

## Evaluation du dépérissement de la châtaigneraie du Vallespir par télédétection dans un contexte de sécheresse



Stage de fin d'études Master 2 Sciences du Bois, 2025 – Fanny Malatier

Ce stage, un projet soutenu par la Région Occitanie dans le cadre du Défi Clé Observation de la Terre et territoires en Transition – O3T / GRANULAR, un projet financé par l'Union européenne. Les points de vue et opinions exprimés sont toutefois uniquement ceux des auteurs et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union Européenne ou de l'Agence pour la Recherche Européenne. Ni l'Union Européenne ni l'autorité octroyant la subvention ne peuvent en être tenues responsables. Les participants britanniques au projet GRANULAR sont soutenus par UKRI - numéros de subvention 10039965 (James Hutton Institute) et 10041831 (Université de Southampton).

## Sommaire

I – L’avenir de la châtaigneraie du Vallespir, un enjeu de biodiversité et de gestion forestière.....	5
a) Pourquoi monter un outil d’évaluation du dépérissement de la châtaigneraie du Vallespir ? .....	5
b) Les missions du stage.....	5
c) Caractéristiques et enjeux du châtaignier.....	6
1- En France .....	6
2- En Vallespir.....	7
II – Méthodes et outils pour évaluer le dépérissement de la châtaigneraie .....	9
a) La méthode DEPERIS du Département de Santé des Forêts.....	9
b) Les projets Casteldiag (Aforce) et Depcast (SPNA) .....	12
1- Comment fonctionne la télédétection ? .....	12
2- Deux projets en Nouvelle-Aquitaine : Casteldiag et Depcast .....	12
III – Etapes d’élaboration d’EValICha, l’outil d’évaluation du dépérissement de la châtaigneraie du Vallespir.....	14
IV- Résultats : un état de santé des châtaigniers hétérogène en Vallespir .....	17
V – Conclusions et recommandations.....	18
 <u>Annexes :</u>	
Remerciements.....	20
Glossaire .....	21
Bibliographie.....	21
Webographie.....	23
Cartographie .....	23
Formules de calcul des indices de télédétection .....	24

## Résumé exécutif

Le territoire du Vallespir (Pyrénées-Orientales) connaît une sécheresse intense depuis 2022, ce qui a des conséquences fortes et brutales sur la biodiversité, qu'il s'agisse des espaces naturels comme la forêt, des milieux aquatiques ou des terrains agricoles. Le Vallespir est un territoire couvert à plus de 60% par une vaste forêt composée en majorité d'essences feuillues, essentiellement de châtaignier, de hêtre et de chêne vert. La forêt est un élément important pour la biodiversité locale (habitats spécifiques), pour l'économie (activités de pleine nature, exploitation du bois), pour la lutte contre les risques naturels (incendie), mais aussi pour les services culturels et patrimoniaux (paysages caractéristiques du territoire). Or, **la sécheresse a un impact direct sur la santé de la forêt qui a du mal à s'y adapter**. Les acteurs et actrices de la forêt locale, réunis autour de la Charte Forestière de Territoire (CFT) du Pays Pyrénées Méditerranée (PPM), constatent le dépérissement de certaines essences, notamment des châtaigniers, essence patrimoniale du territoire dont la fragilisation est particulièrement visible. Localiser et évaluer le dépérissement de la châtaigneraie du Vallespir est donc une volonté partagée qui permet de mieux connaître les effets du changement climatique sur la biodiversité associée à la châtaigneraie locale, d'anticiper et d'adapter la gestion forestière, et de mieux prévenir les incendies.

La châtaigneraie du Vallespir ne fait cependant pas l'objet d'un suivi de son état de santé partagé à l'échelle locale. Les travaux menés par Fanny Malatier, ont ainsi visé à **mettre sur pied un outil d'évaluation basé sur la télédétection, spécifique à une utilisation par les actrices et les acteurs locaux de la forêt**. Ce stage s'inscrit dans le cadre du défis clé O3T et est financé par la région Occitanie. Il est réalisé dans le cadre de la Charte Forestière de Territoire (CFT) et du projet de recherche européen GRANULAR, et co-encadré par le Centre International des Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM) et le Pays Pyrénées Méditerranée (PPM).

C'est à partir d'images satellites de source *Copernicus* et de données issues de l'Inventaire Forestier de l'Institut Géographique National (IGN), que **l'outil de modélisation a été conçu sous le logiciel de système d'information géographique QGIS**. Le code mis en place s'appuie sur les travaux réalisés dans le cadre du projet *CastelDiag* sur les châtaigniers en Dordogne, travaux coordonnés par le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF). **Le modèle a été entraîné grâce à des données collectées sur quinze placettes réparties sur le territoire du Vallespir**. La méthode DEPERIS, reconnue et conçue par le Département de Santé des Forêts (DSF) a été utilisée pour évaluer le niveau de santé des châtaigniers observés sur le terrain.

La châtaigneraie est classée selon des zones faiblement dépérisissantes (36 % de la surface totale étudiée), moyennement dépérisissantes (37%) et fortement dépérisissantes (27%). Les zones faiblement et moyennement dépérisissantes dans le Haut-Vallespir et dans l'un des premiers bassins de plantation de la châtaigneraie du Vallespir, autour de Saint-Laurent-de-Cerdans. Les zones les plus dépérisissantes se trouvent autour de Reynès et au-dessus d'Amélie-les-Bains. **La vérification sur le terrain a montré une fiabilité de 75% de ces résultats**. Les premiers tests statistiques cherchant à expliquer le niveau de dépérissement au regard de de l'environnement et du contexte du peuplement n'ont pas été concluants.

**Les actrices et les acteurs locaux de la forêt, réunis autour de la Charte Forestière de Territoire, ont participé à la mise en place de l'outil de modélisation de l'état de santé de la châtaigneraie**. Impliqués dans la définition du besoin, puis dans l'orientation des travaux, ils sont les utilisateurs finaux de cet outil ou de ses résultats. Des entretiens menés avec certaines et certains d'entre eux ont montré un consensus sur la rapidité du dépérissement de la châtaigneraie et une incertitude sur l'impact de cette évolution à long terme notamment en termes de biodiversité.

Réunis la journée du 11 septembre 2025, ils ont collectivement discuté de la méthode, des résultats et de l'attitude à adopter face au dépérissement de la châtaigneraie, notamment en termes de gestion forestière.

L'outil de modélisation a le mérite de renseigner sur l'état de santé des châtaigniers du Vallespir sur une surface étendue, aujourd'hui peu documentée. **Il s'appuie sur une méthode complexe, la télédétection, rendue accessible aux initiés aux Systèmes d'Information Géographiques du territoire, afin d'éclairer leur décision.** Une prochaine étape pourrait être l'étude de l'historique de la châtaigneraie, mais aussi des causes du dépérissement. Les partenaires de la Charte Forestière de Territoire souhaitent également expérimenter *in situ* l'adaptation de la gestion forestière au changement climatique.

# I – L’avenir de la châtaigneraie du Vallespir, un enjeu de biodiversité et de gestion forestière

## a) Pourquoi monter un outil d’évaluation du dépérissement de la châtaigneraie du Vallespir ?

Le projet de stage sur l’évaluation du dépérissement des châtaigneraies du Vallespir a pour objectif de **rendre compte de l’état actuel des châtaigneraies dans un contexte de sécheresse** à l’aide d’outils et de méthodes d’évaluation de la santé des forêts telles que la télédétection et des outils visuels de terrains (DEPERIS par exemple).

Il fait suite à **une volonté locale de connaître l’état des peuplements de châtaigniers** dans un contexte de sécheresse qui touche notamment le territoire depuis 2022. Les enjeux du risque de dépérissement sont multiples, ils touchent les secteurs touristiques notamment dans les zones naturelles susceptibles d’accueillir du public (activités de randonnées, de course, cueillette...), les risques de chutes de branches et de tiges de châtaigniers morts peuvent freiner la fréquentation. Le châtaignier est une essence emblématique du territoire, qui fait partie du paysage si particulier du Pays Pyrénées Méditerranée, c’est une valeur patrimoniale importante. Pour ces raisons et bien d’autres encore, le châtaignier est une ressource économique et patrimoniale importante, il est intéressant d’observer l’évolution de ces forêts. La santé de la châtaigneraie intéresse également la biodiversité et la qualité des habitats. Enfin, l’enjeu est également l’adaptation de la gestion de la forêt, afin de s’adapter, voire accompagner l’évolution de ce peuplement dans les Pyrénées-Orientales.

## b) Les missions du stage

**Un stage de 6 mois entre avril et septembre 2025 a permis de mettre sur pieds l’outil EValCha, d’évaluation de la santé de la châtaigneraie du Vallespir.** Ce stage s’inscrit dans le cadre du défi clé O3T (Observation de la Terre et Territoires en Transition) et est financé par la région Occitanie. Les encadrants sont Aurélie Kirsch et Tristan Berchoux du CIHEAM (Centre International des Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes), Louise Chasset et Sandra Enaud, du Pays Pyrénées Méditerranée.

C’est dans le cadre de **la Charte Forestière de Territoire** animée par le Pays Pyrénées Méditerranée, que les missions du stage se sont déroulées. Il s’agit d’un outil de développement territorial pour la gestion de la forêt au regard des changements globaux, des services écosystémiques de la forêt notamment en termes de biodiversité, de filière bois et de services socio-culturels, en adoptant une stratégie adaptée au territoire local. Ce document est un cadre pour les acteurs de la forêt afin qu’ils puissent se retrouver et échanger sur des objectifs et un plan d’actions communs.

La mission de stage s’est déroulée dans le cadre du **projet européenne de recherche GRANULAR** (Giving Rural Actors Novel data and re-Useable tools to Lead public Action in Rural areas). Le Pays Pyrénées Méditerranée anime en effet un living lab afin de rapprocher chercheurs et acteurs locaux pour une meilleure connaissance de ce territoire rural au service de la prise de décision.

## c) Caractéristiques et enjeux du châtaignier

### 1- En France

**En France, 17 % du volume total du châtaignier est mort ou en chablis** (il représente 19 % du volume total de bois mort sur pied, soit 28 millions de m<sup>3</sup>). Le bois mort au sol est représenté par 11 % de châtaignier. C'est également l'une des essences la plus altérée de France avec près de 20 % de dépérissement et l'un des plus gros taux de mortalité (1,6 Mm<sup>3</sup>/an) juste derrière l'épicéa (2,2 Mm<sup>3</sup>/an) depuis la crise des scolytes (memento IFN, IGN, 2024).

**Le châtaignier est impacté par de nombreux facteurs environnementaux**, auxquels il répond après sa coupe et son séchage, par la roulure qui est due à la libération des contraintes mécaniques internes du bois (décollement entre les cernes). Il est également impacté par la sécheresse estivale et le déficit hydrique qui peut survenir certaines années ainsi que 3 principaux ravageurs (le chancre, l'encre et le cynips).

En mars 2025, une étude du réseau Aforce a fait ressortir des tendances sur l'état de santé des forêts en France. **Le taux de mortalité des peuplements a doublé en 10 ans** passant de 0,5 m<sup>3</sup>/ha/an sur la période 2005-2013 à 1 m<sup>3</sup>/ha/an sur la période 2014-2022, selon les relevés de placettes de l'IGN (Wurpillot & Gentils, 2025).

#### Usages du bois de châtaignier

Le châtaignier a une classe d'emploi 3 (hors contact du sol, à l'extérieur), il est moyennement durable face aux termites et durable face aux champignons (classe 2) grâce à la présence de ses tanins. Celui-ci est apprécié pour un usage en menuiserie, ébénisterie ou charpente notamment pour du mobilier intérieur ou extérieur (parquet, lambris, panneaux de fibres ou particules ou encore pour du bois énergie). Il est aussi utilisé pour des savoir-faire artisanaux (vannerie, cerclage...). Il ne peut recevoir de traitement du fait qu'il est non imprégnable (classe 4) (Gérard et al. 2011). Sa masse volumique est en moyenne de 538 kg/m<sup>3</sup> et son module d'élasticité en flexion est de 12 000 MPa (pour 66 % de la population, bois sec à 12 % HR), (Gérard et al. 2011). Ces caractéristiques mécaniques sont intéressantes pour un usage en structure, en bardage, en aménagement extérieur et intérieur mais aussi en piquets selon les arbres.

Dans le Vallespir, durant l'exploitation minière entre le 14<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle, une quarantaine de scieries étaient présentes. Elles ont toutes été fermées durant la Seconde Guerre Mondiale. Aujourd'hui il faut se rendre vers Gérone en Espagne pour trouver une scierie. Traditionnellement, le châtaignier est conduit en taillis avec une rotation de 25 à 30 ans. Une éclaircie est réalisée 15 ans après la coupe rase et une seconde, 5 à 10 ans après (Veullen, 2016). Aujourd'hui, de nombreux châtaigniers se trouvent dans des zones qui ne répondent plus à leurs exigences pédoclimatiques et disparaissent parfois au profit d'autres essences mieux adaptées.

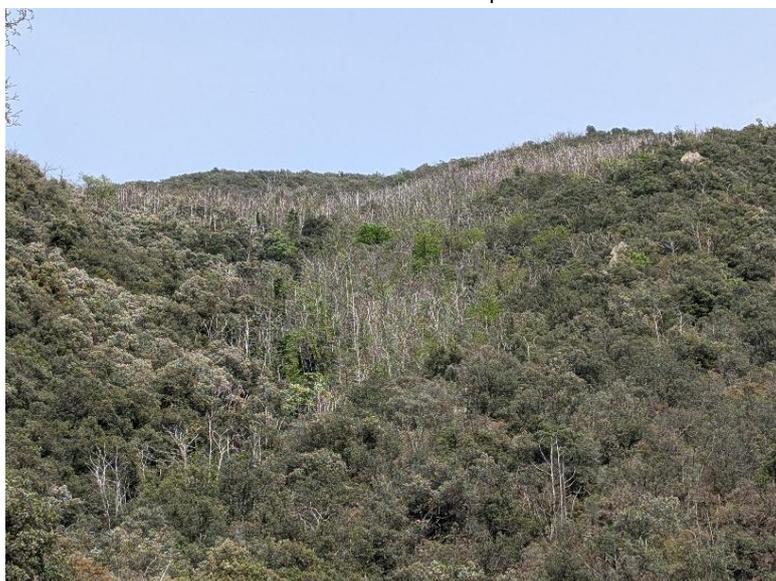
## 2- En Vallespir

**Le Pays Pyrénées-Méditerranée est couvert par 70 000 ha de forêts**, les feuillus représentent environ 86 % et les résineux 10 % du couvert forestier total. 83 % des forêts au sein du Pays Pyrénées-Méditerranée sont privées et le châtaignier occupe 19 % de la superficie totale, alors qu'il représente 12 % de la surface totale du département des PO (IFN, 2005 - 2009, guide de la sylviculture du châtaignier), il s'agit de l'essence majoritaire du Pays avec le chêne vert qui occupe également 19 % de la superficie totale. Dans sa globalité, la forêt a augmenté au fil du temps (d'environ 50 % en 30 ans de la surface totale), l'expansion forestière et la maturation des peuplements est importante (excepté pour les longues tiges <17,5 cm de diamètre, qui se renouvellent peu). Néanmoins, la maturation des châtaigniers.

**La zone d'étude est le Vallespir (dont le Haut Vallespir)** est frontalier avec l'Espagne au Sud et au Nord-Ouest avec la chaîne Puigmal-Canigou. Ces communautés de communes recouvrent 47 075 ha de territoire (INSEE) avec des altitudes allant de 160 m au Pont de Reynès et près de 2731 m au Puig des Très Vents (guide des stations forestières du Vallespir, CRPF Languedoc Roussillon). 70 % de la superficie totale du Vallespir est occupée par de la forêt, dont plus de 60 % de forêts est en zone de montagne et rurale.

**La forêt de ce territoire a connu différentes phases.** L'élevage et l'agriculture engendrent d'abord un fort défrichement à partir de -2 000 av. JC. Puis la forêt revient à son stade optimal entre le 10<sup>ème</sup> et le 14<sup>ème</sup> siècle. L'installation de « forges à la catalane » utilisant le minerai de fer du massif du Canigou, a induit une déforestation importante du fait de la forte demande en charbon de bois, jusqu'au 18<sup>ème</sup> siècle, la forêt est exploitée au maximum. En effet, pour protéger les sols et alimenter les forges à charbon, plus de 8 000 ha de châtaignier sont plantés dans les arrondissements de Céret entre 1787 et 1881. Ces dernières fermeront en 1888 à Arles-sur-Tech. Il arrivait que les arbres soient plantés avec des plants de pommes de terre en agroforesterie avant leur exploitation entre leur 15 et 17 ans. Le châtaignier est alors utilisé dans le milieu viticole à partir de 1890 pour le cerclage et les douelles de tonneaux ou les piquets de vigne jusqu'en 1950 où on ne trouve plus de tonnelier. L'économie est à son comble au début du 20<sup>ème</sup> siècle avant que la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>nd</sup> Guerres mondiales n'appauvrissent le territoire. En 1940 a lieu un fort épisode pluvieux, l'Aiguat, engendrant un glissement de terrain et la destruction de plusieurs villages. Un plan de restauration des terrains de montagnes a par la suite eu lieu avec pour objectifs la régularisation des cours d'eau du Tech et une stabilisation des sols.

**Actuellement, la plupart des châtaigneraies ne sont plus gérées** : l'absence de gestion couplée à une sécheresse grandissante, des températures qui augmentent et le vieillissement des souches induisent un fort dépérissement des arbres (CRPF). Le châtaignier dans le Vallespir se



trouve principalement en peuplement pur et en taillis sur souche (dont les souches sont âgées de 150 à 200 ans). De nombreux châtaigniers sont dépérissant voire morts sur pied, (fig 2). Sur le territoire, selon le Plan d'Approvisionnement Territorial (PAT) de 2023, le châtaignier du Vallespir est principalement cultivé pour son bois (90 % qui est utilisé en énergie) (guide de sylviculture du châtaignier en Languedoc-Roussillon, CRPF et IFN 2005 - 2009).

Figure 2 : photo taillis de châtaigniers morts sur pied à Amélie-les-Bains

Selon le PAT et l'IFN (15 placettes inventoriées), les peuplements purs de châtaignier possèdent **un volume moyen de 156 m<sup>3</sup>/ha et un diamètre moyen 15 cm avec une hétérogénéité moyenne.** Sur le territoire du Pays Pyrénées-Méditerranée, les châtaigneraies représentent 8 500 ha (soit 13 % de la superficie totale), par domaine d'études (peuplements aux caractéristiques similaires) d'après l'étude régionale Occitanie (IGN, 2018 et DRAAF), 24 points d'échantillonnage et un volume moyen de 163 m<sup>3</sup>/ha.

### **Contexte climatique : le Vallespir subit la sécheresse depuis plusieurs années**

Dans le Vallespir, 77 stations forestières sont recensées (CRPF Languedoc-Roussillon, 2013). Les stations forestières sont définies en fonction de la végétation qui s'y trouve, du type de sol et selon les éléments recensés, cela permet d'orienter la gestion (CNPF). C'est une région qui présente une grande diversité de milieux et abrite des espèces remarquables, dont la loutre, le chat sauvage, le desman des Pyrénées, l'euprocte des Pyrénées, le grand tétras ainsi que des coléoptères saproxyliques. Elle est également un habitat naturel pour des grands herbivores (cerfs, sangliers, chevreuils, daims, isards). De nombreuses zones du territoire sont protégées et inscrit en ZNIEFF de type 2 (forêt du Vallespir n°66156-00000), (SRGS, CNPF Occitanie, 2024).

Le Schéma Régional de Gestion Sylvicole (SRGS) permet de recenser les objectifs d'une gestion forestière durable pour les forêts privées régionales. Il permet également de lister les points de vigilances par essence, selon les données du DSF. Par exemple, le châtaignier est dans un état de dépérissement important avec une hausse de l'impact lié à la sécheresse, au chancre et aux cynips. Le SRGS fait également référence aux à-coups climatiques qui sont de plus en plus fréquents en Occitanie et qui affectent les forêts (SRGS, CNPF Occitanie, 2024).

En effet, le sud des Pyrénées est confronté à un déficit hydrique et à une hausse importante des températures. L'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC), indique que les températures globales ont augmenté de +1,2 °C en 50 ans, alors que la moyenne pour le reste du monde est de + 0,85 °C (SRGS, CNPF Occitanie, 2024). L'OPCC montre également une diminution des précipitations annuelles d'environ 2,5 % tous les 10 ans, depuis les 50 dernières années (OPCC et CTP, 2018). En effet, entre 2023 et 2024, dans les PO seul 228 mm de pluie ont été enregistrées. Sur l'année 2022, 22 mois ont été déficitaires en eau. Durant la période de recharge en eau (septembre à mars), les sols sont restés à un bas niveau, similaire à une période estivale, les précipitations suivantes n'ont pas permis de recharger les nappes (Météo France, 2024). A titre de comparaison, en moyenne, les précipitations, sont comprises entre 745 mm à 1045 mm par an et plus sur les sommets, le Vallespir subit un climat maritime et il s'agit de la zone la plus arrosée des PO (SER I22, IGN, 2013).

La forêt des Pyrénées est également impactée par un mauvais équilibre sylvo-cynégétique, qui a tendance à ralentir la croissance et le développement des jeunes arbres mais surtout la régénération naturelle des peuplements forestiers.

## II – Méthodes et outils pour évaluer le dépérissement de la châtaigneraie

Plusieurs dispositifs permettent aujourd'hui d'évaluer la santé de la forêt, notamment des châtaigniers. Le projet *EVallCha* s'appuie sur deux d'entre eux, décrits ci-dessous.

### a) La méthode DEPERIS du Département de Santé des Forêts

**Le Département de santé des Forêts (DSF) évalue l'état de santé des forêts** en surveillant leur évolution et en décelant d'éventuels problèmes sylvosanitaires. Ces observations permettent par la suite de conseiller les gestionnaires et propriétaires forestiers. L'enjeu à l'échelle de la France est d'estimer les surfaces dépérissantes de la forêt. Pour cela, l'IGN et le DSF se sont associés pour proposer une méthode d'estimation des surfaces concernées (Derrière & Saintonge, 2024). Dans le cadre de cette mission, **le dépérissement est défini à l'échelle de l'arbre et du peuplement**, pour qualifier la « surface forestière dépérissante » à l'échelle de la France. La définition retenue est « *au moins 20 % des arbres du peuplement présentent au moins 50 % de branches mortes* ».

**Entre 2018 et 2022, la France possède une surface de peuplements dépérissants de 670 000 ha**, toutes essences confondues. Cependant, cela ne prend pas en compte les jeunes individus ainsi que les forêts dites « de production » (au sens de l'IFN). C'est donc 4,5 millions d'ha de forêt qui ne sont pas pris en compte dans cette estimation sur 17,3 millions de forêt française (cela dépend également des agents qui réalisent l'inventaire et de la probabilité de tomber sur un arbre mort durant l'inventaire) (Derrière & Saintonge, 2024). Cette méthode a montré une altération de 8 % des arbres en forêts entre 2021 et 2023.

**La méthode DEPERIS ne permet pas de connaître les sources du dépérissement et ne prend pas en compte la dominance ou codominance des individus. Cette méthode, permettra par la suite de pouvoir mettre en place des mesures adaptées de gestion ou encore d'éviter certaines coupes ou travaux, qui risqueraient d'endommager davantage le peuplement.**

**L'évaluation se fait à un « instant t »** et permet d'observer l'évolution de l'état de santé de la forêt en question. C'est une technique simple, qui ne nécessite pas de formation particulière et qui permet de suivre l'état du dépérissement à travers des critères quantitatifs.

Les châtaigniers du Vallespir sont des individus de petits diamètres, notamment du fait qu'il s'agit de jeunes tiges qui ont rejetées sur d'anciennes souches. DEPERIS prend en compte des diamètres supérieur à 22,5 cm soit des arbres de taille et d'âge moyen. Ici les individus ont été mesuré mais ceux avec un petit diamètre qui étaient dominants ont été également pris en compte.

- Deux critères d'observation du houppier sont noté pour chaque arbre d'un diamètre supérieur à 22,50 cm de la placette :
  - La mortalité des branches selon tous les axes de l'arbre (des nouvelles pousses aux branches établies, de toutes les tailles possibles) > *figure 3*
  - Le manque de ramification > *figure 4*

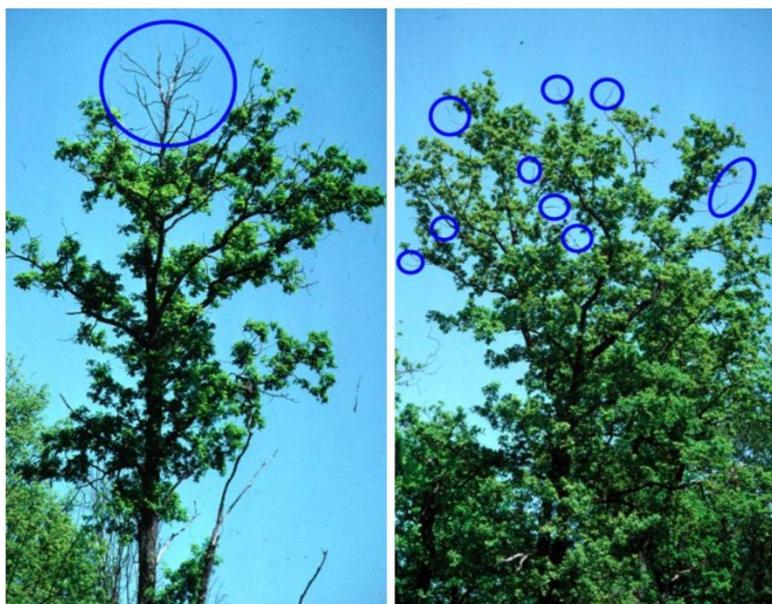


Figure 3 : Mortalité localisée sur la cime (à gauche), mortalité diffuse dans le houppier (à droite), DSF



Figure 4 : Châtaignier été et hiver (mortalités de branches en bleu, manques de ramification en rouge), DSF

Les résultats de l'évaluation de ces deux critères est alors reporté dans un abaque, afin de classer chaque arbre dans une classe selon son état de santé :

		Manque de Ramification (feuillus)					
		Manque d'Aiguilles (résineux sauf mélèze)					
Mortalités de Branches		0	1	2	3	4	5
	0	A	B	C	D	E	F
	1	B	B	C	D	E	F
	2	C	C	D	D	E	F
	3	D	D	D	E	F	F
	4	E	E	E	F	F	F
5	F	F	F	F	F	F	

Figure 5 : Abaque de notation DEPERIS, DSF

- L'aspect du houppier est également évalué selon une grille critériée précise

Note	Intensité	Fréquence	Nombre	% indicatif
0	Absence ou trace	Nulle à très faible	0 à quelques rares	0 à 5
1	Légère	Faible	Quelques à peu nombreux	6 à 25
2	Assez forte	Modérée	Assez nombreux	26 à 50
3	Forte	Importante	Nombreux	51 à 75
4	Très forte	Très importante	Très nombreux	76 à 95
5	Total	Toute la partie notée concernée	Total	96 à 100

Figure 6 : Grille de notation DEPERIS (le châtaignier – l'été, DSF)

La part d'arbre de chaque note peut être regroupés afin d'avoir une statistique complète sur le peuplement que l'on observe et évaluer l'état à l'échelle du peuplement ou de la placette. Un peuplement dégradé est considéré comme tel au-delà de 20 % d'arbres classés D à F. Selon DEPERIS un arbre dépérissant est noté D, E ou F. Concernant le score, les arbres ont été noté selon un gradient faiblement dépérissant à fortement dépérissant d'après la note D à F de DEPERIS. Ce gradient comprend :

Gradient adapté au châtaignier	Couleur de la carte
Faiblement dépérissant = 0 à 50 % de dépérissement	Vert
Moyennement dépérissant = 50 à 75 % de dépérissement	Orange
Fortement dépérissant = 75 à 100 % de dépérissement	Rouge

**A titre indicatif, un châtaignier sain, en période d'été, présente :**

- Un sommet en dôme assez régulier (houppier)
- Des ramifications invisibles dans le houppier (architecture)
- Une transparence diffuse, pratiquement opaque (pour les 1/3 supérieur du couvert)
- Le feuillage doit avoir une longueur supérieure à 20 cm (utilisé pour le déficit foliaire mais pas pour DEPERIS)
- La floraison est importante et peut occuper l'ensemble du sommet du dôme



Figure 7: Châtaignier de référence et sain (à gauche) et châtaignier très dépérissant (à droite), DSF fiche châtaignier – l'été

**Arbre de référence**  
 Mortalité de branches (MB) = 0  
 Manque de ramification (MR) = 0  
 DEPERIS = A  
 Déficit foliaire (DF) = 0 %

MB = 1  
 MR = 3  
 DEPERIS = D  
 DF = 60 %

## b) Les projets Casteldiag (Aforce) et Depcast (SPNA)

Plusieurs études ont mis en corrélation des facteurs de dépérissement observables par télédétection, à l'aide d'images multispectrales capturées depuis l'espace.

### 1- Comment fonctionne la télédétection ?

**La télédétection se base sur la réflectance pour caractériser des zones de végétation.** C'est par l'analyse de l'images prise par un satellite, équipé d'une caméra multispectrale, que 10 bandes spectrales sont capturées dans le visible et l'infrarouge (fig 8). Les images sont capturées à l'aide du satellite Sentinel-2, dont la résolution spatiale est de 10 à 60 m (un pixel fait 10 à 60 m de largeur), avec un temps de revisite de 5 jours (c'est-à-dire que le satellite met 5 jours pour faire le tour de la terre), (Rodat & Maisongrande, 2025). Toutes les images ne sont pas exploitables notamment lorsqu'il y a une forte couverture nuageuse.

Les bandes spectrales sont utilisées pour le suivi du dépérissement. Le signal de réflectance observable depuis les bandes spectrales (signature spectrale), permettent de savoir quel est l'élément observé. La végétation par exemple émet très peu dans le visible et d'avantage dans le proche infrarouge. Cette signature spectrale change en fonction de l'état de santé de la végétation, en fonction de la couverture de végétation (teneur en chlorophylle), de la teneur en eau ou encore de la surface foliaire (indice LAI = Leaf Area Index).

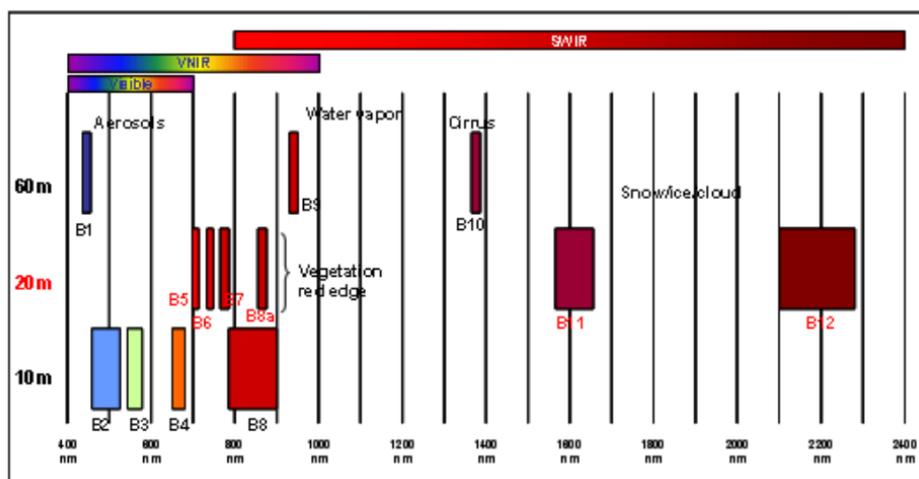


Figure 8: Bandes spectrales de Sentinel-2 (source : [Cesbio](#))

### 2- Deux projets en Nouvelle-Aquitaine : Casteldiag et Depcast

Le projet *Casteldiag* (RMT Aforce et CNPF-IDF, avec Michel Chartier du CNPF - IDF, Véronique Chéret et Jean Philippe Denux de l'UMR Dynafor et de l'école de Purpan) mené entre 2016 et 2018 vise à identifier des classes de dépérissement des châtaigneraies de Dordogne à l'aide de la télédétection et ainsi discriminer les peuplements sains par rapport aux dépérissants, c'est une étude préliminaire (Chéret et al., 2019). Par la suite, une nouvelle action a été menée au sein du SPNA (Sylviculture de Précision en Nouvelle Aquitaine) avec *Depcast* comme acronyme et la même équipe de recherche, ce qui a donné lieu à un article a été publié dans le journal Forêt innovation (Chéret et al., 2023). Pour chaque projet, les données utilisées sont issues du satellite Sentinel-2 et les masques associés de la forêt issus des données de l'IGN (BD Forêt ° V2 et de l'IFN ainsi que CES OSO du pôle THEIA pour l'occupation du sol).

**Casteldiag est un projet sur la faisabilité du diagnostic de l'état sanitaire des peuplements**, par télédétection en prenant pour exemple le châtaignier en Dordogne. Les objectifs de ce projet sont de discriminer par télédétection, les peuplements sains et dépérissants et ainsi fournir une

méthode de traitement de ces séries d'images, afin de suivre annuellement la réponse des taillis de châtaignier aux aléas.

- La méthode utilisée pour *Casteldiag* est **la méthode supervisée, en utilisant une combinaison du diagnostic de terrain Archi et la télédétection.**

- Des parcelles de calibrations ont été délimitées dont 62 parcelles nommées « parcelles CRPF » et 58 « placettes Archi » d'une surface unitaire couvrant 4 pixels (0,16 ha) avec un diagnostic de 30 brins chacune.

- **Le satellite Sentinel-2B** a été utilisé et deux tuiles ont été sélectionnées : le 30/07/2016 et le 28/09/2016, pendant les périodes de feuillaison (entre mars et septembre). Dans *Casteldiag*, **36 indices de végétations** ont permis de traduire : l'activité végétale, la productivité (en observant la biomasse et la photosynthèse), la teneur en eau ou encore la teneur en pigments foliaires, 9 d'entre eux ont été retenus du fait de leurs résultats adéquats (NDII, NDWI, NBR, S2rep, NDVIre2n, DVI, CIgreen, CRi2, GNDVI). En complément, 5 paramètres biophysiques ont également été utilisés (l'indice GLAI a été principalement retrouvé, représentant la surface foliaire verte). Il s'agit du nombre de feuilles au m<sup>2</sup> par m<sup>2</sup> de sol et calculé de manière journalière (Verlingue, 2016). **Ces calculs ont permis de construire des modèles prédictifs.**

- Pour ce qui est des résultats, 8 modèles ont été retenus, permettent de classer en 2 ou 3 classes de dépérissement à partir de référence Archi ou CRPF (fig 9).

- Afin de vérifier la représentativité des résultats, **la méthode Kappa** a été utilisée (mesure de la concordance entre deux échantillons), l'image du mois de juillet représente les meilleurs résultats (0,64) à partir de référence Archi et classé en 2 niveaux (sain et dépérissant).

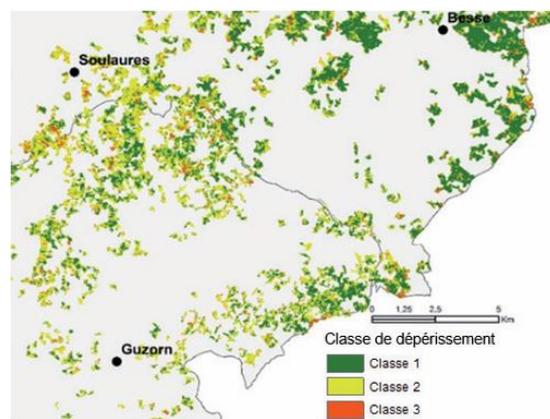


Figure 9: Carte classant en 3 niveaux d'état sanitaire (modèle parcelles CRPF) les peuplements de châtaignier

⇒ Les résultats de cette étude sont prometteurs : envisageables pour des modèles à 3 classes, avec des diagnostics complémentaires pour la classe 2 = classe moyennement dépérissante (évaluation des raisons du dépérissement, prévoir des travaux d'amélioration). Il serait intéressant de refaire ce travail avec des images de 2018 et tester ce modèle sur un autre territoire.

Concernant **Depcast** (Nouvelle Aquitaine),

- **89 parcelles de châtaigniers** sont utilisées pour calibrer le modèle (avec des placettes de 40 m par 40 m, soit 4 pixels), l'état sanitaire des arbres est évalué avec la méthode DEPERIS. Les arbres sont classés en 5 classes où 0 est noté « sain » et 5 « mort à moribond », par la suite les classes 0 et 1 sont regroupés en classes saines.

- **10 bandes spectrales** ont été sélectionnées et **30 indices différents de végétation ainsi que 5 variables biophysiques** ont été testés afin de prédire la probabilité que chaque pixel appartienne à une classe donnée. Avec la « *sélection séquentielle des variables* », 10 modèles différents sont utilisés (6 bandes spectrales et 4 indices de végétation) pour créer une carte finale ; il s'agit d'un modèle de « *régression logistique polytomique* » (binaire). Une seule date est utilisée pour réaliser le traitement, mais il peut être répété sur plusieurs années et par la suite il est possible de comparer les résultats.

- **La méthode Kappa** (ainsi que d'autres tests statistiques et des matrices de confusion) ont également montré des résultats significatifs, pour ce projet, pour 9 modèles (qui sont complémentaires).

- La cartographie résultante de cette méthode peut être comparée avec la probabilité que les peuplements appartiennent à une classe ou à une autre. Cette probabilité et cette cartographie pourront être **mise à disposition des forestiers afin de les guider dans leurs choix de gestion**. Un tutoriel, accessible à tous, a été réalisé à destination des professionnels de la forêt avec la chaîne de traitement de ce projet. Il est cependant nécessaire d'avoir un ordinateur suffisamment puissant pour faire tourner le modèle ainsi qu'une bonne capacité de ram.

⇒ Des biais sont à prendre en compte, notamment le déplacement vers de la bas de la chlorophylle des arbres stressés (descente de cime) et l'âge des peuplements, les arbres âgés étant plus dépérissant que les jeunes arbres (à noter que pour le cas du Vallespir : les peuplements de châtaigniers date de plus de 200 ans pour la plupart).

### III – Etapes d'élaboration d'EValCha, l'outil d'évaluation du dépérissement de la châtaigneraie du Vallespir

La mise sur pieds d'un outil spécifique à la châtaigneraie du Vallespir, a nécessité plusieurs étapes, alternant entre travail sous Système d'Information Géographique (SIG) et phases de terrain pour calibrer et valider le modèle :

#### Étapes d'élaboration d'un outil d'évaluation du dépérissement de la châtaigneraie du Vallespir par télédétection

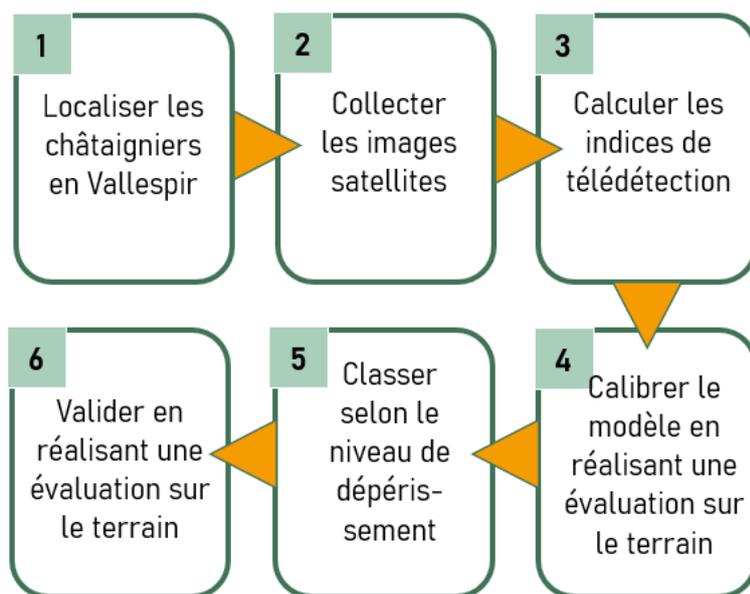


Figure 10 : Schéma de la méthode de télédétection

**Etape 1 :** Les zones de châtaigniers sont visibles sur la couche BD forêt<sup>®</sup> V2 (IGN) (fig 11). Initiée en 2007 et disponible depuis 2018, cette couche permet de recenser les formations végétales forestières « naturelles » pour les surfaces de plus de 5 000 m<sup>2</sup> (0,5 ha). Des informations clés y sont associées : composition des peuplements, essence dominante, densité, etc (32 ensembles de données sont répertoriés). Seules sont retenues les surfaces d’une largeur supérieure à 20 m avec un couvert de végétation supérieur ou égal à 10 % (selon la définition de la forêt de la FAO, 2001).

**Etape 2&3 :** Les images satellites sont collectées avec SCP sur Qgis<sup>®</sup>. Ce sont des images du satellite Sentinel-2, dont la résolution spatiale est de 10 à 60 m, datant de juillet 2024. Puis, plusieurs indices de télédétection sont calculés, en s’appuyant sur l’expérience du projet Depcast (cf. Annexes). Les indices calculés s’intéressent à la végétation (NDII, NDire2n, DVI), la chlorophylle (Cigreen, GNDVI), l’humidité (NDWI, NBR) et les pigments (CRI2).

**Etape 4 :** L’ensemble des résultats a été obtenu en utilisant une méthode supervisée, c’est-à-dire en utilisant des données d’évaluation de l’état de santé des peuplements in-situ avec DEPERIS sur le terrain permettant de calibrer le modèle. 15 placettes sont inventoriées avec 7 placettes très dépérissantes, 4 moyennement dépérissantes et 4 faiblement dépérissantes. Ces données terrains permettent d’obtenir des zones de calibration pour le modèle et classifier les zones de très dépérissantes à faiblement dépérissantes. Pour se faire, l’application Qfield<sup>®</sup> est utilisée. Elle permet de noter les points GPS directement depuis un smartphone ou une tablette et par la suite de traiter directement le document cartographié sur Qgis<sup>®</sup>. Des données dendrométriques et visuelles sont ainsi notées pour chaque individu, par placette d’environ 20 arbres (fig 11).

**Etape 5 :** La classification a été suivie d’une phase de validation terrain en observant au hasard des zones classifiées avec SCP. La figure 14, ci-dessous, est une matrice de confusion entre les pixels bien classifiés (en vert) et des pixels mal classifiés. L’indice de précision est obtenu en divisant le nombre de pixels bien classifiés par le nombre total de chaque catégorie et en multipliant le résultat par 100 pour obtenir des pourcentages.

		Observations validation			Totaux	Précision (%)	Exactitude (%)
		Rouge	Orange	Vert			
Pixels classifiés	Rouge	14	0	1	15	93,33	82,35
	Orange	2	5	0	7	71,43	45,45
	Vert	1	6	9	16	56,25	90
	Totaux	17	11	10	38		
Exactitude globale (%)		73,68					

Figure 14 : Tableau de validation entre les pixels classifiés (en ligne) et les zones de validation observées sur le terrain (en colonne), la diagonale verte montre les pixels bien classifiés

\*Clé de lecture :

- Précision = sur les éléments prédits étant un pixel de la classe X, combien sont corrects (permet de ne pas se tromper, évite les fausses classifications)
- Exactitude = sur les éléments réellement dans la classe X, combien ont été observés sur le terrain lors de la validation (permet de trouver l’ensemble des vrais éléments d’une classe)



Figure 12 : Relevés de terrains et mesure des arbres, le Tech (28/07)

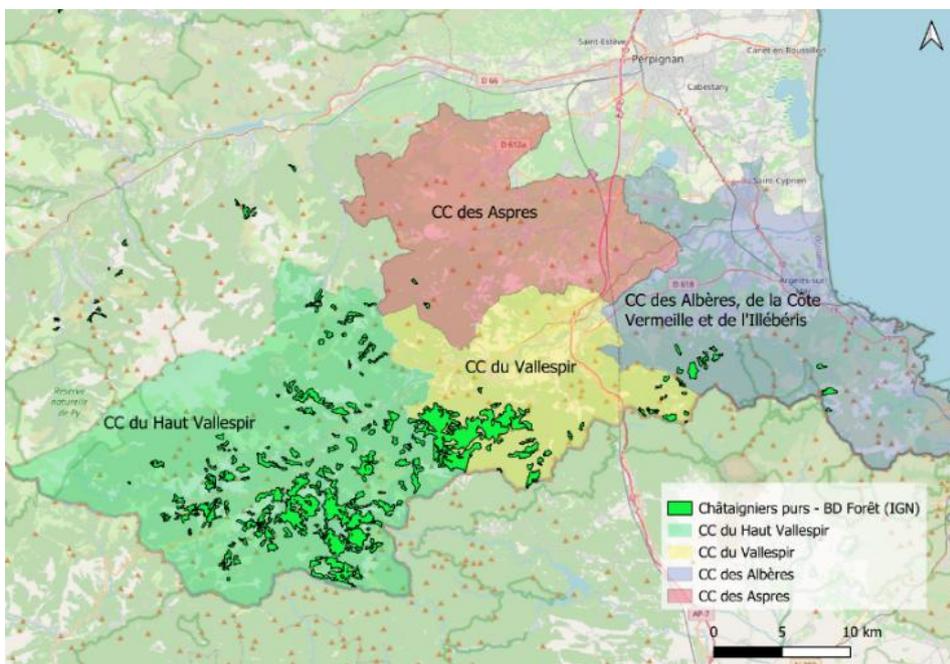


Figure 11 :  
Châtaigneraies  
en Pays  
Pyrénées  
Méditerranée  
(IGN, BD  
ForêtV2 ©)

## IV- Résultats : un état de santé des châtaigniers hétérogène en Vallespir

Les résultats obtenus par l'utilisation de l'outil *EValICha* montre un état de santé hétérogène des châtaigniers selon les secteurs en Pays Pyrénées Méditerranée.

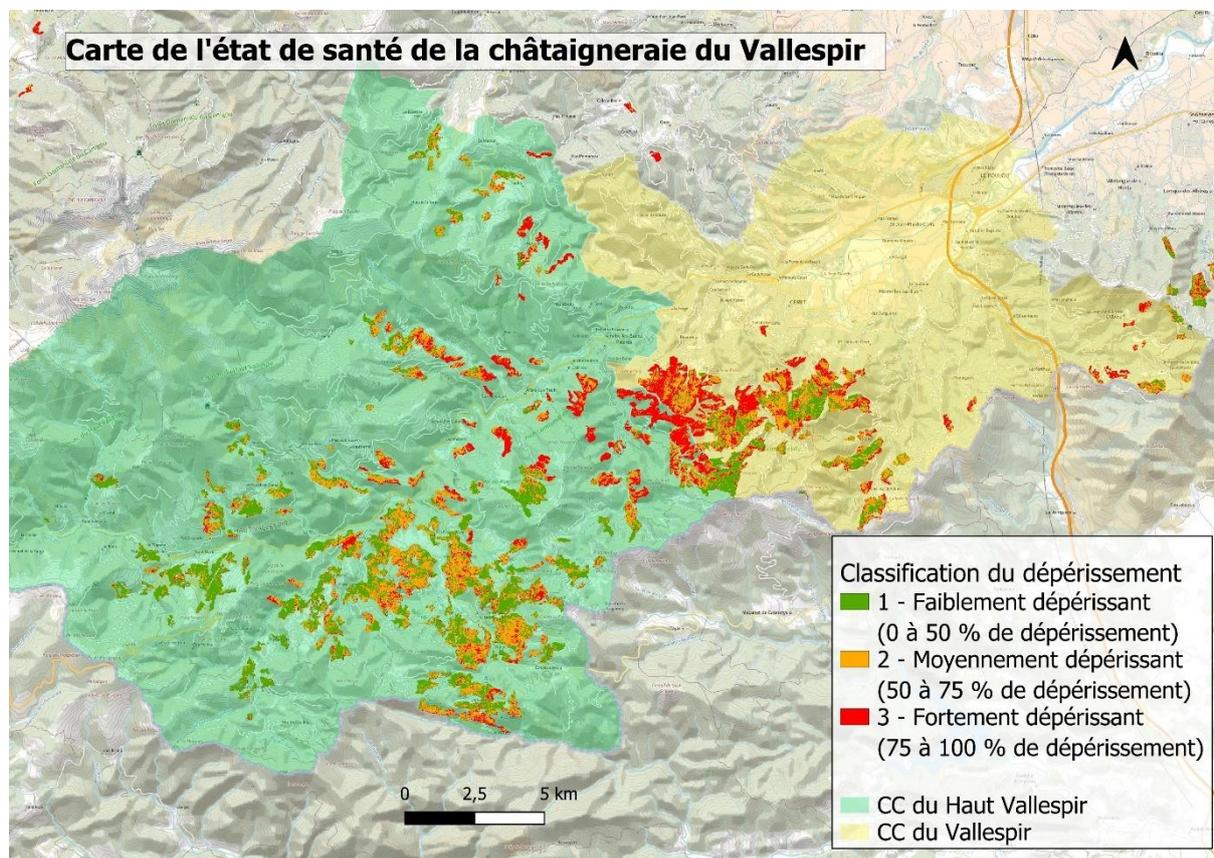


Figure 13 : Etat de santé des châtaigneraies

Les zones faiblement dépérisantes se situent dans le Haut-Vallespir et des zones moyennement dépérisantes dans l'un des premiers bassins de plantation de la châtaigneraie du Vallespir autour de St Laurent-de-Cerdans. **Les zones les plus dépérisantes se trouvent autour de Reynès et au-dessus d'Amélie-les-Bains.** Ces résultats sont cohérents avec la vision des acteurs et des actrices de la Charte Forestière de Territoire (CFT) du Pays Pyrénées Méditerranée.

**L'exactitude globale est de 75%**, c'est-à-dire que les  $\frac{3}{4}$  des pixels ont été correctement classifiés par rapport à ce qui a pu être observé lors de la phase de validation terrain (sur les 38 placettes vérifiées sur le terrain, 28 pixels étaient bien classifiés).

- La classe « rouge » soit les arbres très dépérisants a été bien prédite avec plus de 90 % de pixels bien classifiés. Plus de 75 % des zones ont été clairement identifiés en tant que zone très dépérisante,  $\frac{1}{4}$  des pixels est alors confondus avec une autre classe.
- La classe « orange », soit les arbres moyennement dépérisants est la classe la moins bien prédite, avec un peu plus de 60 % de précision et seulement 45 % d'exactitude, seule la moitié des zones sont clairement identifiés comme étant moyennement dépérisante.

- La classe « verte », soit les arbres faiblement dépérissants montre une exactitude de plus de 90 %, les arbres qui sont réellement dans la catégorie faiblement dépérissante ont été clairement identifiés. Cependant, environ 55 % des arbres identifiés comme sains sont en réalité moyennement dépérissants.

Ces résultats vont permettre de faire un état des lieux de la santé des châtaigniers dans le Vallespir. Cette étude va pouvoir **servir de point de départ pour aider à prendre des décisions quant au suivi des forêts ainsi que leur gestion et afin de recommander aux mieux les gestionnaires forestiers pour la conduite des travaux à tenir.**

## V – Conclusions et recommandations

**La télédétection est un outil qui permet d’observer de grandes zones terrestres**, adaptables sur les forêts, les parcelles agricoles, les océans ou encore l’enneigement et bien d’autres espaces. Concernant les forêts, cela permet de qualifier l’état de santé des peuplements sans avoir à nécessairement se rendre sur le terrain, permettant d’observer de plus larges zones d’études et sur un grand laps de temps. Cela permettrait de s’approcher davantage de la réalité de terrain, en apportant un point de vue sur plusieurs années en continu et en les couplant aux données de l’IGN. Il serait intéressant de poursuivre cette étude et d’appliquer le modèle de télédétection ou de l’ajuster sur les années à venir afin d’observer l’évolution des peuplements de châtaigniers.

**Les châtaigneraies du Vallespir sont, en grande majorité, très dépérissantes**, une grande quantité d’arbres sont morts sur pied, la régénération naturelle est faible. Le sol est relativement sec, acide (acidiphile à mésoacidiphile) et moyennement à peu profond en majorité. La végétation qui accompagne les peuplements de châtaigniers, sont souvent des landes à genêt à balais, des fougères, de la callune ou encore du rhododendron (dépend de la station considérée) (SER I22, IGN, 2013).

Il serait intéressant **d’observer les successions végétales qui peuvent arriver par la suite**, ces successions peuvent induire une augmentation de la biodiversité ou favoriser la repousse de quelques individus de châtaigniers mélangés à d’autres essences.

**Mettre à jour les ouvrages de terrains existants**, notamment sur des zones qui autrefois étaient propice à la croissance du châtaignier et ont changé et sont devenues inadaptées à la croissance de ce dernier, semble nécessaire. Les recommandations de sylvicultures, à l’aide de ces outils vont pouvoir se réaliser au cas par cas.

D’autre part, la création **d’une coopérative sur les piquets et les ganivelles de châtaignier** engendrerait un effet papillon bénéfique aux peuplements de châtaigniers en termes de gestion et d’usage. Le territoire du Vallespir est complexe, notamment pour l’exploitation forestière, du fait de la pente, du type de sol et de la faible gestion des forêts privées. Actuellement, l’objectif principal de la gestion des châtaigneraies est de les remettre en valeur, en réalisant des balivages par exemple (ayant pour vocation bois d’œuvre, cette méthode n’a pas été concluante sur les châtaigniers des PO), en renouvelant les peuplements âgés etc. L’amélioration de la gestion pourrait avoir un impact significatif sur la production du bois (avec apport financier), sur la protection contre les incendies et pour améliorer la biodiversité (SRGS, ORP, 2001).

Si les peuplements de châtaigniers ne sont pas dans une bonne aire écologique, cela va entraîner leur disparition progressive et favoriser d'autres essences qui seront mieux adaptées. En effet, selon les fiches issues de la directive Habitat de Natura 2000, il serait intéressant de ne pas transformer le peuplement au profit notamment d'essences qui viendraient coloniser le châtaignier. D'autres conseils sont listés dans la fiche, elle constitue une ressource importante quant à l'orientation de gestion des châtaigneraies.

Certains itinéraires sylvicoles permettent de réduire les impacts liés à la sécheresse, au cas par cas, en prenant en compte la vulnérabilité de chaque arbre par rapport à son âge. La diminution de la densité du peuplement, permettrait de conserver assez d'eau dans le sol pour les arbres, certains scientifiques préconisent également de remplacer les essences actuelles par des essences plus résistantes au stress hydrique et plus productive (Keskitalo, 2011). Selon Forrester (2014), il serait intéressant de trouver une stratégie plus équilibrée en mélangeant l'essence déperissante avec une ou plusieurs essences d'introduction plus résistantes au stress hydrique ou moins gourmande en eau. Il faut adapter les essences introduites également en fonction du sol et du climat de la station considérée afin de savoir si l'impact sera positif ou négatif (Grossiord, 2018).

Dans un document publié en 2019 par l'OPCC et l'association Canopée, des préconisations sont renseignées pour les forêts de châtaigniers des Pyrénées Orientales en prenant l'exemple d'une châtaigneraie de St Laurent de Cerdans. Les objectifs principaux sont de réduire la densité du peuplement au profit des tiges les plus saines (balivage = sélectionner les tiges les plus vigoureuses et détournage = supprimer les tiges concurrentes), afin d'avoir un peuplement en bonne santé qui pourra faire face aux aléas. La plantation en mélange est également préconisée avec l'utilisation d'essences moins déperissantes telles que le robinier faux acacia (*Robinia pseudoacacia*). Cela permet une meilleure résistance à la sécheresse et une consommation en eau moindre, réduisant alors le stress hydrique. Pour la prise en compte du bilan hydrique deux modèles ont été utilisés : BILJOU\* et MEDFATE\*\*. Ces peuplements, plus résistants poussent mieux et il est possible alors de les utiliser en partie en bois d'œuvre, permettant alors d'en tirer un revenu (OPCC et Canopée, 2019).

\* BILJOU est un outil qui permet d'observer l'état de sécheresse des sols, des forêts en France. Sous forme de site web, il référence les bilans hydriques des forêts de manière journalière. Il a été développé par l'UMR silva et l'INRAE.

\*\* MEDFATE est un outil de modélisation pour visualiser les dynamiques forestières en fonction de données hydriques.

Pour ce qui est des subventions, elles peuvent être fournies pour la plantation à rotation longue (autour de 60 ans) avec des résineux (*pin laricio*, *cèdre*, *douglas*) en remplacement des taillis de châtaignier, mais cela reste assez coûteux et ne permet pas d'améliorer les taillis de châtaignier. Il existe toutefois des projets « carbone » permettant de changer de pratique sylvicole et d'obtenir des financements. Dans les Albères, 30 hectares de taillis de châtaignier ont été converti en futaie sur souche grâce à une association syndicale de gestion forestière (Veullen, 2016).

## Remerciements



Je remercie toutes les personnes qui ont permis à ce projet de voir le jour et d'y avoir participé à ce projet et d'avoir fourni des informations essentielles à la rédaction de ces documents. Merci à tous pour votre coopération pour les journées de terrains et les données sur la forêt.

Je remercie toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce stage, à l'encadrement, au bon déroulement du projet, à la bonne ambiance de travail et à toutes les notions du monde du travail que j'ai pu découvrir tout au long du stage.

Merci à l'équipe du Pays Pyrénées-Méditerranée qui par leur bonne humeur créent un cadre de travail agréable. Merci à l'équipe du CIHEAM de l'IAMM qui m'ont également accueilli avec bonne humeur durant les journées que j'ai passé à Montpellier.

Merci à tous les acteurs du territoire pour les entretiens et pour leur motivation quant au projet. Merci à Daniel Baux, Bruno Mariton, Diane Sorel, Frédéric Hébrard, Jean-Christophe Chabalié, Philippe Chabernaud d'avoir participé aux entretiens. Merci à Jean-Philippe Rieutor, Hugo Soulie, Bruno Mariton, Frédéric Hébrard pour les sessions terrains. Merci à Jean-Philippe Denux, Michel Chartier, Véronique Chéret, Lénéïc Depontailier pour le partage de connaissances SIG.

# Glossaire

## Téledétection

**Coefficient kappa :** « [exactitude] En précision cartographique, mesure comparant les résultats de la classification aux valeurs attribuées par hasard. La valeur obtenue est comprise entre 0 (pas de concordance entre l'image classée et les données de référence) et 1 (l'image classée et les données de référence sont identiques). Plus le coefficient Kappa est élevé, plus la classification est précise. » (Dictionnaire SIG, Support ESRI).

**Distance euclidienne :** « [géométrie euclidienne] Distance en ligne droite (la plus courte) entre deux points sur un plan. La distance euclidienne peut être calculée à l'aide du théorème de Pythagore. » (Dictionnaire SIG, Support ESRI)

**Réflectance :** Rapport entre la quantité d'énergie du rayonnement réfléchi par une surface et la quantité d'énergie du rayonnement reçu. (Académie française, dictionnaire).

**Résolution spectrale :** « [imagerie satellite] Plage de longueurs d'onde pouvant être détectée par une seule bande d'un système d'imagerie. Les capteurs sont caractérisés par leur résolution spectrale, qui comprend à la fois le nombre de bandes et la plage de longueurs d'onde détectée par chaque bande. » (Dictionnaire SIG, Support ESRI)

**Régénération naturelle :** reconstitution d'un peuplement mûr, exploitable sans apport extérieur de matériel végétal, simplement à partir des essences des arbres encore en place sur la parcelle (CRPF, Normandie)

**Révolution forestière :** La révolution est le temps nécessaire à la régénération complète de la forêt, la possibilité est le volume moyen de bois que l'on peut extraire chaque année sans nuire au développement de la forêt. Larousse

**Signature spectrale :** Ensemble des caractéristiques du rayonnement électromagnétique réémis, conditionnées par les propriétés de la matière irradiée, nécessaires et suffisantes pour l'identifier (Ministère de la culture, 2000).

## Bibliographie

1. Chéret Véronique et al., "Cartographier l'état sanitaire des châtaigniers par télédétection (page 20) - Forêt & Innovation n°1 - Sylviculture de précision en Nouvelle-Aquitaine," Site Internet du CNPF, 2023, <https://www.cnpf.fr/actualites/foret-innovation-ndeg1-sylviculture-de-precision-en-nouvelle-aquitaine>.
2. Chéret Véronique et al., "CASTELDIAG," AFORCE, 2019, <https://www.reseau-aforce.fr/casteldiag>.
3. CRPF Languedoc-Roussillon, Guide de Sylviculture Du Châtaignier En Languedoc Roussillon, 2013, <https://manualzilla.com/doc/6483773/guide-de-sylviculture-du-ch%C3%A2taignier-en-languedoc>.
4. CRPF Languedoc-Roussillon, Guide Des Stations Forestières Du Vallespir, 2013, <https://studylibfr.com/doc/2238056/part1-intro--crpf-languedoc-roussillon>.
5. CRPF Normandie, "LA RÉGÉNÉRATION NATURELLE" (n.d.), [https://hautsdefrance-normandie.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/rege\\_20naturelle\\_1\\_1.pdf](https://hautsdefrance-normandie.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/rege_20naturelle_1_1.pdf).
6. CNPF Occitanie "SRGS\_Partie1\_Pyrénées," 2024, <https://occitanie.cnpf.fr/document/srgs-partie1-pyrenees-2024-06-pdf>.
7. Derrière Nathalie and Saintonge François-Xavier, "Etat Dégradé Des Forêts de France : Proposition d'une Méthodologie d'estimation Des Surfaces Concernées" (2024), <https://www.bing.com/search?q=Etat+d%C3%A9grad%C3%A9+des+for%C3%AAts+de+France+>

- <https://www.researchgate.net/publication/353127130>
- <https://www.researchgate.net/publication/353127130>
- <https://www.researchgate.net/publication/353127130>
8. DSF and IGN, "Surfaces déperissantes en forêt française," *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire*, 2024, <https://agriculture.gouv.fr/surfaces-deperissantes-en-foret-francaise>.
9. Dubé et al., "Le Livre Blanc Des Living Labs," *Umvelt Service Design/Montréal In Vivo*, Montréal, [https://www.academia.edu/72091465/Le\\_Livre\\_Blanc\\_des\\_Living\\_Labs](https://www.academia.edu/72091465/Le_Livre_Blanc_des_Living_Labs).
10. Forrester David I., "The Spatial and Temporal Dynamics of Species Interactions in Mixed-Species Forests: From Pattern to Process," *Forest Ecology and Management* 312 (2014): 282-292, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112713006701>.
11. Gérard Jean et al., *Tropix* 7, 2011, <http://tropix.cirad.fr/en>.
12. Girard Sabine et al., "Autécologie Du Châtaignier," 2024, <https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-dutilisation-des-ressources-genetiques-forestieres>.
13. Grossiord, "Having the Right Neighbors: How Tree Species Diversity Modulates Drought Impacts on Forests," *New Phytologist* 228, no. 1 (2018): 42-49, <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.15667>.
14. IGN, "Sylvoécocorégion, I22, Les Pyrénées Catalanes" (2013), [https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/I\\_22.pdf](https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/I_22.pdf).
15. IGN and DRAAF Occitanie, "Disponibilités En Bois Des Forêts d'Occitanie l'horizon 2036" (2018), [https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/ign\\_etude\\_dispo\\_occitanie\\_rapport\\_complet.pdf](https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/ign_etude_dispo_occitanie_rapport_complet.pdf).
16. IGN, "Memento - INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL" (2024), [https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento\\_2024.pdf](https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento_2024.pdf).
17. Keskitalo E. Carina H., "How Can Forest Management Adapt to Climate Change? Possibilities in Different Forestry Systems," *Forests* 2, no. 1 (March 15, 2011): 415-430, <https://www.mdpi.com/1999-4907/2/1/415>.
18. Landmann G., "Comment Apprécier La Vitalité d'un Arbre Ou d'un Peuplement Forestier ?," *Revue Forestière Française*, no. 4 (1988): 265, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03424615>.
19. McDowell G. Nate et al., "Global Satellite Monitoring of Climate-Induced Vegetation Disturbances," *Trends in Plant Science* 20, no. 2 (2015): 114-123, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1360138514002726>.
20. OPCC and Canopée, "Guide de gestion forestière pour l'adaptation au changement climatique des forêts pyrénéennes - CANOPEE," *Site Internet du CNPF Occitanie*, 2019, <https://occitanie.cnpf.fr/document/guide-de-gestion-forestiere-pour-l-adaptation-au-changement-climatique-des-forets>.
21. OPCC and CTP, "Les Changements Climatique Dans Les Pyrénées : Impacts, Vulnérabilités et Adaptation" (2018), <https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/documentacion/opcc-informe-fr-print.pdf>.
22. ORP Languedoc-Roussillon, "SRGS - Orientations Régionales de Production (Forêts Privées Du Vallespir)" (2001), [https://occitanie.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/vallespir\\_1.pdf](https://occitanie.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/vallespir_1.pdf).
23. Tallieu Clara et al., "Une Vision Pluridisciplinaire Des Sécheresses En Forêt : Comment Les Quantifier, Évaluer Leurs Impacts et s'y Adapter," *Revue forestière française* 74, no. 2, 2023, : 307-321, <https://revueforestierefrancaise.agroparistech.fr/article/view/7615>.
24. Tarpley J. D, Schneider S. R., and Money R. L., "Global Vegetation Indices from the NOAA-7 Meteorological Satellite," *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, no. 3 (1984): 491-494, [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0491:GVIFTN>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0450(1984)023<0491:GVIFTN>2.0.CO;2).
25. Verlingue Ugo, "Guiding Varietal Choice for Soybean in Africa: A Comparison of Bottom-up and Top-down Modelling Approaches to Assess Water Limited Potential Yields" (2016): 75, <https://n2africa.org/sites/default/files/MS%20Thesis%20report%20Ugo%20Verlingue-Supagro%20Montpellier%202016.pdf>.
26. Vennetier. M et al., "Impact de la Canicule 2003 sur les peuplements résineux de la région PACA. Rapport final" (report, irstea, 2008), <https://hal.inrae.fr/hal-02591007>.
27. Veuillen L., "Journées de Rencontres et d'échanges En Pays Pyrénées-Méditerranée (Vallespir) : Valoriser Les Espaces Forestiers Méditerranéens Tout En Conciliant Nature et Systèmes Productifs

- Compte Rendu de Deux Journées de Terrain," *Forêt Méditerranéenne* XXXVII, no. 3 (2016): 199-206, <https://hal.science/hal-03556615>.
- 28. Wurpillot Stéphanie and Gentils Milène, "Bilan et Tendances d'évolution de La Santé Des Forêts" (2025), [https://reseau-aforce.fr/sites/reseau-aforce/files/2025-04/WURPILLOT\\_GENTILS\\_Bilan\\_Sante\\_Forets.pdf](https://reseau-aforce.fr/sites/reseau-aforce/files/2025-04/WURPILLOT_GENTILS_Bilan_Sante_Forets.pdf).

## Webographie

- 29. Académie française, "réflectance | Dictionnaire de l'Académie française | 9e édition," <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9R1204>.
- 30. CNPF, "Les stations forestières," *Site Internet du CNPF*, <https://www.cnpf.fr/nos-actions-nos-outils/outils-et-techniques/les-stations-forestieres>.
- 31. "Définition de Distance Euclidienne | Dictionnaire SIG," <https://support.esri.com/fr-fr/gis-dictionary/euclidean-distance>.
- 32. "Définition de Résolution Spectrale | Dictionnaire SIG," <https://support.esri.com/fr-fr/gis-dictionary/spectral-resolution>.
- 33. "Définition de Coefficient Kappa | Dictionnaire SIG," <https://support.esri.com/fr-fr/gis-dictionary/kappa-coefficient>.
- 34. FAO, "Les Arbres Hors Forêts - Les Définir et Les Prendre En Considération," 2001, <https://www.fao.org/4/XII/0230-B1.htm>.
- 35. INSEE, "Comparateur de Territoires - Vallespir," 2025, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=EPCI-246600373>.
- 36. INSEE, "Comparateur de Territoires - Haut Vallespir," 2025, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=EPCI-246600548>.
- 37. Larousse, "sylviculture - LAROUSSE," <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/sylviculture/95220>. Éditions Larousse, "sylviculture - LAROUSSE", <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/sylviculture/95220>.
- 38. Météo France, "Climat : des cumuls de précipitations excédentaires, mais pas partout | Météo-France," 2024, <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/precipitations-excedentaires-pas-partout>.
- 39. Ministère de la culture, "Signature Spectrale Définition France Terme," 2000 <https://www.culture.fr/franceterme/terme/SPAT300#:~:text=Ensemble%20des%20caract%C3%A9ristiques%20du%20rayonnement,et%20suffisantes%20pour%20l'identifier>.
- 40. Natura 2000, "Châtaigneraies des Pyrénées-Orientales - Natura 2000," *Le portail des sites Natura 2000 en Ariège*, n.d., <https://natura2000ariege.fr/habitats-d-interet-communautaire/milieux-forestiers/9260-chataigneraies-des-pyrenees-orientales/>.
- 41. PPM, "Qu'est Ce Qu'une Charte Forestière de Territoire ?," 2017, <https://www.payspyreneesmediterranee.org/thematiques/charte-forestiere-de-territoire/presentation-de-la-cft/qu-est-ce-qu-une-charte-forestiere-de-territoire.html#:~:text=Une%20Charte%20Foresti%C3%A8re%20de%20Territoire%20est%20%C3%A9tablie%20sur%20la%20base,peut%20%C3%AAtre%20renouvel%C3%A9e%20apr%C3%A8s%20%C3%A9valuation>.

## Cartographie

- 42. "BD FORÊT® et Masque FORÊT | Géoservices," <https://geoservices.ign.fr/bdforet>.
- 43. "DataIFN," <https://inventaire-forestier.ign.fr/dataifn/>.
- 44. THEIA, "Carte d'occupation Des Sols Du CES OSO," 2018, <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/oso-theia>.
- 45. "Utiliser Les Données Libres En Flux WMS/WMTS | Géoservices," <https://geoservices.ign.fr/documentation/services/utilisation-sig/tutoriel-qgis/wms-wmts>.

## Formules de calcul des indices de télédétection

Les indices suivants sont tirés des indices utilisés dans le projet Casteldiag du SPNA. Bx correspond à une bande spectrale et x au numéro de la bande spectrale.

- 1)  $NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$  = normalized difference vegetation index. Cet indice représente la vigueur et la densité de la végétation
- 2)  $NDII = \frac{B08 - B11}{B08 + B11}$  = normalized difference index, in a reflectance measurement, sensitive to changes in water content of plant canopies
- 3)  $NDWI = \frac{B03 - B08}{B03 + B08}$  = normalized difference water index. Plus l'indice est élevé plus il indique des valeurs en eau.
- 4)  $NBR = \frac{B08 - B12}{B08 + B12}$  = normalized burnt ratio. Il est possible de calculer avant un feu et après un feu pour faire la différence.
- 5)  $NDVire2n = \frac{B08A - B06}{B08A + B06}$  = normalized difference vegetation index red-edge 2 narrow
- 6)  $DVI = \frac{B08}{B04}$  = difference vegetation index
- 7)  $Cigreen = \frac{B08}{B03} - 1$  = chlorophylle index. Indicateur de concentration en chlorophylle.
- 8)  $Cri2 = \frac{1}{B02} - \frac{1}{B05}$  = carotenoïdes reflectance index. Indicateurs de concentration des pigments caroténoïdiens.
- 9)  $GNDVI = \frac{B08 - B03}{B08 + B03}$  = green normalized difference vegetation index. Permet de caractériser la végétation verte.
- 10)  $S2rep = 705 + 35 * \left( \frac{\left( \frac{(B07 + B04)}{2} - B05 \right)}{(B06 - B05)} \right)$  = Sentinel-2 Red-Edge Position Index. Indicateur de concentration en chlorophylle.