



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**2013-2014**

**MASTER FAGE**  
**Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et**  
**l'Environnement**

**Spécialité**  
**Bois, Forêt et Développement durable**

**DETERMINATION DES LIMITES PEDOCLIMATIQUES DU**  
**CHATAIGNIER DANS LE HAUT-LANGUEDOC**  
**CONSTRUCTION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR**  
**L'ADAPTATION DE LA SYLVICULTURE**



**Antonio GARCIA COLLADO**  
**Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 02/09/2014**

M. Xavier BEAUSSART, Adjoint au directeur et coordinateur de projets du PNR du Haut-Languedoc.

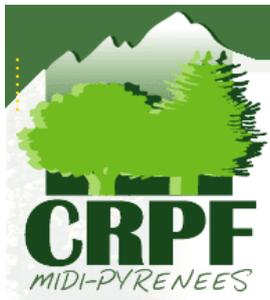
M. Christian PIEDALLU, Enseignant chercheur à AgroParisTech, Nancy.

Parc naturel régional du Haut-Languedoc

## Le Parc naturel régional du Haut-Languedoc



a réalisé cette étude en collaboration avec les Centres Régionaux de la Propriété Forestière (CRPF) de Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, l'Institut pour le Développement Forestier (IDF) et le Département de la Santé des Forêts (DSF).



# Remerciements

A Xavier Beaussart, Adjoint au directeur et coordinateur de projets du Parc, pour avoir pensé à moi comme un bon candidat pour ce stage et pour m'avoir offert l'opportunité de travailler pendant six bons mois dans le Parc naturel régional du Haut-Languedoc. De même, merci pour m'avoir soutenu et encouragé pendant le temps de mon stage.

A Daniel Vialelle, Président du Parc, et Chantal Blondin, Directrice du Parc, pour m'avoir permis de travailler au sein du Parc pendant le temps de mon stage et m'avoir donné cette grande opportunité, qui a été pour moi une expérience très enrichissante.

A Christian Piedallu, enseignant-chercheur à AgroParisTech Nancy, pour avoir accepté d'être mon tuteur de stage, et pour m'avoir guidé dans la réalisation de ce rapport.

A Raphaële Hemeryck, pour toute la volonté et toute la patience qu'elle a eues avec moi, ainsi que pour m'avoir aidé pendant le début des travaux de terrain toujours avec un sourire.

A Pascal Mathieu et Jean-Michel d'Orazio, respectivement techniciens du CRPF de Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, pour avoir partagé avec moi leurs expériences et leurs énergies, et bien sûr également pour leur aide lors des travaux de terrain. Sans eux, les placettes auraient été beaucoup plus difficiles à faire.

A Jean Lemaire, ingénieur à l'IDF, parce que sans toi rien n'aurait été possible. Merci pour toutes les pistes, tous les tuyaux, toutes tes connaissances, toute ton expérience, pour m'avoir aidé à gérer des logiciels et des milliards de chiffres au cours de longues mais productives journées, et pour m'avoir réconcilié avec la statistique. Sans toi cela aurait été « *rideau !* ».

A Bernard Boute et l'équipe du DSF, pour avoir suivi ce stage, m'avoir pourvu de sources d'information et pour être venu avec moi sur le terrain pour me montrer sur place les types de chancre et ses effets ainsi que d'autres pathologies du châtaignier.

A Jean-Pierre Barthès, géologue, pour avoir mis son temps avec moi, pour m'avoir aidé et motivé pendant le terrain. Merci pour cet échange d'expérience.

A François Jaccaz, stagiaire du Parc au même temps que moi, parce que sans toi rien n'aurait été pareil. Les *grands hommes de la Patrie* ne sont pas tous au Panthéon, parfois ils sont de l'autre côté du bureau. Je te souhaite le meilleur pour l'avenir.

A toute l'équipe du Parc, pour son accueil, sa bonne humeur, ses coups de pouce, pour avoir fait chaque jour agréable. Je vous remercie Marc, Emilie, Delphine, Sophie, Alice, Elsa, Camille, Sara, Géraldine, Jérôme, Julie, Ado... et spécialement Denis.

# Sommaire

1. Le territoire d'étude : le Parc naturel régional du Haut-Languedoc (PNR HL) .....	1
1.1 Un territoire boisé entre Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon.....	1
1.2 La forêt du Haut-Languedoc, source d'une économie locale .....	3
2. Problématique et objectifs.....	4
3. L'outil BIOCLIMSOL : prévoir les impacts de l'évolution du climat en forêt.....	5
4. Le châtaignier, l'essence feuillue patrimoniale aux plus forts enjeux .....	5
4.1 Une place prépondérante dans le Haut-Languedoc.....	5
4.2 Une essence sensible aux pathologies.....	7
5. Méthodes : entre les modèles et le terrain.....	8
5.1 Obtention de données forestières : repérer les châtaigniers du territoire .....	8
5.2 Echantillonnage et stratification selon les facteurs à étudier .....	8
5.3 La phase de terrain. Relevés, les paramètres à mesurer.....	10
5.4 Les différents modèles climatiques utilisés .....	11
5.5 Une superposition complexe de données géologiques et pédologiques .....	12
5.6 Les facteurs compensateurs ou aggravants du climat .....	14
5.7 Des analyses statistiques pour une validité scientifique .....	14
6. Résultats .....	15
6.1 Détermination des principaux paramètres stationnels .....	15
6.2 Un dépérissement lié à l'altitude.....	17
6.3 Des décisions à prendre en fonction de l'altitude et de la position topographique.....	19
6.4 Construction d'un modèle de prédiction à partir de ces résultats .....	20
6.5 Climat et chancre .....	20
7. Conclusions et discussion .....	21
7.1 Une corrélation claire entre l'altitude et le dépérissement.....	21
7.2 Une influence des facteurs liés au sol difficile à mettre en évidence .....	22
7.3 Des décisions à prendre en fonction de l'altitude avant tout .....	22
7.4 Un impact du chancre lui aussi lié au climat .....	22
7.5 Un modèle d'aide à la décision pour les gestionnaires et les propriétaires forestiers.....	23
7.6 Le châtaignier : une essence qui a toujours de l'avenir dans le Haut-Languedoc .....	23
Références.....	25
Annexes.....	26

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Localisation du PNR du Haut-Languedoc.....	1
<b>Figure 2.</b> L'occupation du sol du Parc.....	2
<b>Figure 3.</b> Relief du Parc.....	3
<b>Figure 4.</b> Chantier de fabrication de piquets en bois de châtaignier dans la commune de Saint-Pons-de-Thomières, dans le territoire du PNR.....	6
<b>Figure 5.</b> Différence entre un chancre actif (à gauche) et un chancre hypovirulent (à droite) au niveau sous-cortical sur des jeunes brins de châtaignier.....	11
<b>Figure 6.</b> Schéma d'identification du sol pour chaque placette.....	13
<b>Figure 7.</b> Tableau des principaux axes (composantes principales).....	15
<b>Figure 8.</b> Corrélation des variables aux principaux axes.....	16
<b>Figure 9.</b> Cercle de corrélation entre les variables et les axes principales.....	17
<b>Figure 10.</b> ANOVA du dépérissement en fonction de la tranche altitudinale des points échantillonnés.....	17
<b>Figure 11.</b> ANOVA de l'indice de fertilité selon la classe altitudinale.....	18
<b>Figure 12.</b> Répartition des châtaigneraies du territoire du Parc selon l'exposition par tranche altitudinale.....	18
<b>Figure 13.</b> ANOVA du dépérissement et de l'exposition limitée à la classe altitudinale 1 (<400m). .....	19
<b>Figure 14.</b> Arbre de décision.....	19
<b>Figure 15.</b> Modèle de probabilité de dépérissement.....	20
<b>Figure 16.</b> Moyennes des proportions d'arbres affectés par du chancre actif, du chancre non actif et d'arbres sans chancre par classe altitudinale.....	20
<b>Figure 17.</b> Proportion moyenne d'arbres notés CHANCRE 3 et 4 par le protocole CHANCRE par classe altitudinale et par type de placette (dépérissante ou saine). .....	21

## Liste des tableaux

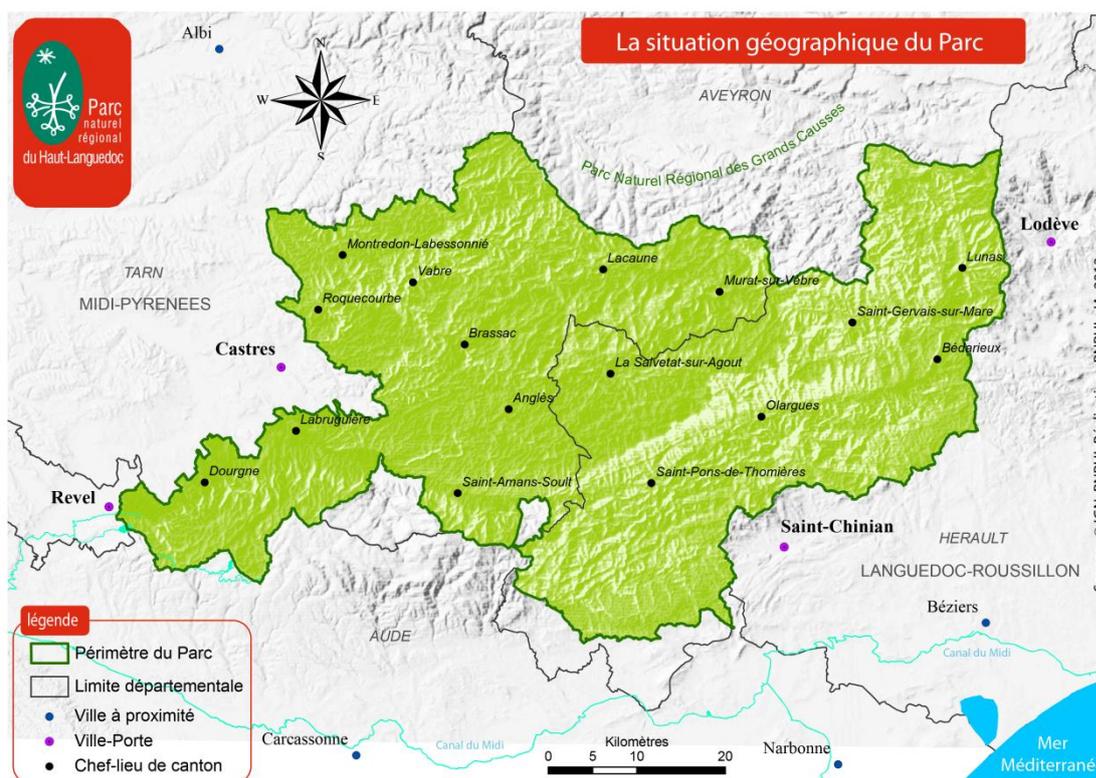
<b>Tableau 1.</b> Répartition en surfaces du territoire (en ha).....	1
<b>Tableau 2.</b> Volumes de bois exploité.....	4
<b>Tableau 3.</b> Bilan des besoins et des limites écologiques du châtaignier en France.....	7
<b>Tableau 4.</b> Limites climatiques du châtaignier.....	9
<b>Tableau 5.</b> Limites altitudinales pour le châtaignier.....	9
<b>Tableau 6.</b> Distribution théorique des placettes selon les conditions d'altitude et exposition.....	9
<b>Tableau 7.</b> Comparaison entre les différents modèles climatiques.....	12
<b>Tableau 8.</b> Probabilité et niveaux de vigilance associés.....	23

# 1. Le territoire d'étude : le Parc naturel régional du Haut-Languedoc (PNR HL)

## 1.1 Un territoire boisé entre Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon

Le PNR du Haut-Languedoc a été créé en 1973 et son classement a été renouvelé en 2012. Il s'agit d'un territoire habité de grande richesse naturelle et paysagère mais aussi culturelle et patrimoniale, avec un caractère propre et une forte culture occitane.

Le territoire du Haut-Languedoc se situe sur la partie sud-ouest du Massif central entre deux régions (Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon) et deux départements (Tarn et Hérault) (*Figure 1*). Le Parc regroupe 305.000 ha dont 60% sont boisés (forêts), 30% sont agricoles et 10% d'autres surfaces naturelles et artificielles (*Tableau 1*) (*Figure 2*). Cette caractéristique fait du PNR du Haut-Languedoc l'un des deux Parcs naturels régionaux les plus boisés de France.



**Figure 1.** Localisation du PNR du Haut-Languedoc.

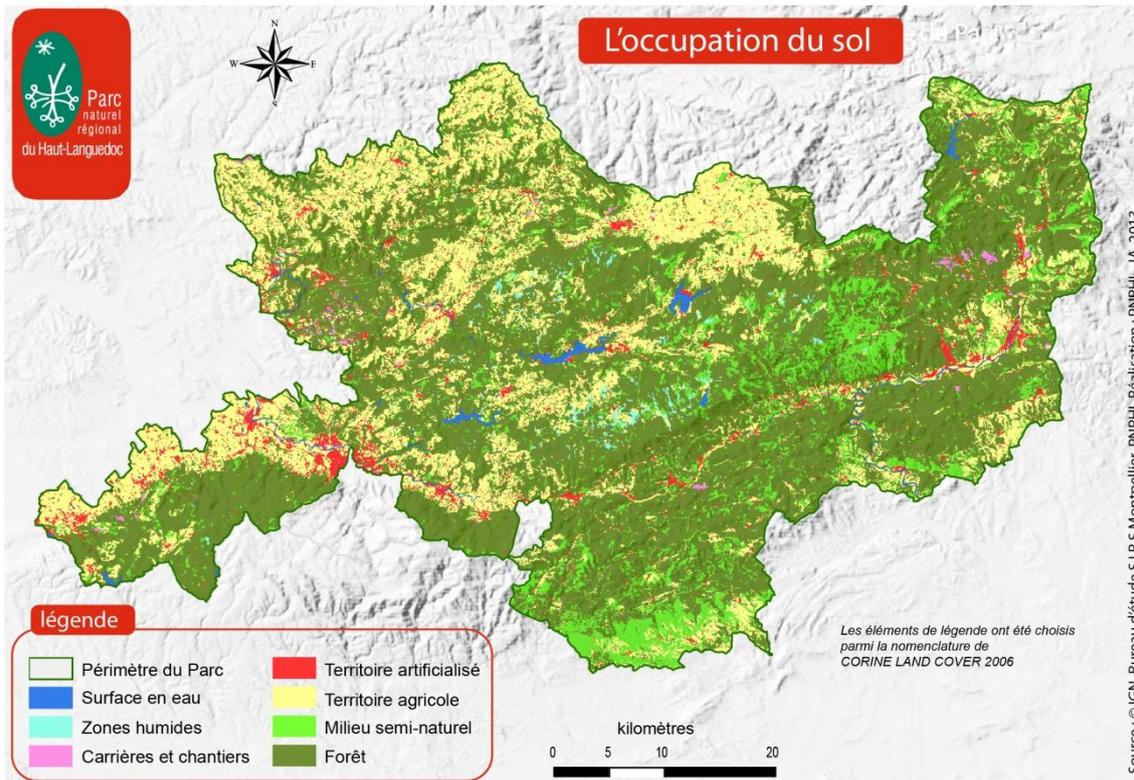
Source : PNR Haut-Languedoc.

Auteur : Denis Azaïs.

**Tableau 1.** Répartition en surfaces du territoire (en ha).

Source : PNR Haut-Languedoc, charte forestière.

Type de surface	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Boisée	180.000	60
Non boisée	125.000	40
Totale	305.000	100



**Figure 2.** L'occupation du sol du Parc.

Source : PNR Haut-Languedoc.

Auteur : Denis Azais.

### 1.1.1 Un relief accidenté à la confluence de plusieurs influences climatiques

Le climat varie fortement au sein de ce territoire à la confluence de trois types climatiques différents : méditerranéen, atlantique et montagnard. La partie méditerranéenne du Parc correspond au sud et sud-est (Avant-Monts) dans l'Hérault ; l'influence atlantique est plus marquée à l'ouest du Parc et le climat montagnard concerne la partie nord où les altitudes sont plus élevées et l'orographie plus accidentée. En conséquence, les précipitations sont importantes : en moyenne entre 1.100 et 2.000 mm de pluie par an. La variabilité n'est pas négligeable dépendant de la période de l'année et de la géographie du territoire.

Le Parc se situe sur une zone climatiquement très complexe où le chevauchement de l'influence des différents climats complique tout pronostic météorologique et toute certitude de l'impact du climat sur la végétation, ainsi qu'une utilisation sûre des modèles climatiques actuels. Cet aspect rend plus difficile la gestion adaptative de la forêt face aux changements climatiques.

Le relief du Parc est varié, et influe énormément sur la composition et la distribution de la végétation en interaction avec le climat. Il s'agit d'un territoire de moyenne montagne au contact de deux massifs : La Montagne Noire d'une part, et les Avants-Monts méditerranéens d'autre part, avec le massif du Somail-Espinouse, le Caroux et les Monts de Lacaune. Séparant ces deux entités et presque comme une frontière naturelle entre les climats atlantique et méditerranéen, les vallées du Thoré, du Jaur et de l'Orb suivent un axe est-ouest. Les altitudes varient entre 200 et 1.200 m avec un maximum de 1.267 m (*Figure 3*).



**Figure 3. Relief du Parc.**  
 Source : PNR Haut-Languedoc.  
 Auteur : Denis Azaïs.

### 1.1.2 Une géologie variée

Les roches siliceuses (granites, gneiss et schistes) sont dominantes sur l'ensemble du territoire du Parc, caractéristique favorisant les essences calcifuges (comme le châtaignier). Des formations calcaires sont néanmoins présentes dans les secteurs sud et sud-est.

## 1.2 La forêt du Haut-Languedoc, source d'une économie locale

Comme précisé précédemment, le PNR HL est l'un des deux Parcs naturels régionaux les plus boisés avec le PNR du Vercors, avec 2/3 de surface forestière. De plus, le massif du Haut-Languedoc est la région forestière la plus productive des régions Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon (PNR HL, 2009). Les enjeux forestiers du Parc sont en conséquence très importants, des points de vue écologiques et économiques.

### 1.2.1 Les essences, entre les enjeux économiques et paysagers

La forêt est essentiellement feuillue (60% de la surface boisée) même si de nombreux reboisements résineux ont été réalisés sur quasiment la totalité du territoire. Ces reboisements datent majoritairement des campagnes de restauration de terrains de montagne (RTM) de la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Les essences choisies étaient alors le sapin pectiné et l'épicéa commun. Ces boisements se poursuivirent dans les années 1950 avec l'appui du fond forestier national (FFN), où le douglas et le pin sylvestre firent leur apparition en plus du sapin et l'épicéa. Dans la partie méditerranéenne les essences utilisées sont notamment le pin maritime, le pin laricio, et le cèdre de l'Atlas mais aussi les sapins pectiné et de Nordmann dans quelques vallées.

Malgré la large présence des reboisements résineux, la question se pose sur l'avenir de la filière et la durabilité de l'exploitation forestière : de nombreux dépérissements ont été observés suite à des périodes chaudes et extraordinairement sèches des dernières années affectant les essences phare de l'industrie locale, notamment le Douglas (Martin-Horcajo, 2013). Un des plus grands efforts mis en place pour éviter la chute de l'économie locale est de diversifier la ressource (résineux et feuillus) et de revaloriser les essences feuillues traditionnelles (retour vers le chêne, le châtaignier et le hêtre) ainsi que l'implantation des nouvelles essences adaptées au climat de la région (cèdre).

### 1.2.2 La filière bois, moteur de l'économie locale :

La filière bois représente environ 2.000 emplois sur le territoire du Parc. La première transformation est souvent l'industrie la plus présente liée directement à l'exploitation, avec 149 entreprises situées majoritairement dans la partie ouest du Parc, coté tarnais. La seconde transformation, qui apporte le plus de valeur ajoutée, est peu développée.

La production forestière est estimée à 450.000 m<sup>3</sup> de grumes de résineux durant la période 2010-2020, mais la distribution de classes d'âge est assez homogène et une diminution progressive du bois disponible est prévue par la suite à cause du manque de peuplements en âge d'exploitation. Des solutions pour atténuer ce déficit sont recherchées.

**Tableau 2.** Volumes de bois exploité.  
Source : PNR Haut-Languedoc, charte forestière.

Ressource		m3	% total récolté
Bois d'œuvre	Feuillus	27.173	55
	Résineux	317.200	
Bois d'industrie		199.663	32
Bois énergie		81.244	13

## 2. Problématique et objectifs

Ces dernières années, de nombreux dépérissements de peuplements forestiers sont observés sur le territoire du Parc. D'après les experts du climat, le changement climatique en cours touchera en priorité les régions du sud-ouest de la France et ses conséquences, notamment en termes de sécheresse estivale, se font déjà sentir sur le territoire du Haut-Languedoc. Avec un âge assez homogène des boisements (donc exploitation importante en quelques années) et dans un tel contexte, les gestionnaires se posent des nombreuses questions tant sur leurs choix d'essences pour le reboisement que pour la sylviculture des peuplements en place.

Sur le Haut-Languedoc, après de nombreux reboisements, les réflexions relatives à l'adaptation des essences aux stations souffrent d'un manque de données. Des interrogations persistent quant aux exigences climatiques des essences forestières, tant au niveau de l'échelle locale que de l'échelle nationale (Gaudin, 2007).

Le Parc a mis en place une charte forestière de territoire (CFT) conformément à la loi n°2001-602 du 9 juillet 2001 dite d'orientation sur la forêt. Une CFT est un document qui compile les politiques et directives locales pour le développement forestier y compris la filière bois. L'objectif est de fixer des actions à mettre en œuvre pour la gestion durable et multifonctionnelle de la forêt.

En conformité avec les attentes des acteurs locaux, un projet ayant pour objectif la création d'un « *atlas pédoclimatique des stations et des essences du Parc* » (Charte forestière du Parc, 2009) aidant le forestier dans ses choix sylvicoles, inclus dans les actions de la Charte, est en cours de mise en œuvre.

Le projet ici présenté, la détermination des limites pédoclimatiques du châtaignier dans ce contexte de climat changeant, a lieu dans le cadre de la création et du développement de cet atlas, qui permettra de mieux comprendre les besoins écologiques des principales espèces d'intérêt économique du Parc et de connaître les conditions précises des stations du territoire afin d'installer

dans chaque station les essences les plus adaptées aux conditions climatiques présentes et futures (dans la limite des connaissances actuelles) en obtenant des productions biologiques et économiques maximales. Dans ce cas, l'essence visée est le châtaignier.

Les objectifs concrets sont de connaître la répartition du châtaignier selon un gradient climatique pour savoir si les dépérissements sont une fonction du climat, et d'estimer l'influence du chancre sur le dépérissement.

### **3. L'outil BIOCLIMSOL : prévoir les impacts de l'évolution du climat en forêt**

Si la notion de changement climatique est désormais communément acceptée par la communauté scientifique, les études menées ne permettent pas à ce jour de connaître ni son intensité, ni sa rapidité, et encore moins les extrêmes climatiques associés. Dans ce cadre d'incertitude, les gestionnaires forestiers font face à des questions et des nouveaux défis.

La forêt est caractérisée comme un écosystème à rythme lent, ses évolutions de production ne sont visibles qu'à long terme et ses réponses aux changements de conditions sont soumises aux contraintes d'une très grande inertie. Le temps d'adaptation est donc limité.

Ces incertitudes poussent les forestiers à établir des stratégies d'adaptation. Le champ des stratégies possibles est large : depuis les changements d'essences jusqu'à d'autres modes de gestion.

Dans ce cadre, l'outil BIOCLIMSOL, né à l'IDF, se développe pour aider à la décision des gestionnaires en prenant en compte les incertitudes et aléas climatiques. (Lemaire, 2014).

*« BIOCLIMSOL est un outil ayant pour objectif de spatialiser des zones de vigilance climatique spécifiques à chaque essence dans un contexte de climat changeant. Cette cartographie des zones de vigilance climatique, couplée à une analyse indispensable de la station et du peuplement, propose in fine des recommandations sylvicoles pour la gestion des peuplements sur pied ou des reboisements en tenant compte du changement du climat. »* (Lemaire, 2014).

BIOCLIMSOL se veut un outil numérique adapté à l'utilisation sur des différents supports informatiques. Il permet l'utilisation sur le terrain en s'appuyant sur les données climatiques et en intégrant tous les autres facteurs jouant un rôle sur la station, pour proposer des guides ou des pistes aux gestionnaires et aux forestiers pour la sylviculture et le choix d'essence.

Le PNR du Haut-Languedoc travaille en partenariat avec les CRPF et l'IDF, donc l'étude ici présentée s'insère dans leurs projets de développement de cet outil et participe à sa mise au point toujours en évolution même si d'autres outils et méthodes de modélisation écologique existent : base de données DIGITALIS et SILVAE (AgroParisTech, LERFoB, INRA).

## **4. Le châtaignier, l'essence feuillue patrimoniale aux plus forts enjeux**

### **4.1 Une place prépondérante dans le Haut-Languedoc**

Le châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) est une espèce naturellement présente dans le sud de la France, qui a été favorisée par l'homme, surtout au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle, pour la production de bois et de châtaignes. L'homme a donc planté et favorisé l'essence au maximum de ses possibilités d'extension. De nos jours les châtaigneraies se trouvent intégrées dans le paysage forestier et jouent un rôle caractéristique dans la multifonctionnalité des forêts, dans l'écosystème et pour les activités forestières du territoire. Dans le Haut-Languedoc, le châtaignier est l'essence feuillue la plus présente avec le hêtre représentant 12% de la surface forestière feuillue (distribution en *Annexe 1*) (CRPF, sans date).

Les châtaigniers ont été utilisés de longue date non seulement pour l'alimentation mais comme une ressource forestière multifonctionnelle ; le bois a été utilisé pour la fabrication de piquets de vigne, de tonneaux, de parquets et d'autres matériaux de construction et ameublement, ou encore pour l'obtention de tanins, ou comme bois de chauffage.

Ce bois, très apprécié et toujours considéré comme un bois noble, a d'excellentes propriétés. Il rappelle le bois de chêne mais avec une couleur plus jaune du duramen qui devient brunâtre à reflets blonds, c'est un bois dur et très durable grâce à une composition très riche en tanins. Cette caractéristique fait du bois de châtaignier un bois très adéquat pour les usages extérieurs et pour la construction.



**Figure 4.** Chantier de fabrication de piquets en bois de châtaignier dans la commune de Saint-Pons-de-Thomières, dans le territoire du PNR.

Auteur : Antonio García Collado.

Les problèmes liés à l'exploitation de cette essence et à sa sylviculture résident principalement dans la difficulté d'accès aux parcelles, la micropropriété et le morcellement. Du point de vue technologique ses contraintes sont le déficit en bois de qualité, la crainte de la roulure et des pourritures internes causées directement ou indirectement par des pathologies (Forêt-entreprise, 2008).

Plusieurs études portant sur le châtaignier ont été menées depuis plus de 25 ans avec l'objectif primaire de revaloriser et revitaliser la filière châtaignier. En effet cette espèce a un très fort potentiel, surtout dans le nord de la France où les stations sont plus productives et les indices de fertilité plus élevés.

*« Les bois de qualité, c'est-à-dire droits et d'au moins 30 cm de diamètre non roulés, valent actuellement 100 à 110 €/m<sup>3</sup> sur pied en moyenne. À titre de comparaison, pour ces dimensions, un châtaignier d'1 m<sup>3</sup> équivaut au prix d'un chêne de 3 m<sup>3</sup>, soit 150 €/m<sup>3</sup> en moyenne pour des bois sains non roulés. Un tel châtaignier peut être produit en 40 ans, contre 120 ans pour le chêne, soit trois rotations de châtaignier, avec autant – sinon plus – de bois d'œuvre exploité à chaque coupe »* (Lemaire, 2008).

Il est donc crucial de connaître les bonnes stations et les endroits idoines pour développer au maximum et avec la plus haute rentabilité possible la sylviculture du châtaignier.

Pour mieux gérer cette essence il faut d'abord connaître son autoécologie. Les conditions écologiques favorables au châtaignier sont définies comme suit (Bourgeois, 2004) :

**Tableau 3.** Bilan des besoins et des limites écologiques du châtaignier en France.

Sources : Le châtaignier, un arbre, un bois (IDF), 2004.

Besoins et limites écologiques du châtaignier	
Besoins	<b>Pluviométrie</b> : >700 mm (optimal >800 mm) <b>Altitude</b> : 300-1000 m (jusqu'à 1200 m en climat méditerranéen) <b>Sols</b> : Profonds et acides (pH 4,8-6,5). Essence calcifuge. <b>Température</b> : chaleur estivale pour la bonne fécondation et maturation des fruits <b>Lumière</b> : essence légèrement héliophile
Limites	Froid extrême précoce et tardif Présence de calcaire actif Sols trempés, hydromorphie Sécheresse estivale

Depuis plusieurs années des dépérissements ont été constatés et considérés comme une conséquence des événements extrêmes, notamment de sécheresse estivale due au manque de précipitations ou à des épisodes de températures anormalement élevées.

#### 4.2 Une essence sensible aux pathologies

En tout état de cause, la problématique du châtaignier est complexe étant donné les multiples maladies qui touchent cette essence et qui sont présentes dans la région. Est-ce que les parasites attaquent les arbres affaiblis à cause d'une station inappropriée ? Ou est-ce que les arbres ne sont pas capables de supporter des épisodes extrêmes à cause de l'affaiblissement provoqué par les parasites ? Comment identifier la cause réelle du dépérissement ? Comment différencier les dépérissements provoqués par les facteurs climatiques de ceux dus aux maladies et aux parasites ? Ou pour aller encore plus loin, est-ce que les parasites sont une cause de dépérissement ? Y a-t-il un lien direct entre ces deux notions ?

Le terme « dépérissement » peut prêter à confusion. Selon le Département de la Santé des Forêts (DSF), un dépérissement est une dégradation graduelle de l'état de santé de l'arbre causée par la confluence de plusieurs facteurs et aléas d'origine abiotique. Les maladies et les ravageurs sont considérés comme des agents primaires, et donc leurs dégâts et leurs effets ne sont pas considérés comme du dépérissement (de Villebonne, 1998).

Le chancre du châtaignier (*Cryphonectria parasitica* (Murrill)) est probablement le parasite le plus répandu et causant le plus de dégâts dans les châtaigneraies au niveau national (Rabin, 2005). C'est un champignon introduit en Europe lors de la première guerre mondiale. Depuis les années 40 il a décimé les châtaigneraies européennes, au point que la culture de cette essence ait été considérée impossible puisqu'une fois le champignon installé, aucune action de lutte ne permet d'éradiquer le pathogène. Dans les années 80 et 90, la virulence du pathogène s'atténue progressivement (« hypovirulence »). Le phénomène est observable car l'écorce, au niveau des chancres, devient noirâtre et est moins fissurée. Il n'y a plus de rejets sous ces chancres et les branches affectées ne se dessèchent plus. La blessure provoquée par le chancre cicatrise donc naturellement. Ce phénomène est provoqué par un virus qui attaque le champignon et qui s'étale de façon naturel et spontanée. (Saintonge, 2005).

## 5. Méthodes : entre les modèles et le terrain

Pour réaliser cette étude et pouvoir déterminer les limites pédoclimatiques du châtaignier, il est nécessaire de mettre en rapport des données climatiques, pédo-géologiques et forestières pour trouver le lien entre elles et identifier les conditions locales favorables ou défavorables à cette essence. Il est donc essentiel de connaître la distribution des peuplements de châtaignier sur le territoire, et pour un échantillon d'entre eux, les conditions climatiques et topographiques auxquelles ils sont soumis ainsi que la nature du sol. Ensuite, l'état sanitaire dans chaque placette de l'échantillon est noté en suivant des protocoles existants et déjà utilisés nationalement, afin d'obtenir un lien entre les conditions stationnelles (climat, sol et topographie notamment) et la santé des arbres. Finalement, avec les données récoltées sur le terrain et les conditions climatiques connues à partir des modèles, des analyses statistiques ont été mises en place pour proposer un modèle de répartition des stations favorables ou non au châtaignier.

La méthodologie exposée à continuation pour le développement du projet est basée sur d'autres travaux réalisés par les organismes ici impliqués, pour d'autres essences d'intérêt forestier. C'est le cas du chêne pubescent en région PACA (Berger, 2013), du hêtre (Silva, 2010. Nageleisen, 2005) ou du douglas dans le PNR du Haut-Languedoc (Martin-Horcajo, 2013), et également d'autres travaux de caractérisation des stations (Gégout *et al*, 2008).

### 5.1 Obtention de données forestières : repérer les châtaigniers du territoire

Afin de constituer un échantillon de peuplements à étudier, il est nécessaire de connaître la distribution des châtaigneraies sur le territoire. Les cartes forestières vectorisées de l'IFN des deux départements sur le territoire du Parc ont servi de base de travail. A partir de ces cartes il est possible de localiser les peuplements forestiers par essence selon le département, et par structure ou type de régime sylvicole.

Les peuplements de châtaignier sur le territoire ont été isolés à partir de la carte forestière IFN par le biais du logiciel ArcGIS. Pour chaque polygone représentant un peuplement, son centroïde a été repéré de façon automatique (outil «*feature to point*»). Les centroïdes ont été utilisés comme points représentatifs pour définir le centre des placettes d'échantillonnage (obtention des coordonnées).

Nous avons travaillé exclusivement avec les peuplements classés «*purs*» de châtaignier, les peuplements mélangés n'ont pas été pris en compte pour la sélection des points d'échantillonnage afin de faciliter les travaux de terrain et d'éliminer la possibilité de ne pas trouver suffisamment d'arbres adéquats de l'essence ciblée dans les placettes. De cette manière les effets de la compétition interspécifique ont été évités. Les vergers ont été également écartés.

### 5.2 Echantillonnage et stratification selon les facteurs à étudier

Avec un échantillonnage aléatoire, pour qu'il soit représentatif d'une population, la taille de l'échantillon est importante. La stratification de la population selon la caractéristique qui nous intéresse permet de réduire l'échantillon tout en mettant en évidence les influences de la variable qui définit la stratification. Le but de cette étude est de mieux connaître surtout l'influence du climat, la stratification envisagée l'est donc selon un gradient climatique.

Au début de l'étude, et en suivant la méthodologie appliquée pour d'autres travaux, cette stratification aurait logiquement dû être faite selon les limites théoriques du déficit hydrique de l'essence, représentées par la valeur de P-ETP des mois estivaux (de juin à août) (*Tableau 4*) (Daget, 1977, Berger, 2013). Ces valeurs ont été établies au niveau national pour le châtaignier dans le cadre du développement de l'outil BIOCLIMSOL du CNPF.

**Tableau 4.** Limites climatiques du châtaignier.

Source : IDF, BIOCLIMSOL.

Essence	Classe	Type de station	Limites de P-ETP (mm)
Châtaignier	1	Défavorable	<-200
	2	Moyenne	-200 à -150
	3	Favorable	>-150

Les résultats obtenus du croisement de la stratification en fonction du P-ETP avec la couche forestière IFN ont montré un déficit de peuplements dans les classes les plus favorables, surtout pour la partie héraultaise du Parc. La stratification n'est donc pas possible du fait d'un nombre insuffisant de données statistiquement valables (*Annexe 2*).

Pour corriger cela, il a fallu changer le critère de stratification ; l'altitude a été donc choisie comme critère puisqu'elle est corrélée au climat. Le gradient climatique est donc respecté. Des nouvelles valeurs de tranches altitudinales ont été définies à dire d'expert (*Tableau 5*).

**Tableau 5.** Limites altitudinales pour le châtaignier.

Essence	Classe	Limites d'altitude (m)
Châtaignier	1	<400
	2	400 à 600
	3	>600

Cette nouvelle stratification a permis d'avoir suffisamment de placettes dans chaque classe (*Annexe 3*).

Une deuxième stratification a été ensuite réalisée. Pour mieux prendre en compte l'influence de l'exposition et des effets de versant sur les peuplements et le caractère favorable ou non de la station, seules les expositions nord (regroupant aussi les expositions nord-est et nord-ouest) et les expositions sud (regroupant les expositions sud-est et sud-ouest) ont été gardées. Les expositions est et ouest pures ont été rejetées, de même que les terrains plats (sans exposition). Pour cette stratification nous avons utilisé un modèle d'exposition construit à partir d'un modèle numérique du terrain (MNT) sur ArcGIS. Une répartition homogène des placettes sur les différentes expositions prises en compte a été envisagée.

Un échantillon de 90 placettes où prendre les mesures et notations nécessaires a été donc extrait parmi la totalité des peuplements, retenant 16 placettes par classe altitudinale et classe d'exposition. Pour l'exposition nord sur la tranche altitudinale la plus favorable, une exception a été faite car il n'a été possible de trouver que 10 placettes. Ces placettes ont fait l'objet d'un tirage aléatoire à l'intérieur de chaque classe croisant altitude et exposition (*Tableau 6*). La quantité de placettes à visiter a été déterminée en fonction du temps disponible, environ deux mois pour les travaux de terrain, et du nombre de placettes minimum statistiquement valide.

**Tableau 6.** Distribution théorique des placettes selon les conditions d'altitude et exposition.

C. Altitude \ Exposition	N	S
1	16	16
2	16	16
3	10	16

Une carte de distribution des points d'échantillonnage par classe altitudinale est visible dans les annexes (*Annexe 4*).

### 5.3 La phase de terrain. Relevés, les paramètres à mesurer

Pour pouvoir établir le lien entre les conditions stationnelles de chaque point d'échantillonnage et l'état du peuplement en place, il faut impérativement se rendre sur le terrain pour mesurer et noter le degré de dépérissement des arbres. Les notations ont été faites en suivant des protocoles agréés et utilisés au niveau national. Ces protocoles sont expliqués ci-dessous.

Dans chaque placette, sur le terrain, ont été mesurés des paramètres :

**-Dendrométriques** : diamètre de 20 arbres de l'étage dominant ou co-dominant (max. deux rejets par souche en cas de taillis), hauteur dominante (les 3 plus gros arbres dans un rayon de 8 m du centre de la placette), surface terrière, âge du peuplement (carottage d'un arbre à la tarière), indice de fertilité du peuplement (rapport hauteur dominante/âge), nombre de brins par hectare, structure du peuplement.

**-Sanitaires** : notations selon les protocoles DEPEFEU et CHANCRE, type de chancre (actif ou cicatrisé) sur les 20 arbres de l'étage dominant ou co-dominant numérotés.

**-Pédologiques** : relevé pédologique avec une fosse creusée à la pioche<sup>(\*)</sup>

**-Compensateurs/aggravants** : confinement, situation sur le versant, exposition, pente, présence de terrasses, pendage et fissuration de la roche mère.

<sup>(\*)</sup>Une fosse pédologique permet de connaître les caractéristiques du sol de la station. Lors des relevés pédologiques l'épaisseur, la texture, le pourcentage en éléments grossiers, la structure, la compacité et la réserve utile en eau (RU) de chaque horizon ont été notés. Ensuite la profondeur, la RU *minimale* ainsi que le pH étaient calculés ou mesurés pour l'ensemble du sol.

#### 5.3.1 Notation du dépérissement : le protocole DEPEFEU (DEPErissement FEUillus) :

Pour l'identification et le classement des dépérissements chez les feuillus deux protocoles existent :

- Le protocole ARCHI, développé par l'IDF, qui base son analyse sur l'architecture et la forme du houppier (ramification) de l'arbre pour déterminer le degré de dépérissement. Il s'agit d'un protocole assez récent toujours en phase d'amélioration. Il dépend de l'architecture de chaque essence, les types ARCHI sont donc spécifiques à chaque essence. Actuellement il n'a pas encore été mis au point pour les taillis de châtaignier.
- Le protocole DEPEFEU, développé par le DSF, qui base son analyse sur la mesure qualitative de la mortalité du houppier (branches) et la perte foliaire. DEPEFEU classe les arbres en 5 catégories selon la présence/absence d'une série d'indicateurs tels que la présence de branches mortes, la transparence du houppier, la présence d'échancrures, etc. Une placette est jugée dépérisissante si le nombre d'arbres classés dans les catégories les plus graves dépasse un certain seuil dont le plus courant est le DEPE20%. Ce seuil classe un peuplement comme dépérisissant si au moins 20% des arbres pris en compte ont été notés de catégorie 3 ou supérieure (Département de la Santé des Forêts, 2010, Nageleisen, 1998) (*Annexe 5*). C'est le protocole retenu pour le développement de ce travail.

Le degré de dépérissement d'un arbre est fonction de ces trois critères visuels :

- La transparence du houppier ;
- La mortalité d'organes pérennes ;
- La répartition de la masse foliaire (homogène ou non).

Ces critères sont eux-mêmes divisés en sous-catégories selon le protocole (*Annexe 5*).

Chaque critère est noté de 0 à 4 en suivant une procédure déterminée (*Annexe 6*). Ensuite l'indice de dépérissement est facilement calculable à partir des formules précisées dans le protocole.

Sur le terrain une version simplifiée du protocole DEPEFEU basée sur les mêmes principes permet d'obtenir une note du dépérissement de l'arbre sans l'utilisation des formules. Avec ce protocole, appelé « DEPEFEU synthétique », l'obtention d'une note identique à celle obtenue en utilisant les formules a été corroborée par le DSF et permet de gagner du temps. L'assignation de la note est faite avec un tableau à deux entrées : en estimant la proportion de branches mortes et de ramification fine manquante du houppier fonctionnel. Le tableau donne une note globale de dépérissement d'une façon plus rapide mais aussi exacte qu'avec le protocole DEPEFEU normal (Annexe 7).

### 5.3.2 Identifier l'impact du parasite : le protocole CHANCRE

Développé également par le DSF, ce protocole vise le classement des châtaigniers du point de vue des effets et dégâts (impacts secondaires) causés par la maladie du chancre (*Cryphonectria parasitica*), y compris les chancres cicatrisés ou actuellement hypovirulents, d'une façon rapide et simple (Annexe 8).



**Figure 5.** Différence entre un chancre actif (à gauche) et un chancre hypovirulent (à droite). Le chancre actif présente des colorations rouges et un front de développement sous cortical montrant des palmettes blanches (mycélium du champignon). Le chancre hypovirulent est noirâtre et les fissures de l'écorce sont veilles et peu profondes.

Auteur : Antonio García Collado.

Après avoir établi tous les paramètres et les informations à mesurer ou noter dans chaque placette, une fiche de terrain a été créée (Annexes 9 et 10).

### 5.4 Les différents modèles climatiques utilisés

Connaître les conditions climatiques du territoire de l'étude et de chaque point d'échantillonnage est indispensable pour le déroulement du projet. Pour avoir accès aux données climatiques nous disposons de trois modèles possibles :

1. **Modèle SAFRAN** : Modèle développé par Météo-France, donne des valeurs issues de l'interpolation de mesures de différents paramètres atmosphériques captées par un réseau de 1600 postes sur le territoire de France métropole. Pour améliorer la précision du modèle, la France a été découpée en 615 zones à climat homogène. Le résultat est une série de valeurs sur une maille de 8 km x 8 km.  
Comme caractéristique particulière, ce modèle permet de donner une valeur de l'évapotranspiration potentielle (ETP) en mm en utilisant la formule de Penman-Monteith. Période de couverture : 1958-2012.
2. **Modèle AURELHY** : Développé aussi par Météo-France, c'est un modèle utilisant et intégrant le relief. Il fonctionne par interpolation entre les paramètres météorologiques

captés par un réseau de 3500 postes sur tout le territoire de France métropolitaine et le relief dans un rayon de 25 km. Les données issues du modèle et disponibles au public sont des valeurs de différents paramètres climatiques (précipitations annuelles et mensuelles, températures minimales et maximales annuelles et mensuelles, etc.) selon un maillage de points de 1 km x1 km. Période de couverture : dépend de chaque variable.

- Modèle DIGITALIS** : Développé par AgroParisTech-Lerfob, il prend les précipitations, les températures et le rayonnement solaire pour calculer le déficit hydrique et tenant compte de différents paramètres topographiques (altitude) avec un Modèle Numérique du Terrain. Les principaux résultats (précipitations, températures, rayonnement solaire et ETP) sont représentés sur couches SIG en libre accès. L'ETP est calculée par la formule de Turc. Période de couverture : 1961-1990.

Un modèle hybride des modèles AURELHY et DIGITALIS a été utilisé pour la détermination des déficits hydriques (P-ETP). Ce modèle hybride apportait des valeurs plus correctes que les autres modèles pour la zone de l'étude, qui se trouve à cheval entre deux climats bien différenciés au sein d'une topographie complexe. Ce modèle a été créé par Jean LEMAIRE et il a déjà été utilisé lors de l'étude menée sur le douglas sur le territoire du parc en 2013.

**Tableau 7.** Comparaison entre les différents modèles climatiques.

	Avantages	Inconvénients
<b>SAFRAN</b>	-Données corrigées plusieurs fois. -Calcul de l'ETP plus précis (formule de Penman-Monteith).* -Mise à disposition des données journalières.	-Ne prend pas en compte la topographie locale : pas de maille de 8 x 8 km (assez large).
<b>AURELHY</b>	-Grand nombre de postes de mesure (3500 pour les précipitations, 1500 pour les températures).	-Ne prend pas en compte la microtopographie (rayon 25km). -Utilisation d'un MNT au pas de 250m. -Ne calcule pas l'ETP.
<b>DIGITALIS</b>	-Prend en compte l'influence de la topographie. Utilisation d'un MNT au pas de 50m. -Calcul de l'ETP.	-ETP calculée de façon moins précise (formule de Turc).* -Faible nombre de postes de mesure (environ 500 pour les températures, environ 400 pour les précipitations). -Période couverte pas très longue.

\* La formule de Turc tend à sous-estimer l'ETP de 10 à 20% en été comparée à la formule de Penman (Richard, 2011).

Ces modèles au format SIG permettent d'obtenir pour chaque point d'échantillonnage ses conditions climatiques (température moyenne, maximale et minimale annuelle, précipitations, ETP, etc.).

### 5.5 Une superposition complexe de données géologiques et pédologiques

Pour le travail de caractérisation des sols, quatre sources d'information plus ou moins corrélées étaient disponibles :

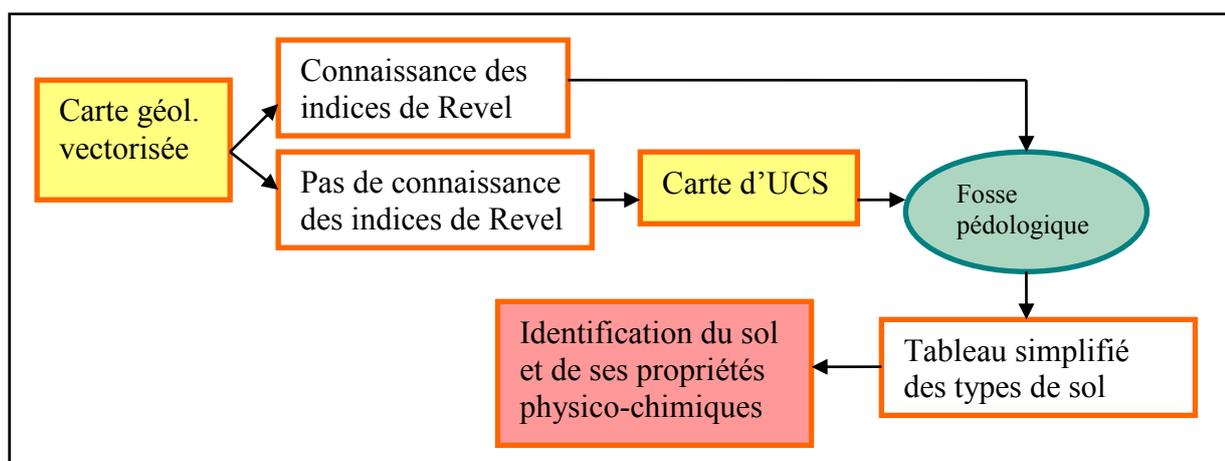
- Carte vectorisée BRGM(\*) géologique et de substrats** : il s'agit d'une carte en format SIG couvrant l'ensemble du territoire du Parc. Chaque polygone de la carte représente un type de substrat géologique identifié par un code.  
(\*)Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- Tableau de JC Revel** : base de données préparée par le professeur Jean-Claude REVEL, de l'école nationale supérieure agronomique de Toulouse, en 2013. Il a décrit les substrats

répertoriés dans les différentes cartes BRGM papier qui englobent le territoire du Parc en assignant à chaque type de substrat une valeur à dire d'expert à la richesse chimique, à la facilité de fissuration et à l'altérabilité de chaque roche mère. Le problème de cette base est qu'elle est incomplète pour l'ensemble du Parc, car il manque l'analyse des substrats correspondants à la carte de Bédarieux (*Annexe 11*) (Revel, 2013).

3. **Tableau simplifié des types de sol du Parc** : il a été construit pour faciliter une identification rapide et simplifiée sur le terrain des sols du Parc en fonction de la roche mère et sa profondeur. De plus, pour chaque sol, le tableau relie des données permettant de caractériser différents paramètres (richesse chimique, RU et fertilité) (*Annexe 12*) (Delaunois, 1995).
4. **Carte des UCS (Unités Cartographiques de Sols)** : Les UCS regroupent différents substrats selon leur nature afin de simplifier la complexité géologique du Parc. Chaque unité apporte une probabilité de trouver une série de sols déterminés (UTS) dans un endroit précis. Cette carte se trouve en format numérique (Barthes, 2013).

Pour pouvoir caractériser les conditions pédologiques et les propriétés du sol de chaque placette, il a été nécessaire de travailler simultanément avec ces quatre sources d'information (car séparément elles n'arrivent pas à couvrir tout le territoire du Parc) en suivant ces étapes :

1. Liaison de la carte géologique vectorisée au tableau de JC Revel afin de connaître pour chaque point de coordonnées XY du Parc le type de substrat de base et leurs valeurs de richesse chimique, fissuration et altérabilité. Cette liaison ne couvre pas l'ensemble du territoire.
2. Regroupement en classes des substrats du Parc avec des propriétés semblables à partir de la carte géologique pour faciliter le travail. Ce regroupement a été effectué par des spécialistes de la géologie et de la pédologie mandatés par le Parc dans le cadre du projet.
3. Pour les sols non répertoriés par JC Revel, observation de la carte des UCS. Une fois connue l'unité, consulter la liste des sols (ou UTS) possibles avec sa description. Les UTS sont décrites selon la roche mère et le type de substrat de base et donc cela permet de réduire le nombre de possibilités des sols à trouver.
4. Observation sur place d'un profil lors de la phase de terrain par l'ouverture d'une fosse pédologique (relevé de terrain) et la détermination *in situ* des caractéristiques du sol (profondeur, roche mère notamment). Le nombre d'alternatives possibles est connu grâce à la carte d'UCS ou à la carte géologique. Avec la mesure de la profondeur et l'identification de la roche mère, la détermination du sol est possible à l'aide du tableau simplifié des types de sol du Parc.



**Figure 6.** Schéma d'identification du sol pour chaque placette.

Auteur : Antonio García Collado.

Malgré tout, l'identification d'un sol *a priori* n'est pas possible. La phase préalable au terrain permet de réduire le nombre de possibilités du type de sol et le terrain rend possible la différenciation.

## 5.6 Les facteurs compensateurs ou aggravants du climat

Les facteurs compensateurs sont toutes les conditions qui définissent la station et qui jouent un rôle sur le développement des peuplements. Le plus souvent il s'agit de facteurs topographiques et pédo/géologiques. Le problème est d'établir l'importance de chaque facteur par rapport aux autres ou de déterminer le plus significatif.

Pour chaque placette, lors de la phase de terrain, les facteurs compensateurs et aggravants ont été pris en compte et notés, selon qu'ils sont positifs, négatifs ou nuls (et dans ce dernier cas, les conditions climatiques influencent directement le peuplement sans être compensées ou aggravées).

Ces facteurs compensateurs topographiques peuvent être approchés sous SIG grâce au TPI (*Topographic Position Index*) (Jenness, 2006). Cet indice est calculé à partir du MNT (modèle numérique de terrain), et assigne à chaque dalle de ce dernier une valeur calculée par la différence entre le nombre de dalles voisines dont l'altitude est plus basse que le point central et celles dont l'altitude est plus élevée dans un rayon donné. Le TPI est donc un indice topographique qui exprime la position relative d'un point du terrain par rapport aux autres points proches selon un rayon fixé. De cette façon il est possible de déterminer si un point se trouve plutôt en bas, en haut ou à mi versant, et donc du point de vue des facteurs compensateurs, si la position topographique de ce point est favorable ou défavorable (apports d'eau supérieurs aux dépôts, par exemple). Une valeur très négative du TPI correspond à un point en fond de vallée, une valeur très positive correspond à une crête ou un sommet. Les valeurs approchant zéro correspondent aux plateaux ou à une position de mi-versant (*Annexe 13*).

Une fois toutes ces données disponibles, des analyses statistiques permettent de faire apparaître, parmi tous les facteurs relevés du terrain, ceux jouant un rôle plus important dans le dépérissement du châtaignier.

## 5.7 Des analyses statistiques pour une validité scientifique

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel TANAGRA 1.4, développé à l'Université Lyon 2 (Rakotomalala, 2005) et le logiciel STATISTICA 7. Le logiciel Excel 2007 a également été utilisé, notamment pour les tableaux croisés dynamiques et les graphiques.

Pour pouvoir traiter statistiquement les données obtenues des placettes en combinaison avec les données climatiques obtenues des modèles, une base de données a été mise au point. Cette base a été constituée en deux phases : d'abord pour chaque placette, les notations des protocoles DEPEFEU et CHANCRE des 20 arbres ont été saisies. Cela permet de calculer le nombre d'arbres dépérissants (notés DEPE $\geq$ 3) de chaque placette et de la même manière, de classer chaque placette comme « *dépérissante* » ou « *saine* » (selon le seuil fixé par le protocole DEPEFEU). Pour rappel, une placette est jugée dépérissante quand au moins 20% des arbres sont dépérissants. Ensuite, pour chaque placette son classement et tous les paramètres dendrométriques et climatiques ont été mis en relation. A partir de ce moment, différentes analyses statistiques ont été appliquées :

- **Analyse en composantes principales (ACP)** : cette analyse considère des axes indépendants qui représentent les principales directions de variabilité des données brutes. Plusieurs axes (ou composantes principales) sont proposés, chaque axe explique une partie de la variabilité des données. Ils sont classés du plus explicatif au moins explicatif selon le pourcentage de variabilité expliqué. Ensuite les différentes variables sont testées pour trouver celles qui s'adaptent le mieux aux axes et donc qui expliquent le mieux la

distribution des autres. Autrement dit, les axes expliquent la variance des points échantillonnés.

Cette analyse est purement exploratoire, elle sert à faire ressortir les variables les plus influentes, mais elle ne sert pas directement à la construction d'un modèle (La liste de variables testées est disponible dans l'*Annexe 14*).

- **Analyse de variances (ANOVA) :** il s'agit d'un traitement qui permet d'établir l'existence ou non d'une corrélation entre une ou plusieurs variables continues et une variable discrète. Cette analyse a été utilisée pour confirmer ou écarter les corrélations entre le degré de dépérissement des peuplements et certaines conditions stationnelles, et par ce biais, confirmer ou non les hypothèses de départ. Cela est très important étant donné que notre échantillon de placettes a été stratifié et ensuite sélectionné aléatoirement.
- **Arbre de décision :** l'arbre de décision est un outil qui permet de répartir en groupes (d'une taille minimale fixée) une population initiale selon des limites qu'il fixe pour une ou plusieurs variables données, avec une proportion d'erreur connue. Il permet donc d'établir des limites pour les variables influents en fonction de l'hétérogénéité de la population initiale en séparant des sous-populations de façon binaire (en termes d'absence/présence). Il convient de choisir un arbre de décision qui soit un compromis entre la précision et la praticité. Un arbre très précis peut inclure dans son développement un grand nombre de variables, parfois difficiles à mesurer. Un arbre créé à partir d'un nombre plus restreint de variables a le plus souvent un taux d'erreur plus élevé.
- **Modèle de régression logistique binaire :** Il s'agit d'un outil qui permet d'établir une équation pour classer une variable binaire dépendante en fonction d'un certain nombre de variables continues indépendantes. Ce type de régression a été choisie car la population (l'ensemble de placettes) était déjà séparée de façon binaire (« *dépérisante* » ou « *saine* »). Une régression logistique binaire est beaucoup plus performante qu'une régression multiple quand la population initiale est répartie en termes d'absence/présence. Le modèle permet de donner une valeur précise de la probabilité de classer correctement la variable dépendante en fonction des variables indépendantes choisies.

## 6. Résultats

### 6.1 Détermination des principaux paramètres stationnels

Le premier objectif est de déterminer quels sont les variables ou facteurs qui expliquent le dépérissement des châtaigniers. Pour y arriver une analyse multivariée a été utilisée en composantes principales (ACP) des données associées à chaque placette (*Figure 7*) (Rappel : liste de variables testées en *Annexe 14*).

Ici la proportion de variabilité expliquée obtenue pour les deux premiers axes est très bonne : ils expliquent au peu près 50% de la variabilité des données brutes.

Axis	Eigen value	Difference	Proportion (%)	Histogram	Cumulative (%)
1	8,887106	5,278169	32,92 %		32,92 %
2	3,608938	1,133662	13,37 %		46,28 %
3	2,475276	0,280326	9,17 %		55,45 %
4	2,194950	0,984347	8,13 %		63,58 %

**Figure 7.** Tableau des principaux axes (composantes principales).

Source : TANAGRA 1.4

Auteur : Antonio García Collado.

Ensuite le logiciel donne la liste de variables qui sont corrélées aux axes (*Figure 8*). Les variables les plus corrélées avec le premier axe sont les variables du climat (température) et d'altitude.

Néanmoins le climat et l'altitude sont en même temps corrélés entre eux et donc leurs effets sont liés. La variable « *moyenne des températures maximales des mois de juin à août pendant la période 1981-2010* » selon le modèle AURELHY (ATX0608811 sur la figure 8), a un facteur de corrélation linéaire de -0,92 avec l'axe 1, ce qui signifie qu'elle pourrait suffire à expliquer la variance des points échantillonnés. Les variables les plus corrélées avec le deuxième axe sont les variables liées à la présence de chancre et à la quantité de branches mortes.

Attribute	Axis_1		Axis_2		Axis_3		Axis_4		Axis_5	
	Corr.	% (Tot. %)								
ATX0608811	-0,92308	85 % (85 %)	0,12029	1 % (87 %)	0,09182	1 % (87 %)	0,10581	1 % (89 %)	-0,01619	0 % (89 %)
ATN0381	-0,89248	80 % (80 %)	0,32559	11 % (90 %)	-0,01724	0 % (90 %)	0,17012	3 % (93 %)	0,05666	0 % (93 %)
ATMAN81_21	-0,88892	79 % (79 %)	0,28232	8 % (87 %)	0,14106	2 % (89 %)	0,19551	4 % (93 %)	-0,01875	0 % (93 %)
ATN018110	-0,85590	73 % (73 %)	0,36747	14 % (87 %)	-0,02948	0 % (87 %)	0,15366	2 % (89 %)	0,03137	0 % (89 %)
APveg81_21	0,85062	72 % (72 %)	-0,22438	5 % (77 %)	-0,06027	0 % (78 %)	-0,23318	5 % (83 %)	0,12028	1 % (85 %)
NBGELAN81	0,85006	72 % (72 %)	-0,31216	10 % (82 %)	0,04034	0 % (82 %)	-0,17486	3 % (85 %)	-0,09168	1 % (86 %)
PETPv_8150	0,77975	61 % (61 %)	-0,12302	2 % (62 %)	0,51470	26 % (89 %)	0,11951	1 % (90 %)	0,03805	0 % (90 %)
APAN81_215	0,71401	51 % (51 %)	-0,17399	3 % (54 %)	-0,19872	4 % (58 %)	-0,28680	8 % (66 %)	0,17667	3 % (69 %)
PET59_8150	0,67646	46 % (46 %)	-0,02165	0 % (46 %)	0,64501	42 % (87 %)	0,25314	6 % (94 %)	-0,03672	0 % (94 %)
MNT11_34_8	0,66662	44 % (44 %)	0,20644	4 % (49 %)	-0,03769	0 % (49 %)	-0,19221	4 % (53 %)	0,19192	4 % (56 %)
PET68_8150	0,57029	33 % (33 %)	0,09909	1 % (34 %)	0,64886	42 % (76 %)	0,31205	10 % (85 %)	-0,06007	0 % (86 %)
Indice fertilité	-0,52682	28 % (28 %)	-0,61737	38 % (66 %)	-0,14729	2 % (68 %)	0,06241	0 % (68 %)	0,29903	9 % (77 %)
DEPEFEU3+	-0,52252	27 % (27 %)	-0,57495	33 % (60 %)	0,15651	2 % (63 %)	-0,18991	4 % (66 %)	0,10786	1 % (68 %)
Hauteur dominante	0,47984	23 % (23 %)	0,67366	45 % (68 %)	0,09727	1 % (69 %)	-0,19328	4 % (73 %)	-0,24816	6 % (79 %)
Chancre 3+	-0,37681	14 % (14 %)	-0,67184	45 % (59 %)	0,20340	4 % (63 %)	-0,21189	4 % (68 %)	-0,36050	13 % (81 %)
B_Mortes3+	-0,44852	20 % (20 %)	-0,63478	40 % (60 %)	0,26261	7 % (67 %)	-0,20701	4 % (72 %)	-0,05534	0 % (72 %)
Exposition2	-0,16295	3 % (3 %)	0,04662	0 % (3 %)	0,72843	53 % (56 %)	0,24279	6 % (62 %)	-0,05889	0 % (62 %)
Topographie	-0,14969	2 % (2 %)	0,01086	0 % (2 %)	0,16488	3 % (5 %)	-0,63713	41 % (46 %)	0,25420	6 % (52 %)
Surface terrière	0,04522	0 % (0 %)	0,42740	18 % (18 %)	-0,11994	1 % (20 %)	-0,43825	19 % (39 %)	-0,57000	32 % (72 %)
Fissuration	0,37406	14 % (14 %)	0,28516	8 % (22 %)	-0,15287	2 % (24 %)	0,36186	13 % (38 %)	0,44804	20 % (58 %)
Situation2	0,24877	6 % (6 %)	-0,33131	11 % (17 %)	-0,41861	18 % (35 %)	0,38736	15 % (50 %)	-0,39588	16 % (65 %)
Poches	-0,32755	11 % (11 %)	0,32336	10 % (21 %)	0,41747	17 % (39 %)	-0,39702	16 % (54 %)	0,20346	4 % (59 %)
Pendage/Foliation	0,18320	3 % (3 %)	-0,07572	1 % (4 %)	-0,09932	1 % (5 %)	0,29217	9 % (13 %)	0,09611	1 % (14 %)
ChancreAct	-0,28971	8 % (8 %)	-0,48329	23 % (32 %)	0,11613	1 % (33 %)	0,23921	6 % (39 %)	-0,09441	1 % (40 %)
Confinement2	0,16753	3 % (3 %)	0,33034	11 % (14 %)	-0,02856	0 % (14 %)	0,35222	12 % (26 %)	-0,04302	0 % (26 %)
RU minimale	0,46406	22 % (22 %)	-0,02960	0 % (22 %)	-0,40040	16 % (38 %)	0,21448	5 % (42 %)	-0,02627	0 % (42 %)
Porosité	-0,28215	8 % (8 %)	0,42173	18 % (26 %)	0,04585	0 % (26 %)	-0,37391	14 % (40 %)	0,01672	0 % (40 %)
Var. Expl.	8,88711	33 % (33 %)	3,60894	13 % (46 %)	2,47528	9 % (55 %)	2,19495	8 % (64 %)	1,21060	4 % (68 %)

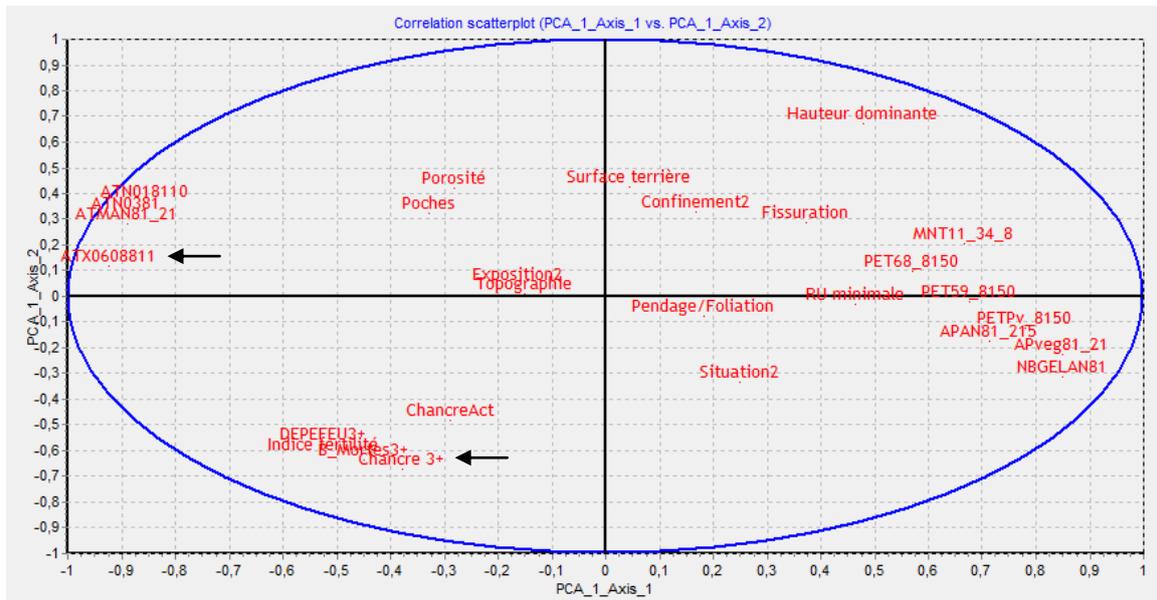
**Figure 8.** Corrélation des variables aux principaux axes.

Source : TANAGRA 1.4

Auteur : Antonio García Collado.

Une projection graphique des variables permet de visualiser la corrélation de celles-ci avec les axes principaux (*Figure 9*).

L'état de santé des peuplements est donc lié au climat (notamment la température) et les attaques du chancre (actuelles ou ayant laissé des traces). Cependant, il est connu que la répartition et l'agressivité du chancre sont aussi corrélées aux conditions climatiques, et notamment à la température annuelle (Saintonge, 2005). Ainsi, pour récapituler, il est clair que l'état sanitaire des châtaigneraies est fonction du climat, et plus précisément de la température.



**Figure 9.** Cercle de corrélation entre les variables et les axes de composantes principales.

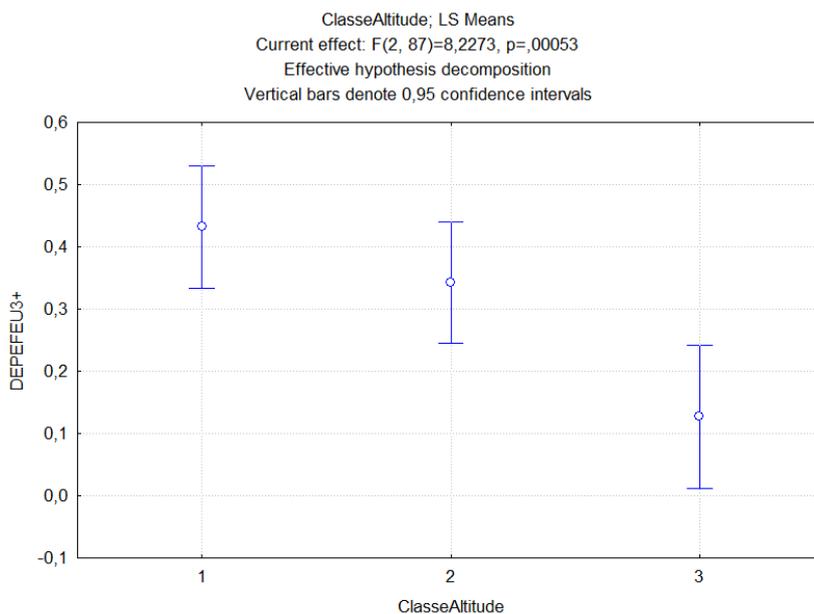
Source : TANAGRA 1.4

Auteur : Antonio García Collado.

## 6.2 Un dépérissement lié à l'altitude

Pour savoir s'il existe effectivement un rapport entre l'altitude et l'état sanitaire des châtaigniers, les données récoltées ont été traitées avec une analyse de variances (ANOVA).

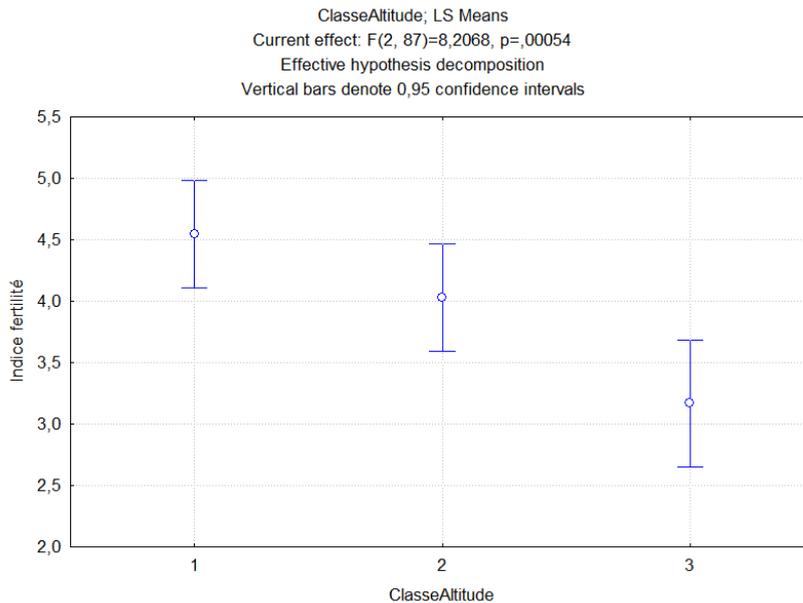
L'objectif est d'identifier le lien entre le taux de dépérissement des peuplements (exprimé en pourcentage d'arbres classés au-delà de 3 selon le protocole DEPEFEU), l'indice de fertilité, et la classe altitudinale (*Figures 10 et 11*). L'intérêt de l'indice de fertilité est qu'il intègre tous les facteurs climatiques et biotiques présents dans un endroit pour donner une valeur synthétique de l'adéquation de la station forestière.



**Figure 10.** ANOVA du dépérissement en fonction de la tranche altitudinale des points échantillonnés. Sur la figure on observe un rapport négatif entre le dépérissement et l'altitude (très forte corrélation,  $p=0,0005$ ). Le pourcentage d'arbres classés DEPEFEU 3 ou plus au sein de chaque placette est plus élevé dans les tranches altitudinales basses (1 et 2).

Source : STATISTICA 7

Auteur : Antonio García Collado.



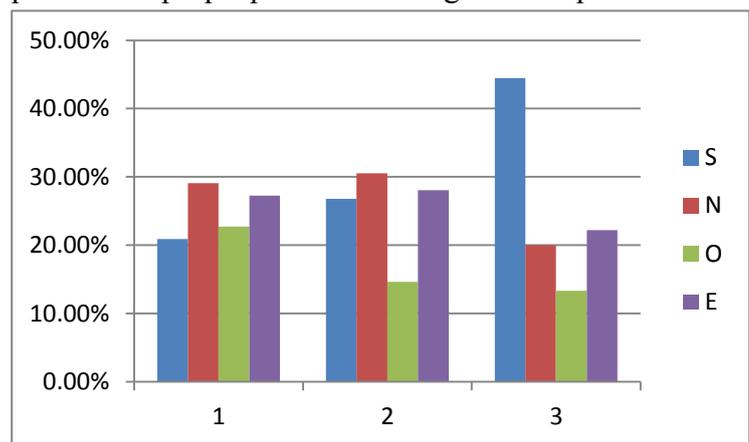
**Figure 11.** ANOVA de l'indice de fertilité selon la classe altitudinale. On observe un rapport négatif entre l'indice de fertilité des points échantillonnés et l'altitude (très forte corrélation,  $p=0,0005$ ). **Rappel :** la station est plus productive lorsque l'indice de fertilité est plus petit.  
 Source : STATISTICA 7  
 Auteur : Antonio García Collado.

Se pose alors la question de l'influence de l'exposition sur l'état sanitaire des peuplements. Or un problème a été détecté pendant la phase de mesure : sur

le terrain l'exposition réelle de la placette n'est pas toujours la même que celle prévue par le modèle SIG d'expositions dû au manque de précision de celui-ci. En conséquence notre échantillon est biaisé au niveau des expositions car la répartition de placettes selon l'orientation nord et sud n'est pas homogène par tranche altitudinale.

Cependant, il a été démontré que la distribution des peuplements de châtaignier n'est pas homogène non plus sur le territoire (Figure 12) ce qui peut être expliqué par l'autoécologie de l'espèce.

**Figure 12.** Répartition des châtaigneraies du territoire du Parc selon l'exposition par tranche altitudinale.  
 Source : Excel 2007  
 Auteur : Jean Lemaire/Antonio García Collado.

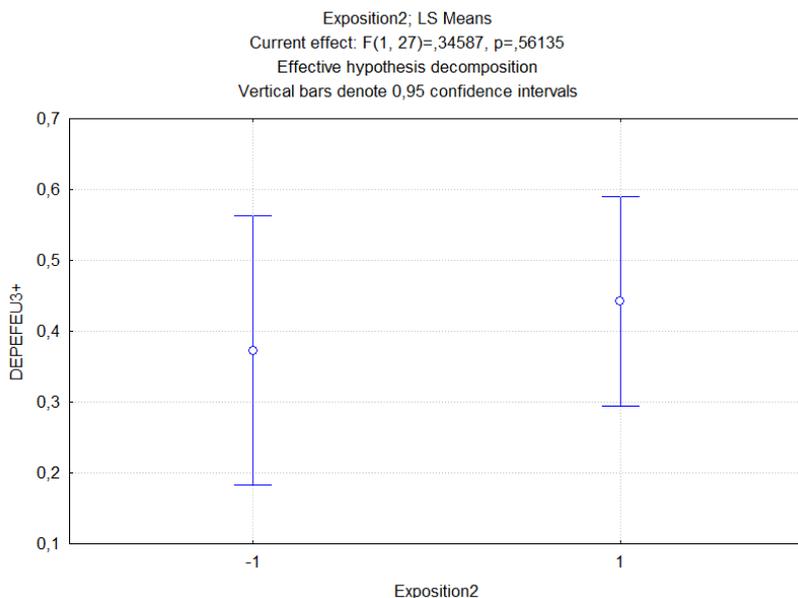


Le châtaignier est une essence exigeante en eau et requiert des d'ambiances fraîches. A basse altitude les expositions nord permettent donc de compenser les effets des températures élevées. Cependant, les températures trop froides sont également limitantes pour l'essence, qui craint le gel. Ainsi, à haute altitude les expositions sud peuvent limiter les températures trop basses.

Cette distribution se retrouve dans notre échantillon, nous avons plus de placettes en exposition nord dans la classe altitudinale 1 (<400m) et plus en exposition sud dans la classe 3 (>600m).

Pour pouvoir établir l'influence de l'exposition sur le dépérissement, de la même façon une analyse de variances limitée à chaque tranche altitudinale a été réalisée.

La même analyse sur les trois classes d'altitude donne les mêmes résultats, montrant que pour chaque classe il n'y a aucun effet de l'exposition sur l'état sanitaire des placettes (Figure 13). Les figures concernant les autres classes n'ont pas été incluses dans ce rapport, mais elles font l'objet de la même conclusion (Annexe 15).



**Figure 13.** ANOVA du dépérissement et de l'exposition limitée à la classe altitudinale 1 (<400m). La valeur -1 correspond aux expositions sud et la valeur 1 aux nord. Le  $p=0,56$  indique l'absence de corrélation entre les variables.

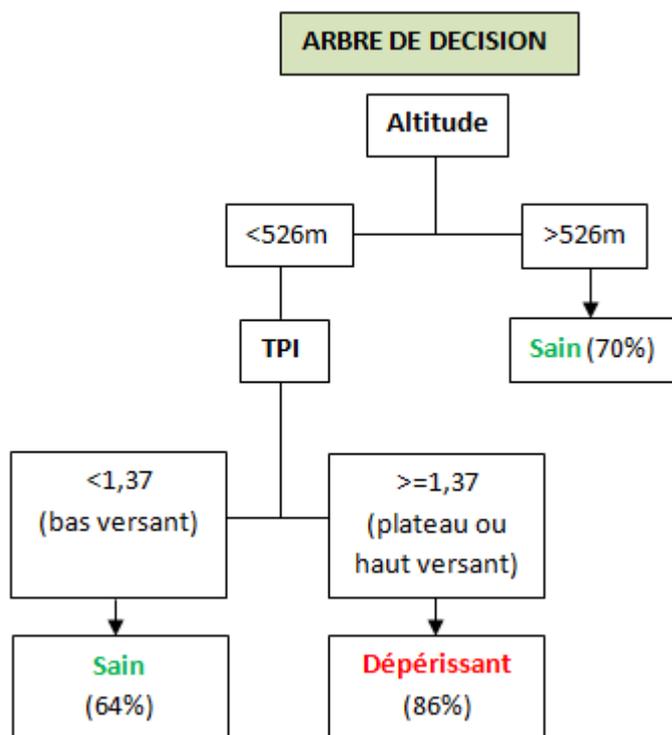
Source : STATISTICA 7  
Auteur : Antonio García Collado.

### 6.3 Des décisions à prendre en fonction de l'altitude et de la position topographique

Pour établir les limites écologiques du châtaignier dans la

région étudiée à partir des points échantillonnés un arbre de décision a été réalisé.

Ici, l'arbre de décision retenu comprend peu de variables et permet un diagnostic rapide avec une faible erreur (Figure 14).



**Figure 14.** Arbre de décision.

Source : TANAGRA 1.4  
Auteur : Antonio García Collado.

La taille limite minimale des groupes faits par l'arbre a été fixée à 10 placettes. Les variables sélectionnées sont l'altitude (puisque nous avons vu une influence claire de cette variable sur le bon état des peuplements), le TPI (car c'est une valeur qui regroupe et numérise l'influence des facteurs compensateurs ou aggravants) et la température (qui est la variable la plus influente sur l'état de santé des châtaigniers). Cependant, l'arbre créé a rejeté la température, pas assez cohérente selon les limites imposées. Cet arbre de décision sépare d'abord deux groupes par une limite altitudinale. Au-dessus de 526 m il y a

37 placettes dont 70% sont saines. Deux groupes sont ensuite à nouveau séparés en dessous de 526m en fonction du TPI : quand la valeur est inférieure à 1,37 il y a 11 placettes dont 64% sont saines, et quand elle est supérieure ou égale à -1,37 (plateau ou haut versant) il y a 42 placettes dont 86% sont dépérissantes, qui permettent de conclure à une forte probabilité de dépérissement.

Ce qui est important à voir dans l'arbre est la distribution des placettes. Ici, deux pôles d'attraction sont discriminants : le premier et principal est le nombre important de placettes dépérissantes situées en dessous de 526 mètres et ayant une position topographique défavorable. L'autre est le nombre élevé de placettes saines au dessus de 526 mètres.

Le taux d'erreur du classement selon l'arbre est de 23%, c'est-à-dire que 23 fois sur cent, une placette sera mal classée en suivant cette clé de détermination. Dans le détail, une placette saine sera classée correctement comme saine 85% des cas, et de manière erronée comme dépérissante dans 15% des cas. De façon analogue la clé marche bien pour les placettes dépérissantes pour 71% des cas.

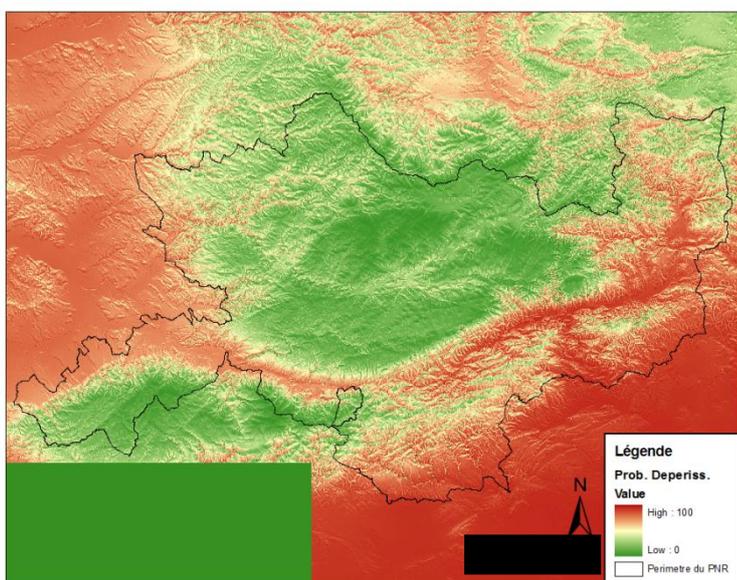
## 6.4. Construction des modèles de prédiction à partir de ces résultats

L'étape suivante est la création d'un modèle logistique. Dans le cas présent, il est envisagé le classement d'une placette comme dépérissante ou saine en fonction des paramètres les plus intéressants ressortis des analyses précédentes. Le logiciel TANAGRA exécute cette opération. Les paramètres sélectionnés sont alors le déficit hydrique de la période estivale, le TPI et l'altitude compensée par l'exposition, et pour chacun il donne le coefficient de l'équation de régression (*Annexe 16*).

La probabilité pour chaque peuplement du territoire d'être classé correctement comme dépérissant peut alors être calculée avec ces mêmes facteurs grâce à la formule suivante :

$$ProbitDEPE = \left( \frac{1}{1 + e^{(-LogitDEPE)}} \right) \times 100$$

Où « ProbitDEPE » est la probabilité de classer un peuplement de châtaignier situé sur un point donné comme dépérissant et « LogitDEPE » est la valeur obtenue de l'équation de régression pour chaque point. La valeur de la probabilité est exprimée en pourcentage avec une erreur du 22%. Les résultats sont visibles graphiquement en format SIG (*Figure 15 et Annexe 17*).



**Figure 15.** Modèle de probabilité de dépérissement pour le châtaignier dans le territoire du Parc.

Auteur : Antonio García Collado.

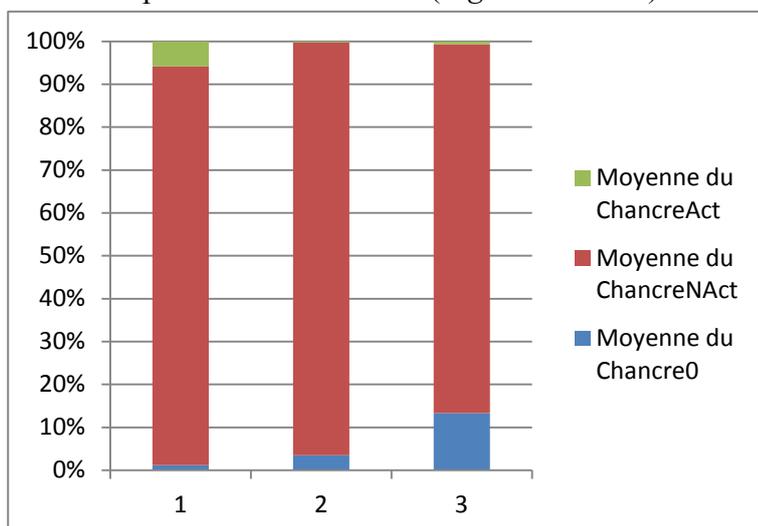
Un modèle similaire a été créé pour la classification des stations selon l'indice de fertilité des peuplements. Le modèle donne la probabilité qu'un peuplement ait un indice de fertilité défavorable (*Annexe 18*).

## 6.5 Climat et chancre

Le dernier point à aborder est le rapport entre le chancre et le climat : savoir si le chancre est indépendant du

climat ou inversement, si sa répartition est corrélée aux facteurs climatiques.

Les premières approches montrent une distribution non aléatoire ni homogène des placettes affectées par des chancres actifs et non actifs ainsi qu'une proportion différente d'arbres touchés par le chancre par classe altitudinale (*Figure 16 et 17*).

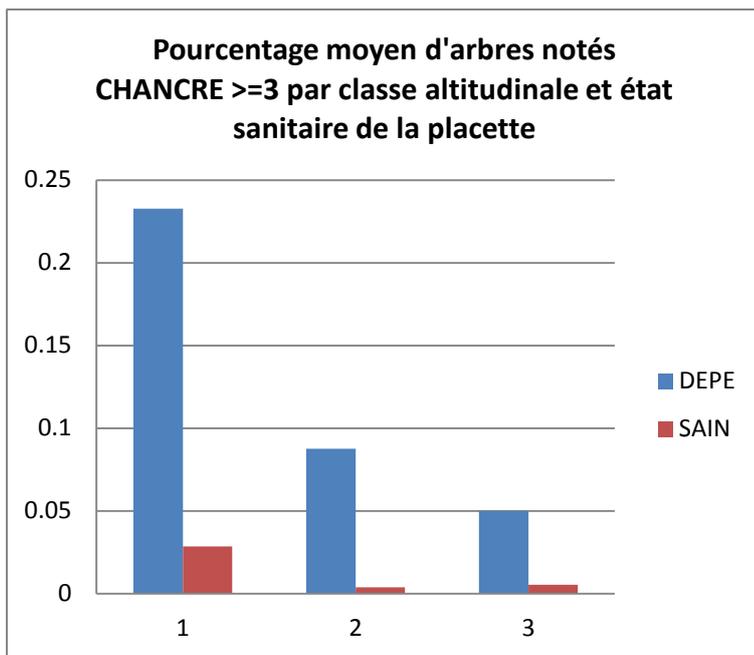


**Figure 16.** Moyennes des proportions d'arbres affectés par du chancre actif, du chancre non actif et d'arbres sans chancre par classe altitudinale. (ChancreAct : chancre actif sur l'arbre. ChancreNAct : chancre non actif sur l'arbre. Chancre0 : pas de chancre sur l'arbre)

**Rappel :** Classe 1 <400m, Classe 2 400-600m, Classe 3 >600.

Source : Excel 2007.

Auteur : Jean Lemaire/Antonio García Collado.



**Figure 17.** Proportion moyenne d'arbres notés CHANCRE 3 et 4 par le protocole CHANCRE par classe altitudinale et par type de placette (dépérissante ou saine).

Source : Excel 2007.

Auteurs : Jean Lemaire/Antonio García Collado.

Au vu de ces résultats, un lien net entre la présence de chancre actif et l'altitude est mis en évidence : le chancre actif est beaucoup plus présent à basse altitude. De la même façon, il y a un lien fort entre l'altitude et la proportion d'arbres non affectés par le chancre. Plus on monte en altitude, plus la proportion d'arbres non touchés par le chancre augmente

(jusqu'à 15% dans la classe altitudinale 3). De plus, l'analyse des proportions d'arbres notés CHANCRE 3 et 4 (protocole CHANCRE) montre une diminution très marquée avec l'altitude. Moins du 0,02% des arbres en classe altitudinale 3 sont porteurs de chancre laissant des impacts secondaires sur le houppier (attaque forte) alors qu'à basse altitude cette proportion monte jusqu'à presque 20%. A noter que la proportion d'arbres affectés gravement par le chancre dans les placettes dépérissantes aux altitudes les plus basses dépasse les 20%. Sachant que le seuil d'arbres notés dépérissants pour considérer une placette dépérissante est de 20%, cela veut dire que dans cette classe altitudinale le chancre est la cause principale du dépérissement.

## 7. Conclusions et discussion

### 7.1 Une corrélation claire entre l'altitude et le dépérissement

Les analyses de variance (ANOVA) montrent une corrélation nette entre le dépérissement et l'altitude. Cela valide l'hypothèse selon laquelle les conditions et les stations les plus propices pour le développement du châtaignier dans le territoire du Parc se trouvent en altitude.

L'altitude et le climat sont tellement corrélés que nous ne pouvons pas séparer les effets de l'un et de l'autre.

La conclusion la plus importante à noter est qu'effectivement l'état sanitaire des châtaigniers est une fonction directe du gradient climatique. Cette conclusion était déjà connue d'autres études (Lemaire, 2008) et elle vient à corroborer les hypothèses sur le territoire du Haut-Languedoc.

La température est aussi un paramètre corrélé au déficit hydrique de la station. Plus la température est élevée, plus l'évapotranspiration potentielle sera importante et en conséquence le déficit hydrique (P-ETP). Cette notion permet de corriger l'influence des précipitations, c'est-à-dire que la distribution de celles-ci est plus importante que les précipitations totales. Une distribution non homogène des pluies crée des périodes sèches qui peuvent être défavorables au châtaignier même si la quantité globale de précipitations annuelle est suffisante selon les limites empiriques classiques. C'est dans ce contexte qu'il est intéressant d'utiliser le déficit hydrique de la période estivale, qui est toujours le plus défavorable (Lebourgeois, 2010).

Le déficit hydrique est un paramètre facile à calculer avec les modèles climatiques dont il existe des couches numérisées qui peuvent être facilement incorporées aux modèles.

Contrairement à ce qui avait été envisagé, l'exposition n'est pas un facteur primordial. En revanche, elle influence la répartition actuelle des peuplements de châtaigniers sur le territoire du PNR du Haut-Languedoc.

Les stations les plus favorables au châtaignier sont celles où les peuplements ont un meilleur état de santé et sont aussi celles où la production est plus élevée, c'est-à-dire que les arbres poussent rapidement.

Travailler avec l'indice de fertilité plutôt qu'avec l'indice de dépérissement nous permet de travailler avec une valeur qui regroupe de façon synthétique tous les facteurs qui définissent la station, ce qui peut être préférable. En revanche, l'indice de fertilité n'est pas connu *a priori* (il ne peut être calculé qu'une fois le peuplement en place) et il ne peut donc pas être utilisé pour la prédiction de la potentialité d'une station. L'indice de fertilité est le résultat des conditions de la station forestière qui la rendent favorable ou défavorable.

Comme cet indice exprime bien la potentialité d'une station, un modèle de prédiction de l'indice de fertilité en fonction des variables du milieu a été construit de la même façon que le modèle créé pour prédire la probabilité de dépérissement (*Annexes 16 et 18*).

## **7.2 Une influence des facteurs liés au sol difficile à mettre en évidence**

D'après les ACP, les principales variables ressorties sont toujours les variables climatiques, les facteurs géologiques et pédologiques (substrat, profondeur, richesse chimique, fissuration, altérabilité) ont été donc dépréciés. Cela ne veut pas dire qu'ils n'ont aucune importance, mais son importance a été atténuée par l'influence du climat, qui est plus visible. En conséquence, l'importance des paramètres pédologiques n'a pas pu être déterminée.

Après les relevés de terrain nous constatons aussi le problème pour mesurer et bien classer la RU d'un sol, et donc pour l'utiliser comme un facteur de station et pouvoir l'intégrer dans les modèles.

Il est impossible de bien estimer la RU d'un sol car nous n'arrivons jamais aussi profondément que les racines, même avec la pioche. Il faut bien garder en tête que c'est la « RU minimale visible d'un sol » qui est mesurée, mais cette mesure n'a pas forcément de correspondance avec la réalité.

Pour une meilleure caractérisation des effets pédologiques et géologiques, il est absolument nécessaire de travailler avec un échantillon à climat constant (par exemple, sur une même tranche altitudinale) et observer les effets du sol et de la géologie sur les peuplements. Cela doit faire l'objet d'une étude différente visant d'établir l'effet des facteurs du sol.

## **7.3 Des décisions à prendre en fonction de l'altitude avant tout**

De manière générale le châtaignier a sa place dans le territoire du Haut-Languedoc au-dessus de 500 m. En dessous de cette limite altitudinale il a besoin de facteurs compensateurs (position topographique de bas versant, apports d'eau) pour pouvoir se développer.

L'arbre de décision a permis de créer cette clé de détermination des stations avec une erreur globale du 23%, permettant des premières approches sur le terrain.

## **7.4 Un impact du chancre lui aussi lié au climat**

Le chancre est un facteur aggravateur du dépérissement et sa répartition ainsi que ses dommages sont très corrélés à l'altitude. A basse altitude, où les conditions sont moins favorables pour le châtaignier, les chancres jouent un rôle plus important comme agent perturbateur de la santé des peuplements.

L'influence de l'altitude sur la présence de chancre actif est claire. On a pu constater plus de présence de chancre actif dans la classe altitudinale 1 tandis que dans les tranches 2 et 3 il y a beaucoup moins de chancre actif.

Les effets des chancres sont beaucoup moins visibles dans les stations climatiquement favorables au châtaignier.

Le lien entre le climat, la présence de chancre, et l'importance de ses impacts est donc net. Néanmoins il est impossible de dissocier les deux effets sur l'état de santé global des châtaigneraies et nous devons intégrer le chancre comme un autre facteur stationnel impliqué dans le bon état de santé des peuplements.

## 7.5 Un modèle d'aide à la décision pour les gestionnaires et les propriétaires forestiers

Le résultat le plus important de ce travail est la création d'un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires et les propriétaires forestiers. Ce modèle pronostique la probabilité qu'une châtaigneraie dans un endroit précis du territoire du Parc soit classée comme dépérissante (en utilisant le modèle de dépérissement. *Annexe 17*) ou comme ayant un bon indice de fertilité (en utilisant le modèle d'indice de fertilité. *Annexe 18*).

Cet outil a une utilité et une importance primordiales car il permettra d'estimer, pour chaque station du territoire sa pertinence pour la culture du châtaignier. Le modèle sera à libre disposition pour les techniciens du CRPF et autres responsables forestiers, il sera sous format SIG, utilisable depuis le bureau ou sur le terrain. Il est donc un résultat qui a une application directe sur la gestion forestière. Ainsi, cet outil sera directement utilisable rapidement et constitue le résultat le plus visible et satisfaisant de ce travail.

Le modèle a été créé dans les conditions climatiques actuelles (en s'appuyant sur les données climatiques de 1981 à 2010), il représente donc la réalité d'aujourd'hui quant à l'adéquation des stations vis-à-vis de cette essence. Ce modèle est aujourd'hui très puissant car il intègre les épisodes extrêmes de 2003 et 2005. Ensuite, pour intégrer les effets du changement climatique, il suffit de changer les données de base et utiliser les prédictions du P-ETP en utilisant les températures à venir.

Sachant que les modèles donnent une probabilité qu'un peuplement sur un point du territoire soit classé comme dépérissante (ou comme ayant un mauvais indice de fertilité), et que la valeur de la probabilité est toujours comprise entre 0 et 100, elle peut être regroupée en classes pour créer des niveaux de vigilance applicables aux châtaigneraies déjà présentes sur le territoire ou aux nouveaux reboisements avec cette essence. Ces classes de probabilité sont les mêmes pour tous les modèles issus de l'outil BIOCLIMSOL, pour la création de cartes de vigilance.

**Tableau 8.** Probabilité et niveaux de vigilance associés.

Source : BIOCLIMSOL.

Valeurs de probabilité	Niveaux de vigilance
0 – 30	Modérée
30 – 60	Elevée
60 – 100	Maximale

Pour conclure, ce modèle est un outil en perpétuelle évolution, qui devra être testé sur le terrain par les techniciens et les acteurs de la forêt, pour l'améliorer et l'ajuster en fonction de ses limites.

## 7.6 Le châtaignier : une essence qui a toujours de l'avenir dans le Haut-Languedoc

Au vu des résultats, une double interprétation peut être faite. D'une part, le châtaignier devrait connaître une forte régression par rapport à son aire de répartition actuelle. Il est vraisemblable que sa culture ne sera plus rentable sur les stations à moins de 500 m d'altitude sans facteurs compensateurs importants. D'autre part, au contraire, le châtaignier a un énorme potentiel sur les stations à plus de 500 m d'altitude où il n'est pas installé actuellement.

En effet, en regardant les cartes du territoire et le modèle construit, il semble que le châtaignier trouverait des conditions propices à son développement sur une grande partie du Plateau des Lacs et sur la majorité de la partie tarnaise du Parc, seulement limité par des températures trop froides (diminution de la production et de la régénération).

Il est donc une essence à garder en tête lors de reboisements après coupes, particulièrement sur des versants en exposition sud d'altitude.

Le châtaignier pourrait par exemple être une option sur les stations où le douglas est dépérissant. Le frein : le manque d'une filière de transformation associée à cette essence feuillue.

Dans la vallée et sur les versants plus exposés à moins de 500 m d'altitude, le chêne vert prendra la place ainsi que le chêne pubescent qui lui le fera prioritairement sur les versants plus ombragés et les expositions nord. Ces deux essences doivent être favorisées lors des régimes sylvicoles actuels en assurant une correcte régénération et l'installation du peuplement à venir. La filière associée à ces deux espèces de chênes est encore à développer cependant.

Le châtaignier peut aussi être remplacé par le cèdre sur les versants d'altitude moyenne.

A cette altitude, le châtaignier devrait être considéré comme une essence envisagée seulement dans les fonds des vallons, et endroits ombragés, sous un certain confinement et de préférence sur des sols très pénétrables (schistes très fissurés et éboulis à grande profondeur).

Ainsi, les changements climatiques à l'œuvre dans le Haut-Languedoc sont en train de modifier la répartition du châtaignier, qui migre vers des altitudes plus élevées. C'est le cas également pour d'autres essences, comme le douglas, qui a été étudié dans le cadre de l'atlas pédoclimatique l'année dernière, et sans doute aussi d'essences comme le hêtre, ou encore le chêne pubescent, qui devraient eux aussi faire l'objet d'études sur le territoire du Parc.

En outre, au-delà du territoire du Haut-Languedoc, des changements sont en train de se mettre en place à l'échelle mondiale (Bernier, 2009. Allen, 2009). Le phénomène ici vécu est le reflet d'un changement global plus large. Il faudra donc s'adapter aux nouvelles conditions et réagir aux nouveaux défis.

## Références

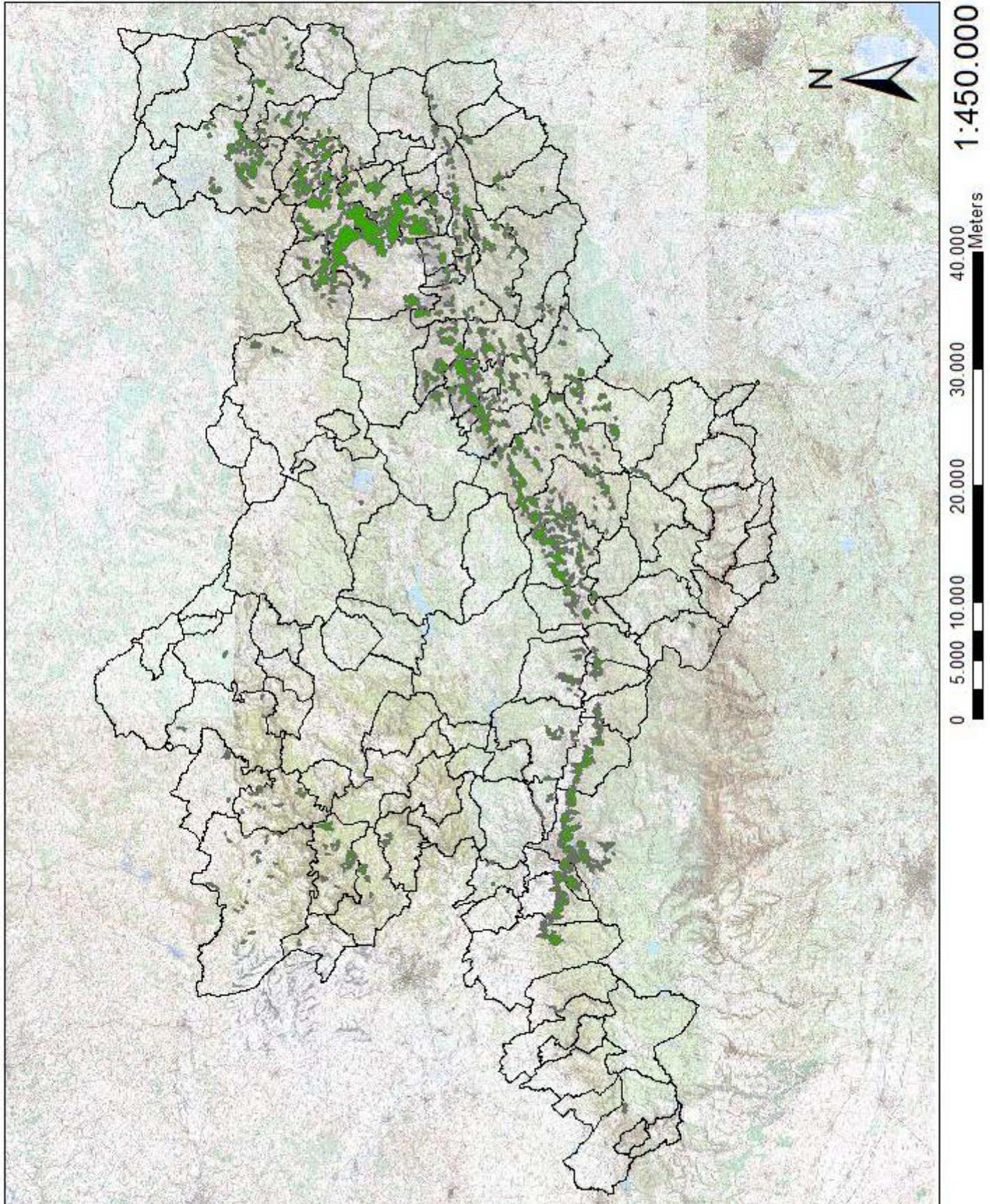
- ALLEN, C.D. *Le dépérissement des forêts dû au climat : un phénomène planétaire croissant ?* Unasylva, (FAO), 2009, N° 60, p. 43-49.
- BARTHES, J.P. *Atlas géo-pédologique de la partie héraultaise du Parc naturel régional du Haut-Languedoc en relation avec le changement climatique.* 2013.
- BERGER, C. *Détermination de la sensibilité au changement climatique du chêne pubescent en région PACA* (Mémoire de fin d'études). Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux Aquitaine (ENSSABA), 2013.
- BERNIER, P., SCHOENE, D. *Adapter les forêts aux changements climatiques : un aperçu.* Unasylva, (FAO), 2009, N° 60, p. 5-11.
- BOURGEOIS, C., LEMAIRE, J. *Le châtaignier, un arbre, un bois.* Institut pour le Développement Forestier (IDF), 2004, 2<sup>ème</sup> édition.
- CRPF de Languedoc-Roussillon. *Guide de sylviculture du châtaignier en Languedoc-Roussillon.*
- de VILLEBONNE, D. *Le chancre du châtaignier en forêt. Résultats de l'enquête 1996-1997.* Les cahiers du DSF, 1998, N°4, 26 p et annexes.
- DELAUNOIS, A., MATHIEU, P., ORTISSET, J.P. *Potentialités forestières du Tarn suivant les sols et les régions naturelles.* Chambre d'Agriculture du Tarn, 1995.
- Département de la Santé des Forêts. *Ordre de méthode, Note de service DGAL/SDQPV/N2010-8119.* Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, 2010.
- GAUDIN, S. *Prise en compte du changement climatique dans les guides et catalogues de stations : première approche.* CRPF de Champagne-Ardenne, 2007.
- GÉGOUT, J.C. et al. *La cartographie prédictive des stations forestières : un nouvel outil au service du gestionnaire.* Revue Forestière Française, 2008, Vol LX, N° 1, p. 37-60.
- JENNESS, J. *Topographic Position Index (tpi\_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a.* Jenness Enterprises, 2006.
- LEBOURGEOIS, F. *Cours de Bioclimatologie à l'usage des Forestiers.* AgroParisTech-ENGREF, 2010.
- DAGET, P. *Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation.* Vegetation, 1977, N° 34, p. 1-20.
- LEMAIRE, J. *BIOCLIMSOL, un outil d'aide à la décision en développement pour réagir face au changement climatique,* Forêt-entreprise, 2014, N° 218.
- LEMAIRE, J. *Sylviculture du châtaignier, numéro spécial.* Forêt-entreprise, 2008, N° 179.
- MARTIN-HORCAJO, G. *Caractérisation des limites pédoclimatiques du douglas (Pseudotsuga menziesii) sur le territoire du Parc naturel régional du Haut-Languedoc en prenant compte de l'évolution du climat* (Mémoire de fin d'études). Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux Aquitaine, 2013.
- NAGELEISEN, L.M. *Dépérissement du hêtre : présentation d'une méthode symptomatologique de suivi.* Revue Forestière Française, 2005, Vol LVII, N° 2 p. 255-262.
- NAGELEISEN, L.M. *Méthode d'évaluation de l'aspect des houppiers (protocole DEPEFEU).* Département de la santé des forêts, 1998, 13 p.
- Parc naturel régional du Haut-Languedoc. *Charte forestière du Parc naturel régional du Haut-Languedoc 2009-2015.* IF Bureau d'études, 2009.
- RABIN, J.F., LEMAIRE, J. *Impact du chancre du châtaignier dans le sud-ouest de la Vienne.* Forêt-entreprise, 2005, N° 165, p. 31-34.
- REVEL, J.C. *Rapport sur les potentialités forestières en fonction de la nature des roches mères dans le territoire du Parc naturel régional du Haut-Languedoc.* 2013.
- RICHARD, J.B. *Caractérisation de la contrainte hydrique des sols à l'aide de cartes numériques pour prendre en compte les effets potentiels du changement climatique dans les catalogues de stations forestières : application aux plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne et Bourgogne* (Mémoire de fin d'études) AgroParitech-ENGREF de Nancy, 2011.
- SAINTONGE, F.X. *Le chancre, principal pathogène du châtaignier en France.* Forêt-entreprise, 2005, N° 165, p. 21-25.
- SILVA, D.E. *Ecologie du hêtre (Fagus sylvatica L.) en marge sud-ouest de son aire de distribution* (Thèse pour l'obtention du Doctorat en Biologie Végétale et Forestière de l'Université Henry Poincaré). Université Henry Poincaré, 2010.

# *Annexes*

---

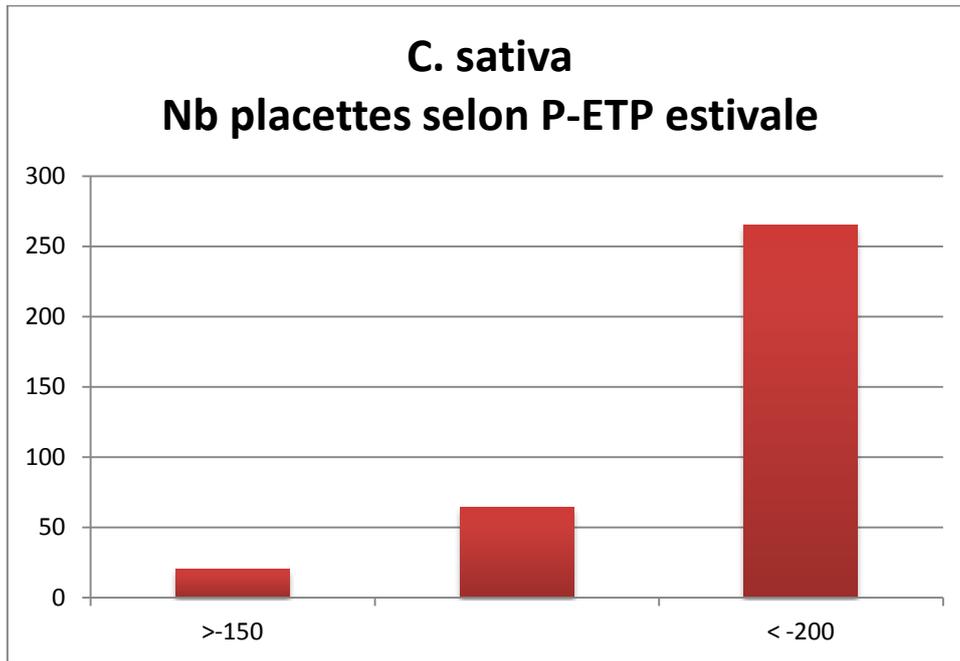
**Annexe 1** *Distribution des châtaigneraies pures sur le territoire du Parc*

---



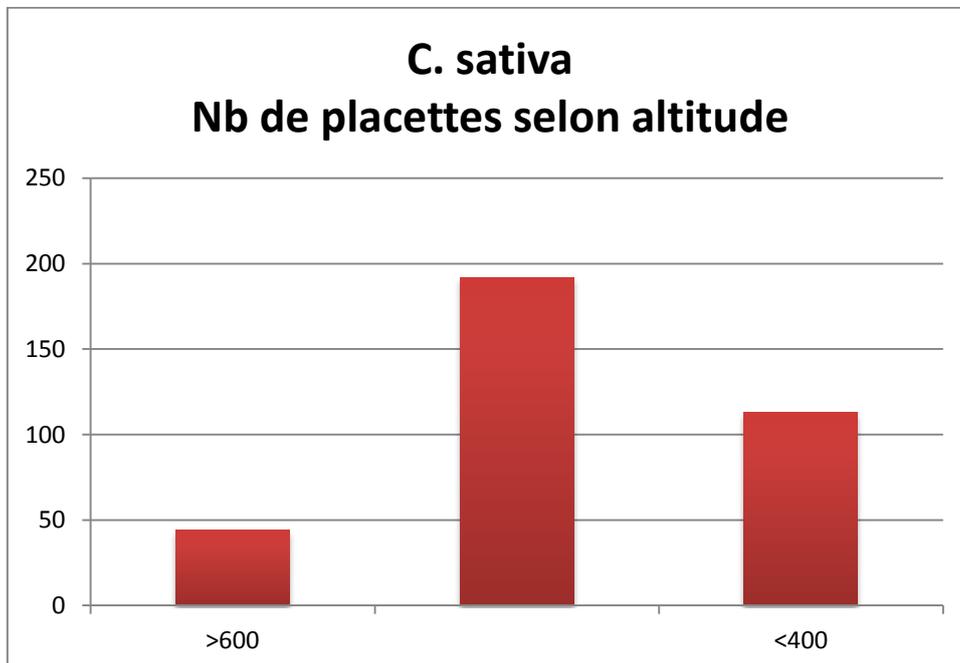
**Annexe 2** Stratification des châtaigneraies du Parc selon le P-ETP

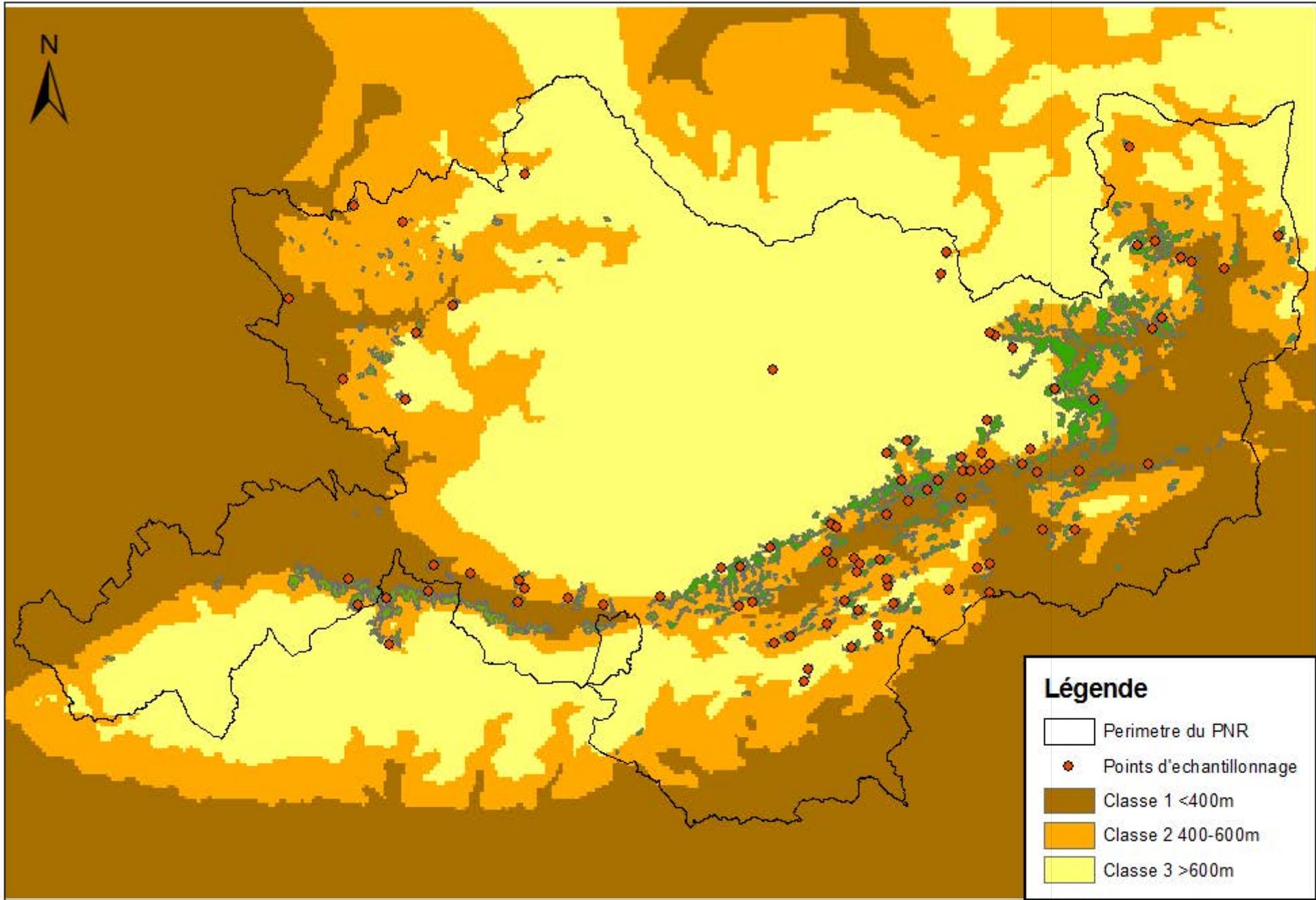
---



**Annexe 3** Stratification des châtaigneraies du Parc selon l'altitude

---





1:400.000

0 4.375 8.75 17.5 26.25 35.0  
Meters

## Annexe 5 Le protocole DEPEFEU (DSF)

Le Département de la santé des forêts a mis au point un protocole spécifiquement adapté à l'observation des dépérissements feuillus, (acronyme DEPEFEU pour DEPERissement d'essences FEUillues). Ce protocole n'est applicable que sur des essences feuillues à un stade adulte mais il peut être mis en œuvre tant en hiver qu'en été.

L'aspect général du houppier d'un arbre est la résultante de plusieurs phénomènes :

- la croissance en longueur des pousses qui en cas de réduction, à la suite d'un stress par exemple, prennent notamment chez le hêtre un aspect caractéristique en "fouet", pouvant conduire à une répartition en "paquets" (Roloff, 1991);
- la vitalité ou la mortalité des rameaux et de branches ;
- l'abondance de la ramification fine qui en cas de diminution peut évoluer en fenêtré ou échancrure dans le houppier.

Pour un arbre dépérissant ces phénomènes se traduisent par trois catégories de symptômes visibles :

- une certaine transparence du houppier qui laisse voir des fragments de ciel à l'observateur depuis le sol ;
- des mortalités d'organes pérennes ;
- une répartition plus ou moins homogène de la masse foliaire.

Chacune de ces catégories de symptômes est scindée en sous-catégories, ce qui conduit au tableau ci-dessous des critères symptomatologiques à observer dans la partie supérieure du houppier des arbres (arbres adultes de l'étage dominant) pour effectuer une notation de dépérissement.

<b>TRANSPARENCE</b>	Apprécier la transparence globale mais aussi la présence de fenêtré (trouée dans le houppier laissant voir une tache de ciel) ou d'échancrure dans le pourtour du houppier	FENETRE	<b>TF</b>
		ECHANCRURE	<b>TE</b>
		TRANSPARENCE GLOBALE	<b>TG</b>
<b>MORTALITE ORGANES PERENNES</b>	Distinguer les rameaux ( $\varnothing < 3$ cm) des branches ( $\varnothing < 3$ cm) et apprécier l'importance de cette mortalité par rapport à l'ensemble du houppier observé	RAMEAUX	<b>MR</b>
		BRANCHES	<b>MB</b>
		MORTALITE GLOBALE	<b>MG</b>
<b>REPARTITION MASSE FOLIAIRE</b>	Estimer la perte globale de ramification fine dans le houppier notable ainsi que la présence de rameaux en fouet ou de feuilles agglomérées en paquet dans la périphérie supérieure du houppier	FOUETS	<b>F</b>
		PAQUETS	<b>P</b>
		Perte Rameaux fins	<b>PR</b>

L'évaluation de l'aspect du houppier revient alors à noter chacun de ces 9 critères élémentaires et de leur attribuer une note qualitative de 0 à 4 (voir la définition de ces classes en annexe 5, "Définition des classes de notation"). Un indice de dépérissement est calculé à partir de ces 9 notes selon les formules ci-dessous

<b>Indice de Transparence (IT)</b>	$IT(\text{été}) = (TF + 2*TE)/6 + TG/2$	$IT(\text{hiver}) = (TF + 2*TE)/3$
<b>Indice de Mortalité (IM)</b>	$IM = (MR + 2*MB)/6 + MG/2$	
<b>Indice de Masse foliaire (IF)</b>	$IF = (F + 2*P)/6 + PR/2$	
<b>Indice de dépérissement</b>	<b>DEPEFEU = [ ( ( 4 - IM ) / 4 ) * ( ( IT + IF ) / 2 ) ] + IM</b>	

Nota : Une notation hors saison de végétation à l'état totalement défeuillé ou partiellement feuillé (période de débournement au printemps ou de chute des feuilles à l'automne) ne permet d'apprécier la transparence globale. Aussi dans le calcul de l'indice de transparence IT ne sont retenus que la présence de fenêtrés (TF) ou d'échancrures (TE).

Une présentation plus détaillée de ce protocole est disponible auprès du Département de la santé des forêts. Il est aussi présenté dans l'article : Dépérissement du Hêtre : présentation d'une méthode symptomatologique de suivi (Nageleisen - Revue Forestière Française LVII - 2-2005 pp. 255-262)

## Annexe 6 Procédure de notation des critères DEPEFEU (DSF)

### Définition des classes de notation

Note	0	1	2	3	3+	4
Intensité	Absence ou trace	Légère	Assez forte	Forte	Très Forte	Total
Fréquence	Nulle à très faible	Faible	modérée	Importante	Très Importante	Toute la partie notée concernée
Nombre	0 à quelques rares	Quelques à peu nombreux	Assez nombreux	Nombreux	très nombreux	Total
Proportion	Absence ou trace	Moins de 1/4	De 1/4 à 1/2	De 1/2 à 3/4	Plus de 3/4	ensemble
Pourcentage indicatif	0 à 5 %	6 à 25 %	26 à 50 %	51 à 75 %	76 à 95 %	96 – 100 %

### Codifications des organes

Organes	Code	Organes	Code
Bourgeons	BO	Pousses terminales, apicales	PA
Fleurs	FL	Petites branches, rameaux, diamètre < 2 cm	BP
Fruits	FR	Branches moyennes, diamètre < 10cm	BM
Feuilles de l'année (cas général des feuillus caducifoliés)	FN	Grosses branches, diamètre ≥ 10 cm	BG
Feuilles anciennes (cas des feuillus sempervirents)	FV	Branches de dimension, diamètre variable	BV
Feuilles de tous âges (cas des feuillus sempervirents)	FT	Partie du tronc dans le houppier, surbille	TS
Fût	TF	Racines (visibles à la surface du sol)	RA
Totalité du tronc	TT	Pousses de l'année	PN
Collet	CO		

### Localisation des dommages sur le tronc ou le houppier

**H** = partie haute (moitié supérieure)      **B** = partie basse (moitié inférieure)  
**D** = disséminé, diffus, ...      **T** = totalité

### Codification des symptômes

La combinaison du code "symptôme" et du code "précision" forme un ensemble de code à 7 caractères. Les codes symptômes n'ont de sens que si ils sont associés à un code organe

FEUILLES OU AIGUILLES			
symptômes	code	précision sur le symptôme	code
totalement ou partiellement consommé	<b>CONS</b>	trous/ partiellement consommé ou manquant	<b>PAR</b>
		échancrures (bord du limbe touché)	<b>BOR</b>
totalement ou partiellement manquant sans trace consommation	<b>MANQ</b>	totalement consommé ou manquant	<b>TOT</b>
		décapage	<b>DEC</b>
		mines foliaires	<b>MIN</b>
		chute prématurée	<b>CHU</b>
coloration vert clair à jaune Rougisement à brunissement (incluant les nécroses) aspect cuivré, couleur bronze. coloration blanchâtre Autres couleurs	<b>JAUN</b>	partout	<b>TOT</b>
	<b>ROUG</b>	tacheté, moucheté	<b>TAC</b>
	<b>BRON</b>	bord du limbe	<b>BOR</b>
	<b>BLAN</b>	en bande	<b>BAN</b>
	<b>COUL</b>	internervaire	<b>INV</b>
		extrémité, apex	<b>EXT</b>
		partiel	<b>PAR</b>
	le long des nervures	<b>NER</b>	
microphyllie		<b>MICROPH</b>	
taille, dimension anormale		<b>ANORMAL</b>	
déformation	<b>FORM</b>	frisé, début d'enroulement courbé, coudé	<b>FRI</b> <b>COU</b>

		enroulement pétiole courbé, tordu crispé, plié galles flétri cloques ernose autres déformations	ENR PET PLI GAL FLE CLO ERI AUT
trace d'insecte	ENTO	miellat, fumagine (poudre noire sur les feuilles) nid, tissage adulte, larve, nymphe, ponte	FUM NID ADU LAR NYM PON
trace de champignon	MYCO	feutrage blanc mycélium fructification de champignon	BLA MYC FRU

FRUITS - FLEURS	
symptômes	code
fructification anormalement abondante	FRUCTIF
floraison anormalement abondante	FLORAIS

TRONC, BRANCHES, POUSSES			
symptômes	code	précision sur le symptôme	code
consommé	CONS	pousses minées	MIN
manquant sans trace de consommation	MANQ	décurtation / abscission	ABS
cassé	CASS	chute	CHU
mort ou mourant	MORT	tronçonné, élagué, exploité totalement partiellement	EXP TOT PAR
renversé, chablis		<b>CHABLIS</b>	
blessure (écorçage, fente,...)	BLES	écorçage, écorce déhiscente fente autres blessures	ECO FEN AUT
coloration anormale nécrose (partie nécrosée)	COUL NECR	en bande partout par plage ou tache	BAN TOT TAC
écoulement de résine écoulement visqueux ou gluant (de sève) Pourriture	RESI ECOU POUR		
déformation	FORM	flétrissement plié, brisé (attaché, pendu), courbé chancre tumeur excroissance longitudinales (gélivure,...) balai de sorcière autres déformations	FLE PLI CHA TUM EXC BAL AUT
trace d'insecte	ENTO	trous de forage (pénétration ou sortie), sciure, vermoulure galeries sous écorce galeries dans le bois nid, tissage points ou feutrage blanc adulte, larve, nymphe, ponte	TRO  SCO XYL NID POI ADU LAR NYM PON
trace de champignon	MYCO	fructification de champignon mycélium vésicule jaune à orange	FRU MYC VES
autres traces	TRAC	trace de dent (rongeurs) coup bec pic	DEN PIC

## Annexe 7 Protocole DEPEFEU synthétique (DSF)

L'objectif est de classer, en final, l'arbre observé dans une des 6 classes DEPEFEU ci-dessous, à partir de 2 critères : la mortalité de branches et la perte ou le manque de ramifications :

### 6 classes globales du protocole DEPEFEU DSF

0 : absence de symptôme ; ramifications fines très abondantes ; houppier à l'état feuillé opaque ne laissant quasiment pas voir le ciel à travers

1 : rameaux fins desséchés dans la périphérie du houppier et/ou transparence légère à modérée (de 6 % à 25%) liée à une perte de ramifications fines légère et/ou présence de fenêtres disjointes et/ou rameaux en fouet (de 6 % à 25%). Squelette de l'arbre invisible à l'état feuillé.

2 : branches desséchées dans la moitié supérieure du houppier mais moins de 50 % et/ou transparence moyenne à forte liée à une perte assez forte de ramifications fines (<50 %) et/ou échancrures nettes dans le houppier et/ou feuilles apparaissant réparties en paquet - Visualisation partielle du squelette de l'arbre à l'état feuillé.

3 : branches mortes composant plus de 50 % du houppier et/ou disparition de plus de 50% de la ramification - Visualisation totale du squelette de l'arbre.

3+ : branches mortes composant plus de 75 % du houppier et/ou disparition de plus de 75% de la ramification - Visualisation totale du squelette de l'arbre.

4 : houppier mort ; arbre mort ou moribond

- Deux critères sont à regarder au minimum dans le houppier notable :

- la mortalité de branches,
- la perte ou manque de ramification.

- La mortalité de branches correspond à l'appréciation en classes du % global de branches et rameaux **morts, encore présents**

- La perte de ramification correspond ici à la **ramification manquante**, disparue (chute de branches mortes...) c'est à dire correspond essentiellement aux vides dus à des fenêtres ou des échancrures, en classes de % du houppier notable également.

- Ces deux critères sont donc complémentaires et non redondants.

- Chaque critère est noté indépendamment de 0 à 4 (cf. 6 classes DEPEFEU ci-dessus) puis la note synthétique de dépérissement est attribuée à l'aide du tableau ci-dessous :

		RAMIFICATIONS MANQUANTES					
		0	1	2	3	3+	4
MORTALITE DE BRANCHES	0	0	1	2	3	3+	4
	1	1	1/2	2/3	3	3+	4
	2	2	2/3	3	3+	3+	4
	3	3	3	3+	3+	4	4
	3+	3+	3+	3+	4	4	4
	4	4	4	4	4	4	4

Note synthétique de dépérissement

## **Annexe 8** Notation du protocole CHANCRE (DSF)

---

<b>Note CHANCRE</b>	<b>Description</b>
0	Absence de chancres
1	Au moins un chancre sur branche
2	Au moins un chancre sur tronc sans impacts secondaires
3	Au moins un chancre sur tronc avec impact secondaire
4	Chancre responsable de la mort de l'arbre
<b>Impacts secondaires liés à la présence de chancre</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>-Perte foliaire</li><li>-Réduction de croissance</li><li>-Dessèchement de la tige au-dessus du chancre</li><li>-Altération du bois</li><li>-Risque de bris</li><li>-Perte commerciale importante</li></ul>	

Annexe 9 Fiche de terrain

Placette		Date																	
		DSF	classes DEPEFEU Flash séparées		global														
Arbr	Circonf	Ho	CHANCRE	%branches mort	perte de ramificat	DEPEF	Chancre ac	Surface terrière	m <sup>2</sup> /ha										
1								Age du peuplement	ans										
2								Hauteur dominante	m										
3								Indice fertilité											
4								<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Profil du sol</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>50</td> </tr> <tr> <td></td> <td>100</td> </tr> <tr> <td></td> <td>150</td> </tr> </tbody> </table>		Profil du sol			0		50		100		150
Profil du sol																			
	0																		
	50																		
	100																		
	150																		
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			
Analyse du sol		Type sol																	
Nom carte géologique				pH															
Roche mère				pendage															
Horizon	Epaisseu	Texture	% Cailloux	RU horizon	Structur	Hydromorp	Compacité												
Profondeur				RU totale															
Cause de l'arrêt																			
						Forme d'Humus													
						OL													
						OF													
						OH													

Facteurs compensateurs		Effet (+/-)
Altitude		
Pente (%)		
Circul. eau	sens pente / sens courb.	/
Situation		
Expo		
Pendage		
Confinem.		
Effet global		

Type de peuplement	
Nb brins / ha	
% Verger	
Autres essences	

Autres anotations	

Environnement	
A. pend/foliat	
B. porosité	
C. topograph	
D. poches	
E. fissuration	

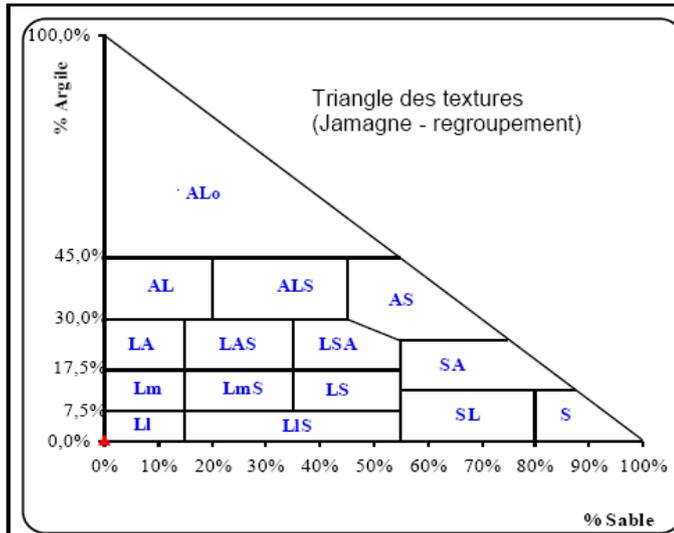
### Ecogramme

Très sec						
Sec						
Assez sec						
Assez frais						
Frais						
Assez humide						
Humide						
Toujours inondé						
	Non ou faiblement calcaire			Calcaire		

## Annexe 10 Notice de la fiche de terrain

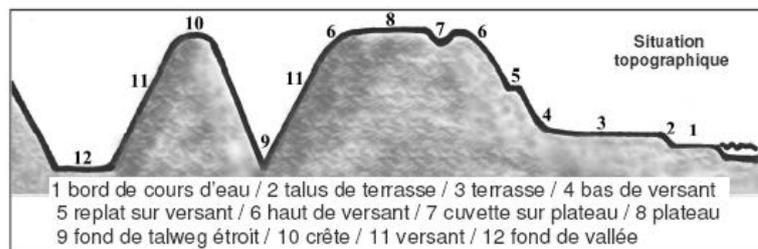
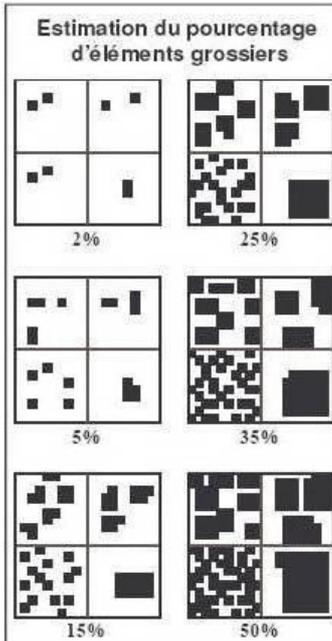
<b>Branches mortes (%)</b>	0	<25	26 - 50	51-75	76-99	mort - 100%
<b>code DEPEFEU</b>	0	1	2	3	3+	4
<b>perte de ramification</b>	0	<25	25 - 50	50 - 75	>75%	Houppier mort
<b>code DEPEFEU</b>	0	1	2	3	3+	4

Chancre	Note	Définition
<b>Cicatrisé</b>	0	Fond des fissures foncé. Limite nette du front de propagation. Pas de gourmands autour du chancre. Pas de palmettes sous corticales.
<b>Actif</b>	1	Fond des fissures clair. Rameaux de l'année morts. Front de propagation couleur rouge vin Gourmands actifs autour du chancre. Palmettes sous corticales. Fructifications oranges



### Regroupement des classes de texture et capacité de stockage en eau

Texture			Réserve utile max	
Très sableuse	S	sable	0,7 mm d'eau / cm	
	LIS	limon léger sableux	1,2 mm d'eau / cm	
Très limoneuse	LI	limon léger	1,3 mm d'eau / cm	
	LmS	limon moyen sableux	1,6 mm d'eau / cm	
	Lm	limon moyen	1,75 mm d'eau / cm	
Très argileuse	ALo	argile lourde	1,65 mm d'eau / cm	
Grossière	SL	sable limoneux	1 mm d'eau / cm	
	SA	sable argileux	1,35 mm d'eau / cm	
	LS	limon sableux	1,45 mm d'eau / cm	
Argileuse	AS	argile sableuse	1,7 mm d'eau / cm	
	ALS	argile limono-sableuse	1,75 mm d'eau / cm	
	Intermédiaire	Equilibrée	LSA	limon sablo-argileux
Limono argileuse		LAS	limon argilo-sableux	1,75 mm d'eau / cm
		LA	limon argileux	1,95 mm d'eau / cm
		AL	argile limoneuse	1,8 mm d'eau / cm



### FORME D'HUMUS

description des horizons organiques (cf. document Jabiol *et al.*):

OL débris foliaires non ou peu dégradés, le plus souvent libres entre eux, pas de matière organique fine intercalée entre les débris.

OF mélange de débris foliaires, plus ou moins altérés ou collés, et de matière organique fine (boulettes fécales)

OH plus de 70 % de matière organique fine, assez homogène, teinte brun à noir, structure granulaire ou massive ou fibreuse.

### Circulation de l'eau

dans le sens de la pente

- départ supérieur à l'arrivée
- départ égal à l'arrivée
- départ inférieur à l'arrivée
- arrivée très supérieure au départ
- source

suivant les courbes de niveau

- versant convexe ☺
- versant plan —
- versant concave ☹

## Notation DEPEFEU Flash

### 6 classes globales du protocole DEPEFEU DSF

0 : absence de symptôme ; ramifications fines très abondantes ; houppier à l'état feuillé opaque ne laissant quasiment pas voir le ciel à travers

1 : rameaux fins desséchés dans la périphérie du houppier et/ou transparence légère à modérée (de 6 % à 25%) liée à une perte de ramifications fines légère et/ou présence de fenêtres disjointes et/ou rameaux en fouet (de 6 % à 25%). Squelette de l'arbre invisible à l'état feuillé.

2 : branches desséchées dans la moitié supérieure du houppier mais moins de 50 % et/ou transparence moyenne à forte liée à une perte assez forte de ramifications fines (<50 %) et/ou échancrures nettes dans le houppier et/ou feuilles apparaissant réparties en paquet - Visualisation partielle du squelette de l'arbre à l'état feuillé.

3 : branches mortes composant plus de 50 % du houppier et/ou disparition de plus de 50% de la ramification - Visualisation totale du squelette de l'arbre.

3+ : branches mortes composant plus de 75 % du houppier et/ou disparition de plus de 75% de la ramification - Visualisation totale du squelette de l'arbre.

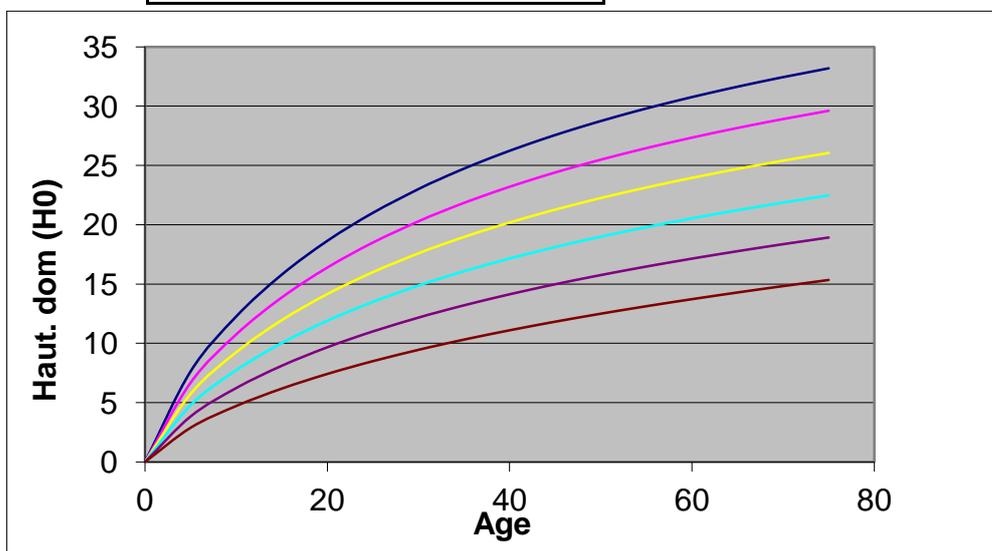
4 : houppier mort ; arbre mort ou moribond

		RAMIFICATIONS MANQUANTES					
		0	1	2	3	3+	4
MORTALITE DE BRANCHES	0	0	1	2	3	3+	4
	1	1	1/2	2/3	3	3+	4
	2	2	2/3	3	3+	3+	4
	3	3	3	3+	3+	4	4
	3+	3+	3+	3+	4	4	4
	4	4	4	4	4	4	4

#### COMPACTITE (STIPA, AFNOR-ISO)

meuble	matériau non cohérent, le couteau pénètre sans effort jusqu'à la garde.
peu compact	un léger effort est nécessaire pour enfoncer le couteau dans l'horizon testé.
compact	le couteau ne pénètre qu'incomplètement, même sous un effort important.
très compact	il n'est pas possible d'enfoncer le couteau de plus de quelques millimètres.
induré	compacité liée à une précipitation.

Type de peuplement			
Taillis pur	Taillis mélangé	Mélange futaie et taillis	
Confinement			
0-20%	20-40%	>40%	>>40%
0	1	2	3
Indice de fertilité station			



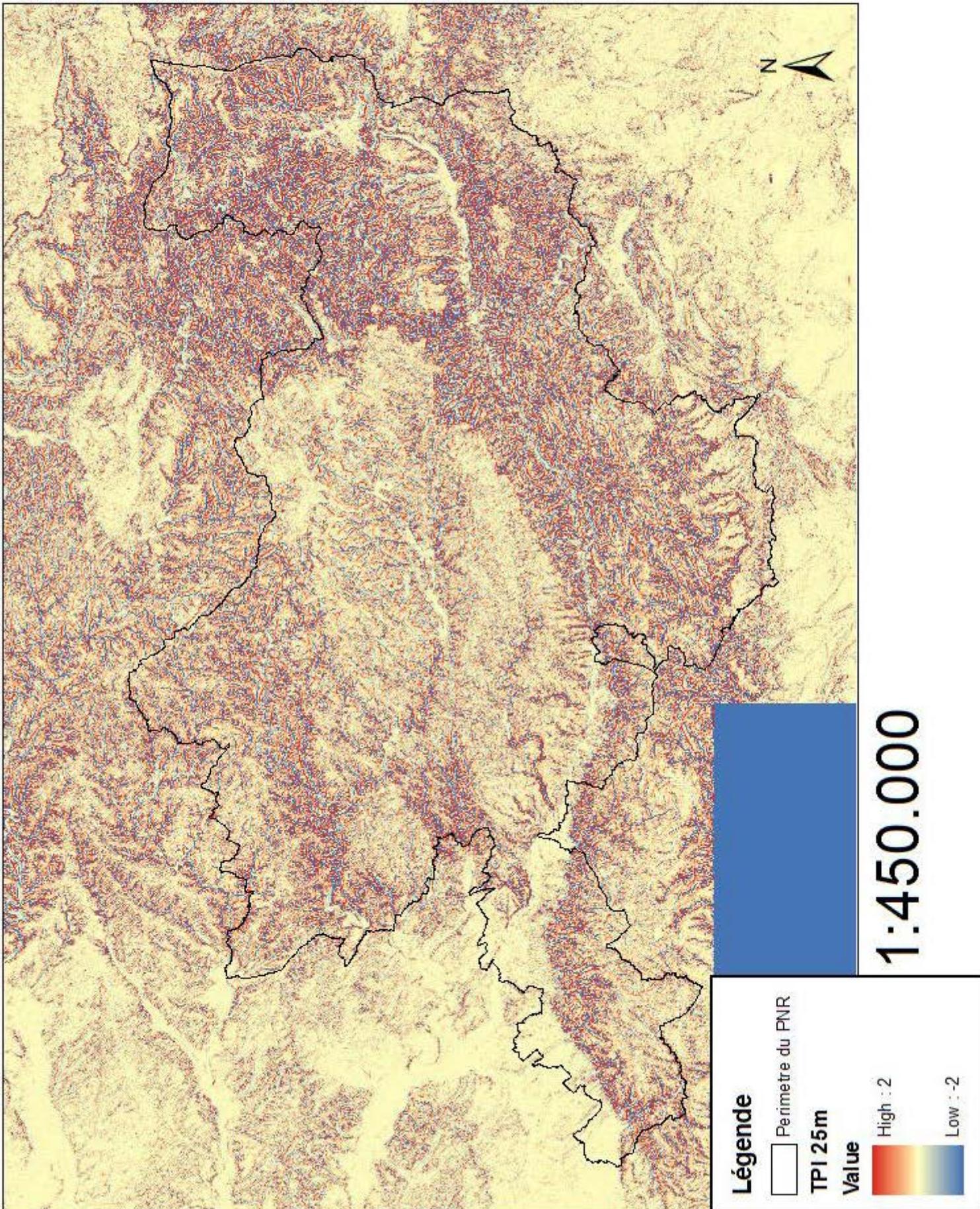
## Annexe 11 Extrait du tableau de JC Revel

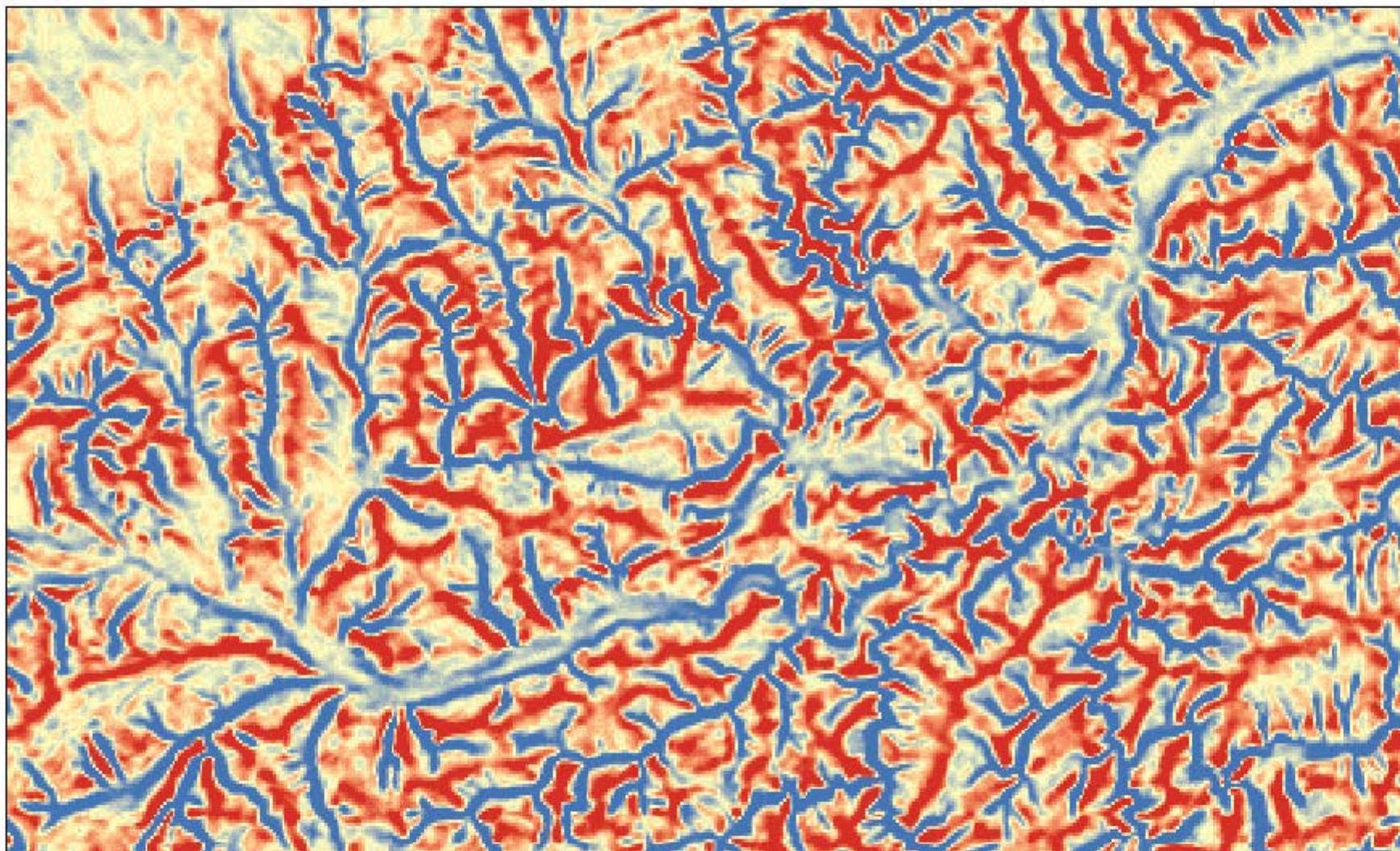
Carte	Symb.		Origine	Ere	Roche Symbole sur la carte géologique	Description, éléments de détermination	Richesse chimique	Fissuration pénétration	Altérabilité
Réalmont	RCFy	qEt	Roches sédimentaires	Quaternaire	Holocène. Colluvions des talwegs et des fonds de vallées secondaires RCFy	Dépôts argilo-sableux parfois limoneux, éléments grossiers variés en quantité variable	2-3	2	2
Réalmont	Fw4	qFz1	Roches sédimentaires	Quaternaire	Formations alluviales inférieures Fw4	Mélange hétérogène de galets avec ou sans patine, souvent subarrondis, graviers et sables	2	2	2
Réalmont	Fw3	q3Fy	Roches sédimentaires	Quaternaire	Formations alluviales moyennes Fw3	Mélange hétérogène de galets provenant du remaniement des niveaux supérieurs	1	2	0-1
Réalmont	Fw2	q3Fx	Roches sédimentaires	Quaternaire	Formations supérieures alluviales à gros galets patinés Fw2	Gros galets décimétriques de quartz et de schistes emballés dans des sables argileux	1	2	0-1
Réalmont	Fv-w1G	q2-3Fv	Roches sédimentaires	Quaternaire	Glacis se raccordant à la partie supérieure de la basse plaine Fv-w1G	Glacis d'érosion ou d'accumulation des alluvions plus anciennes quartzueuses	1-2	2	1-2
Réalmont	Fv-w1	q2-3Fv	Roches sédimentaires	Et	Alluvions des terrasses moyennes les plus élevées Fv-w1	Formations très caillouteuses de galets de quartz et quartzites patinés	0-1	1	1
Réalmont	Fu	p3-q1Fu	Roches sédimentaires	Quaternaire	Glacis inférieur d'accumulation et matériaux résiduels des paléovallées les plus anciennes Fu	Cailloutis de blocs anguleux à subanguleux de quartz emballés dans une matrice argilo-graveleuse (kaolinite, illite)	0	1	0
Réalmont	Fs-t	p3-q1Fu	Roches sédimentaires	Quaternaire	Glacis supérieur d'accumulation et matériaux résiduels des paléovallées les plus anciennes Fs-t	Cailloutis de blocs anguleux à subanguleux de quartz emballés dans une matrice argilo-graveleuse (kaolinite, illite)	1	2	1
Réalmont	Fs1-Fy		Roches sédimentaires	Quaternaire	Débris schisteux et quartzeux Fs1-Fy	Reste d'ancienne surface mélangée au sol récent : matrice argilo-limoneuse emballant des éléments grossiers de quartz et schistes	1	2	1
Réalmont	Re-Fs1	e7-g1A	Roches sédimentaires	Quaternaire	Débris schisteux et quartzeux Re-Fs1	Argiles (kaolinites, illites) à graviers de quartz	1	2	2
Réalmont	e6a-b	e6aA	Roches sédimentaires	Tertiaire	Bartonien inférieur-moyen. Argiles à graviers de saint Jean de Vals, du Carmausin et de l'Albigeois e6a-b	Argiles (kaolinite, illite) à nombreux galets de quartz et quartzites avec parfois des schistes. Par place il existe quelques niveaux dolomitiques	1	2	1
Réalmont	e6a-b	e6aA	Roches sédimentaires	Tertiaire	Bartonien inférieur-moyen. Argiles à graviers de saint Jean de Vals, du Carmausin et de l'Albigeois e6a-b	Argiles (kaolinite, illite) à nombreux galets de quartz et quartzites avec parfois des schistes. Par place il existe quelques niveaux dolomitiques	1	2	2
Réalmont	e6a-b	e6aA	Roches sédimentaires	Tertiaire	Bartonien inférieur-moyen. Argiles à graviers de saint Jean de Vals, du Carmausin et de l'Albigeois e6a-b	Argiles (kaolinite, illite) à nombreux galets de quartz et quartzites avec parfois des schistes. Par place il existe quelques niveaux dolomitiques	3	3	3
Réalmont	o1c-2	o1-2S	Roches sédimentaires	Primaire	Grès sombres et schistes noirs o1c-2	Alternance de bancs de grès phylliteux assez sombre et de schistes noirs organique	1	1	1
Réalmont	o1c-2	o1-2S	Roches sédimentaires	Primaire	Schistes noirs homogènes à intercalation gréseuse (schistes de l'Albigeois) o1c-2	Schistes noirs homogènes, organiques à petites lits gréseux à ciment siliceux ou carbonaté.	1-2	1	1
Réalmont	o1c-2	o1-2S	Roches sédimentaires	Primaire	Schistes noirs homogènes à intercalation gréseuse (schistes de l'Albigeois) o1c-2	Schistes noirs homogènes, organiques à petites lits gréseux à ciment siliceux ou carbonaté.	2-3	1	3
Réalmont	o1b	o1SM	Roches sédimentaires	Primaire	Formation du moulin mont-Roc : grès quartzitiques blancs o1b	Niveaux de grès micacés à sérécite et bancs de grès quartzitiques à ciment siliceux séparés par des lits schisteux verts et lie de vin	1	1	1
Réalmont	k6-o1a	k5-o1SM	Roches sédimentaires	Primaire	Formation de Masnau-Massuguiès-Rayssac : schistes homogènes gris à verts k6-o1a	Schistes gris, verts et lie de vin avec de rares lits centimétriques de grès fins micacés	1-2	1	1
Réalmont	k2b2	k1	Roches sédimentaires	Primaire	Alternance grès fins micacés schistes noirs k2b2	Schistes noirs en lits décimétriques alternés avec des grès fins riches en micas et de calcschistes riches en nodules phosphatés	1-2	1	1
Réalmont	k2b2	k2	Roches sédimentaires	Primaire	Alternance grès fins micacés schistes noirs k2b2	Schistes noirs en lits décimétriques alternés avec des grès fins riches en micas et de calcschistes riches en nodules phosphatés	2-3	1	3

Annexe 12 Tableau simplifié des types de sol du Parc

Code	Nom du regroupement:	Groupe substrats	Nom du sol	N° UTS 81	N° doc Pot. Forestières	richesse chimique	Classe RU	Fertilité Douglas
ARG1	Affleurement d'argiles à graviers	Argiles à gravier	Régosol d'érosion	501		1	1	0,1
ARG2	sol peu profond non hydromorphe non lessivé	Argiles à gravier	brunisol d'érosion	502	non prévu	1	2	1
ARG3	sol peu à moyennement profond hydromorphe lessivé	Argiles à gravier	luvisol-rédoxisol tronqué	513, 516	AG2	1	2,5	1,5
ARG4	sol profond hydromorphe lessivé	Argiles à gravier	néoluvisol rédoxique	511, 515	AG3	1	3,5	1,8
ARG5	colluvion très profonde hydromorphe	Argiles à gravier	? ?	non prévu	AG4	2	4	3
ARG7	sol peu à moyennement profond hydromorphe non lessivé	Argiles à gravier	brunisol-rédoxisol d'érosion	506	AG2	1	2	1,6
ARG8	sol moyennement profond non hydromorphe non lessivé	Argiles à gravier	brunisol d'érosion	502	non prévu		2,5	2
CALCS1	sol peu profond	Calcschistes	Regosol	non prévu	non prévu	1	1	1,4
CALCS2	sol moyennement profond	Calcschistes	Brunisol eutrique	811	non prévu	3	2,5	2,8
CALCS3	sol profond	Calcschistes	Brunisol	non prévu	non prévu	3	3	4
CALCS4	Colluvion très profonde	Calcschistes	Brunisol colluvique	non prévu	non prévu	3	4	5
GGM1	roche mère affleurante	Granites Gneiss Migmatites	lithosol	561	M1	1 à 2	0,5	0,1
GGM2	sol peu profond	Granites Gneiss Migmatites	rankosol	562	M2	1 à 2	1	1
GGM3	sol ocreux moyennement profond	Granites Gneiss Migmatites			M4	0 à 2	2	2
GGM4	Sol ocreux profond	Granites Gneiss Migmatites	Alocrisol / podzosol ocrique	841, 881	M5	0 à 2	3	3
GGM5	sol profond noir podzolique humique	Granites Gneiss Migmatites	podzosol	871	non prévu	0 à 1	3	2
GGM6	sol ocreux très profond	Granites Gneiss Migmatites	alocrisol, parfois colluvial		M7	2	3	3,5
GGM7	sol de bas fond tourbeux	Granites Gneiss Migmatites	histosol	702	non prévu	0 à 1	5	0,5
SC1	roche mère affleurante	Schistes	Lithosol	530		1	0,5	0,3
SC10	colluvion très profonde	Schistes	brunisol colluvique				4,5	4,5
SC2	sol peu profond	Schistes	rankosol ou brunisol tronqué	531, 532	S1/S2/M1/M2	0 à 3	1	1,3
SC3	sol ocreux moyennement profond non hydromorphe	Schistes	alocrisol	721	S5/M5	0 à 2	2	2,3
SC4	sol brun lessivé moyennement profond non hydromorphe	Schistes	brunisol luvique	711	S5 ?	2 à 3	2	2,4
SC5	sol brun moyennement profond	Schistes	brunisol dystrique (acide)	535	S4/M4	1 à 3	2	2,5
SC6	colluvion profonde	Schistes	brunisol colluvique	542	S6 M6	3	4	4
SC7	sol de bas fond tourbeux	Schistes	histosol	702, 704	non prévu	0 à 1	4	0,8
SC8	sol peu évolué profond sur roche très altérée	Schistes	Rankosol d'érosion, brunisol oligosaturé	non prévu	S3/M3	1	3	3,5
SC9	sol brun à ocreux, parfois lessivé, profond, non hydromorphe	Schistes	brunisol ou alocrisol	711, 535			3	3,8

**Annexe 13** Carte du TPI 25m





### Légende

 Perimetre du PNR

### TPI 25m

#### Value

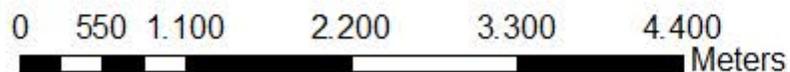
 High : 2

 Low : -2

Détail de la carte du TPI 25m sur le secteur de  
Saint-Pons-de-Thomières



1:50.000

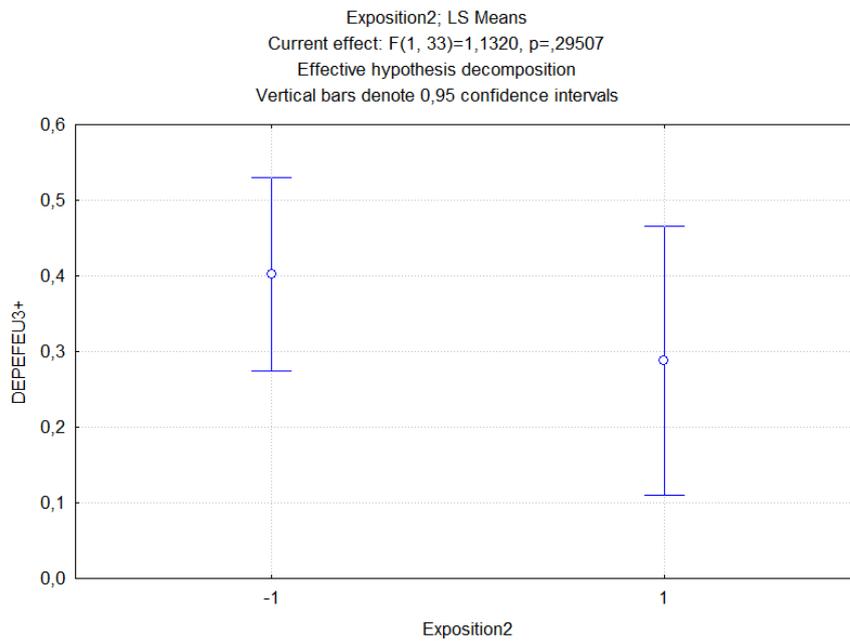


## Annexe 14 Liste de variables testées

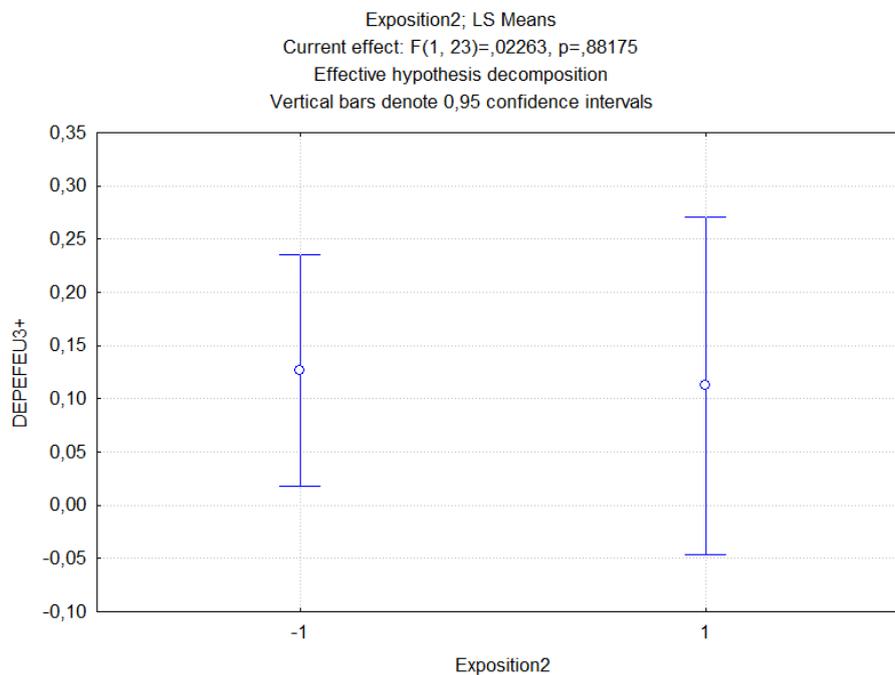
Variable	Explication	Source
ATX0608811	Température maximale moyenne de juin à août inclus moyenne de 1981-2010 source AURELHY	Modèle climatique AURELHY
ATN0381	Température minimale de mars moyenne de 1981-2010 source AURELHY	Modèle climatique AURELHY
ATNAN81_21	Température moyenne annuelle source AURELHY 1981-2010	Modèle climatique AURELHY
NBGELAN81	Nombre de jour de gel par an moyenne de 1981-2010	Modèle climatique AURELHY
ATN018110	Température minimale de janvier moyenne de 1981-2010 source AURELHY	Modèle climatique AURELHY
APveg81_21	Précipitation d'avril à octobre inclus moyenne de 1981-2010 source AURELHY	Modèle climatique AURELHY
PETPv_8150	différence entre les précipitations et l'ETP d'avril à octobre inclus P AURELHY et ETP turc période 1981-10, résolution 50m	Modèle climatique hybride
MNT11_34_81	Altitude en mètres, résolution 25m	Modèle numérique du terrain de l'Aude, du Tarn et de l'Hérault
PET59_8150	différence entre les précipitations et l'ETP de mai à septembre inclus P AURELHY et ETP turc période 1981-10, résolution 50m	Modèle climatique hybride
APAN81_215	Précipitation annuelle 1981-2010 source AURELHY	Modèle climatique AURELHY
PET68_8150	différence entre les précipitations et l'ETP de juin à septembre inclus P AURELHY et ETP turc période 1981-10, résolution 50m	Modèle climatique hybride
ETPAN_8110	ETP annuelle calculé avec la formule de Turc modèle hybride 1981_10	Modèle climatique hybride
Indice fertilité	Indice de fertilité de chaque placette	Données de terrain
DEPEFEU 3+	Pourcentage d'arbres mesurés dans chaque placette ayant une note DEPEFEU égale ou supérieure à 3	Données de terrain
Hauteur dominante	Hauteur dominante de chaque placette	Données de terrain
Chancre 3+	Pourcentage d'arbres mesurés dans chaque placette ayant une note CHANCRE égale ou supérieure à 3	Données de terrain
B_mortes3+	Pourcentage d'arbres mesurés dans chaque placette ayant une note partielle DEPEFEU pour la ramification morte égale ou supérieure à 3	Données de terrain
ChancreAct	Pourcentage d'arbres dans chaque placette ayant des chancres actifs	Données de terrain
Exposition 2	Exposition de la placette (nord/sur)	Données de terrain
Topographie	Code définissant la position topographique de chaque placette	Données de terrain
Surface terrière	Surface terrière de chaque placette	Données de terrain
Fissuration	Valeur de la fissuration de la roche mère (0 à 4), valeur assignée sur le terrain	Données de terrain
Situation 2	Valeur synthétique de la position topographique de chaque placette selon si elle est positive ou négative pour le peuplement (1 ou -1)	Données de terrain
Poches	Valeur synthétique exprimant la présence ou absence de poches de remplissage utilisables par les arbres	Données de terrain
Pendage/foliation	Code définissant le pendage de la roche mère et son effet positif ou négatif pour le peuplement dans chaque placette	Données de terrain

Confinement2	Valeur synthétique du confinement de chaque placette selon s'il est positif ou négatif pour le peuplement (1 ou -1)	Données de terrain
RU minimale	RU calculée après l'ouverture d'une fosse pédologique dans chaque placette	Données de terrain
Porosité	Valeur de la porosité de la roche mère de chaque placette (0 à 4)	Données de terrain

## Annexe 15 ANOVA du dépérissement et de l'exposition pour les classes altitudinales 2 et 3



ANOVA du dépérissement et de l'exposition pour la classe altitudinale 2 (400-600m).  
Résultat : Pas d'effet de l'exposition sur l'état sanitaire des peuplements ( $p=0,295$ ).



ANOVA du dépérissement et de l'exposition pour la classe altitudinale 3 (>600m).  
Résultat : Pas d'effet de l'exposition sur l'état sanitaire des peuplements ( $p=0,881$ ).

## *Annexe 16 Construction des modèles de probabilité de dépérissement et de probabilité de mauvais indice de fertilité (données associées)*

### Modèle de probabilité de dépérissement :

Variables : déficit hydrique, TPI et altitude corrigée par l'exposition (MNT corrigé).

Taux d'erreur : 22%

#### Attributes in the equation

Attribute	Coef.	Std-dev	Wald	Signif
constant	-1,075313	2,1933	0,2404	0,6239
PET68_8150	-0,012982	0,0070	3,4460	0,0634
TPI	0,459763	0,1616	8,0953	0,0044
MNTCOR8134	-0,003659	0,0019	3,8694	0,0492

#### Classifier performances

Error rate			0,2222			
Values prediction			Confusion matrix			
Value	Recall	1-Precision		DEPE	SAIN	Sum
DEPE	0,8235	0,2075	DEPE	42	9	51
SAIN	0,7179	0,2432	SAIN	11	28	39
			Sum	53	37	90

#### Adjustement quality

Predicted attribute	DEPE20%txt	
Positive value	DEPE	
Number of examples	90	
Model Fit Statistics		
Criterion	Intercept	Model
AIC	125,162	108,917
SC	127,662	118,916
-2LL	123,162	100,917
Model Chi <sup>2</sup> test (LR)		
Chi-2	22,2447	
d.f.	3	
P(>Chi-2)	0,0001	
R <sup>2</sup> -like		
McFadden's R <sup>2</sup>	0,1806	
Cox and Snell's R <sup>2</sup>	0,2190	
Nagelkerke's R <sup>2</sup>	0,2937	

### Modèle de probabilité de mauvais indice de fertilité :

Variables : déficit hydrique, TPI et altitude corrigée par l'exposition (MNT corrigé).

Taux d'erreur : 23%

#### Attributes in the equation

Attribute	Coef.	Std-dev	Wald	Signif
constant	-6,181671	2,5834	5,7257	0,0167
PET68_8150	-0,034560	0,0093	13,6849	0,0002
TPI	0,331609	0,1723	3,7038	0,0543
MNTCOR8134	-0,003444	0,0021	2,7474	0,0974

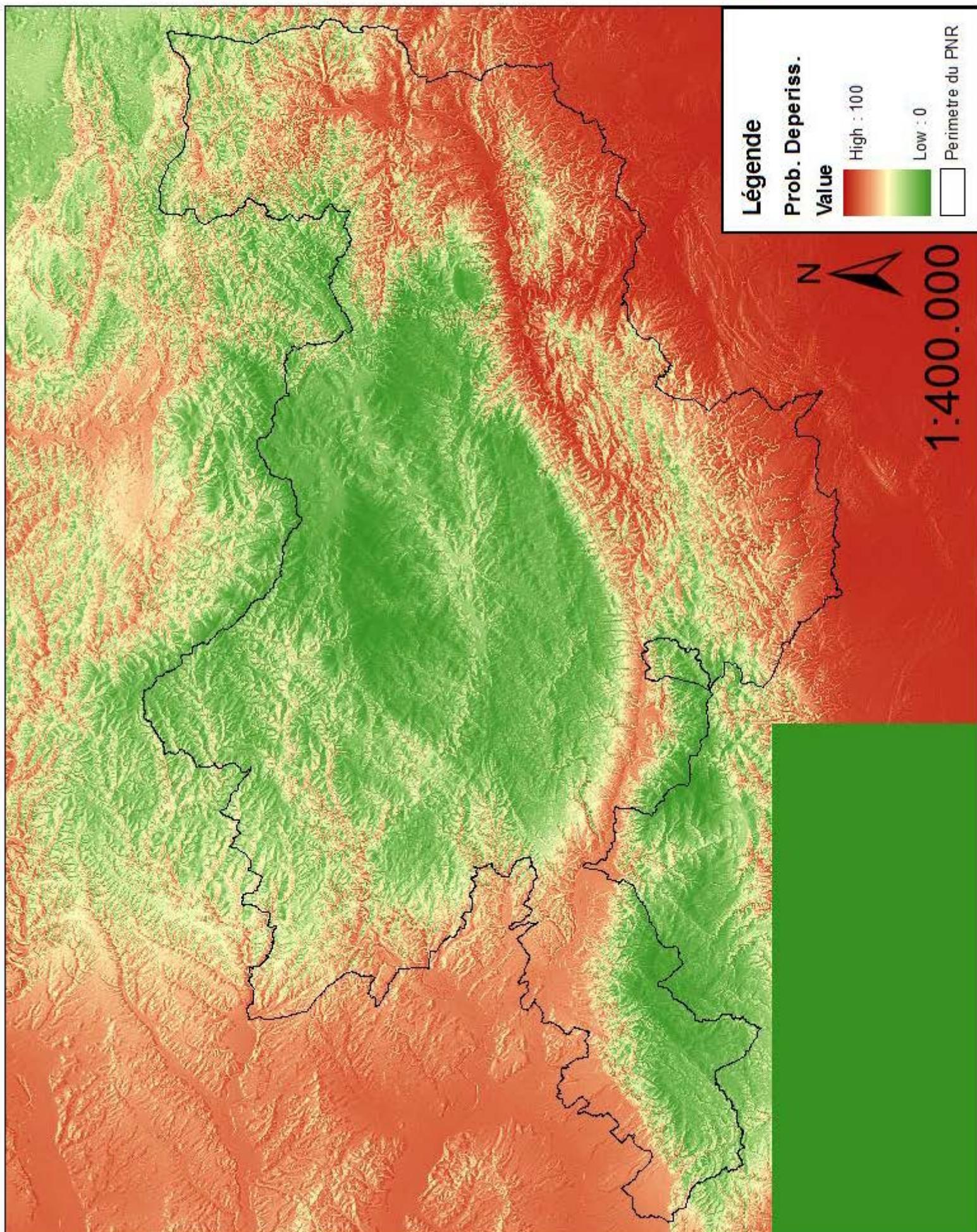
#### Classifier performances

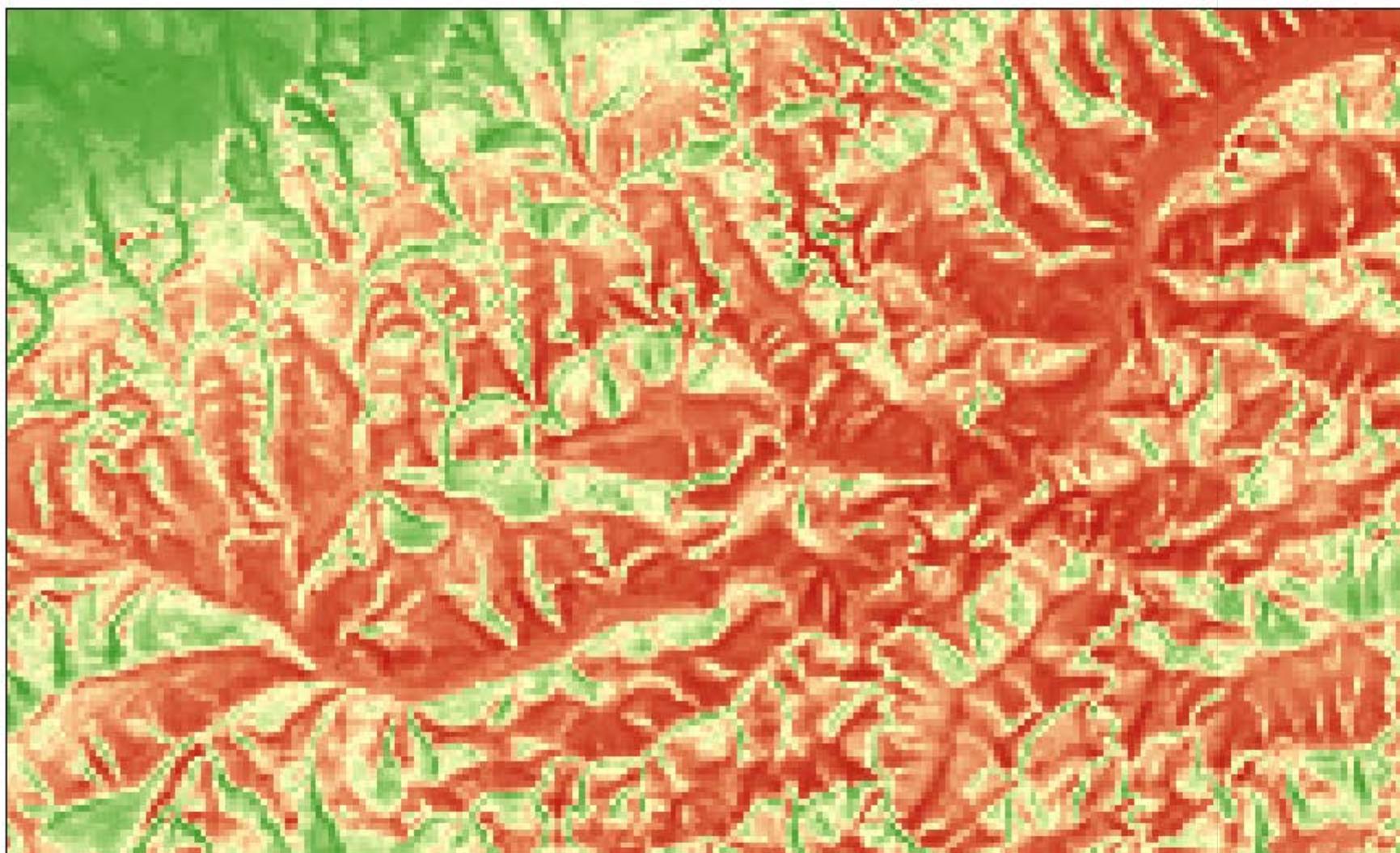
Error rate			0,2333			
Values prediction			Confusion matrix			
Value	Recall	1-Precision		Mauv	Bon	Sum
Mauv	0,8704	0,2295	Mauv	47	7	54
Bon	0,6111	0,2414	Bon	14	22	36
			Sum	61	29	90

#### Adjustement quality

Predicted attribute	ClasseIndFert	
Positive value	Mauv	
Number of examples	90	
Model Fit Statistics		
Criterion	Intercept	Model
AIC	123,142	92,279
SC	125,642	102,279
-2LL	121,142	84,279
Model Chi <sup>2</sup> test (LR)		
Chi-2	36,8628	
d.f.	3	
P(>Chi-2)	0,0000	
R <sup>2</sup> -like		
McFadden's R <sup>2</sup>	0,3043	
Cox and Snell's R <sup>2</sup>	0,3361	
Nagelkerke's R <sup>2</sup>	0,4543	

*Annexe 17* Modèle de probabilité de dépérissement





### Légende

 Perimetre du PNR

### Probabilité déperissement

#### Value

 High : 100

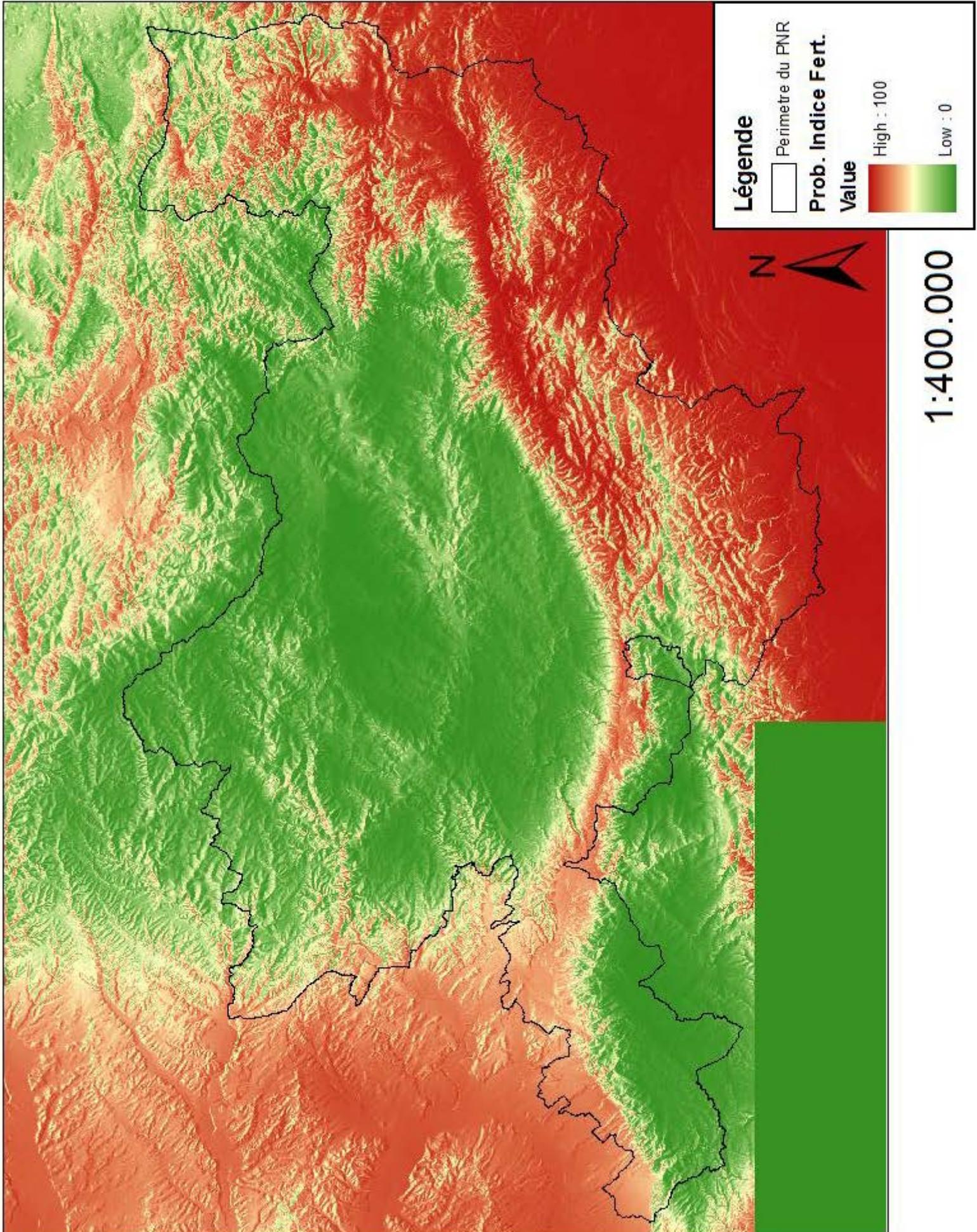
 Low : 0

Détail du modèle de déperissement sur le secteur de  
Saint-Pons-de-Thomières

1:50.000

0 550 1.100 2.200 3.300 4.400  
 Meters





## **RESUME**

Le Parc naturel régional du Haut-Languedoc mène la création d'un atlas pédoclimatique des stations et des essences forestières du territoire en collaboration avec les autres acteurs de la forêt. Cet atlas envisage d'établir la niche écologique des principales essences du Parc et la construction de modèles de prédiction des stations favorables. Cet outil permettra aux gestionnaires et aux propriétaires forestiers d'adapter la sylviculture à venir ainsi que les reboisements dans un scénario de climat changeant.

Ici, l'essence traitée a été le châtaignier, un arbre à fort enjeu économique et culturel dans la région, produisant un bois noble et apprécié. Les possibilités de développement de la filière châtaignier sont donc très intéressantes.

Les principaux résultats de ce travail sont l'établissement de la niche climatique et écologique la plus propice au châtaignier, d'un lien net entre les conditions climatiques et l'état sanitaire des peuplements ainsi que la construction d'un modèle permettant de prédire le risque de dépérissement en fonction des paramètres climatiques et de la position topographique des peuplements.

## **SUMMARY**

The Regional Natural Park of Haut-Languedoc leads the creation of a pedo-climatic atlas of stations and forest species in the territory in collaboration with other actors. This atlas is considering establishing the ecological niche of the main species of the Park and the construction of models of station's convenience. This tool will allow managers and forest owners to adapt future forestry and reforestations in a scenario of changing climate.

Here the treated specie was chestnut, a tree with strong economic and cultural issues in the region, producing a great appreciated wood. The opportunities for the chestnut's industry development are very interesting.

The main results of this work are the establishment of the ecological and climate more conducive situations to chestnut, a clear link between climate and the health conditions of the stands and the construction of a model to predict the risk wasting depending on climatic parameters and the topographic position of the stands.