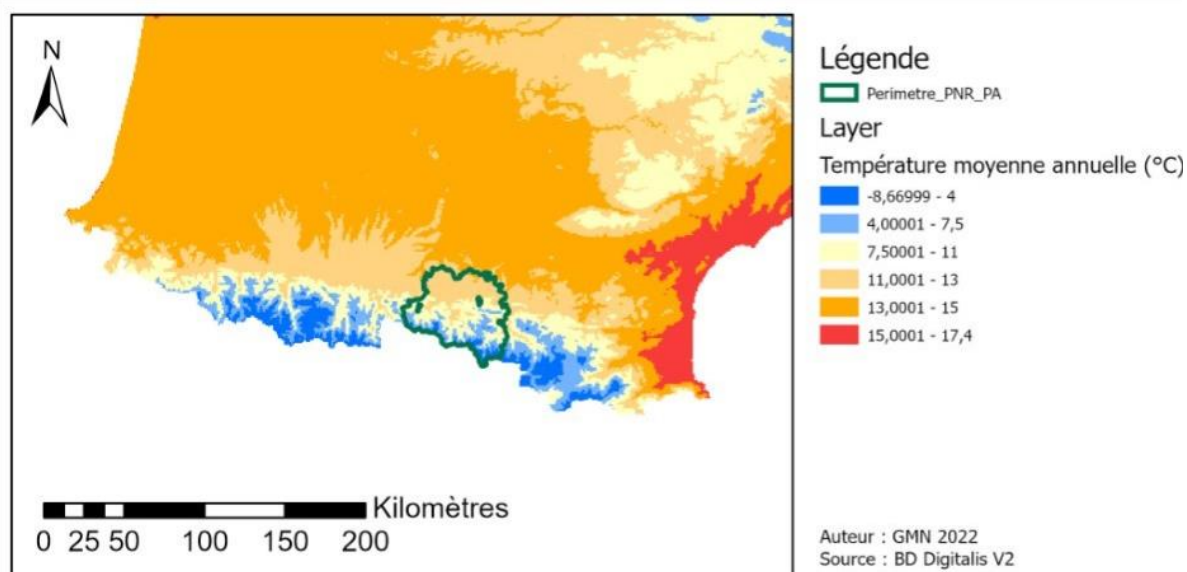
Residual standard error: 3.982 on 1048568 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.01689, Adjusted R-squared:  0.01688
F-statistic: 3002 on 6 and 1048568 DF, p-value: < 2.2e-16
```

3. Annexes du sujet 3 : étude de l'état de santé des principales essences de production avec pour objectif de construire des modèles représentant les symptômes précoces de dépérissement sur les principales essences en place dans le but de réaliser des cartes de vulnérabilité adaptées et de déterminer les conditions de peuplement les plus résistantes

Annexe 23 : Cartographies des gradients climatiques (température et précipitations) à l'échelle de la chaîne pyrénéenne sur la période 1961-1990



Annexe 23.A : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1961-1990



Annexe 23.B : Températures moyennes annuelles sur la période 1961-1990

Annexe 24 : Eléments d'autécologie des essences étudiées

Autécologie du hêtre :

L'aire de répartition du hêtre s'étend en Europe centrale et occidentale, sur des régions à température annuelle moyenne comprises entre 3 et 12°C et à précipitations annuelles totales comprises entre 750mm et 1400mm. Dans le Nord de son aire de répartition le hêtre se trouve plutôt en plaine tandis qu'il est plutôt montagnard dans le Sud de son aire de répartition. Le hêtre est adapté aux stations fraîches ayant une forte humidité atmosphérique, et souffre de températures estivales trop élevées. C'est une essence mésophile à large amplitude trophique (stations calcaires à acides) et qui tolère l'ombre même au stade juvénile (Petit et al. 2017).

Le hêtre est relativement résistant à la plupart des maladies et il ne subit pas d'attaques massives de parasites conduisant à un dépérissement du peuplement (von Wuehlisch G. 2012).

Le développement racinaire du hêtre est dépendant des contraintes physiques et hydriques du sol (compacité, anaérobiose, engorgement). Il ne tolère pas les sols engorgés, ni les sols peu profonds, mal structurés ou présentant un horizon compact. Un mauvais enracinement lié à ces contraintes peut rendre le hêtre sensible au vent. Le hêtre est également très sensible aux canicules, aux sécheresses printanières et estivales, et au manque d'eau. Il est donc peu favorable aux stations sèches exposées au Sud, et aux stations à régime hydrique alternatif. Le hêtre est également très sensible aux gelées tardives, en particulier au stade juvénile (Petit et al. 2017).

Toutes ces contraintes font que le hêtre est considéré comme une essence à risque dans le contexte des changements climatiques (Petit et al. 2017).

Autécologie du sapin pectiné :

Le sapin pectiné (*Abies alba*, Mill., 1768) est une essence montagnarde, que l'on retrouve majoritairement en France entre 400 et 1800m.

Il exige une humidité atmosphérique élevée et constante toute au long de l'année, et craint les sécheresses estivales. Il résiste au froid, mais craint les gelées tardives qui peuvent endommager les bourgeons, particulièrement à basse altitude. C'est une espèce dryade (tolérant l'ombre) les premières années. Il présente une bonne résistance aux vents grâce à un enregistrement profond (lorsque le sol le permet, et craint les sols compacts et hydromorphes, ainsi que les sols superficiels (Rameau et al, flore forestière française tome 1).

Autécologie du châtaignier :

Le châtaignier est un arbre de la famille des Fagaceae. Il s'agit d'une espèce postpionnière supraméditerranéenne, c'est-à-dire plutôt thermophile et héliophile. C'est une espèce à large amplitude, acidiphile des stations à bilan hydrique assez favorable (RAMEAU et al. 2008).

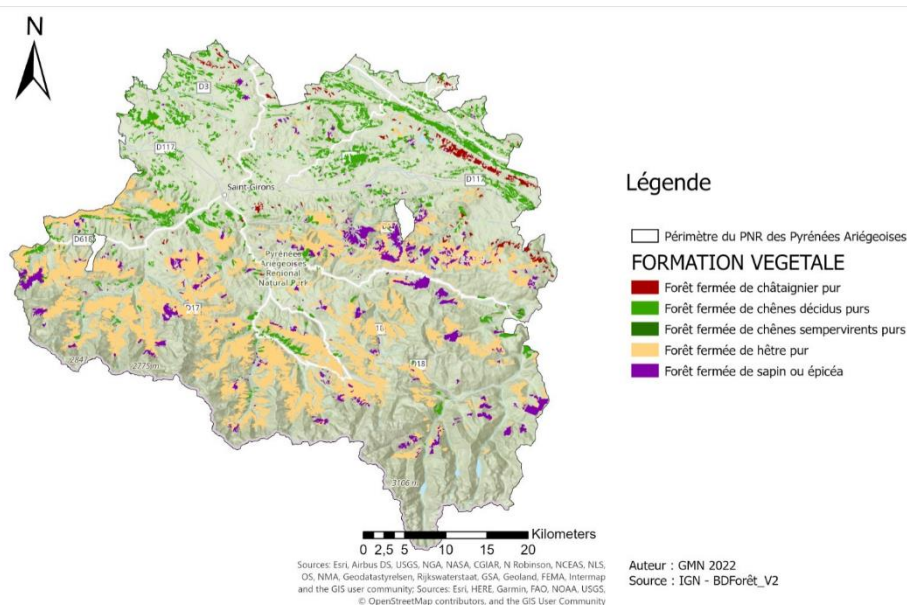
A noter que le châtaignier est une espèce anciennement introduite. Son aire de répartition initiale est plutôt autour du Caucase (Thomas et Busti 2009). En France, son aire de répartition naturalisée correspond à la Corse, et quelques localités des Cévennes, des Maures, et des Pyrénées Orientales (RAMEAU et al. 2008). Il est important de noter que le châtaignier est principalement maintenu par l'action anthropique dans et en dehors des zones qui lui sont favorables. Une part du dépérissement

de l'espèce en France peut donc possiblement être attribuée à l'abandon et la déprise des châtaigneraies.

Autécologie des chênes pédonculé, sessile et pubescent

	Paramètres	Chêne pédonculé (<i>Quercus robur</i>)	Chêne sessile (<i>Quercus petrae</i>)	Chêne pubescent (<i>Quercus pubescens</i>)
DI S T R I B U T I O N	Aire de répartition en France	Commun partout en plaine, sauf en région méditerranéenne	Commun partout en plaine, sauf en région méditerranéenne et dans le bassin aquitain	Très commun en région méditerranéenne, présence encore discrète dans le Nord de la France, absence en Bretagne et dans les Landes
	Étage de végétation	Arbre très répandu à l'étage collinéen et à la base de l'étage montagnard (il ne monte pas au-delà de 1 300m d'altitude)	Arbre très répandu à l'étage collinéen et à la base de l'étage montagnard (il ne monte pas au-delà de 1 600m d'altitude)	Arbre très répandu à l'étage collinéen et à l'étage méditerranéen (il ne monte pas au-delà de 1 400m d'altitude)
	Biotope	Essence forestière que l'on retrouve aussi dans les friches (espèce pionnière) et fonds de vallon humides	Essence majoritairement forestière qui supporte bien la compétition	Essence forestière que l'on retrouve aussi dans les friches (espèce pionnière) et coteaux secs
S O L	pH optimal	Entre 6 et 7	Autour de 5	Entre 5 et 6
	pH toléré (min et max)	Très acide à basique	Acide à neutre	Acide à basique
	Texture optimale	Sol argilo-limoneux bien alimenté en eau	Sol limono-argileux	Sol limono-sableux
	Humus favorable	Eumull à mésomull	Oligomull à hémimoder	Mésomull carbonaté à oligomull
E A U	Hydromorphie permanente	Tolérée	Non tolérée	Non tolérée
	Hydromorphie temporaire	Tolérée dès la surface	De préférence à plus de 50cm de profondeur	Tolérée si à plus de 75cm de profondeur
	Déficit hydrique estival pour survivre	≥-200mm (faible résistance à la sécheresse)	≥-240mm (bonne résistance à la sécheresse)	≥-290mm (très bonne résistance à la sécheresse)
C L I M A T	Résistance au gel	Bonne	Moyenne	Assez bonne
	T°C moyenne annuelle pour survivre	≥5°C	≥7°C	≥9°C
	T°C moyenne estivale pour survivre	≤25°C (très sensible au réchauffement climatique sur le territoire français)	≤26°C (sensible au réchauffement climatique sur le territoire français)	≤29°C (favorisé par le réchauffement climatique sur le territoire français)
	Lumière	Très exigeant (haut degré d'héliophilie)	Exigeant (tolère un ombrage partiel)	Très exigeant (haut degré d'héliophilie)
M E N A C E S B I O T I Q U E S	Feuilles	Oïdium du chêne (facteur déclenchant dans les dépérissements), défoliations printanières dues aux insectes phytophages (tordeuse verte, phalène brumeuse, processionnaire du chêne, bombyx disparate)	Oïdium du chêne (facteur déclenchant dans les dépérissements), défoliations printanières dues aux insectes phytophages (tordeuse verte, phalène brumeuse, processionnaire du chêne, bombyx disparate, bombyx cul-brun, orcheste)	Oïdium du chêne (facteur déclenchant dans les dépérissements), défoliations printanières dues aux insectes phytophages (tordeuse verte, phalène brumeuse, bombyx disparate)
	Branches et tronc	Bupreste du chêne qui provoque une mortalité de branches éparses dans le houppier; attaque du tronc par les cambiohages et xylémophages (agriles, scolytes, cérambycidés), maladie de l'encre qui provoque des chancres suintants sur le tronc	Bupreste du chêne qui provoque une mortalité de branches éparses dans le houppier; attaque du tronc par les cambiohages et xylémophages (agriles, scolytes, cérambycidés), platype qui creuse des galeries pénétrantes	Bupreste du chêne qui provoque une mortalité de branches éparses dans le houppier
	Racines	Collybie à pied en fuseau (pourridié primaire à l'origine d'une lente érosion racinaire), maladie de l'encre (lente érosion des racines fines, nécroses racinaires), armillaire couleur de miel (facteur aggravant dans les phases finales de dépérissement)	Collybie à pied en fuseau (pourridié primaire à l'origine d'une lente érosion racinaire), armillaire couleur de miel (facteur aggravant dans les phases finales de dépérissement), consommations racinaires totales par les hannetons commun et forestier	Absence de données

Annexe 25 : Répartition des essences étudiées au sein du PNR PA



Annexe 26 : Calculs effectués pour le choix des arbres (co)dominants

Le pourcentage d'arbres dépérissant est calculé au sein des arbres considérés comme dominants. Cela correspond aux critères suivants :

- **Le ratio C13/C13_{moy}** : Le ratio entre la circonférence de l'arbre à 1m30 (variable C13), et la moyenne de cette circonférence à l'échelle de la placette doit être supérieur à 0,9. Cela indique que l'arbre n'est pas trop petit par rapport aux autres arbres du peuplement.
- **La mortalité des branches** : Selon le protocole IFN, cette variable n'est relevée que sur les arbres vivants ayant un taux de couvert libre non nul, c'est à dire dont le houppier n'est pas entièrement recouvert par celui des arbres voisins. Les arbres ayant un NA pour cette variable ont donc été exclus, ce qui simplifie aussi les analyses ultérieures
- **L'état végétatif** : Les arbres morts depuis moins de 5 ans pour des raisons autres que le vent ou la sylviculture ont été identifiés grâce à la variable VEGET (code "C" ou "5"). Ces arbres morts ont été rajoutés dans la liste des arbres dominants de chaque placette, dès lors qu'ils respectaient le critère du ratio C13/C13_{moy}.

Pour une essence donnée, lorsqu'une placette ne présente aucun arbre dominant de l'essence concernée, le critère de dépérissement associé est noté NA. La placette est donc exclue de la construction du modèle pour cette essence.

Le seuil de 20% servant à discriminer les placettes saines et dépérissantes est en nombre de tiges à l'hectare. Le choix de ce seuil est issu de (Rapport GMN 2021).

Annexe 27 : Liste récapitulative des variables utilisées pour la calibration des modèles

data_dep_tot.csv					
Nom de la variable	Abréviation	Description	Sens biologique	Unité	Source
Variable à expliquer					
Dépérissement de la placette pour le châtaigner	DEP_CHA	Variable binaire : 1 si la placette présente des signes de dépérissement pour le châtaigner (au moins 20% des châtaigniers dominants ou co-dominants présentent des signes précoces de dépérissement, c'est-à-dire ont au moins 5% de branches mortes dans la partie supérieure du houppier), 0 sinon pour une placette saine	Etat sanitaire de la placette	0 : placette saine 1 : placette dépérissante	GMN 2022 à partir de BD IGN, fichier ARBRE (période 2017-2021)
Dépérissement de la placette pour le hêtre	DEP_HET	Même raisonnement pour le hêtre	Etat sanitaire de la placette		GMN 2022 à partir de BD IGN, fichier ARBRE (période 2017-2021)
Dépérissement de la placette pour le sapin	DEP_SAP	Même raisonnement pour le sapin	Etat sanitaire de la placette		GMN 2022 à partir de BD IGN, fichier ARBRE (période 2017-2021)
Dépérissement de la placette pour le chêne pubescent	DEP_CHPU B	Même raisonnement pour le chêne pubescent	Etat sanitaire de la placette		GMN 2022 à partir de BD IGN, fichier ARBRE (période 2017-2021)
Dépérissement de la placette pour le chêne pédonculé	DEP_CHPE D	Même raisonnement pour le chêne pédonculé	Etat sanitaire de la placette		GMN 2022 à partir de BD IGN, fichier ARBRE (période 2017-2021)
Dépérissement de la placette pour le chêne sessile	DEP_CHS	Même raisonnement pour le chêne sessile	Etat sanitaire de la placette		GMN 2022 à partir de BD IGN, fichier ARBRE (période 2017-2021)
Variables explicatives					
Année des opérations terrain	CAMPAGN E	Année de la campagne annuelle d'inventaire forestier national. Une campagne C commence à l'automne de l'année C-1 et se termine à l'automne de l'année C.		-	BD IGN, fichier PLACETTE (période 2017-2021)
Identifiant de la placette	IDP	Identifiant unique de chaque point d'inventaire		-	BD IGN, fichier PLACETTE (période 2017-2021)
Coordonnées	XL	Position X de la placette (en Lambert 93)		Coordonnées en Lambert 93	BD IGN, fichier PLACETTE (période 2017-2021)
Coordonnées	YL	Position Y de la placette (en Lambert 93)			BD IGN, fichier PLACETTE (période 2017-2021)
Sylvoécorégion	SER	Sylvoécorégion dans laquelle se trouve la placette		-	BD IGN, fichier PLACETTE (période 2017-2021)
facteurs peuplement					
Taux de couvert total des arbres	TCAT10	Taux de couvert absolu en dixièmes sur la placette 25m de rayon (2000 m²), formé par tous les arbres, recensables ou non recensables.		Dixième	BD IGN, fichier PLACETTE (période 2017-2021)
Type de plantation	TPLANT	TPLANT caractérise la plantation (ou l'absence) observée sur une surface de 20 ares sans limite d'âge du peuplement.		0 : pas de plantation	BD IGN, fichier PLACETTE (période 2017-2021)
Gestion	GEST	Niveau de gestion ou d'exploitation actuel du peuplement		Qualitatif 0 : aucune trace 1 : traces faibles 2 : signes manifestes	BD IGN, fichier PLACETTE (période 2017-2021)
Type de coupe	DC	Nature et intensité de coupe récente			
Espèce principale de la placette	esp_ppal			Nom vernaculaire d'essence	GMN 2022
Espèce secondaire de la placette	esp_sec			Nom vernaculaire d'essence	GMN 2022
Surface terrière	G	Surface terrière toutes essences confondues		-	GMN 2022
Surface terrière relative de chaque essence d'intérêt	G_CHA	Surface terrière relative du châtaigner		Proportion entre 0 et 1	GMN 2022
	G_HET	Surface terrière relative du hêtre			GMN 2022
	G_CHS	Surface terrière relative du chêne sessile			GMN 2022
	G_CHPUB	Surface terrière relative du chêne pubescent			GMN 2022
	G_CHPED	Surface terrière relative du chêne pédonculé			GMN 2022
	G_SAP	Surface terrière relative du sapin			GMN 2022

data_dep_tot.csv					
Nom de la variable	Abréviation	Description	Sens	Unité	Source
<i>facteurs pédologiques et topographiques</i>					
Type de sol	TSOL	Déterminé selon la classification de Duchaufour lorsqu'une fosse pédologique a pu être réalisée.		Qualitatif A : sol hydroporphe B : sol faiblement hydromorphe CE : sols jeune ou podzolisé D : sol carbonaté FG : sols brunifiés et ferralsitiques	BD IGN, fichier ecologie (période 2017-2021)
Type d'humus	HUMUS	Type d'humus selon la classification de Jabiol		MULL DYSMULL MODER MOR	BD IGN, fichier ECOLOGIE (période 2017-2021)
Profondeur de sondage	PROF2	Profondeur en décimètres de l'horizon inférieur du sol à deux textures différenciées ou de l'horizon unique du sol à une texture.		dm	BD IGN, fichier ECOLOGIE (période 2017-2021)
Type de roche-mère	ROCHE	Type de roche-mère selon une simplification de la classification du CEPE-CNRS.		Qualitatif SEDSIL : sédiments siliceux CARB : roches carbonatées META : roches métamorphiques MAGMA : roches magmatiques	BD IGN, fichier ECOLOGIE (période 2017-2021)
Texture de l'horizon supérieur	TEXT1	Texture de l'horizon supérieur du sol		Qualitatif 0 : Absence 1 : Sable - 2 : Sable limoneux 3 : Sable argileux - 4 : Limon sableux 5 : Limon argileux - 6 : Limon 7 : Argile limoneuse - 8 : Argile sablo-limoneuse 9 : Argile	BD IGN, fichier ECOLOGIE (période 2017-2021)
Texture de l'horizon inférieur	TEXT2	Texture de l'horizon inférieur du sol			BD IGN, fichier ECOLOGIE (période 2017-2021)
Engorgement	HYDR	Variable binaire décrivant l'observation (1) ou non (0) de traces d'apparition de gley, de taches d'oxydation ou d'un pseudogley dans le premier mètre de profondeur du sol quand une fosse pédologique a pu être réalisée.	Signes d'hydromorphie dus à un engorgement temporaire ou permanent du sol.	0 ou 1	BD IGN, fichier ECOLOGIE (période 2017-2021). A partir des données PGLEY, POX, PPSEUDO
Situation topographique	TOPO	Position topographique la plus représentative sur la placette de 15 m de rayon (2000 m ²)		Qualitatif 0 : terrain plat - 1 : sommet 2 : haut de versant - 3 : mi-versant concave 4 : mi versant rectiligne - 5 : mi versant convexe 6 : replat sur versant - 7 : bas de versant 8 : vallée large - 9 : dépression fermée, combe, fond de vallon étroit, situation de confinement	BD IGN, fichier ECOLOGIE (période 2017-2021)

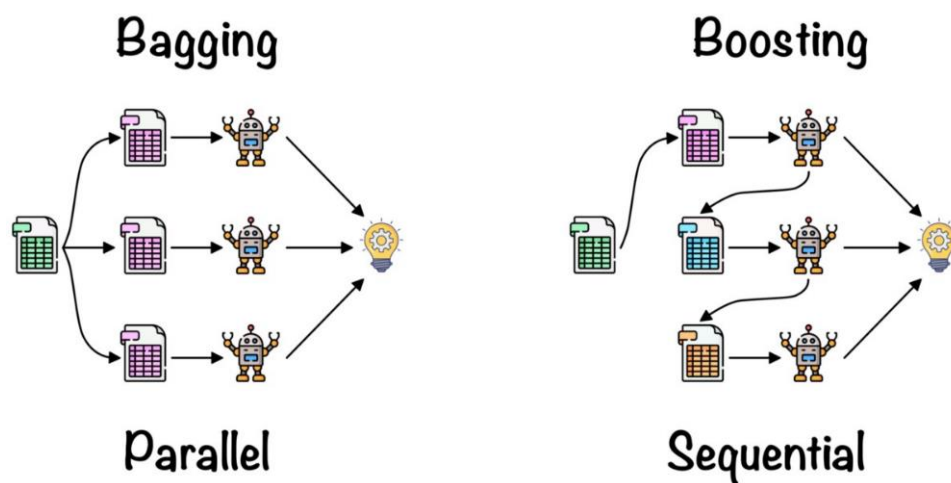
data_dep_tot.csv					
Nom de la variable	Abréviation	Description	Sens	Unité	Source
<i>facteurs climatiques</i>					
<i>Conditions climatiques</i>					
Moyenne du bilan hydrique climatique annuel	bhc_13_actuel	Moyenne du bilan hydrique climatique annuel sur la période actuelle (2007-2020)		mm	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne du BHC estival	bhc_et_actuel	Moyenne du BHC estival sur la période actuelle		mm	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne du déficit d'évapotranspiration annuel	deth_13_actuel	Moyenne du déficit d'évapotranspiration annuel calculé par la méthode de Thornthwaite sur la période actuelle		mm	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne du déficit d'évapotranspiration estival	deth_et_actuel	Moyenne du déficit d'évapotranspiration estival calculé par la méthode de Thornthwaite sur la période actuelle		mm	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne des précipitations annuelles	prec_13_actuel	Moyenne des précipitations annuelles sur la période actuelle		mm	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne des précipitations	prec_et_actuel	Moyenne des précipitations estivales sur la période actuelle		mm	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne de la réserve utile du sol	ruth_13_actuel	Moyenne de la réserve utile du sol (formule de Thornthwaite) annuelle sur la période		mm	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne de la ruth estivale	ruth_et_actuel	Moyenne de la ruth estivale sur la période actuelle		mm	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne de la température maximale annuelle	tmax_13_actuel	Moyenne de la température maximale annuelle sur la période actuelle		°C	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne de la température maximale estivale	tmax_et_actuel	Moyenne de la température maximale estivale sur la période actuelle		°C	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne de la température minimale printanière	tmin_pr_actuel	Moyenne de la température minimale printanière sur la période actuelle		°C	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne de la température minimale annuelle	tmin_13_actuel	Moyenne de la température minimale annuelle sur la période actuelle		°C	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne de la température minimale hivernale	tmin_hi_actuel	Moyenne de la température minimale hivernale sur la période actuelle		°C	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne des températures moyennes annuelles	tmoy_13_actuel	Moyenne des températures moyennes annuelles sur la période actuelle		°C	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
Moyenne des températures moyennes estivales	tmoy_et_actuel	Moyenne des températures moyennes estivales sur la période actuelle		°C	BD DIGITALIS (période 2007-2020)
data_dep_tot.csv					
Nom de la variable	Abréviation	Description	Sens biologique	Unité	Source
<i>Evolution climatique</i>					
Anomalie relative du bilan hydrique climatique annuel	anomrel_bhc_13	Anomalie relative du bilan hydrique climatique annuel entre la période de référence (1961-1985) et actuelle (2007-2020), pondérée par la moyenne du bilan hydrique climatique sur la période actuelle	Evolution relative du BHC	mm	GMN 2022 à partir de BD DIGITALIS (périodes 1961-1985 et 2007-2020)
Anomalie relative des précipitations annuelles	anomrel_prec_13	Anomalie relative des précipitations annuelles entre la période de référence et actuelle pondérée par la moyenne des précipitations annuelles sur la période actuelle	Evolution relative des précipitations	mm	GMN 2022 à partir de BD DIGITALIS (périodes 1961-1985 et 2007-2020)
Anomalie relative des températures moyennes annuelles	amonrel_tmoy_13	Anomalie relative des températures moyennes annuelles entre la période de référence et actuelle pondérée par la moyenne des températures moyennes annuelles sur la période actuelle	Evolution relative de la température moyenne annuelle	°C	GMN 2022 à partir de BD DIGITALIS (périodes 1961-1985 et 2007-2020)
Anomalie relative des déficits d'évapotranspiration annuels	anomrel_deth_13	Anomalie relative des déficits d'évapotranspiration moyens annuelles entre la période de référence et actuelle pondérée par la moyenne des températures moyennes annuelles sur la période actuelle	Evolution relative des déficits d'évapotranspiration moyen annuel	mm	GMN 2022 à partir de BD DIGITALIS (périodes 1961-1985 et 2007-2020)

Annexe 28 : Nombre de placette IFN - IGN par essence et par année au sein du PNRPA et de notre zone d'étude étendue

Nombre de placette IFN - IGN par essence et par année pour la zone d'étude étendue							
Année	CHA	HET	CHPED	CHS	CHPUB	SAP	Total
2 009	30	86	39	19	97	38	309
2010	37	59	40	27	73	38	274
2 011	44	82	58	19	72	49	324
2 012	28	75	44	32	68	36	283
2013	32	61	38	18	68	28	245
2 014	31	73	40	15	46	22	227
2015	25	56	26	14	39	34	194
2 016	30	41	34	14	47	28	194
2 017	31	50	37	12	42	24	196
2018	26	44	45	12	41	13	181
2 019	28	58	33	13	34	23	189
2020	29	51	37	14	59	18	208
2 021	29	53	42	7	35	25	191
Total	400	789	513	216	721	376	

Nombre de placette IFN - IGN par essence et par année au sein du PNR PA							
Année	CHA	HET	CHPED	CHS	CHPUB	SAP	Total
2 009	9	22	8	3	9	2	53
2010	6	11	8	3	13	4	45
2 011	6	18	8	6	3	7	48
2 012	3	20	7	6	6	2	44
2013	4	15	7	6	4	4	40
2 014	6	17	8	3	3	1	38
2015	11	13	5	4	7	1	41
2 016	3	10	8	4	3	5	33
2 017	3	9	7	1	5	3	28
2018	9	10	5	3	3	2	32
2 019	8	9	3	2	2	1	25
2020	4	11	7	2	5	2	31
2 021	3	9	6	1	4	1	24
Total	75	174	87	44	67	35	

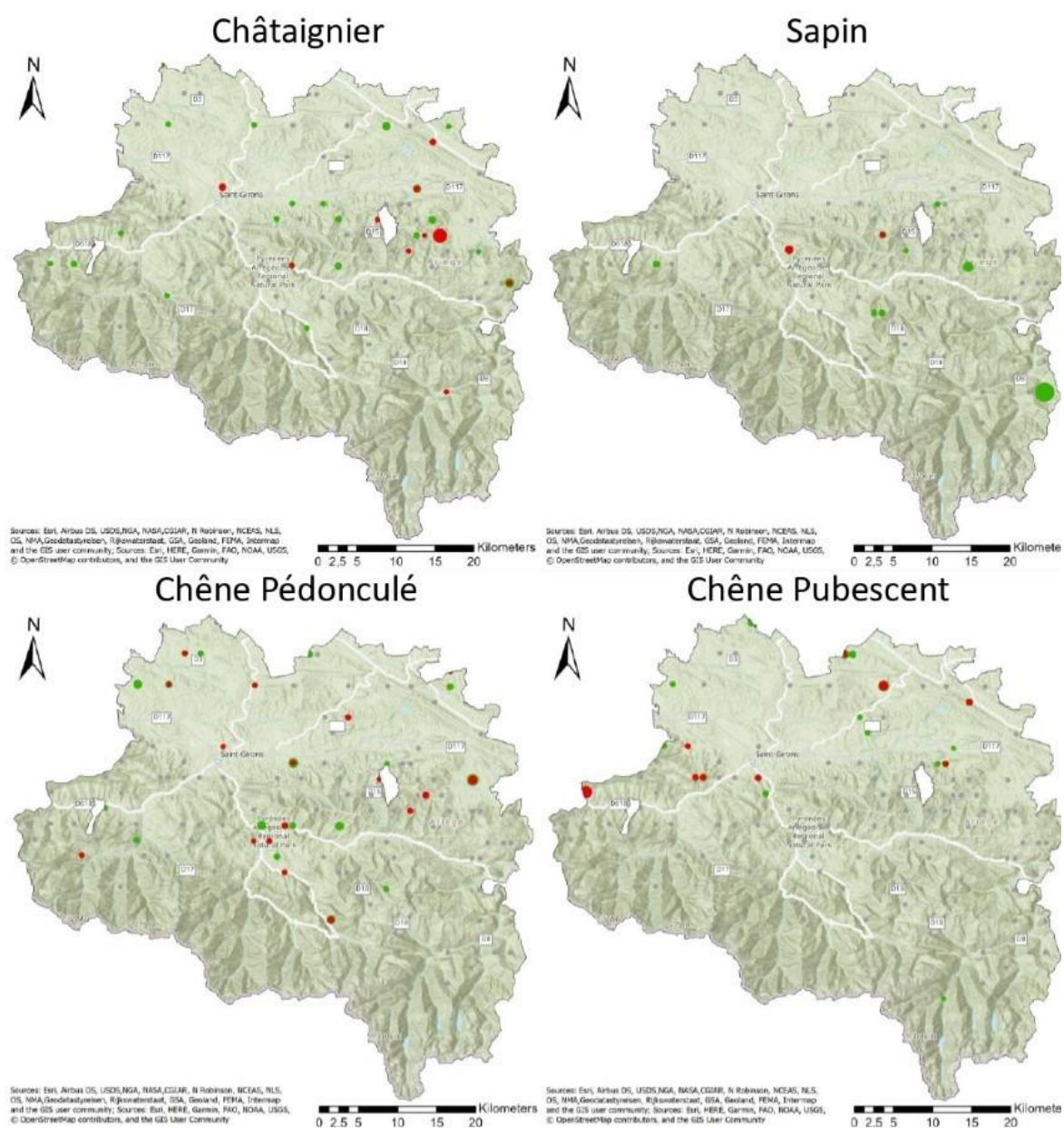
Annexe 29 : Différence de fonctionnement du modèle RF et BRT respectivement

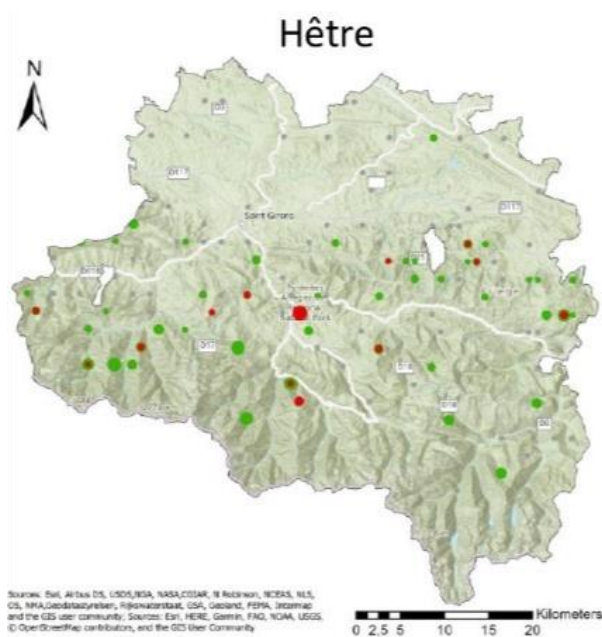


Annexe 30 : Effectifs de placettes par essence sur la période 2017-2021

	Période 2017-2021	Hêtre	Sapin	Châtaignier	Chêne pubescent	Chêne sessile	Chêne pédonculé	Total
Zone d'étude étendue	Nombre de placettes	256	103	143	211	58	194	975
	Nombre de placettes présentant des signes précoces de dépérissement (%)	36 (14.0%)	12 (11.7%)	69 (48.3%)	97 (46.0%)	20 (34.5%)	66 (34.0%)	298 (30.5%)
PNR PA	Nombre de placettes	48	9	27	19	9	28	119
	Nombre de placettes présentant des signes précoces de dépérissement (%)	11 (22.9%)	2 (22.2%)	9 (33.3%)	9 (47.4%)	5 (55.6%)	14 (50.0%)	49 (41.2%)

Annexe 31 : Présence et signes précoces de dépérissement des essences étudiées au sein du PNR des Pyrénées Ariégeoises entre 2017 et 2021





Légende

□ Périmètre du PNR des Pyrénées Ariégeoises
 Dépérissement 17-21 (nbr tige/Ha)

Nombre

- 0
- 334
- 668
- 1 002

Présence 17-21 (nbr tige/Ha)

Présence

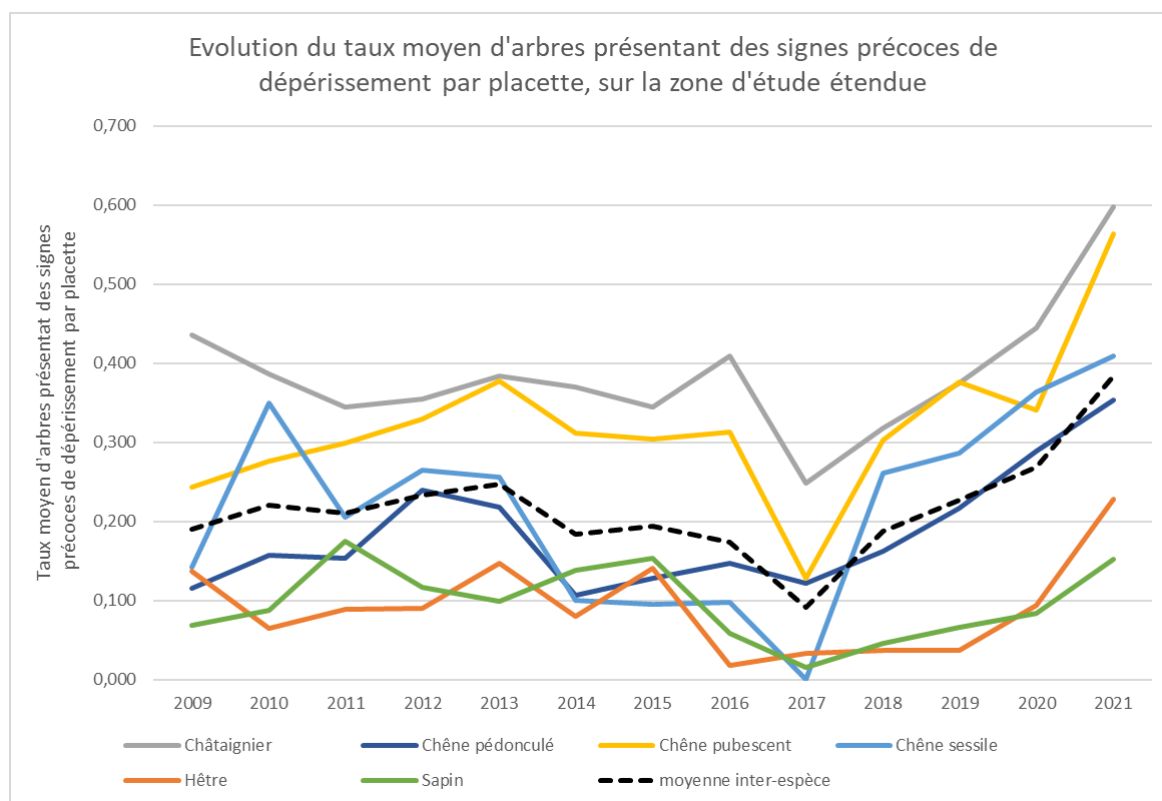
- Absent
- Présent

Nombre

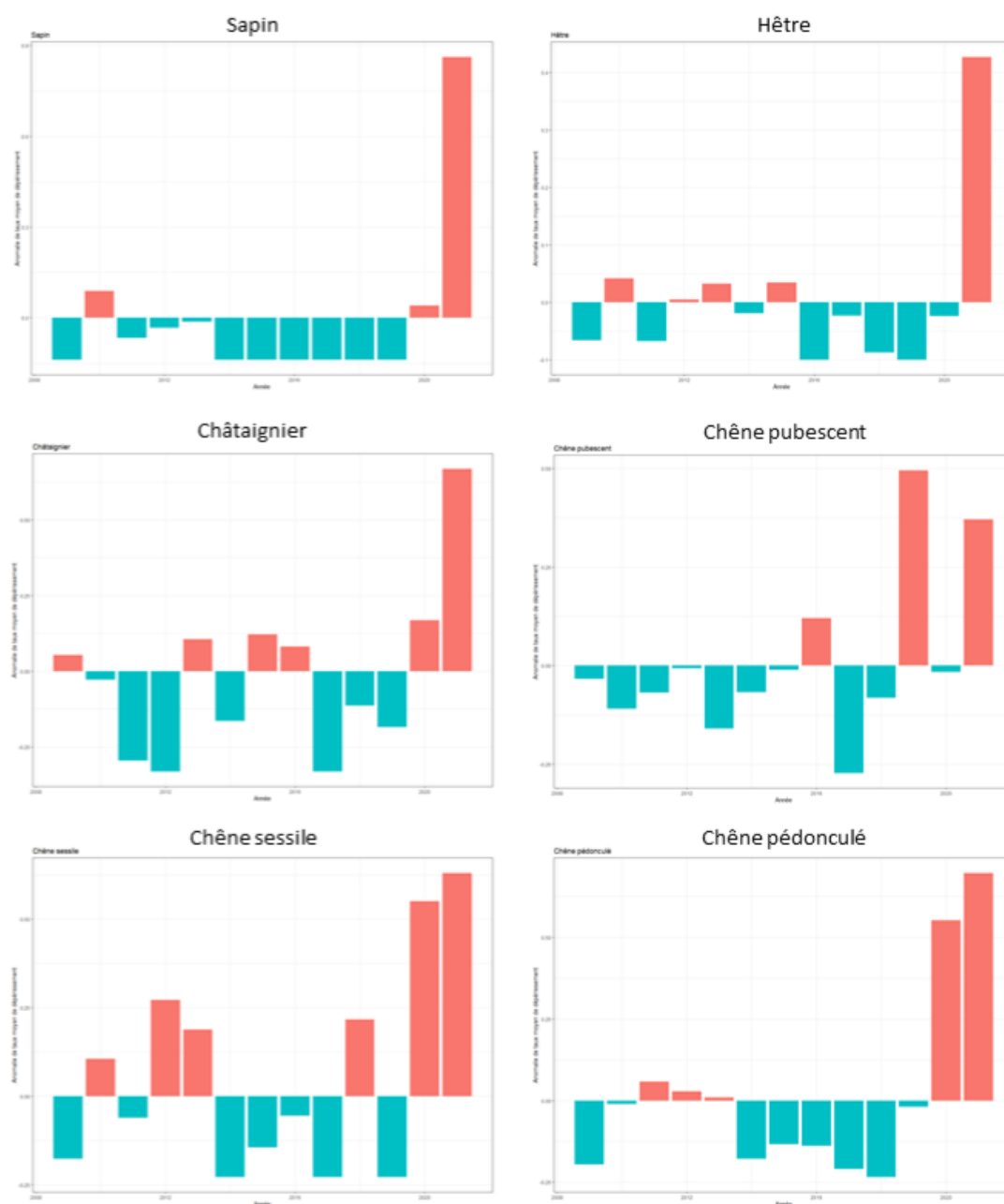
- 0
- 334
- 668
- 1 002

Auteur : GMN 2022
 Source : IGN 2017 - 2021

Annexe 32 : Taux moyen d'arbres par placette présentant des signes précoces de dépérissement à l'échelle de la zone d'étude étendue, par année et par essence sur la période 2009-2021 (Effectifs de placettes moyen/essence/année : Châtaignier 30,8 ; Hêtre 60,7 ; Chêne péd. 39,5 ; Sapin 28,9 ; Chêne pub. 55,5 ; Chêne ses. 16,6)

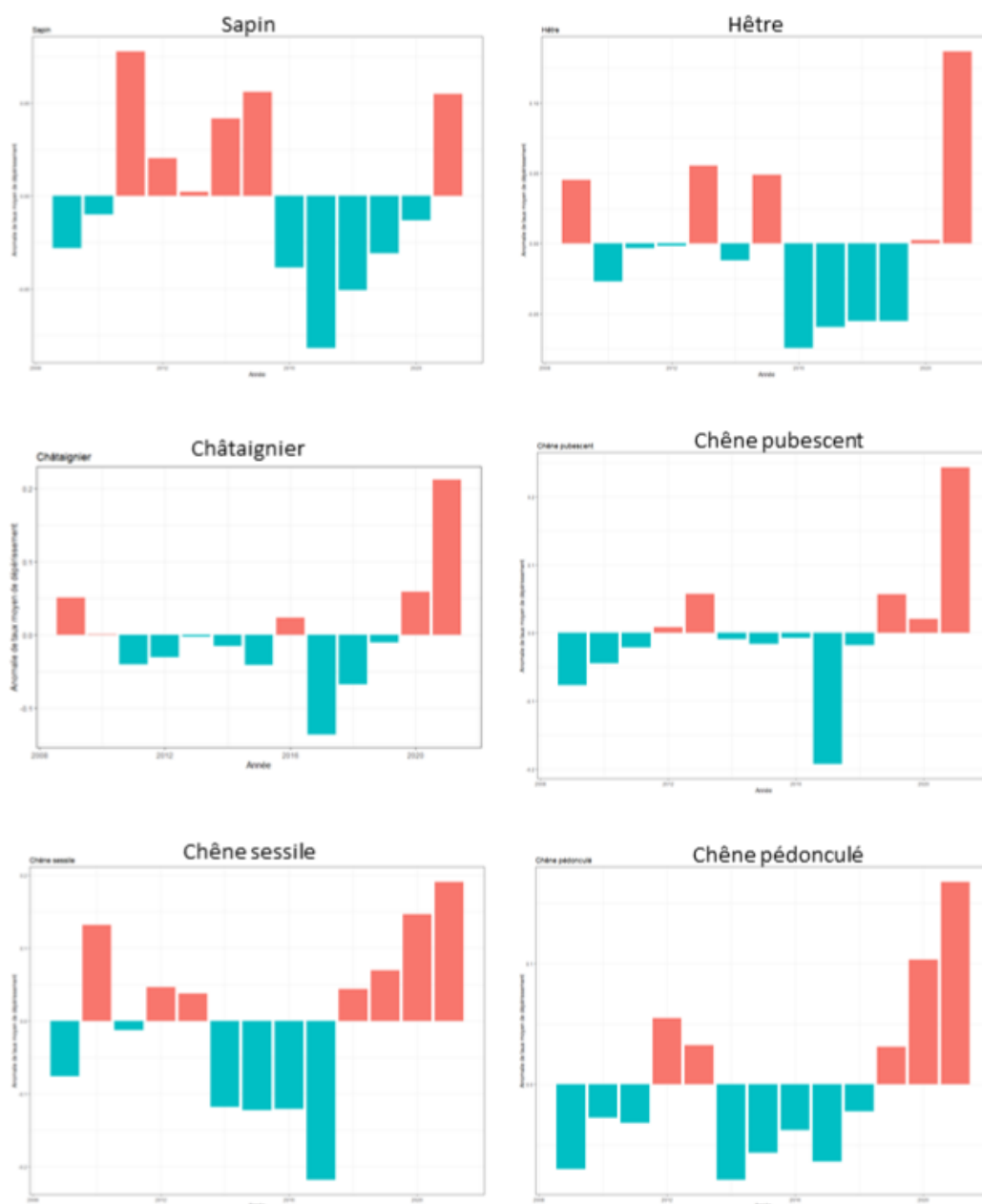


Annexe 33 : Anomalies de taux moyen de dépérissement précoces sur la période 2009-2021, sur le PNR PA pour les six essences étudiées



La figure ci-dessus permet d'illustrer le caractère "anormal" des signes précoces de dépérissement observés pour les années 2020 et 2021 : en effet, pour ces deux années et pour toutes les essences étudiées (2021 uniquement pour le Hêtre), les taux moyens d'arbres par placette présentant des signes précoces de dépérissement sont largement au-dessus de la moyenne de la période 2009-2021.

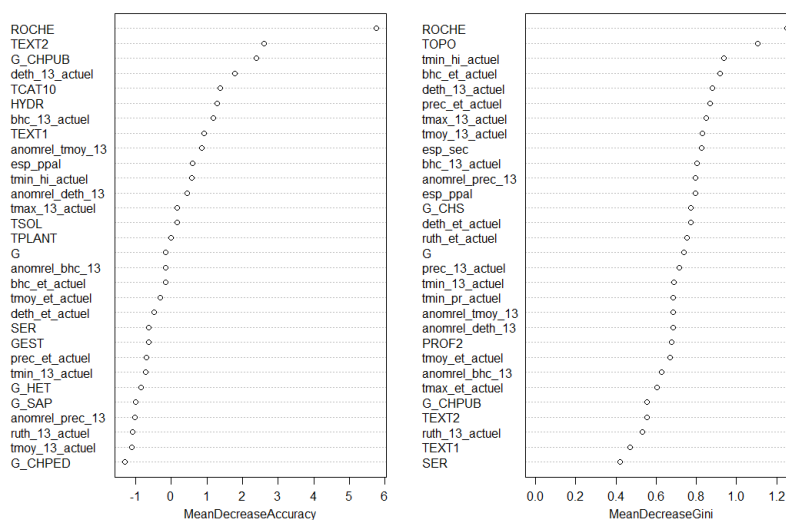
Annexe 34 : Anomalies de taux moyen de dépérissement précoces sur la période 2009-2021, sur la zone d'étude étendue pour les six essences étudiées



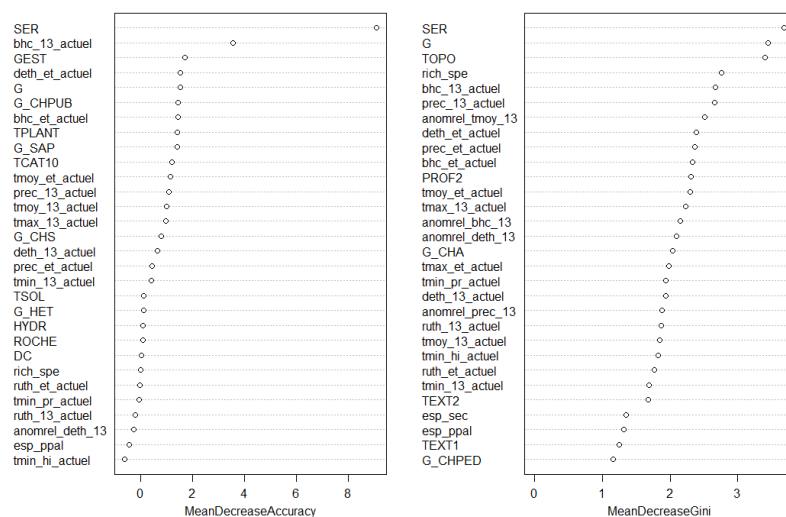
A titre comparatif avec la figure de l'annexe 33, la figure ci-dessus illustre l'évolution des anomalies de taux moyen d'arbres présentant des signes précoces de dépérissement à l'échelle de la zone d'étude étendue. Elle permet de constater que les années 2020-2021 ont également été "anormales" à l'échelle de la zone d'étude étendue. Toutefois, selon les essences, des anomalies positives se retrouvent également pour les années 2019 et 2018, ainsi que pour la période 2011-2015.

Annexe 35 : Importance des variables dans le modèle Random Forest selon les critères Mean Decrease Accuracy et Mean Decrease Gini

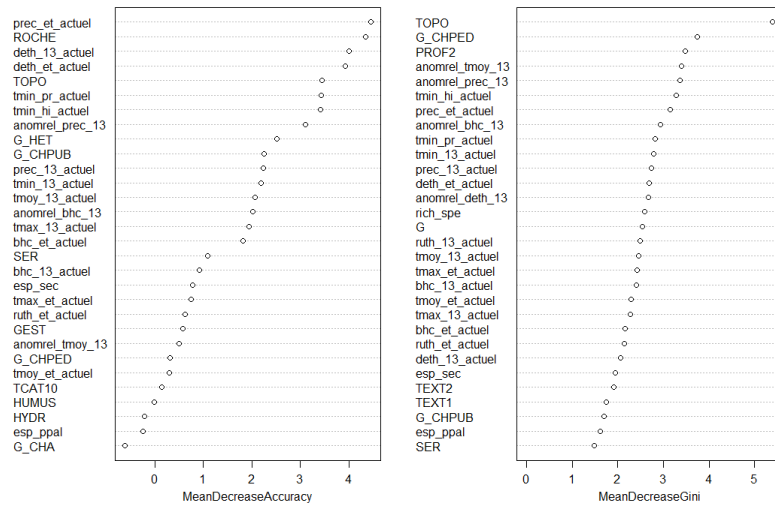
Importance des variables dans la prédiction du dépérissement du chêne sessile



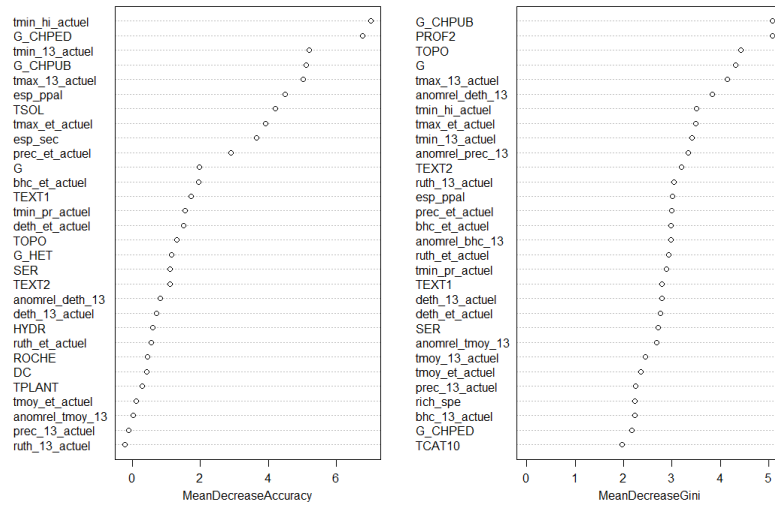
Importance des variables dans la prédiction du dépérissement du châtaignier



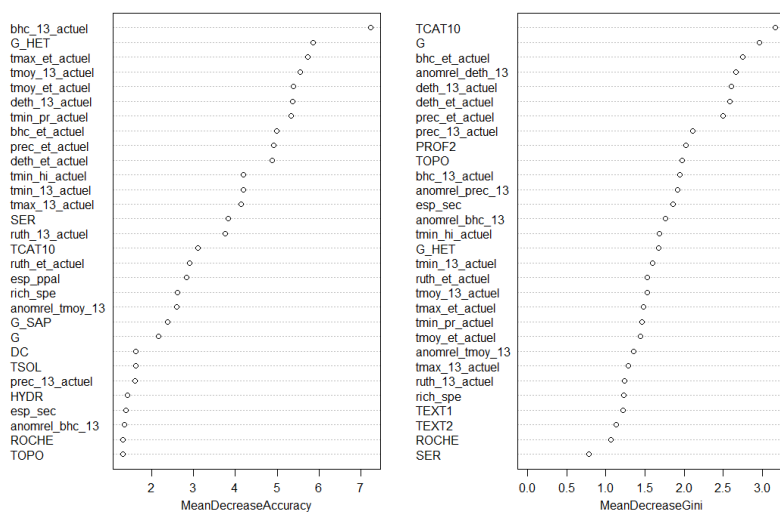
Importance des variables dans la prédiction du dépérissement du chêne pédonculé



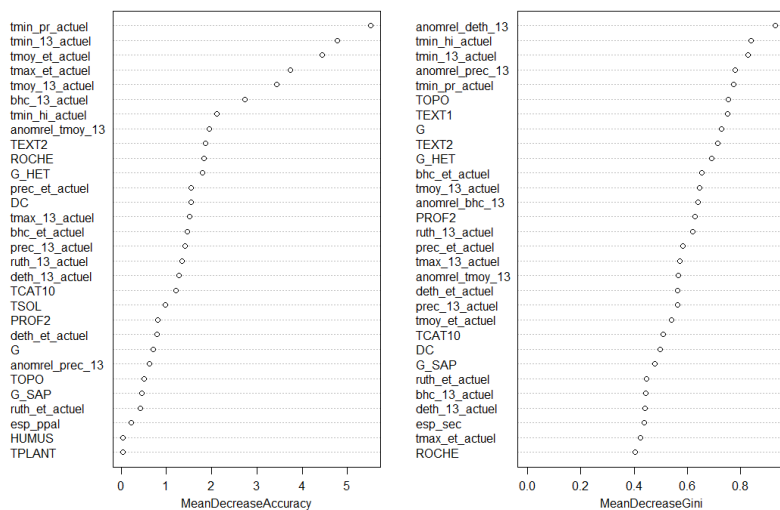
Importance des variables dans la prédiction du dépérissement du chêne pubescent



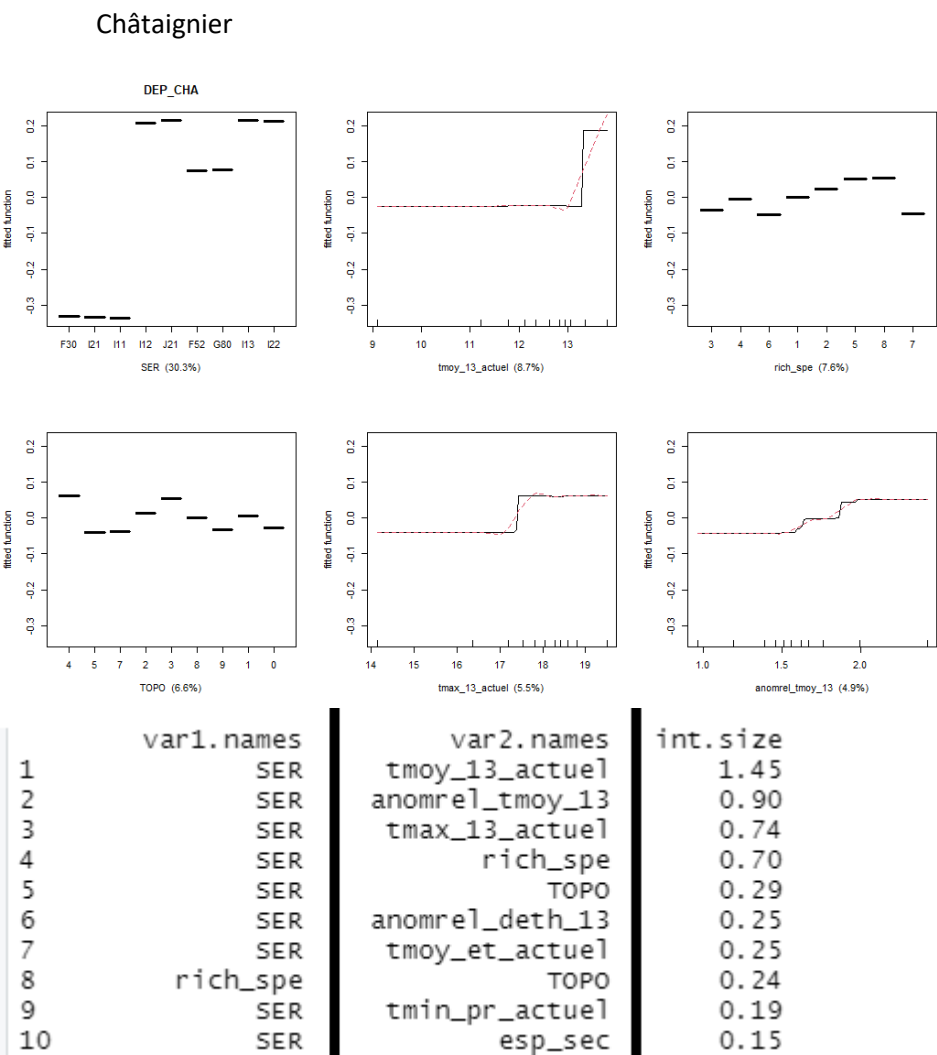
Importance des variables dans la prédiction du dépérissement du hêtre



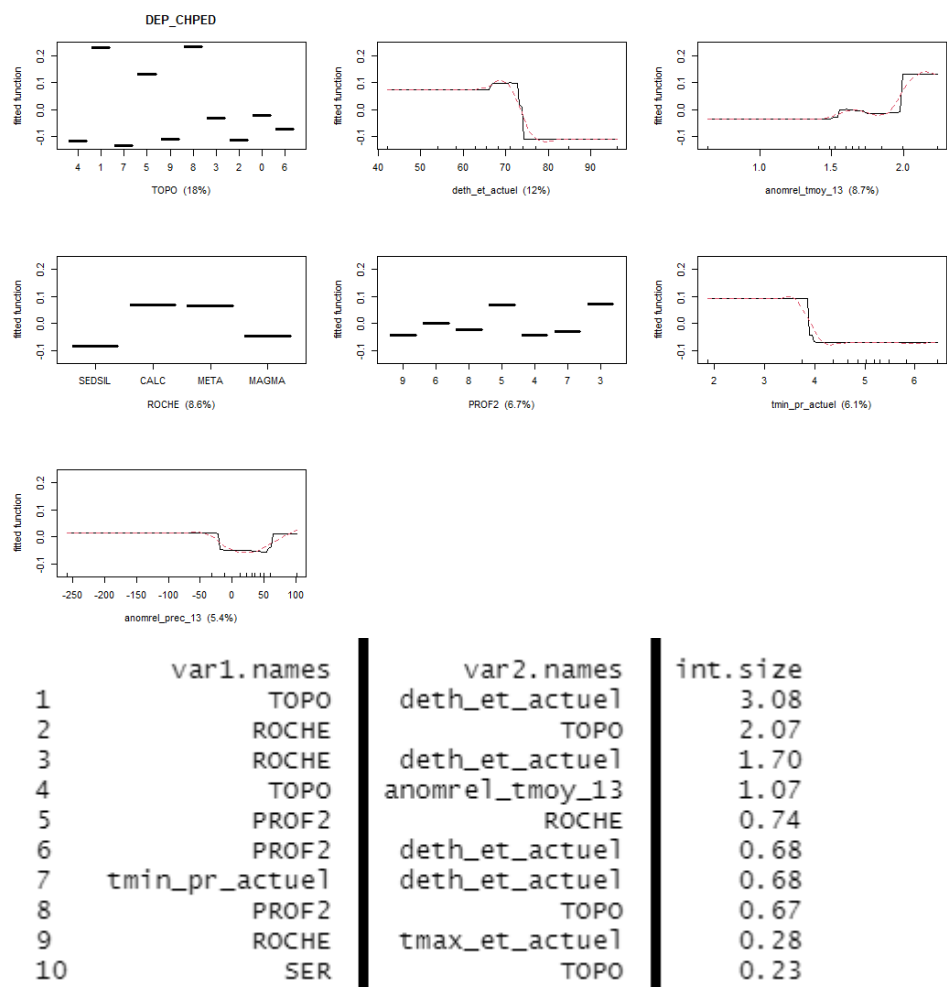
Importance des variables dans la prédiction du dépérissement du sapin



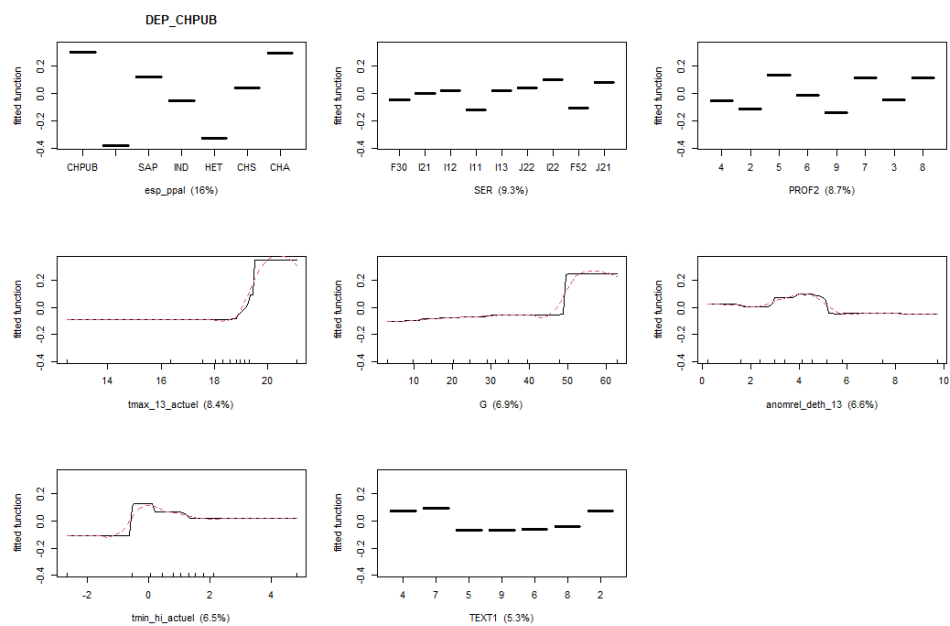
Annexe 36 : Résultat sous forme de graphiques des variables principales expliquant les signes de dépérissements de chaque espèce, ressortis par modèle BRT, et les interactions principales de ces variables entre elles



Chêne pédonculé

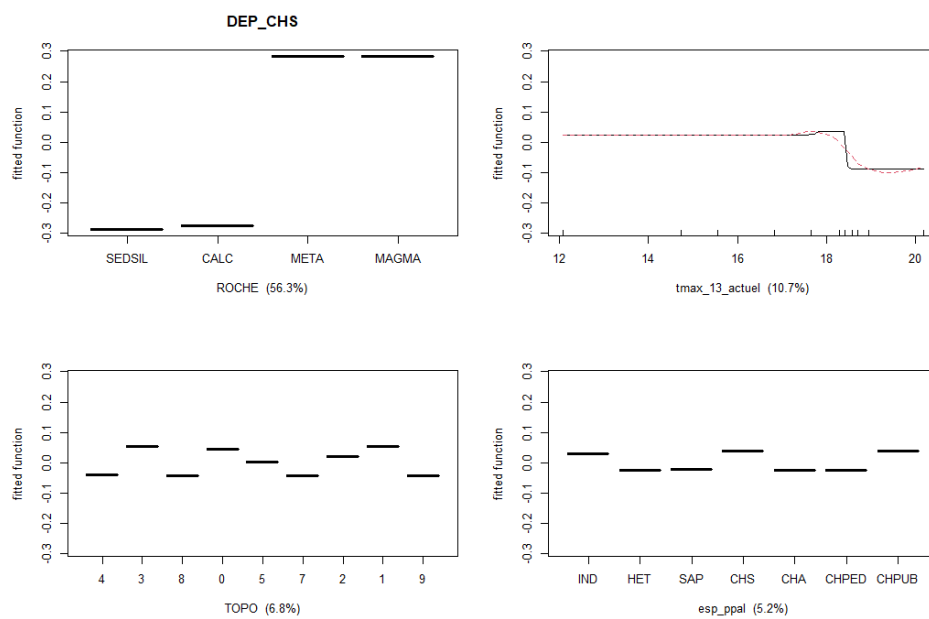


Chêne pubescent



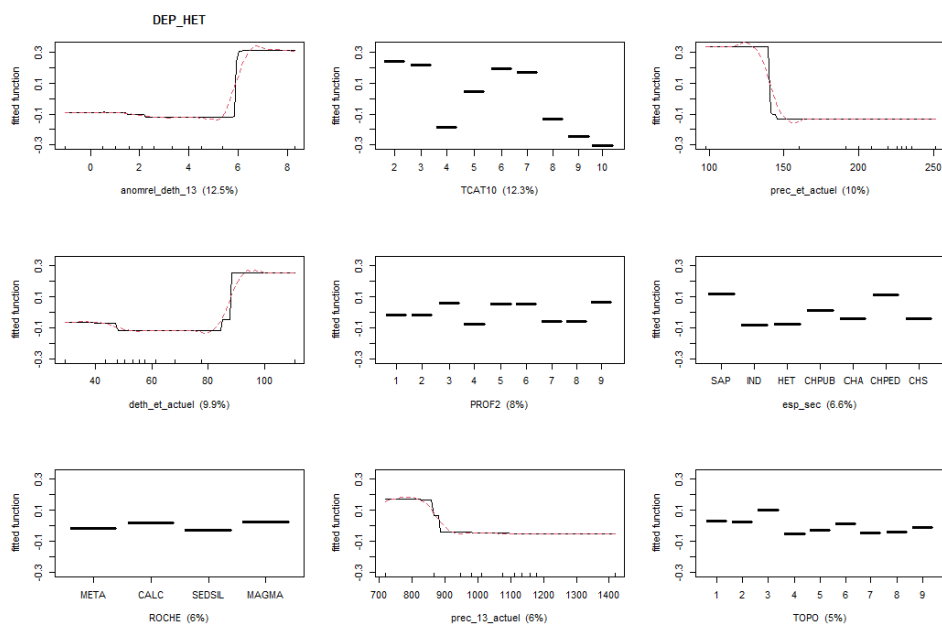
	var1.names	var2.names	int.size
1	SER	esp_ppal	6.34
2	esp_ppal	tmin_hi_actuel	2.42
3	esp_ppal	G	1.48
4	esp_ppal	tmin_13_actuel	1.46
5	G	tmin_13_actuel	1.08
6	anomrel_deth_13	PROF2	0.94
7	esp_sec	esp_ppal	0.72
8	esp_ppal	tmax_13_actuel	0.63
9	SER	TEXT1	0.46
10	esp_ppal	PROF2	0.39

Chêne sessile



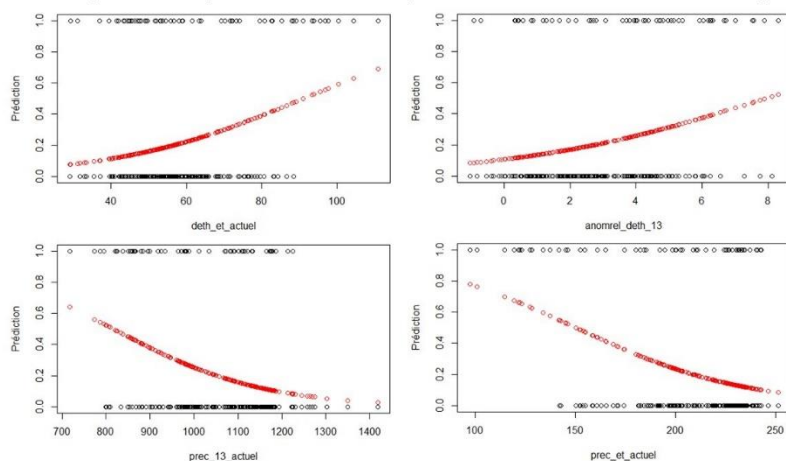
	var1.names	var2.names	int.size
1	ROCHE	tmax_13_actuel	0.82
2	esp_ppal	ROCHE	0.81
3	ROCHE	TOPO	0.60
4	ROCHE	anomrel_prec_13	0.40
5	esp_ppal	tmax_13_actuel	0.19
6	esp_sec	ROCHE	0.11
7	ROCHE	anomrel_tmoy_13	0.11
8	anomrel_tmoy_13	tmax_13_actuel	0.06
9	ROCHE	tmoy_et_actuel	0.05
10	G	ROCHE	0.04

Hêtre



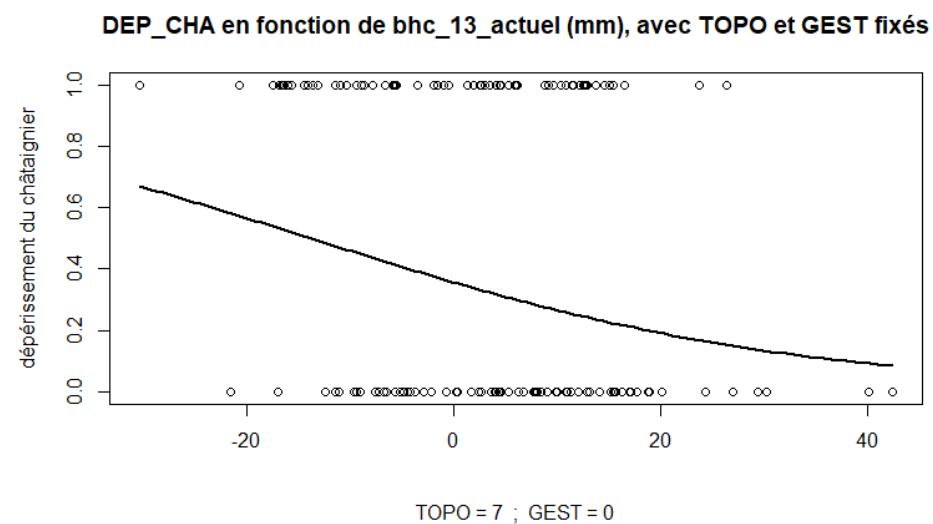
	var1.names	var2.names	int.size
1	ROCHE	prec_13_actuel	2.53
2	anomrel_deth_13	deth_et_actuel	1.33
3	esp_sec	PROF2	0.96
4	TCAT10	prec_13_actuel	0.95
5	TCAT10	prec_et_actuel	0.94
6	anomrel_deth_13	bhc_et_actuel	0.74
7	PROF2	deth_et_actuel	0.71
8	ROCHE	bhc_13_actuel	0.66
9	anomrel_deth_13	prec_et_actuel	0.64
10	anomrel_deth_13	TCAT10	0.61
11	esp_sec	TCAT10	0.58
12	anomrel_deth_13	TOPO	0.55
13	TCAT10	TOPO	0.53
14	TCAT10	bhc_13_actuel	0.51

Prédictions de probabilité de dépérissement du Hêtre faites à partir du modèle BRT en fonction de nos variables explicatives

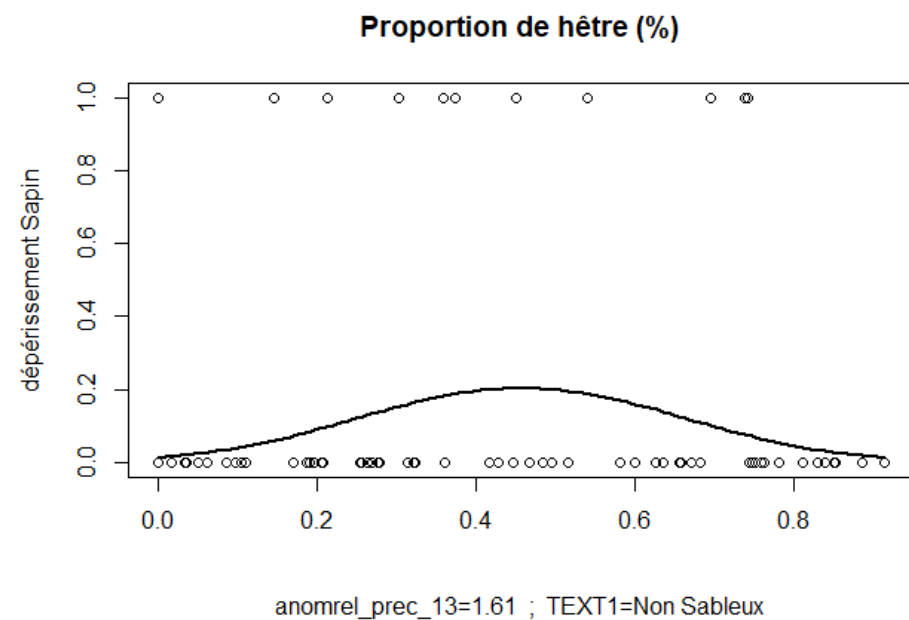


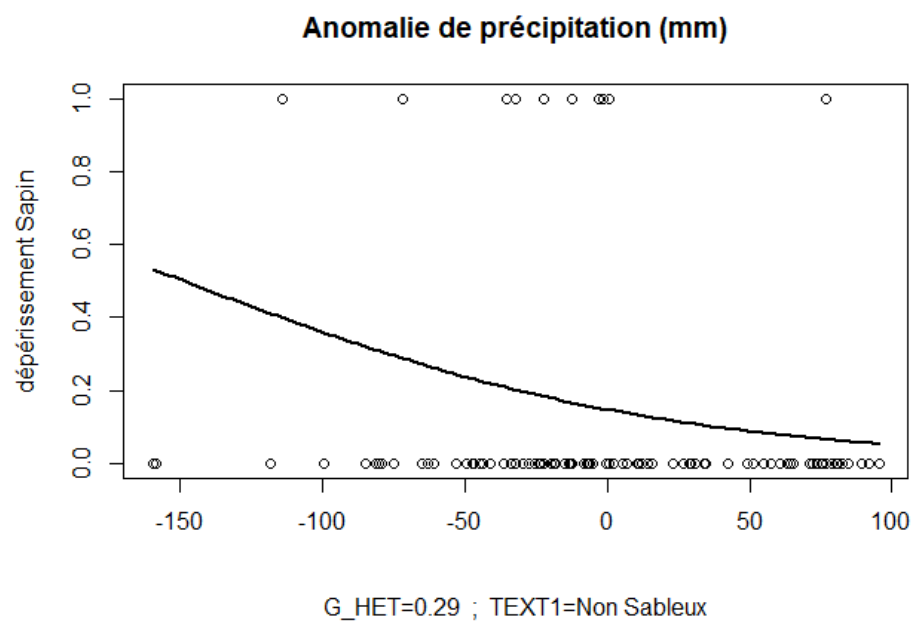
Annexe 37 : Courbes de réponse des variables significatives expliquant les signes de dépérissements de chaque espèce (châtaignier, sapin, hêtre), ressortis par le modèle linéaire généralisé (GLM)

GLM CHÂTAIGNIER

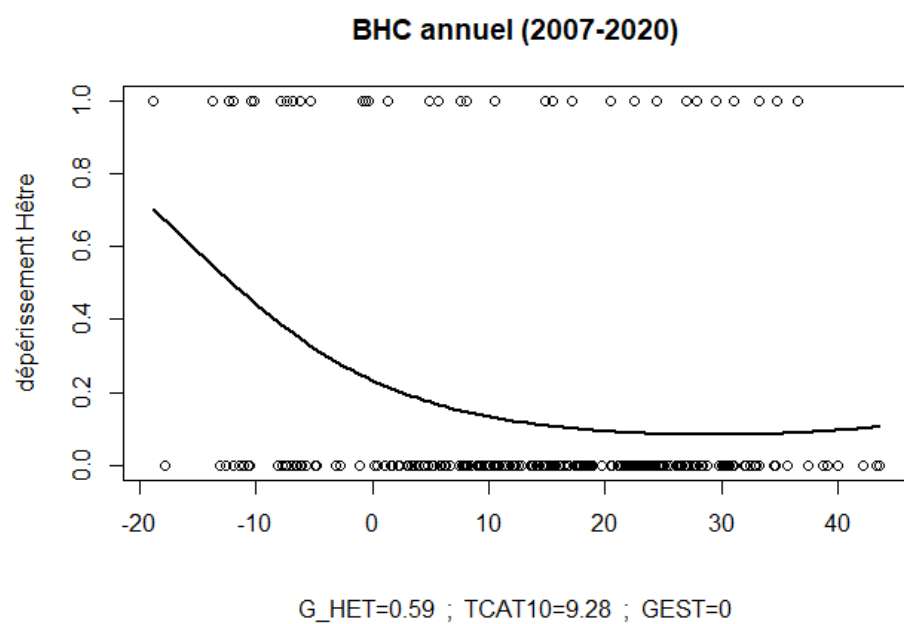


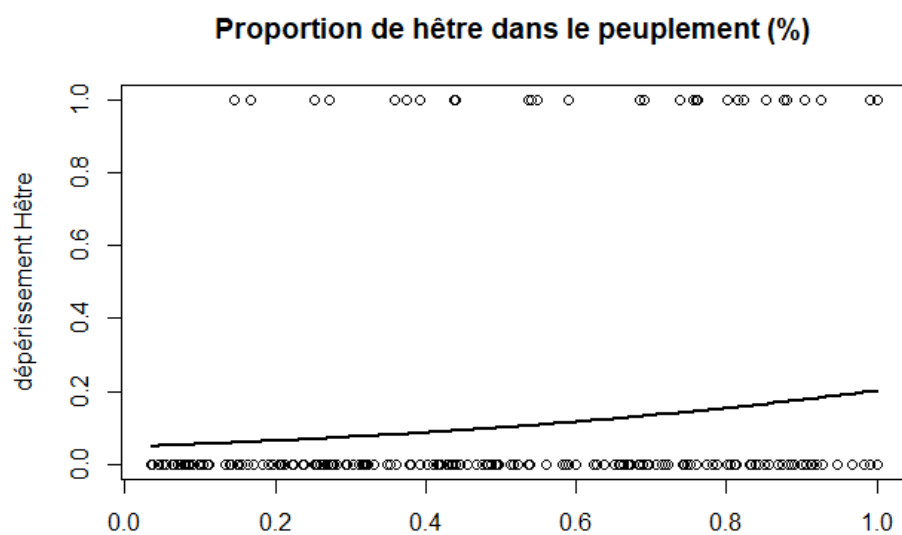
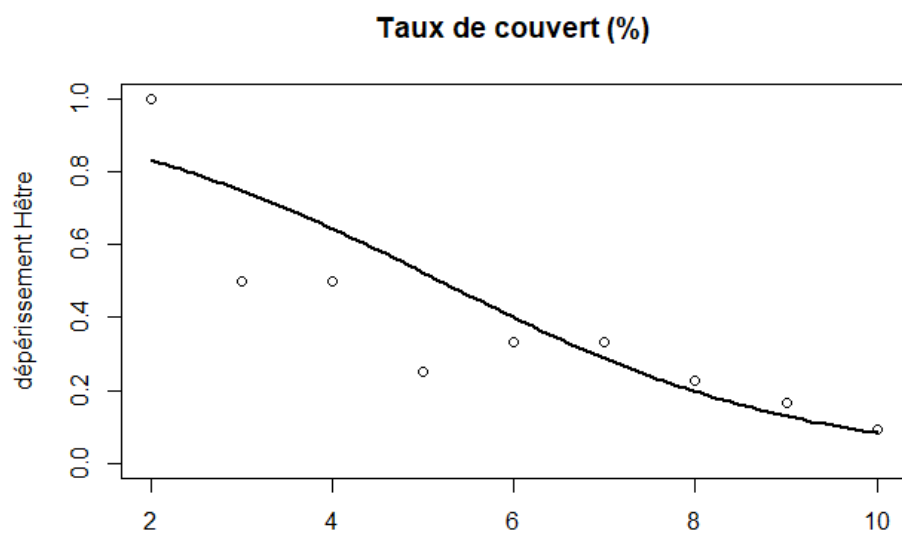
GLM SAPIN





GLM HETRE





Annexe 38 : Calculs des probabilités de présence des essences étudiées

Modèle GLM : Probabilité de présence du châtaigner :

$$P_C = \frac{1}{1 + e^{-(0.78551 - 0.04269 \cdot BHC - 1.33582 \cdot TOPO)}}$$

La variable TOPO doit être notée comme suit :

-1 pour la modalité 7 de la BD IFN (bas de versant)

-0 sinon

Modèle GLM : Probabilité de présence du sapin :

$$Ps = \frac{1}{1 + e^{-(-4.354105 + G_HET * 13.127120 - 14.349662 * G_HET^2 + 2.589872 * TEXT - 0.011813 * ANOMREL)}}$$

La variable TEXT doit être notée comme suit :

-1 pour les modalités 1 et 2 de la variable TEXT1 de la BD IFN (texture sableuse)

-0 sinon

Modèle GLM : Probabilité de présence du hêtre :

$$Ph = \frac{1}{1 + e^{-(2.4883293 - 0.0820332 * BHC + 0.0013892 * BHC^2 - 0.5001877 * TCAT - 1.1485631 * GEST + 1.6327580 * G_HET)}}$$

La variable GEST doit être notée comme suit :

-1 pour la modalité 2 de la variable GEST de la BD IFN (traces de gestion abondantes)

-0 sinon (modalités 0 ou 1 : pas ou peu de gestion)

Les annexes 39, 40, 41, 42, 43 et 44 présentent les principaux résultats obtenus par modèle, pour chacune des essences étudiées. Les flèches ↗ (resp. ↘) indiquent que la variable est corrélée (resp. anti corrélée) à la prédiction du dépérissement du modèle. Par exemple, ↘*prec_13_actuel* signifie que la vulnérabilité diminue lorsque les précipitations annuelles augmentent. Les figurés ↗↘ et ↘↗ correspondent à des courbes en cloche, respectivement convexe et concave.

Annexe 39 : Résultats obtenus pour le hêtre pour les trois modèles testés

Hêtre	GLM	RF	BRT
Performance du modèle	AUC = 83% Succès = 67% Sensibilité = 86% Spécificité = 64%	AUC = 65% Succès = 85% Sensibilité = 0 Spécificité = 98%	AUC = 96% Succès = 90% Sensibilité = 86% Spécificité = 91%
Variables liées au peuplement	↘ TCAT10 ↘ GEST ↗ G_HET	↘ TCAT10 ↘ G	↘ TCAT10 esp_sec : ↗ SAP ↗ CHPED
Variables pédologiques et topographiques			PROF2 : = ROCHE : = TOPO : ↗ mi-versant concave
Variables du climat actuel	↘↗ bhc_13_actuel	↘↗ deth_et_actuel ↘↗ deth_13_actuel ↘↗ bhc_et_actuel ↘ prec_et_actuel ↘ prec_13_actuel	↘ prec_et_actuel ↗ deth_et_actuel ↘ prec_13_actuel
Variables d'évolution du climat		↗ anomrel_deth_13 ↘ anomrel_prec_13	↗ anomrel_deth_13

Annexe 40 : Résultats obtenus pour le sapin pour les trois modèles testés

Sapin	GLM	RF	BRT
Performance du modèle	AUC = 84% Succès= 74% Sensibilité = 91% Spécificité = 72%b	AUC = 53% Succès = 88% Sensibilité = 0 Spécificité = 99%	Non adapté
Variables liées au peuplement	↗ ↘ G_HET		
Variables pédologiques et topographiques	TEXT1: ↗ sableux	↗ PROF2 TOPO : ↗ fond de vallon ↗ mi-versant concave TEXT : ↗ sols limoneux ↗ sols sableux ↗ sols limono-sableux	
Variables du climat actuel		↗ tmin_13_actuel ↗ tmin_pr_actuel ↗ tmin_hi_actuel ↘ bhc_et_actuel	
Variables d'évolution du climat	↘ anomrel_prec_13	↘ anomrel_prec_13	

Annexe 41 : Résultats obtenus pour le châtaignier pour les trois modèles testés

Châtaignier	GLM	RF	BRT
Performance du modèle	AUC = 74% Succès = 73% Sensibilité = 64% Spécificité = 81%	AUC = 53% Succès = 55% Sensibilité = 54% Spécificité = 57%	AUC = 93% Succès = 86% Sensibilité = 94% Spécificité = 78%
Variables liées au peuplement	↘ GEST		=(↗) rich_spe
Variables pédologiques et topographiques	TOPO : ↘ bas de versant	SER : ↗ d'Ouest en Est TOPO : ↗ vallée large ↗ terrain plat ↗ mi-versant concave	SER : ↗ d'Ouest en Est (et Sud-Est) TOPO : ↗ mi-versant concave ↗ mi-versant rectiligne
Variables du climat actuel	↘ bhc_13_actuel	↘ prec_et_actuel ↘ prec_13_actuel ↘ bhc_13_actuel ↗ deth_et_actuel	↗ tmoy_13_actuel ↗ tmax_13_actuel
Variables d'évolution du climat		↗ anomrel_tmoy_13	↗ anomrel_tmoy_13

Annexe 42 : Résultats obtenus pour le chêne pubescent pour les trois modèles testés

Chêne pubescent	RF	BRT
Performance du modèle	AUC = 63% Succès = 60%	AUC = 97% Succès = 91%

	Sensibilité = 45% Spécificité = 72%	Sensibilité = 95% Spécificité = 89%
Variables liées au peuplement	↗ G ↗ G_CHPUB Esp_ppal : ↗ Chêne pubescent ↗ Châtaignier	↗ G Esp_ppal : ↗ CHPUB ↗ CHA (↗ SAP)
Variables pédologiques et topographiques	↗ PROF2 TOPO : ↗ vallée large ↗ terrains plats	SER : ↗ vers le Sud-Est = PROF2 TEXT1 : ↗ sable limoneux ↗ limon sableux ↗ argile limoneuse
Variables du climat actuel	↗ tmax_13_actuel ↗ tmax_et_actuel ↗ ↘ tmin_hi_actuel	↗ tmax_13_actuel ↗ ↘ tmin_hi_actuel
Variables d'évolution du climat	↗ anomrel_deth_13 ↗ ↘ anomrel_prec_13	↗ ↘ anomrel_deth_13

Annexe 43 : Résultats obtenus pour le chêne pédonculé pour les trois modèles testés

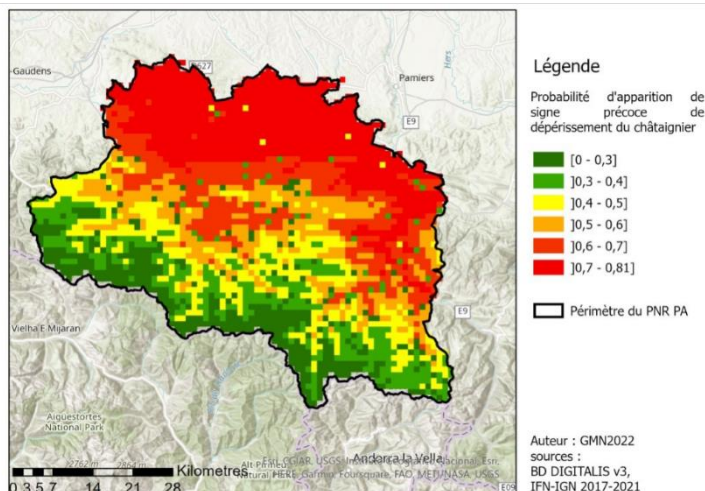
Chêne pédonculé	RF	BRT
Performance du modèle	AUC = 57% Succès = 62% Sensibilité = 15% Spécificité = 85%	AUC = 91% Succès = 81% Sensibilité = 86% Spécificité = 78%
Variables liées au peuplement	↗ rich_spe	
Variables pédologiques et topographiques	↗ PROF2 TOPO : ↗ en haut de versant ↗ en milieu de versant	=(↘) PROF2 TOPO : ↗ en sommet ↗ en milieu de versant convexe (↗ en vallée large) ROCHE : ↗ calcaire ↗ métamorphique
Variables du climat actuel	↗ tmin_hi_actuel ↗ tmin_pr_actuel	↘ deth_et_actuel ↘ tmin_pr_actuel
Variables d'évolution du climat	↗ anomrel_tmoy_13 ↘ anomrel_prec_13	↗ anomrel_tmoy_13 ↘ ↗ anomrel_prec_13

Annexe 44 : Résultats obtenus pour le chêne sessile pour les trois modèles testés

Chêne sessile	RF	BRT
Performance du modèle	AUC = 51% Succès = 58% Sensibilité = 16% Spécificité = 79%	AUC = 94% Succès = 88% Sensibilité = 100% Spécificité = 82%

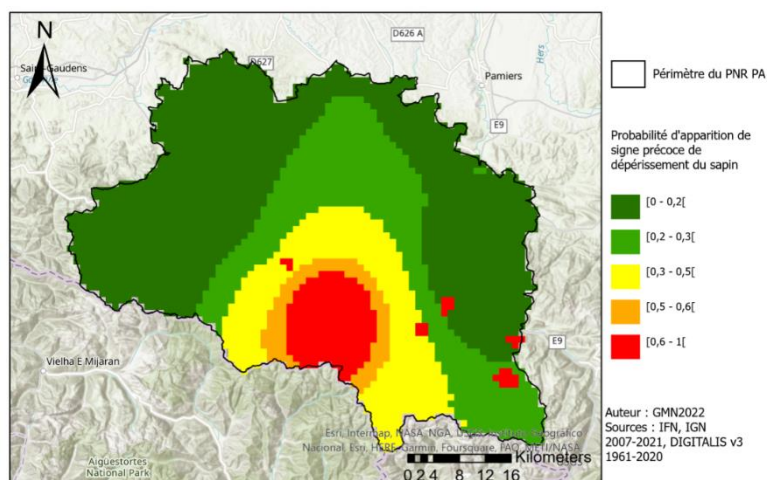
Variables liées au peuplement	Esp_sec : ↗ sapin ↗ G_CHS	Esp_ppal : ↗CHPUB ↗CHS
Variables pédologiques et topographiques	TOPO : ↗ en fond de vallon ROCHE : ↗ métamorphique	ROCHE : ↗ magmatique ↗ métamorphique TOPO : ↗ terrain plat ↗ sommet ↗ mi-versant concave
Variables du climat actuel	↘ deth_13_actuel ↘ deth_et_actuel ↘ tmin_hi_actuel ↘ ↗ bhc_et_actuel	↘ tmax_13_actuel
Variables d'évolution du climat	↘ anomrel_prec_13	

Annexe 45 : Carte de probabilité d'apparition de signe précoce de dépérissement pour le châtaignier



Pour le châtaignier, on note une probabilité d'apparition de signe précoce de dépérissement plutôt élevé, avec globalement la moitié Nord – Nord Est du parc à au moins plus de 50% de probabilité de dépérissement. Les relevés IFN signalent principalement des placettes de châtaigniers dans la bande intermédiaire de dépérissement entre 40 et 60% (zone de piémonts, cf Figure@MLK). D'après le modèle, la topographie et les conditions climatiques de bilan hydrique annuel moyen expliquent le plus la probabilité de dépérissement du châtaignier. Ces variables sont favorables à l'espèce en zone de montagne, tandis qu'elles sont défavorables en zone de plaine et de piémonts, selon un gradient Nord – Sud ou bien d'altitude. Il est à noter que le châtaignier est une espèce anciennement introduite (Thomas et Busti 2009), qui a pu être planté en limite de station favorable. Avec d'une part la déprise des vergers et plantations de châtaignier (perte d'actions anthropiques favorables au maintien de l'espèce) et d'autre part les changements climatiques, le dépérissement peut aussi être mal représenté dans notre modèle GLM. Ces mêmes évolutions climatiques et de gestion sont potentiellement favorables à l'apparition ou le renforcement des agresseurs et maladies du châtaigniers, qui présente rapidement des signes de dépérissement en cas d'agression (CNPFP, CRPF Poitou-Charentes, 2014), (Robin 2017).

Annexe 46 : Carte de probabilité d'apparition de signe précoce de dépérissement pour le sapin pectiné



Concernant le sapin pectiné, le modèle GLM a retenu les variables d'anomalie relative de précipitation annuelle, la texture du sol en redéfinissant deux classes : sable ou sable limoneux et autre, et la surface terrière du hêtre qui a été moyennée ici, s'agissant d'une donnée de placette. La cartographie de la vulnérabilité du sapin se retrouve donc très simplifiée : on remarque les "tâches" rouges qui correspondent à des sols sableux qui ont une forte probabilité (entre 0,6 et 1) d'entraîner des signes précoces de dépérissement du sapin. Puis un gradient circulaire partant de la commune d'Ustou qui reprend le gradient des anomalies relatives de précipitation. L'évolution à la baisse des précipitations annuelles moyennes entraîne une plus forte probabilité de dépérissement du sapin. Le modèle GLM retenu ne prend pas en compte la donnée de l'altitude ce qui simplifie grandement la cartographie de sa vulnérabilité. Finalement, il est à repréciser que la carte de probabilité d'apparition de signe précoce de dépérissement du sapin pectiné ne représente pas les effets des variables de peuplement, notamment sa présence en mélange avec le hêtre, qui influe significativement sur sa vulnérabilité.

Bibliographie de la partie 3 :

Petit, S, S Cordier, H Claessens, Q Ponette, C Vincke, D Marchal, et F Weissen. 2017. « Fichier écologique des essences : Hêtre commun ». Forêt.Nature. Accord-Cadre de Recherches et Vulgarisation Scientifique.

Wühlisch, Georg von. 2012. « Fiche technique d'EUFORGEN pour la conservation génétique pour l'utilisation du hêtre commun (*Fagus sylvatica* L.) ». Bioversity International, Rome, Italie, et Ministère de l'Agriculture, Paris, France.

RAMEAU, Jean-Claude, Dominique Mansion, et G. Dumé. 1989. Flore forestière française: Plaines et collines. Forêt privée française. Vol. 1. 3 vol. Flore forestière française. Paris: Institut pour Le Développement Forestier.

Thomas, Régis, et David Busti. 2009. « Châtaigne et marron : l'ethnobotanique du Châtaignier ». Publication. ENS de Lyon - Département de biologie. 2009. <https://biologie.ens-lyon.fr/ressources/Biodiversite/Documents/la-plante-du-mois/chataigne-et-marron-lethnobotanique-du-chataignier>.

RAMEAU, J.-C, D. MANSION, G. DUME, et C. GAUBERVILLE. 2008. Flore forestière française Région méditerranéenne Tome 3. Idf, Broché. Vol. 1. 3 vol. Flore forestière française. Paris: Institut pour Le Développement Forestier.

F. Romane, G. Bonin. Chêne vert et chêne pubescent : histoire, principaux groupements, situation actuelle. Forêt Méditerranéenne, 1996, XVII (3), pp.119-128

Département Santé des Forêts, INRA Ephytia. 2018, 2018. <https://ephytia.inra.fr/fr/C/18517/Forets-Hetre>.

Lebourgeois, François. 2006. « Sensibilité au climat des Chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies ». *Revue Forestière Française* 53 (août): 29-44. <https://doi.org/10.4267/2042/5720>.

R, Sruthi E. 2021. « Random Forest | Introduction to Random Forest Algorithm ». *Analytics Vidhya* (blog). 17 juin 2021. <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/06/understanding-random-forest/>.

Thomas, Régis, et David Busti. 2009. « Châtaigne et marron : l'ethnobotanique du Châtaignier ». Publication. ENS de Lyon - Département de biologie. 2009. <https://biologie.ens-lyon.fr/ressources/Biodiversite/Documents/la-plante-du-mois/chataigne-et-marron-lethnobotanique-du-chataignier>.

Centre National de la Propriété Forestière, Délégation régionale (CRPF) de Poitou-Charentes. 2014. « Dépérissement du châtaignier : état des lieux de la ressource, outils de diagnostic, adaptation des itinéraires sylvicoles. » CENTRE NATIONAL DE LA PROPRIETE FORESTIERE Délégation régionale (CRPF) de Poitou-Charentes. https://nouvelle-aquitaine.cnpf.fr/sites/nouvelle-aquitaine/files/2022-02/rapport_final_aout_2014.pdf.

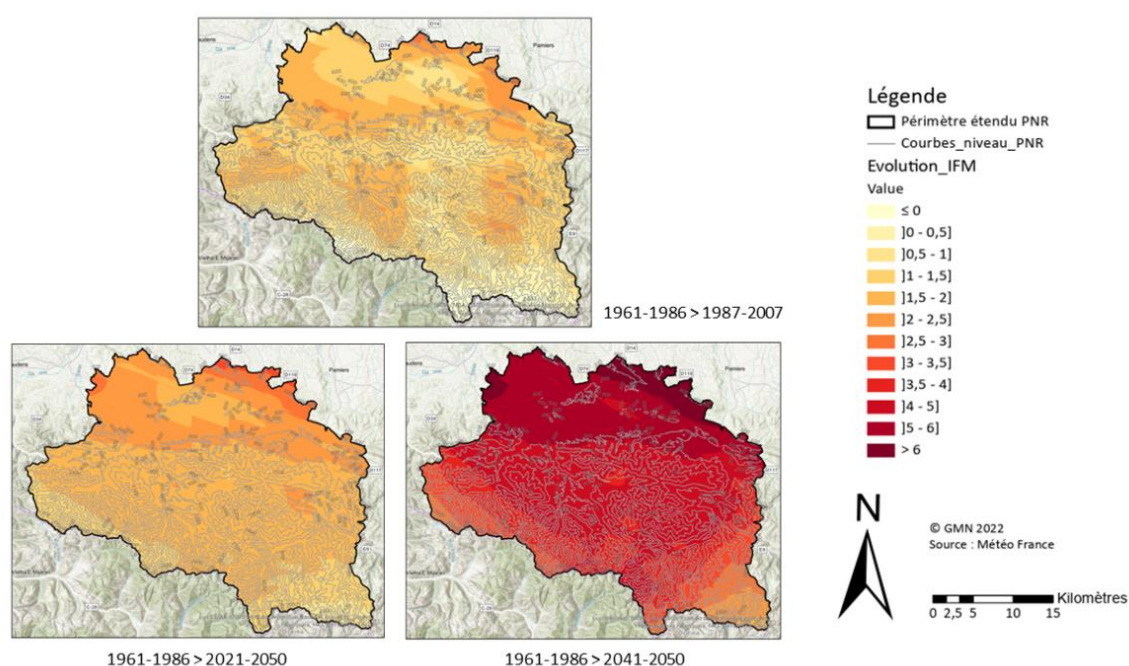
Thomas, Régis, et David Busti. 2009. « Châtaigne et marron : l'ethnobotanique du Châtaignier ». Publication. ENS de Lyon - Département de biologie. 2009. <https://biologie.ens-lyon.fr/ressources/Biodiversite/Documents/la-plante-du-mois/chataigne-et-marron-lethnobotanique-du-chataignier>.

4. Annexes du sujet 4 : Cartographie du risque incendie afin de déterminer les zones vulnérables sur le PNRPA

Annexe 47 : Tableau des différents indices météorologiques pour caractériser le risque incendie (Dauriac, 2004)

Rôle	Indices	Libellé	Pays	Références
Propagation du feu	IMPI	Indice Meteorologico di Prevenzione per Incendi	Italie	Palmieri et Cozzi 1983 Palmieri <i>et al.</i> 1992, 1993
	ISI	Initial Spread Index	Canada	Van Wagner, 1987
	GFDL	Global Fire Danger Meters	Australie	Noble <i>et al.</i> , 1980
Inflammabilité de la litière fine	FMM	Fuel Moisture Model	Australie	McArthur, 1967
	EMC	Equilibrium Moisture Content	Canada	Simard, 1968
	FFMC	Fine Fuel Moisture Code	Canada	Van Wagner, 1987
	NFDRS 1h	National Fire Danger Rating System Humidité au pas de temps horaire	États-Unis	Deeming <i>et al.</i> , 1977
	BEHAVE	BEHAVE fine fuel moisture model	États-Unis	Rothermel <i>et al.</i> , 1986 Andrews et Chase, 1990
Inflammabilité de la biomasse et de la litière grossière	NFDRS 10-100h	National Fire Danger Rating System Humidité au pas de temps de 10 et 100 heures	États-Unis	Bradshaw <i>et al.</i> , 1983
	NFDRS 1000h	National Fire Danger Rating System Humidité au pas de temps de 1000h	États-Unis	Fosberg <i>et al.</i> , 1981
	KBDC et KBDI	Keetch-Byram Drought Code et Keetch-Byram Dryness Index	États-Unis	Keetch et Byram, 1968 révisé en 1988
	DMC	Drought Moisture Code	Canada	Van Wagner, 1987
	DC	Duff Code	Canada	Van Wagner, 1987
Détermination des jours à risque extrême	FWI	Fire Weather Index	Canada	Van Wagner, 1987
	BUI	Build Up Index	Canada	Van Wagner, 1987
	Orieux Index	Orieux Index	France	Orieux, 1979
	Risque numérique	Risque numérique	France	Drouet et Sol 1993, Sol 1990
	I87	Carrega Index	France	Carrega, 1990
	ICONA	Probabilité d'ignition par la méthode ICONA	Espagne	Icona, 1988 et 1993
	Irepi Index	Irepi Index	Italie	Bovio <i>et al.</i> , 1984
	Index Portugais	Index Portugais	Portugal	INMG 1988, Gonçalves et Lourenço 1990
	FFFI	Finnish Forest Fire Index	Finlande	Heikinheimo <i>et al.</i> , 1998

Annexe 48 : Etude de l'évolution de l'IFM entre les différentes périodes étudiées



Evolution de l'IFM à la période actuelle, l'horizon H1 et l'horizon H2 par rapport à la période de référence (1961-1987)

Il est possible d'observer comment l'IFM varie entre chaque combinaison de période. La comparaison à la période de référence 1961-1987 des trois autres périodes étudiées est synthétisée sur cette cartographie. L'échelle plus fine de cette représentation permet de constater des évolutions de l'IFM plus locales que précédemment.

Ainsi, le gradient de l'IFM selon l'altitude est toujours présent pour les cartes des périodes H1 et H2. Il apparaît en revanche plus nuancé sur la carte du présent, certaines zones présentant une évolution plus rapide que d'autres.

L'analyse des autres cartes de variations de l'IFM montre que les évolutions majeures ont lieu entre le présent et le passé et entre les deux périodes futures.

Annexe 49 : Tableau de répartition des formations végétales de la version 2 de la BD Forêt de l'IGN selon les 4 niveaux de sensibilité détaillés dans le rapport de la mission interministérielle (Duche et al., 2011)

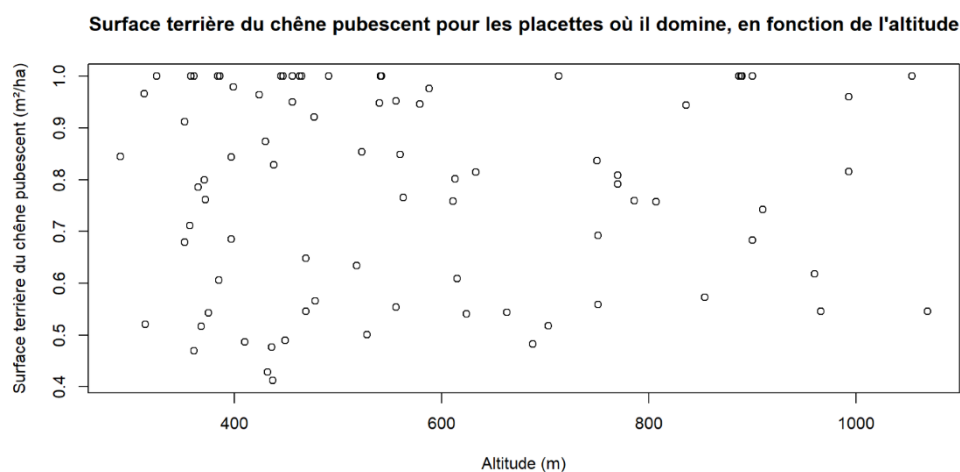
Sensibilité des formations végétales			
Faible (1)	Modérée (2)	Assez forte (3)	Forte (4)
CODE_TFV = FF1-09-09	CODE_TFV = FF2G61-61	CODE_TFV = LA6	CODE_TFV = LA4
CODE_TFV = FF1G01-01	CODE_TFV = FF2-64-64	CODE_TFV = FF1-10-10	CODE_TFV = FF1G06-06
CODE_TFV = FF1-14-14	CODE_TFV = FF2G58-58	ESSENCE = "Feuillus" et ALT < 1100 m	CODE_TFV = FF2-57-57
ESSENCE = "Feuillus" et ALT > 1100 m	CODE_TFV = FF2-63-63		CODE_TFV = FF2-51-51
	ESSENCE = "Conifères" et 800 < ALT < 1600 m		CODE_TFV = FF2G53-53
	ESSENCE = "Mixte" et 800 < ALT < 1600 m		CODE_TFV = FF2-52-52
			ESSENCE = "Conifères" et ALT < 800 m et > 1600 m
			ESSENCE = "Mixte" et ALT < 800 m et > 1600 m

LEGENDE		Strates herbacées et arbustives, pas d'essence précisée
		Peuplements purs, essence précisée
		Mélanges d'essences, intervention du critère altitude

Ce tableau récapitule les opérations de sélection effectuées sur la table attributaire de la BD Forêt de l'IGN (V2) afin de répartir les différents polygones dans les catégories de sensibilité du rapport de mission interministérielle.

Annexe 50 : A) Représentations graphiques de la surface terrière du chêne pubescent sur les placettes de l'IFN où il domine et B) altitudes minimale, moyenne et maximale où l'essence prédomine

A)

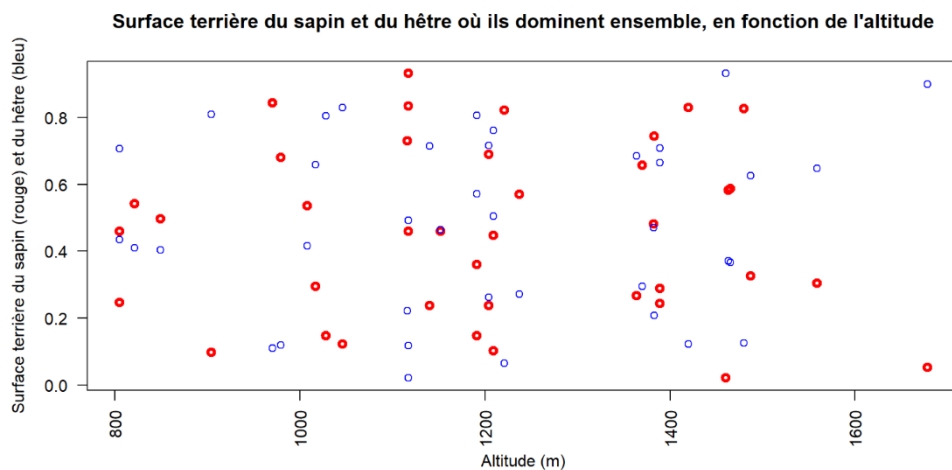


B)

Altitude minimale	Altitude moyenne	Altitude maximale
290 m	568.5 m	1069 m

Annexe 51 : A) Représentations graphiques de la surface terrière du sapin (en rouge) et du hêtre (en bleu) sur les placettes de l'IFN où ils dominent et B) altitudes minimale, moyenne et maximale où ces essences prédominent ensemble

A)



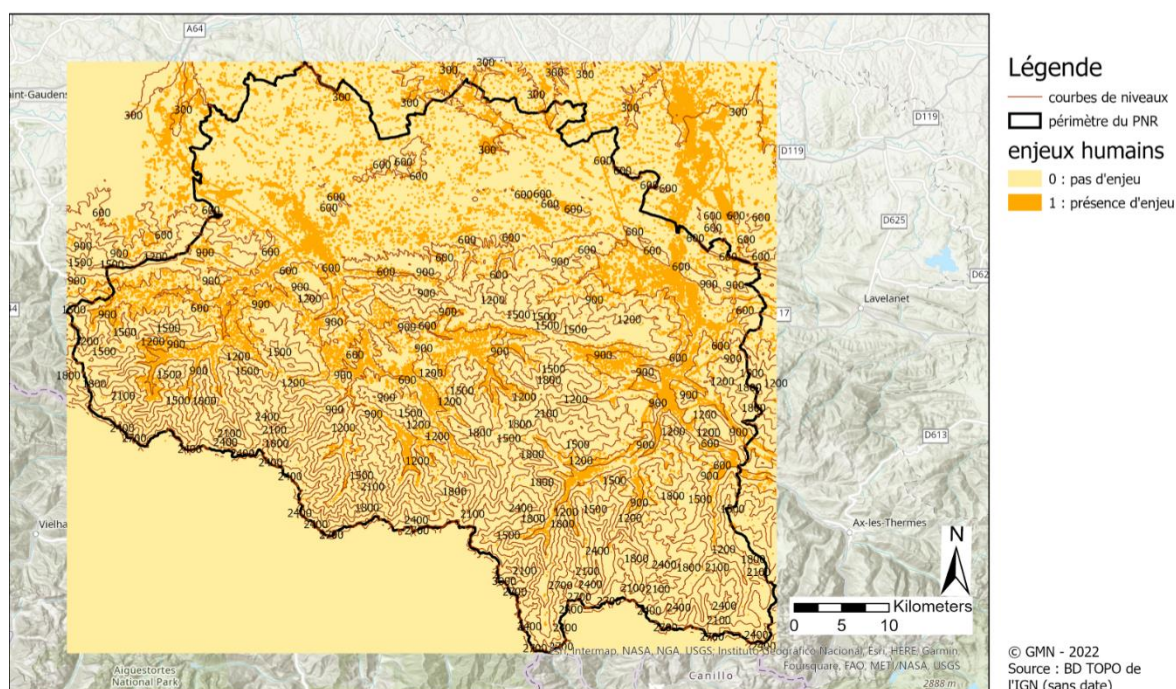
B)

Altitude minimale	Altitude moyenne	Altitude maximale
805 m	1203.7 m	1678 m

Cette annexe détaille le travail réalisé sur R pour déterminer l'aire de distribution du chêne pubescent d'une part et de la hêtraie-sapinière d'autre part sur un critère d'altitude. Ces données servent ensuite à subdiviser les polygones « feuillus » et « conifères » indifférenciés mais aussi à essences « mixtes » de la BD Forêt (V2) de l'IGN.

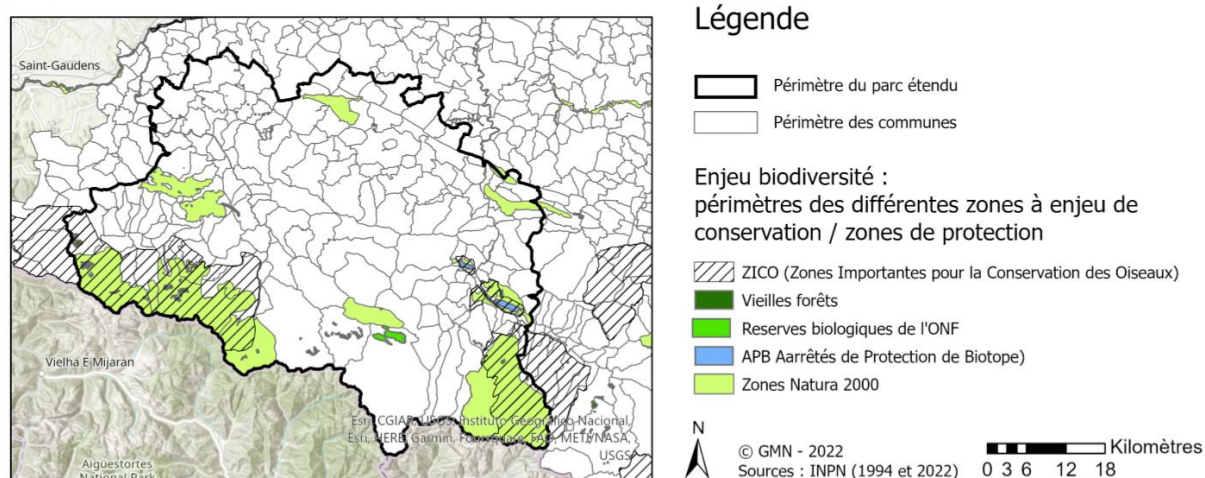
Annexe 52 : Carte de l'enjeu humain dans le PNR des Pyrénées Ariégeoises

Représentation spatiale de l'enjeu humain sur le territoire du PNR des Pyrénées Ariégeoises

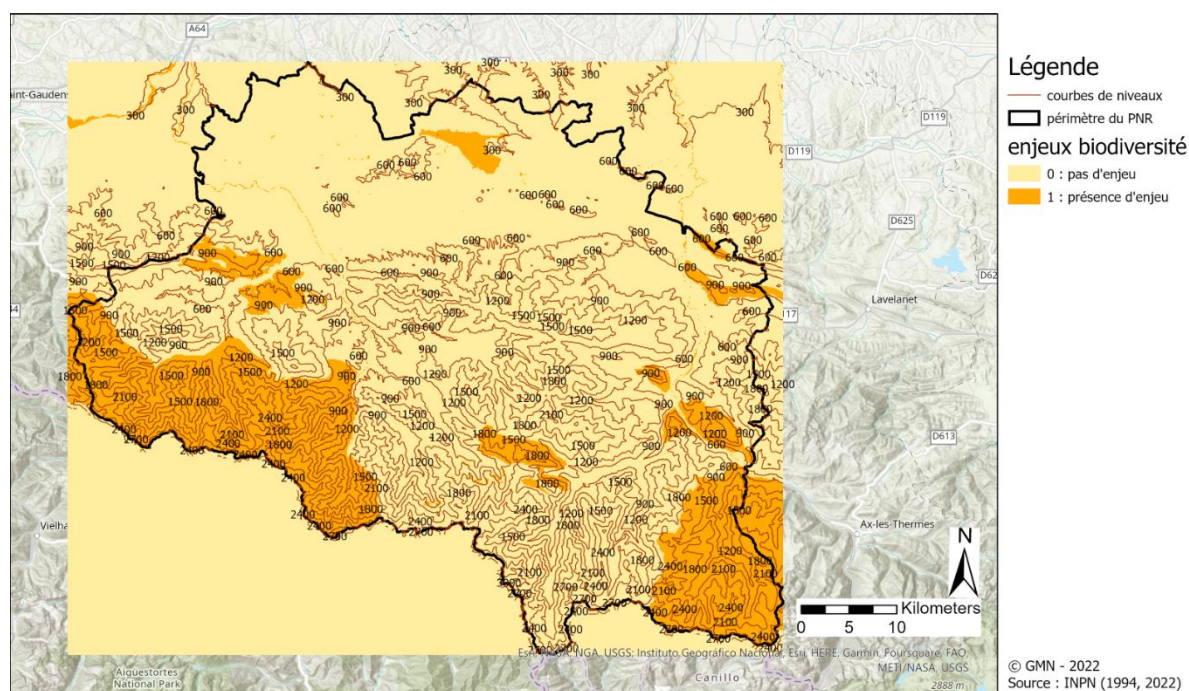


Carte réalisée en agrégeant les zones situées à moins de 100 mètres d'une habitation, d'une zone d'activité et d'une ligne électrique.

Annexe 53 : Carte des périmètres des différentes zones à enjeu de conservation / zones de protection

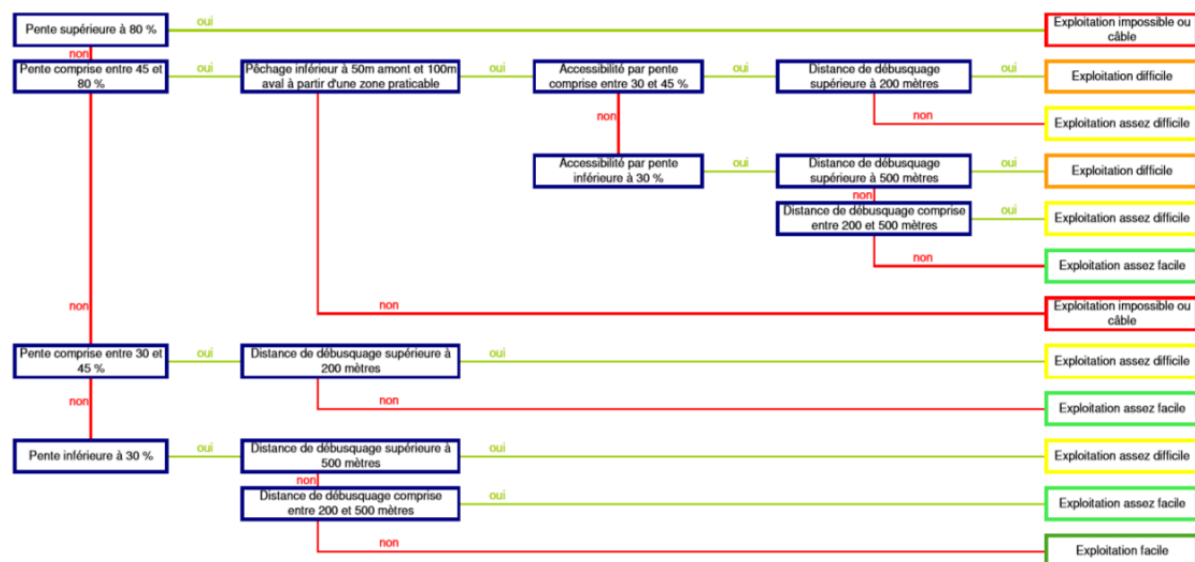


Annexe 54 : Carte de l'enjeu biodiversité dans le PNR des Pyrénées Ariégeoises



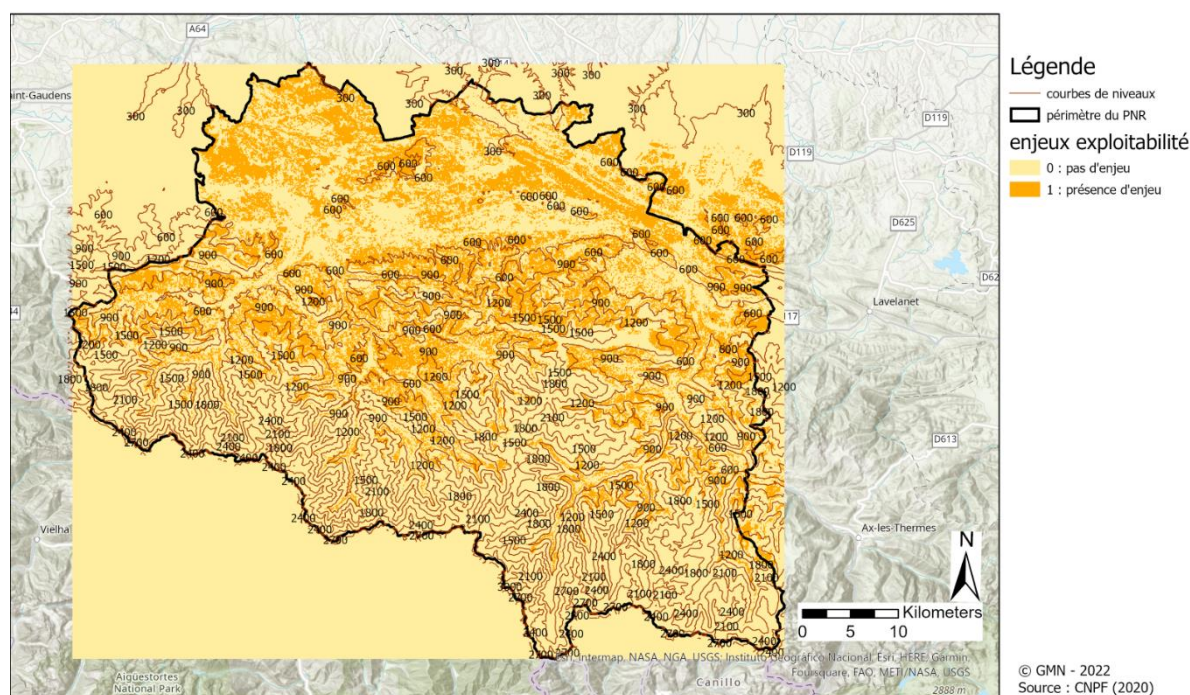
Carte réalisée en agrégeant les zones à enjeu de conservation et les zones de protection de la biodiversité (ZICO, vieilles forêts, réserves ONF, APB et Natura 2000).

Annexe 55 : Clef d'exploitabilité des forêts d'après le CNPF



Clef expliquant les critères permettant de classer les forêts en 5 classes d'exploitabilité.

Annexe 56 : Carte de l'enjeu exploitabilité des forêts dans le PNR des Pyrénées Ariégeoises



Carte réalisée en classant les 5 classes issues du travail de classement des forêts par le CNPF en 2 classes d'enjeu. L'enjeu égal à 0 correspond aux exploitabilités mauvaises et très mauvaises en enjeu égal à 0 et l'enjeu égal à 1 correspond aux exploitabilités moyennes, bonnes et très bonnes.

Annexe 57 : Matrices de croisement entre aléa, vulnérabilités et enjeux (Duche et al., 2011)

		Vulnérabilité «réserve en eau»			
		1	2	3	4
Vuln. «végétation»	1	1	1	2	3
	2	1	2	3	3
	3	2	3	4	5
	4	3	4	5	5

Résultat de ce croisement : indice brut de sensibilité (=vulnérabilité) potentielle de la végétation

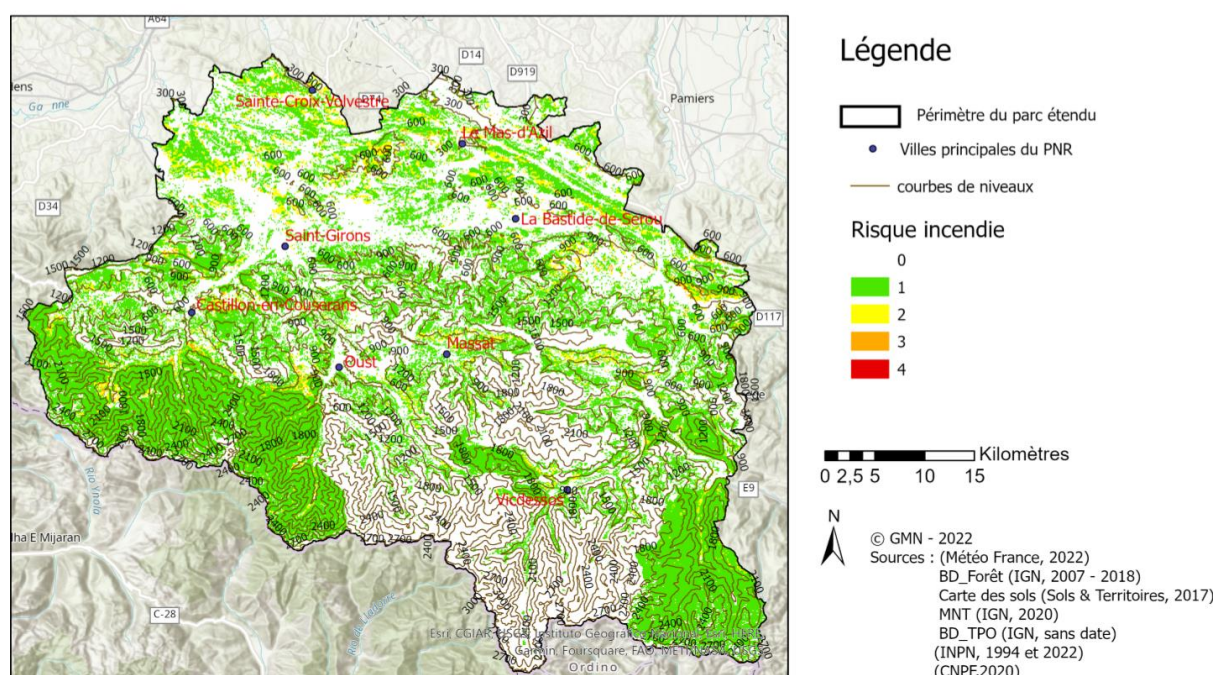
		indice brut de sensibilité potentielle de la végétation		
		1 ou 2	3	4 ou 5
Aléa : IFM	1	1	1	2
	2	1	2	3
	3	2	3	4

Résultat de ce croisement : aléa * vulnérabilité

		ALEA * VULNERABILITE			
		1	2	3	4
ENJEUX	1	1	1	2	3
	2	1	2	3	4
	3	2	3	4	4

Résultat de ce croisement : risque incendie

Annexe 58 : Carte du risque incendie pour la période future proche (2021 – 2050)



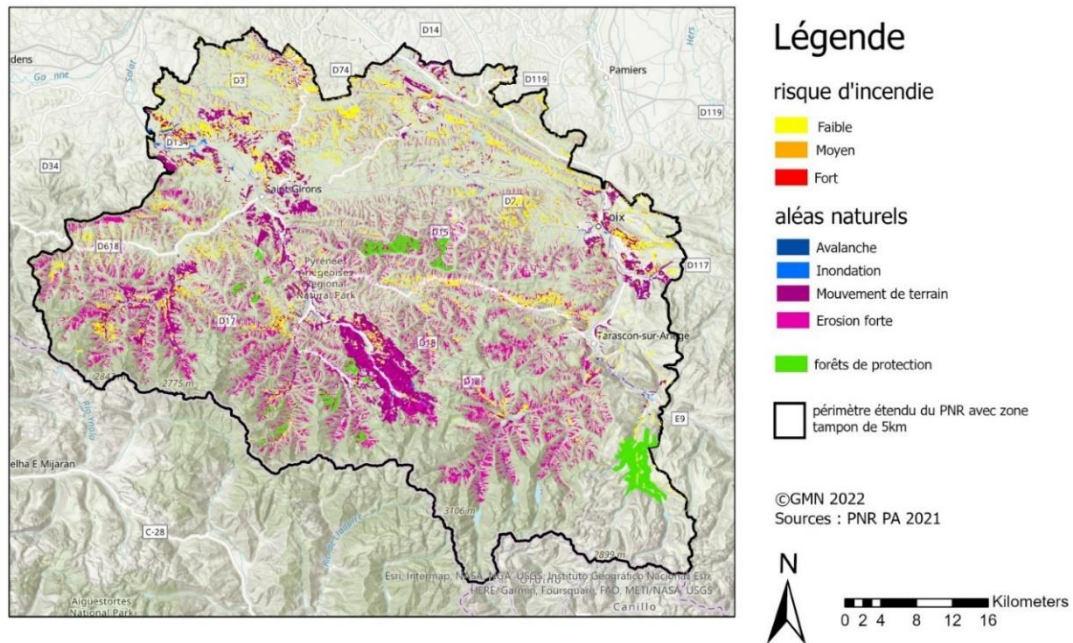
Carte réalisée en croisant les cartographies de l'aléa météorologique du futur proche, de vulnérabilité stationnelle des forêts, de vulnérabilité des formations végétales et des enjeux.

Bibliographie de la partie 4 :

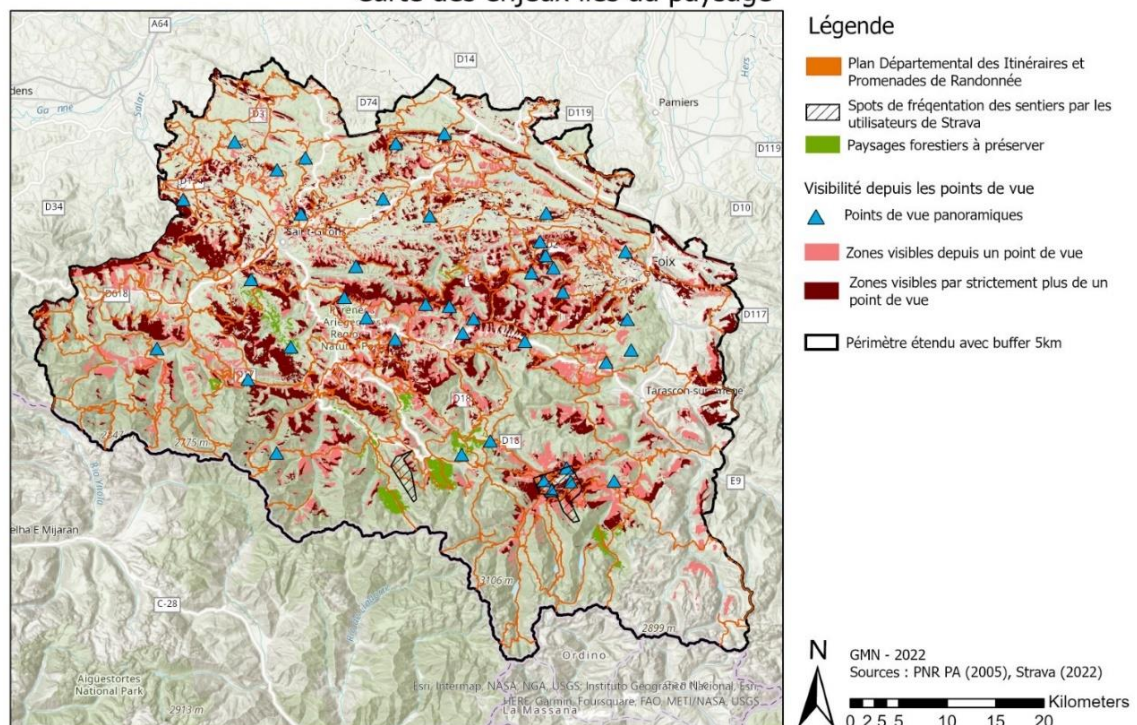
Dauriac F. *Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque de feu de forêt* [En ligne]. phdthesis. [s.l.] : Doctorat Sciences de l'eau, ENGREF, Montpellier, 2004. Disponible sur : < <https://hal.inrae.fr/tel-02583466> > (consulté le 29 novembre 2022)

Duche Y., Savazzi R., Commagnac L., Cloppet E., Regimbeau M. « Essai de cartographie des massifs potentiellement sensibles aux incendies estivaux à l'horizon 2040 - ». *Forêt Méditerranéenne*. 2011. Vol. XXXII, n°2, p. 217-224.

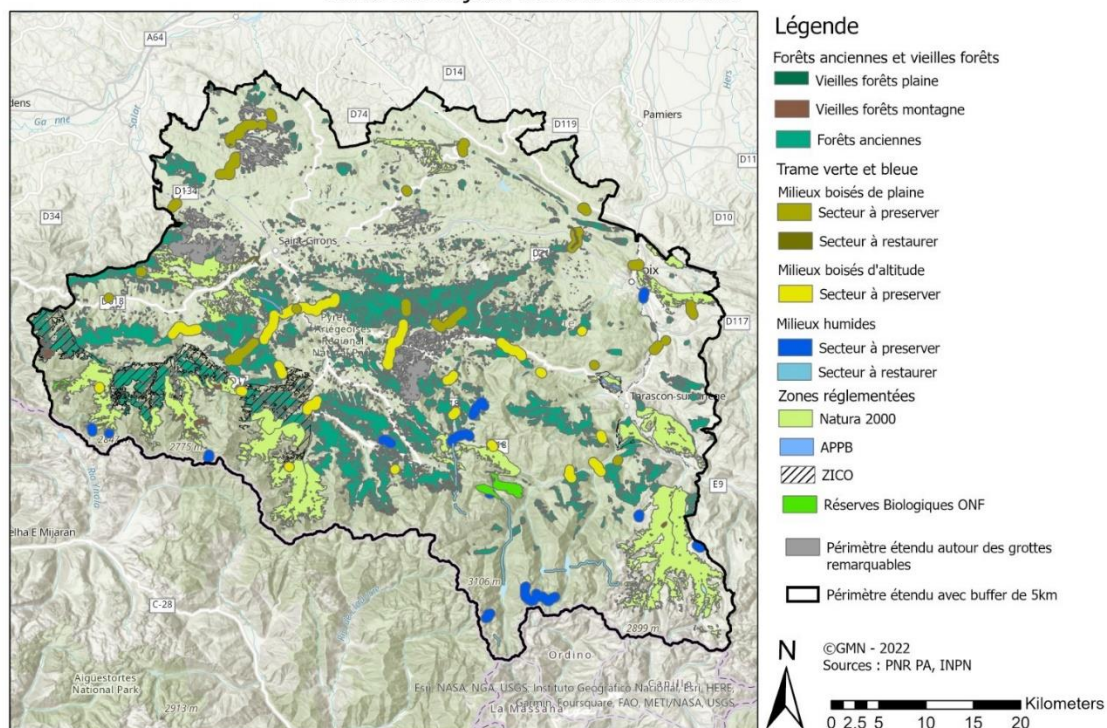
Carte des risques naturels



Carte des enjeux liés au paysage



Carte des enjeux liés à la biodiversité



Annexe 60 : Taux de recouvrement des essences pour chaque enjeu du territoire

Essence	Biodiversité	Risques	Eau potable	Paysage	Filière bois	Surface totale
Autres feuillus	36,11	2912	6,33	38,23	51,22	50
Hêtre	74,97	30,86	11,41	47,50	26,46	25
Chênes décidus	42,26	23,00	7,30	44,00	60,48	10
Sapinière hêtraie	55,37	25,83	8,80	48,32	46,90	7
Sapin et épicéa	65,48	26,29	10,52	55,23	51,67	5
Pin	55,96	15,53	10,30	49,56	66,95	2
Chênes sempervirents	83,34	12,76	31,72	23,46	7,31	0.15

Annexe 61 : Préconisations générales basées sur les caractéristiques du peuplement en place

Voici quelques pistes de gestion pour favoriser la résilience des peuplements forestiers aux changements climatiques. Ces pistes ont été distingués en fonction de la composition du peuplement et du type de traitement sylvicole appliqué.

Par contre, le panel de préconisation de gestion pour des peuplements vulnérables aux changements climatiques est à peu près le même quel que soit le niveau de vulnérabilité du peuplement. En revanche, l'intensité des efforts va varier. Il est important de hiérarchiser les efforts en fonction de la vulnérabilité des peuplements pour ne pas se disperser.

Ensuite, la préconisation la plus fiable reste de diversifier les solutions et les tests face aux incertitudes du changement climatique et de la capacité d'adaptation des peuplements.

Préconisations en fonction de la composition du peuplement

Peuplements purs	- Diversifier les essences (attention aux effets allélopathiques négatifs entre certaines essences) - Favoriser les mélanges feuillus-résineux : niches écologiques différentes, plus faible compétition pour la ressource en eau que dans un peuplement monospécifique - Possibilité de plantation sous couvert d'essence sciaphile - Migration assistée courte distance : accompagner la remontée des essences plus en altitude, utilisation de semences de peuplements locaux pour les plantations - Diminuer la densité du peuplement : cela diminue la compétition pour l'eau et permet l'implantation d'autres essences par régénération naturelle
Peuplements mélangés	- Favoriser les essences les moins vulnérables tout en conservant des essences en mélange

Préconisations en fonction du type de traitement sylvicole

Futaie régulière	- Eviter les coupes rases - Sylviculture à couvert continu : pour une meilleure résistance à la sécheresse - Possibilité de conserver plus longtemps le peuplement mère, repousser le moment de sa récolte - Bien étaler la récolte du peuplement mère sur 30 ans avec plusieurs coupes d'exploitation - Possibilité d'accompagnement vers de l'irrégulier mais ce n'est pas la solution d'adaptation aux changements climatiques
Futaie irrégulière	- Favoriser les essences les moins vulnérables
Taillis	- Eviter les taillis à courte rotation - Si souches très anciennes : alors elles ne sont pas adaptées au climat actuel et très vulnérables, planter de nouveaux arbres à partir de semence de peuplements assez résistants - Si possible, éviter de continuer à exploiter en taillis car pas d'adaptation génétique possible

Préconisations en fonction de la vulnérabilité des essences présentes

Très vulnérable	- Diminuer la densité du peuplement - Favoriser des essences plus résistantes présentes éventuellement dans la régénération naturelle - Plantations sous abris d'essence plus résistantes aux fortes amplitudes thermiques et au stress hydrique - Appliquer la sylviculture à couvert continu car le couvert protège le peuplement face aux sécheresses estivales - Plantation par îlots (penser aux protections contre le gibier) d'essences plus résistantes au stress hydrique - Migration assistée courte distance : accompagner la remontée des essences plus en altitude, utilisation de semences de peuplements locaux pour les plantations - Si la vulnérabilité du peuplement est très liée à la station : abandon de la sylviculture sur le site et laisser la forêt en libre évolution
Moyennement vulnérable	
Pas vulnérable	

Références bibliographiques

- Les interventions de divers acteurs du secteur forestier effectuées lors de la formation forestière AgroParisTech Nancy
- Entretien avec Myriam Legay
- Connaissances acquises au cours de formation AgroParisTech
- Documents mis à disposition par le PNRPA

Annexe 62 : Tableaux récapitulant les différentes préconisations de gestion associées à chaque enjeu du territoire

Ici, ont été listées les premières idées de gestion en rapport avec les enjeux présents sur le territoire. Le premier tableau récapitule les gestions pour tous les risques naturels, le deuxième celles pour les enjeux de biodiversité et d'eau potable. Le dernier regroupe les préconisations pour le paysage et la filière bois.

Tableau 1 : les préconisations de gestion pour les risques naturels

Risques naturels	
érosion	Respect du sol : • Ne pas faire d'ornières : ne pas entrer sur sols frais, ou peu porteurs, adapter les engins aux sols et aux peuplements Pistes : • Ne pas créer des pistes avec une pente forte • Intégrer des revers d'eau sur les pistes pour détourner l'eau dévalant la piste dans les parcelles À creuser : - Favoriser des essences avec des systèmes racinaires différents pour maintenir le sol - Entretenir une strate arbustive et herbacée
Incendies	Adapter les plans pour chaque type de forêt (ensemble de conditions écologique et sociologiques, tient compte des activités humaines) Principes de bases : - modification structurelle de la forêt pour contrarier la propagation du feu - diversification, discontinuités périmétrales, mélanges d'essences - respect du paysage et des habitats + caractère de la zone Les autres pistes de gestions sont en Annexe INCENDIE.
Inondation	• Eviter le tassement dans parcelles • Avoir strates arbustives et herbacée dans les parcelles
Avalanches	- Garder des souches hautes pour stopper la neige - Garder des branches basses pour retenir la neige - Laisser les chablis comme points d'appui
Evénements extrêmes	Tempête : - Limiter le nombre d'arbres vieillissants - Favoriser l'hétérogénéité des strates du peuplement - Post-tempête : - Dégager rapidement les chablis - En profiter pour tester de nouvelles essences

Tableau 2 : Tableau regroupant les préconisations de gestion pour les enjeux de biodiversité et d'eau.

Biodiversité	Eau = augmenter la filtration par le sol
Conserver les trames écologiques (Vertes et bleues)	Conserver les zones humides
Si présence d'une espèce rare ou à enjeux (espèce parapluie) : la conserver et porter ses efforts dessus (mesures de protection, sensibilisation, ...)	Ne pas traverser de cours d'eau (si présence de dérogation, ne pas traverser abusivement les cours d'eau)
Respecter les zones de quiétude de la faune ainsi que les périodes de repos (si absence de ces règles, les créer)	
Favoriser les différentes strates	
Favoriser les mélanges arborés, arbustifs et herbacés	
Garder du gros bois vivant et mort	

Tableau 3 : Tableau regroupant les préconisations de gestion pour les enjeux de de paysage et de filière.

Tourisme / paysage / patrimoine	Filière bois et territoire
Essayer de garder le paysage visible en place Si besoin d'apporter de nouvelles essences : • Garder des essences proches en terme "d'image" (rester sur du résineux si du résineux était en place, ...) • Ne pas réaliser de coupe rase – plantation qui dénaturent le paysage	Voir comment réintégrer le sylvo-pastoralisme pour limiter la broussaille inflammable, (Etudier comment intégrer les acteurs du territoire)
Si un espace ou un peuplement est patrimonial, essayer de le conserver en état si cela est possible Sinon travailler à la fois pour CE peuplement mais AUSSI pour de nouvelles essences (sans modifier l'écosystème déjà en place)	Travailler sur l'équilibre sylvo- cynégétique • CF annexe chasse
Sensibiliser au dépérissement des arbres et au devenir de la forêt	Améliorer desserte (routes forestières et pistes)

Annexe 63 : Préconisation de gestions associées au risque incendie, d'après Dennison et al., 2014, Della et al., 2014 et Vélez, 1990

La gestion des incendies se construit selon 3 grands axes : la prévention afin de limiter le nombre et la surface des incendies, l'extinction qui vise à répondre aux incendies de manière effective, et la publication afin de faire progresser la connaissance et évoluer les moyens de lutte (Vélez, 1975).

La gestion forestière et la gestion des incendies se rejoignent sur l'axe de la prévention. Une gestion appropriée permettra notamment de limiter les dégâts causés sur les peuplements en facilitant la lutte ou limitant la propagation du feu. Dans cette optique, un certain nombre d'actions de gestion sont possibles en sylviculture préventive.

Il est important d'adapter les plans de gestion à chaque "type de forêt", en tant qu'ensemble de conditions écologique et sociologiques prenant en compte des activités humaines (Vélez, 1990). Les principes de bases de la sylviculture préventive sont :

- La modification structurelle de la forêt pour contrarier la propagation du feu
- La diversification, l'ajout de discontinuités périmétrales et les mélanges d'espèces
- Le respect du paysage et des habitats, du caractère de la zone

Pour cela, différents types d'interventions sont envisageables : les interventions linéaires qui s'intéressent aux structures "linéaires" (lisières, ravins, cours d'eau, etc.) et les interventions dans la masse qui sont diffuses au sein du peuplement

1. Intervention linéaire

- Lisières : Isoler la forêt des autres zones (agri, urbaines, industrielles, routes, etc) par une zone tampon.
 - *Ex : Bande de sol nu le long des voies d'accès et débroussaillage du sous-bois sur 10 m*
- Cours d'eau : Favoriser la végétation spontanée le long des cours d'eau car elle est riche en eau et ralentira donc la progression du feu. Enrichir les berges avec des espèces ripicoles elles aussi riches en eau.
- Ravins/Talwegs : Aménager ces structures en fonction de leur orientation par rapport à la direction des vents dominants.
 - Perpendiculaires au vent : Aménager comme des cours d'eau avec des espèces riches en eau
 - Eviter l'effet cheminée en ravin/talweg en favorisant les arbres pour freiner le vent mais limitant le développement du sous-bois. Utiliser plutôt des feuillus locaux, qui auront en plus un effet positif contre l'érosion
- Crêtes : Conserver des arbres sur la crête mais faire des coupes-feux perpendiculaires aux vents dominants (si présents), à quelques mètres des lignes de crêtes. Limiter le maquis et les herbes sèches sous les arbres.
- Mise en place de "pare-feux verts" (Della et al., 2014) : Utiliser des essences à bois dense et faible inflammabilité pour construire des coupures ralentissant la propagation du feu. L'inflammabilité de la nécromasse et de Composés Organiques Volatils est à prendre en compte dans le choix des essences.
 - Remarque : ces techniques sont encore expérimentales mais peuvent être intéressantes à développer.

2. Interventions dans la masse

- Au sein du peuplement, diversifier les essences pour créer une mosaïque d'inflammabilité et "déconcerter" le feu dans sa progression.
- Prendre en compte la résistance active (résilience après le feu) ou passive (résistance au feu) des espèces dans le choix des essences
- Réserver les stations assez humides aux caducifoliés

Par ailleurs, la gestion forestière a une forte influence sur la présence de zones sûres pour les intervenants lors de la lutte contre l'incendie. L'analyse des peuplements avec les données Lidar peut permettre de repérer ces zones et de réfléchir aux actions possibles pour les préserver, voire en créer de nouvelles (Dennison et al., 2014).

Annexe 64 : Résumé de l'entretien avec Pauline DUWE, étudiante de la promotion GMN 2022, ayant réalisé son stage de césure sur "L'équilibre faune-flore et pratiques de chasse : étude de cas en France, Wallonie, Sarre et Rhénanie-Palatinat" pour le projet ASKAFOR.

Travail sur l'équilibre sylvo- cynégétique :

Il faut faire diagnostic sur la pression de gibier (et déterminer les obstacles présents pour atteindre les objectifs (et donc de définir les objectifs : avoir de la régénération naturelle, ...) : mettre en place des suivis du type des ICE (à l'échelle des massifs forestiers et unités de gestion de chasse), Mettre en place des enclos-exclos pour voir la pression du gibier, ...

Le but est de partager les objectifs forestiers avec les chasseurs pour les impliquer :

- Arriver à un constat partagé avec les chasseurs pour prouver que c'est bien le gibier qui est la cause des dégâts
- Mieux arriver à prouver en mettant les chasseurs dans les suivis (ICE ; comptages kilométriques, ...)
- => mettre en place et décider des actions. Pour cela, avoir une structure porteuse du projet qui soit neutre et qui le porte dans le temps

Les points bloquants peuvent être :

- Pas le même constat entre les forestiers et les chasseurs
- Le fait que les chasseurs puissent ne pas être d'accord pour les actions à mener
- **Méthode Brossier-Pallu** = Guide sur l'équilibre forêt-gibier édité par le CRPF Bretagne et la fédération de chasse des Côtes d'Armor. A consulter et creuser pour augmenter le nombre des recommandations de gestion

Il faut aussi mettre en place des formations et informer le public :

- Informations à destination du grand public, des élus, des forestiers et des chasseurs. Le but est de faire comprendre les enjeux de la chasse en forêt
- Formations à destination des élus, des chasseurs, des forestiers et des propriétaires forestiers, avec comme thèmes possibles :
 - Comment protéger les plantations (sans forcément grillager) (ici ce serait plutôt pour les forestiers)
 - Si présence d'une surpopulation de gibier, faire comprendre que les travaux ne pourront pas être bien réalisés et donc que cela engendrera des coûts supplémentaires.

Pour changer ou mettre en œuvre certaines pratiques, il faut savoir que si les chasseurs ne sont pas volontaires, des formations pour les forestiers sur d'autres techniques de chasse peuvent être mises en place.

- Comprendre pourquoi les chasseurs vont chasser :
 - La convivialité
 - Le travail avec les chiens
 - Être dans la nature
- Techniques marchant bien :

- La traque-affut fonctionne mieux que la battue (plus efficace, plus sécurisant, meilleure cohabitation des usagers, respect du bien-être animal (pas d'affolement, moins de stress), tirs plus propres, ...). Se renseigner alors sur les écrits de Gaston Febus.
- À Bois Landry (Domaine dans le Perche) ils mettent en place :
 - Des affûts collectifs
 - Des affûts en approches combinées. Cela est à la limite de la chasse individuelle et de la chasse collective
 - De la battue avec une surélévation des tireurs (avec une chaise un peu haute). Ce qui garantit un tir fichant. Mais l'achat de ces chaises coute cher (250 € la pièce).

D'autres mesures pourraient être mises en place à l'échelle du PNR comme la valorisation de la venaison, la mise en place d'un observatoire du gibier ou encore intégrer les fédérations des chasseurs dans le projet.

Toutes les idées listées ci-dessus ne sont que des pistes, qui demandent à être étoffées et adaptées à l'échelle du territoire.

Annexe 65 : Surfaces de chaque peuplement forestier, de son occupation du territoire et de sa vulnérabilité

Ce tableau récapitule les surfaces de tous les peuplements forestiers du PNR, de leur occupation du territoire et de leur vulnérabilité lorsque les données étaient présentes.

Essence	Surface en ha	% du territoire forestier	Vulnérabilité ?
Autres feuillus	81306	50	Peu vulnérable
Hêtre	38807	24	Forte dans les hêtraies montagnardes
Chênes décidus	15794	10	
Forêts mixtes	9337	6	
Sapin et épicéa	6917	4	Très vulnérable à vulnérable
Pins	3190	2	Très vulnérable à vulnérable
Autres conifères	2428	2	Très vulnérable à vulnérable
Châtaignier	1707	1	Très forte
Douglas	1436	1	
Chênes sempervirents	200	<1	
Peuplier	90	<1	
Total	161212	100	

Annexe 66 : Ebauche de préconisations de gestion pour les hêtraies pures

L'Ariège possède des hêtraies pures dans des zones de montagne reculée. Etant mal desservies et peu exploitées, certaines d'entre elles ont aujourd'hui une dynamique de vieille forêt particulièrement importante pour la biodiversité. Cependant le hêtre est considéré comme particulièrement sensible au réchauffement climatique, notamment à cause des sécheresses qu'il implique. L'arbre possède une capacité de résilience assez forte pour des événements ponctuels, mais des dépérissements ont déjà été observés dans le cas de sécheresses répétées, surtout estivales.

Propositions de gestion

Du fait de la difficulté d'accès de ces forêts, une priorisation des peuplements selon leur vulnérabilité pourra être réalisée. Le déficit hydrique de juin à août sera l'indice principal de cette vulnérabilité.

Déficit inférieur à 85 mm : hêtraie peu vulnérable

La hêtraie sera ici maintenue dans son état actuel, avec éventuellement des aménagement locaux liés aux enjeux de la zone.

Déficit entre 85 et 120 mm : hêtraie moyennement vulnérable

Les autres facteurs pouvant limiter les effets de la sécheresse seront analysés : la réserve utile, les apports latéraux et la fertilité chimique. S'ils sont favorables, le hêtre sera maintenu, mais d'autres essences d'accompagnement, comme le sapin, seront recherchés.

Déficit supérieur à 120mm : hêtraie vulnérable

La transition vers une forêt composée d'essences plus résistantes au stress hydrique sera mise en place. Le chêne sessile, les pins ou encore les fruitiers type alisier ou cormier pourront ainsi lui être substitués. La régénération naturelle sera privilégiée, mais des plantations pourront être nécessaires.

Le hêtre pourra être gardé en essence d'accompagnement. De manière générale, la densité sera limitée afin de limiter la demande en eau et de laisser plus de pluie arriver au sol.

Risque de chablis : Le hêtre y est particulièrement sensible, notamment si le sol est détrempé. La probabilité de tempêtes semblables à celle de 1999 augmentant, une gestion spécifique pourra être mise en place sur les parcelles les plus sensibles en limitant la hauteur des arbres et le nombre d'arbres âgés ou fragilisés.

Bibliographie de la partie 5 :

Della, R. G., Danti, R., Raddi, P., Moya, B., & Moya, J. (2014). Mise en œuvre du “ système cyprès ” pour des barrières vertes coupe-feu. *Projet CypFire. Forêt Méditerranéenne*, XXXV(3), 269–274. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03556442>

Vélez, R. (1975). A l'étranger : organisation D.F.C.I. en Espagne. *Revue Forestière Française*, 27(S), 541–546. <https://doi.org/10.4267/2042/21026>

Vélez, R. (1990). La sylviculture préventive des incendies en Espagne. *Revue Forestière Française*, 42(S), 320–331. <https://doi.org/10.4267/2042/26157>

Dennison, P. E., Fryer, G. K., & Cova, T. J. (2014). Identification of firefighter safety zones using lidar. *Environmental Modelling & Software*, 59, 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.017>

Brossier, P., & Pallu, J. (2016). Le guide pratique de l'équilibre forêt gibier (Révélation,). <https://equilibre-foret-gibier.fr/wp-content/uploads/2019/09/equilibre-foret-gibier-guide-complet-2019.pdf>

Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises. (2015, juillet). Trame écologique du Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises : Diagnostic, Identification des enjeux, Plan d'actions. https://seafire.agroparistech.fr/lib/56a17ff9-db11-4a01-8d6c-27d5ea7228d6/file/SUJET_5_MESURES_GESTION/Bibliographie/enjeux/biodiversit%C3%A9/DiagnosticTrameEcologique_PNRPA_rapportv0.8.pdf

Intervention de Livio TILATTI, chargé de sylviculture sur l'agence 09,11,66, sur le tassement des sols

Intervention de Jean-Jacques BOUTTEAUX, Responsable de l'unité territoriale d'Auberive, sur l'irrégularisation de la forêt du SIGFRA (Syndicat Intercommunal de Gestion Forestière de la Région d'Auberive), Haute marne

Intervention de Philippe DURAND, enseignant chercheur à AgroParisTech, et Sylvain WEILL, enseignant chercheur à l'ENGES, lors de la sortie terrain "bassin versant du Steinbach "

Entretien avec Pauline DUWE, étudiante de la promotion GMN 2022, ayant réalisé son stage de césure sur “L'équilibre faune-flore et pratiques de chasse : étude de cas en France, Wallonie, Sarre et Rhénanie-Palatinat” pour le projet ASKAFOR.

Guy Landmann, Jean-Luc Dupouey, Vincent Badeau, Yves Lefevre, Nathalie Bréda, et al.. Le hêtre face aux changements climatiques. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 2007, pp.29-38. [ffhal-01195001f](https://hal-01195001f)