Contribution de la télédétection au diagnostic de la vulnérabilité des forêts du Parc naturel régional des Pyrénées ariégeoises

Rapport d'étude réalisée dans le cadre du programme LIFE ARTISAN PNR09

Par :

Ecole d'ingénieurs de PURPAN
Véronique CHERET, Jean Philippe DENUX
75, voie du TOEC
B.P. 57611
31076 TOULOUSE cedex 3

Pour :

Parc naturel régional des Pyrénées ariégeoises
Ferme d'Icart
09240 Montels

Table des matières

1 Introduction 3
2 Matériel et Méthode 4
2.1 Site d'étude 4
2.2 Données et prétraitement 4
1. Données cartographiques 4
2. Les images satellitaires 5
2.3 Choix des indices et cartographie des indicateurs 6
3. Indices de végétation 6
4. Indicateurs d'état de la végétation 7
3 Résultats 9
3.1 Observations pour les feuillus 9
1. Les massifs de hêtre 11
2. Les massifs de chênes décidus 15
3. Les massifs de chênes sempervirents 17
4. Les massifs de châtaignier 17
3.2 Observations pour les résineux 17
4 Conclusion 19

1 Introduction

Le travail réalisé s'inscrit dans le cadre du projet LIFE ARTISAN « Accroître la Résilience des Territoires au changement climatique par l'Incitation aux Solutions d'Adaptation fondées sur la Nature ».

Un des sites pilotes de ce projet est le Parc naturel régional des Pyrénées ariégeoises (PNR09) et le projet sur ce territoire vise : « à diminuer la vulnérabilité des écosystèmes forestiers du PNR des Pyrénées Ariégeoises face aux effets attendus du changement climatique sur le territoire. L'ambition est de limiter au maximum les risques qui pourraient être engendrés par ces changements, en augmentant la résistance et la résilience des forêts du territoire….pour limiter au maximum les dépérissements et éviter les mortalités massives. Les objectifs visés sont :

- Le maintien de la capacité productive des forêts exploitées du PNR face aux effets attendus du changement climatique pour limiter les impacts économiques sur la filière bois ;
- Le maintien du couvert forestier dans les secteurs où les peuplements jouent un rôle de protection (des sols, de l'eau, des populations) ;
- Le maintien du rôle social des forêts pour la population dans les secteurs les plus fréquentés (usages récréatifs, activités touristiques, attraits esthétiques, spirituels…).»

Une des premières étapes du projet consiste à identifier les formations forestières les plus vulnérables, en particulier là où les conditions de sècheresse font le plus souffrir les arbres. La télédétection, pour ses capacités à observer et suivre l'état des forêts, peut contribuer à ce diagnostic à l'échelle du PNR.

Durant l'été 2020 et dès le début du mois d'août des signes de sénescence prématurée des forêts de feuillus ont été observés sur certains versants des Pyrénées haut-garonnaises et ariégeoises. Ils se sont manifestés par un changement brutal de coloration du feuillage des arbres (rougissement ou jaunissement), principalement sur les versants exposés au Sud ou sur les stations les plus sèches (Figure 1). Par ailleurs les résineux peuvent avoir subi aussi des déficits foliaires et/ou autres dépérissements (ex : maladie des bandes rouges des Pins).

Figure 1 : Photo d'un versant forestier le 10 août 2020

En s'appuyant sur ce constat, l'objectif que l'on s'est fixé est de tester les capacités des images Sentinel-2 (mission ESA) à localiser les anomalies de comportement des peuplements forestiers durant la période de végétation et sur les années d'acquisition des images (2017 à 2021). On cherche à cartographier par télédétection les forêts qui ont présenté ces signes apparents de stress hydrique ou de dépérissements inexpliqués. La zone d'étude est le territoire du PNR09.

La première étape a consisté à choisir des indices de végétation, en se basant sur la bibliographie et sur l'analyse des images, puis à sélectionner des indicateurs phénologiques de vigueur et/ou d'assèchement de la végétation calculés sur la période estivale. Les données couvrant la période 2017-2021, l'objectif était également de voir si l'on peut observer une évolution temporelle de l'état des peuplements. Le résultat attendu est l'identification de peuplements spécifiques où des anomalies sont identifiables, sans pour autant les attribuer à un phénomène de dépérissement.

2 Matériel et Méthode

2.1 Site d'étude

La zone d'étude est le territoire du PNR09. Elle est entièrement couverte par la tuile 31TCH Sentinel-2 (de dimension 100x100km) (Figure 2). Sur ce territoire la surface forestière (selon la BD forêt de l'IGN) est de l'ordre de 22 500 ha et s'étend depuis les reliefs du Plantaurel et des Petites Pyrénées au Nord, jusqu'à la Haute-Chaine Pyrénéenne du Couserans et du Vicdessos au Sud. Les essences les plus représentées sont les chênes décidus, les feuillus divers et le hêtre pour les feuillus, les sapin épicéa pour les résineux.

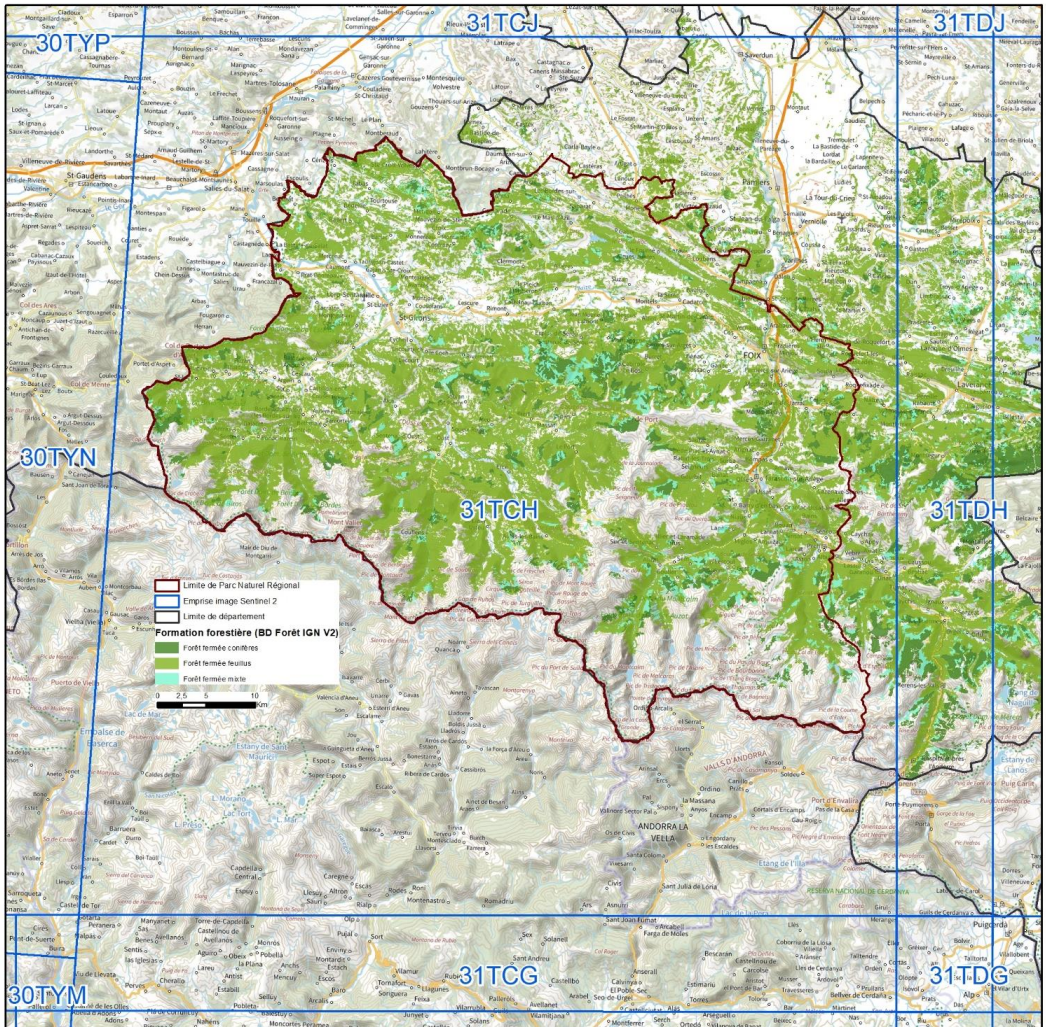


Figure 2 : Limite du PNR09 et emprise de la tuile Sentinel-2 31TCH

2.2 Données et prétraitement

1. Données cartographiques

Pour localiser les surfaces en forêt nous avons utilisé la BD Forêt IGN V2 (https://inventaire-forestier.ign.fr). Dans la nomenclature les surfaces cartographiées correspondent aux forêts fermées de feuillus et de résineux, et à la sélection des peuplements purs des essences d'intérêt suivantes :

- pour les feuillus : les chênes décidus, le hêtre, les chênes sempervirents, le châtaignier,

- pour les résineux : les sapin épicéa.

Comme autres données nous avons utilisé :

- Le plan raster d'altitude à 25m de l'IGN,
- Le fond topographique : Plan IGN V2,
- Les limites des forêt publiques (ONF),
- La carte du potentiel agronomique des sols en région Midi-Pyrénées (CRAMP, C. Longueval).

2. *Les images satellitaires*

Caractéristiques des images Sentinel 2

Les séries temporelles d'images Sentinel-2A et 2B sont mises à disposition par l'ESA (Agence Spatiale Européenne). Elles sont acquises depuis le juin 2015 pour 2A et mars 2017 pour 2B. Des images pré-traitées (orthorectifiées, corrections atmosphériques, masque des nuages et d'ombre, de neige et d'eau) sont distribuées par THEIA, et sont téléchargeables gratuitement depuis le site site du projet THEIA (www.theia-land.fr; https://theia.cnes.fr). Les images couvrant le site d'étude sont en projection UTM Zone31N (Universal Transverse Mercator / World Geodetic System 1984).

Les données spectrales du capteur MSI (Multi Spectral Instrument) de Sentinel-2 (Figure 3) se composent de 4 bandes à 10 m dans le visible et le Proche infrarouge (NIR), et de 6 bandes à 20 m dans le Red Edge, le Proche infrarouge et le Moyen infrarouge (Red Edge, NIR et SWIR) particulièrement utiles pour la caractérisation spectrale de l'activité de la végétation (Drusch, Del Bello et al. 2012, Malenovsky, Rott et al. 2012). A cette richesse spectrale s'ajoute une haute répétitivité temporelle : la fréquence d'acquisition est 5 jours avec les 2 satellites 2A et 2B.

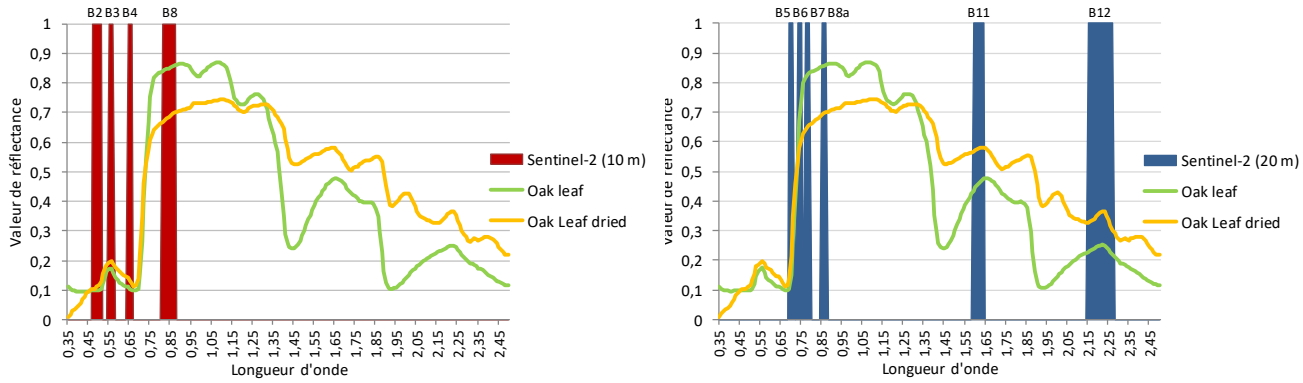


Figure 3 : Bandes spectrales des images Sentinel-2 et courbes de réflectance de feuilles de chêne saine et sénescente : 4 bandes à 10 m dans le visible et le NIR (figure à gauche), 10 bandes à 20 m dans le Red Edge, NIR et SWIR (figure à droite)

Bandes	Nom	Résolution
B2	Blue	*10 m*
B3	Greeen	*10 m*
B4	Red	*10 m*
B5	Vegetation Red Edge1	*20 m*
B6	Vegetation Red Edge2	*20 m*
B7	Vegetation Red Edge3	*20 m*
B8	NIR	*10 m*
B8a	NIRn	*20 m*
B11	SWIR1	*20 m*
B12	SWIR2	*20 m*

Figure 4 : Nom et numéro des 10 bandes spectrales de Sentinel-2

Sélection des images

Sur le site d'étude, des images sont disponibles depuis 2017.

Pour analyser un maximum de possibilités de calcul d'indicateurs, les données acquises (images de niveau 2A et produits de synthèse mensuelle de niveau 3A de THEIA, avec leur masque de couverture nuageuse) couvrent la saison de végétation d'avril à septembre, pour les années de 2017 à 2021. Une première étape d'observation de la qualité a conduit à éliminer un grand nombre d'images ayant un taux élevé de couverture nuageuse. Sur ce territoire les précipitations sont particulièrement fréquentes et la couverture nuageuse affecte souvent une trop grande partie de l'image pour qu'elle soit exploitable. La deuxième est l'observation d'anomalies telles qu'illustrées ci-dessous (Figure 5) qui se traduisent par des différences de qualité entre l'Est et l'Ouest de la zone d'étude. Une explication possible est qu'à l'Est il y a un recouvrement de 2 traces du capteur (hachuré ci-dessous) et donc une acquisition tous les 2-3 jours, contre 5 jours sur l'autre partie qui pourrait engendrer un problème de calibration pour la constitution des tuiles.

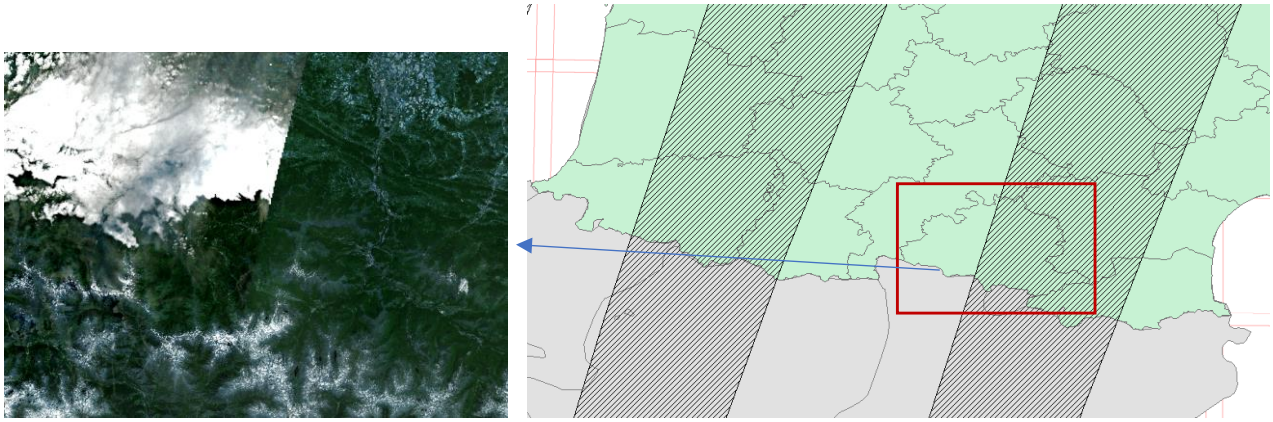


Figure 5 : Observation d'anomalies sur les images

D'avril à septembre, beaucoup d'images s'avèrent donc inexploitables. Le bilan est :

2017 : aucune date exploitable,

2018, 2019 et 2020 : la majorité des dates sur la saison de végétation sont exploitables,

2021 : seulement 2 dates exploitables (06 et 07).

Les images et leur masque de nuages ont été découpées à la dimension de la zone d'étude.

Les bandes à 10 m ont été rééchantillonnées à 20 m.

2.3 Choix des indices et cartographie des indicateurs

Il s'agit d'observer la variabilité spatiale d'indicateurs d'état et de vigueur de la végétation forestière. Ces indicateurs reposent sur l'utilisation de différents indices de végétation calculés à partir des images acquises sur la saison de végétation pour les années disponibles, et en particulier en 2020, année où des anomalies ont été constatées in situ.

3. Indices de végétation

Les indices de végétation sont le plus souvent obtenus à partir de relations arithmétiques simples entre deux ou trois bandes spectrales. Ils ont été conçus pour leur capacité à suivre la variabilité du comportement spectral de la végétation corrélé à son activité photosynthétique, ses caractéristiques biophysiques ou sa teneur en eau.

Dans un premier temps, 5 indices de végétation ont été retenus et calculés pour toutes les dates exploitables sur la saison de végétation : NDVI, PSRI, CIgreen, NDII et CRswir (Figure 6). Cette sélection repose sur une recherche bibliographique et sur les résultats de nos travaux sur le dépérissement (Lambert 2014, Chéret, Goulard et al. 2019). Leur intérêt repose sur leur relation avec les principales caractéristiques de la végétation forestière mesurables spectralement (Figure

7). Ils utilisent pour leur calcul la plupart des bandes spectrales, ce qui permet d'exploiter au mieux la richesse spectrale de Sentinel-2 (Figure 7).

Nom	Indice	Relation	Source
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Greenness, plant productivity	*(Rouse, Haas et al. 1974)*
PSRI	Plant Senescence Reflectance Index	Plant senescence	*(Merzlyak, Gitelson et al. 1999)*
CIgreen	Green Chlorophyll Index	Leaf pigments	*(Gitelson, Gritz et al. 2003)*
NDII	Normalized Difference Infrared Index	Vegetation water content	*(Hardisky, Klemas et al. 1983)*
CRswir	Continuum Removal SWIR	Vegetation water content	*(Dutrieux, Féret et al. 2021)*

Figure 6 : Spécificité des indices de végétation retenus

	Bandes spectrales Sentiel-2									
	Blue	Greeen	Red	RedEdge1	RedEdge2	RedEg3	NIR	NIRn	SWIR1	SWIR2
Indices de végétation	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8a	B11	B12
NDVI			X				X			
PSRI	X		X		X					
CIgreen		X						X		
NDII							X		X	
CRswir								X		X

Figure 7 : Bandes spectrales utilisées pour le calcul des indices de végétation

4. Indicateurs d'état de la végétation

Le principe d'un indicateur est de mesurer un état et de permettre de déceler un éventuel changement en lien ou pas avec la phénologie de la végétation.

A partir des indices de végétation choisis et en comparant deux dates, l'hypothèse de changement peut correspondre à une diminution de la teneur en eau, une baisse de vigueur, une perte en pigments foliaires.

En première étape et compte tenu des images disponibles nous avons testé :

- Des **indicateurs annuels**, correspondant aux écarts normalisés des 5 indices de végétation entre juin et août, et entre juin et septembre, pour les années 2018 à 2021 (Figure 8).
  Nous avons également calculé un indicateur de vigueur de la végétation, le SG (Spring Greeness) (Reed 2006, Chéret and Denux 2007). Celui-ci est un indicateur phénologique correspond au cumul de l'indice de végétation NDVI, traduisant l'intensité de l'activité printanière mesurée d'avril à juin. Toutefois les dates communes exploitables sur cette saison n'a permis de calculer la somme de NDVI que sur deux mois, juin et juillet.
- Un **indicateur interannuel** de vigueur des peuplements (Chéret, Denux et al. 2011), correspondant à l'écart de SG mesuré sur le maximum de dates disponibles, c'est-à-dire entre 2018 et 2021.

	Indicateurs annuels			Indicateur interannuel
	Ecart d'indice 06-08	Ecart d'indice 06-09	SG (somme des NDVI 06-07)	
2017				
2018	x	x	x	Ecart de SG 2018 - 2021
2019	x	x	x	
2020	x	x	x	
2021		x	x	

Figure 8 : Indicateurs calculés sur la zone d'étude pour les dates disponibles

Après analyse des premiers résultats cartographiques et en particulier de la variabilité spatiale et des contrastes identifiables, nous avons retenu :

- **3 indices de végétation** : le **CIgreen**, le **CRswir**, et le **NDVI**. Le PSRI et le NDII apportant difficilement de l'information exploitable ont été écartés.

  Le CIgreen est un rapport entre les bandes du vert (Green) et du Proche infrarouge (NIRn) ce qui en fait un indice lié à la teneur en pigments foliaires (Gitelson, Gritz et al. 2003).

  Le CRswir a été récemment développé dans le cadre de la mise au point d'une méthode de suivi des dégâts de scolytes (Dutrieux, Féret et al. 2021). Cet indice tient compte des valeurs spectrales influencées par l'absorption de l'eau (SWIR1 et SWIR2) en relatif à la valeur de réflectance dans le Proche infrarouge (NIRn). Il est considéré comme sensible à la teneur en eau.

  Le NDVI est un indice lié à l'intensité de l'activité chlorophyllienne (Rouse, Haas et al. 1974). Celui-ci est classiquement utilisé pour le suivi la végétation et correspond à un écart normalisé de la différence entre la valeur spectrale dans le Rouge et le Proche Infrarouge. Il entre dans le calcul du SG utilisé pour l'indicateur interannuel.

- **2 indicateurs annuels estivaux** :

  Les écarts normalisés de CIgreen et de CRswir entre 06-09 ne sont pas retenus car semblent trop corrélés à la phénologie de la végétation (sénescence).

  On a retenu les écarts normalisés d'indice de végétation calculés entre **06-08**, pour les années 2018 à 2020, l'année 2020 étant la plus pertinente compte tenu des conditions climatiques extrêmes de l'été 2020 et des manifestations observées.

  Les résultats doivent nous permettre d'identifier les situations de plus ou moins grande :

  - Perte de pigments foliaires en été avec la mesure des écarts normalisés de **CIGreen** entre juin et aout ; plus les valeurs de l'indicateur sont élevées plus la perte est importante.
  - Perte de teneur en eau en été (ou indicateur d'assèchement) avec la mesure des écarts normalisés de **CRswir** entre juin et aout. Pour cet indicateur les valeurs négatives indiquent une baisse de la teneur en eau.

- **1 indicateur interannuel** :

  L'écart de **SG** (indicateur de vigueur printanière basé sur la somme des **NDVI 06-07**) est calculé pour les surfaces en feuillus et en résineux entre **2018** et **2021**. Une baisse de SG pourrait être assimilée à une baisse de vigueur de peuplement, toutefois la période d'observation étant courte, elle sera difficilement interprétable en termes de changement significatif.

3 Résultats

Pour les feuillus les indicateurs montrant le plus de variabilité spatiale sont les écarts estivaux de CIGreen et de CRswir, pour les résineux il s'agit des écarts de CRswir. 2020 est l'année où la variabilité spatiale des indicateurs est la plus significative.

3.1 Observations pour les feuillus

Les cartes ont été établies pour les différents indicateurs et pour les essences d'intérêt. Pour leur légende les couleurs ont été choisies de manière à discriminer au mieux visuellement les situations de perte de pigments foliaires ou de teneur en eau sur la période estivale de 2020. Ces situations ne peuvent pas être interprétées comme des manifestations de dépérissement forestier.

Liste des cartes présentées en annexe pour les feuillus :

- Carte 1 : Ecart de l'indice **CIgreen** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
  - ✓ Carte 2 - avec limite des unités géomorphologiques
- Carte 3 : Ecart de l'indice **CIgreen** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Hêtre**
  - ✓ Carte 4 : - avec limite altitudinale 1200 m
- Carte 5 : Ecart de l'indice **CIgreen** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Chênes décidus**
- Carte 6 : Ecart de l'indice **CIgreen** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Chênes sempervirents**
- Carte 7 : Ecart de l'indice **CIgreen** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Châtaignier**

- Carte 8 : Ecart de l'indice **CRswir** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus
- Carte 9 : Ecart de l'indice **CRswir** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Hêtre**
  - ✓ Carte 10 : - avec limite altitudinale 1400 m
- Carte 11 : Ecart de l'indice **CRswir** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Chênes décidus**
- Carte 12 : Ecart de l'indice **CRswir** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Chênes sempervirents**
- Carte 13 : Ecart de l'indice **CRswir** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Châtaignier**

- Carte 14 : Ecart de **SG** entre **2018** et **2021** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
- Carte 15 : Ecart de **SG** entre **2018** et **2021** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Hêtre**
- Carte 16 : Ecart de **SG** entre **2018** et **2021** Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2) **Chênes décidus**

Pour commenter les résultats plusieurs massifs ont été délimités, 4 pour la hêtraie (H1, H2, H3 et H4) et 3 pour la chênaie décidue (C1, C2et C3), situés sur des conditions de sol et d'altitude différentes (Figure 9).

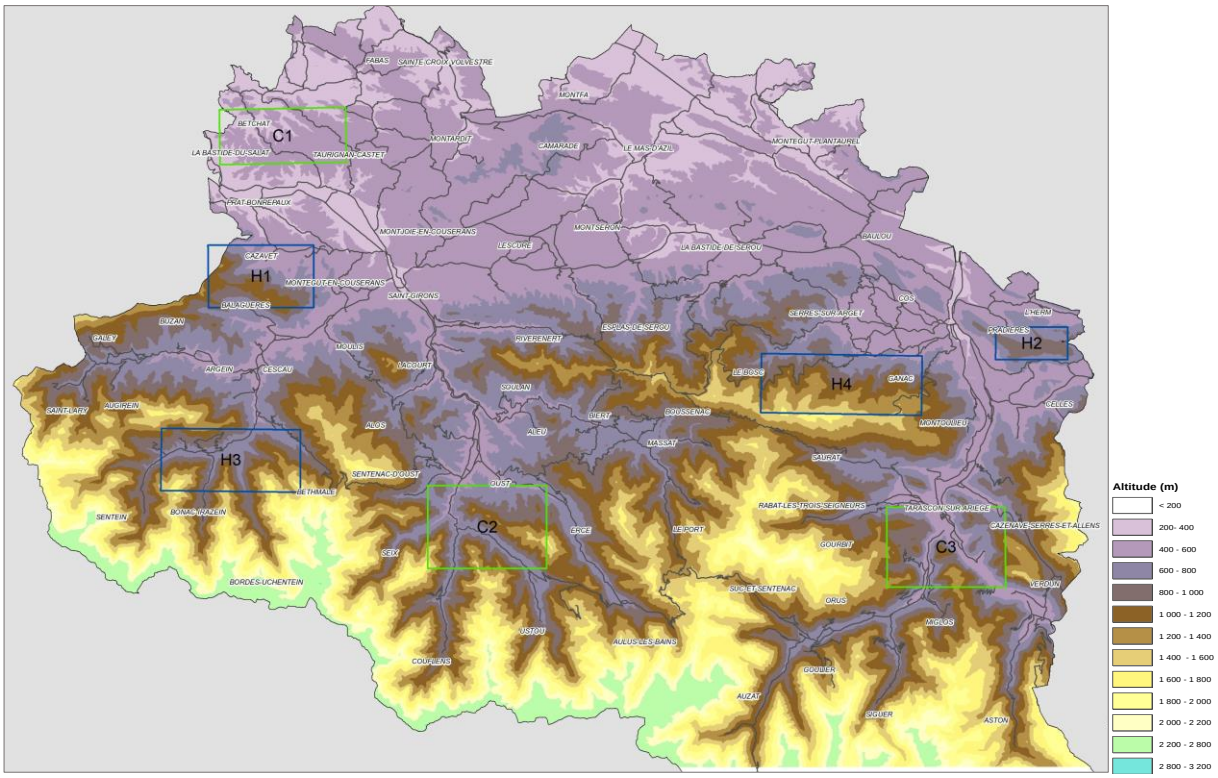


Figure 9 : Localisation de massifs de hêtre et de chênes décidus

Pour l'ensemble des feuillus (Carte 1 et 2 en annexe) l'écart estival de CIgreen indique une baisse de pigments foliaires beaucoup plus marquée sur les secteurs Nord et Ouest du PNR, grossièrement délimités sur la Figure 10.

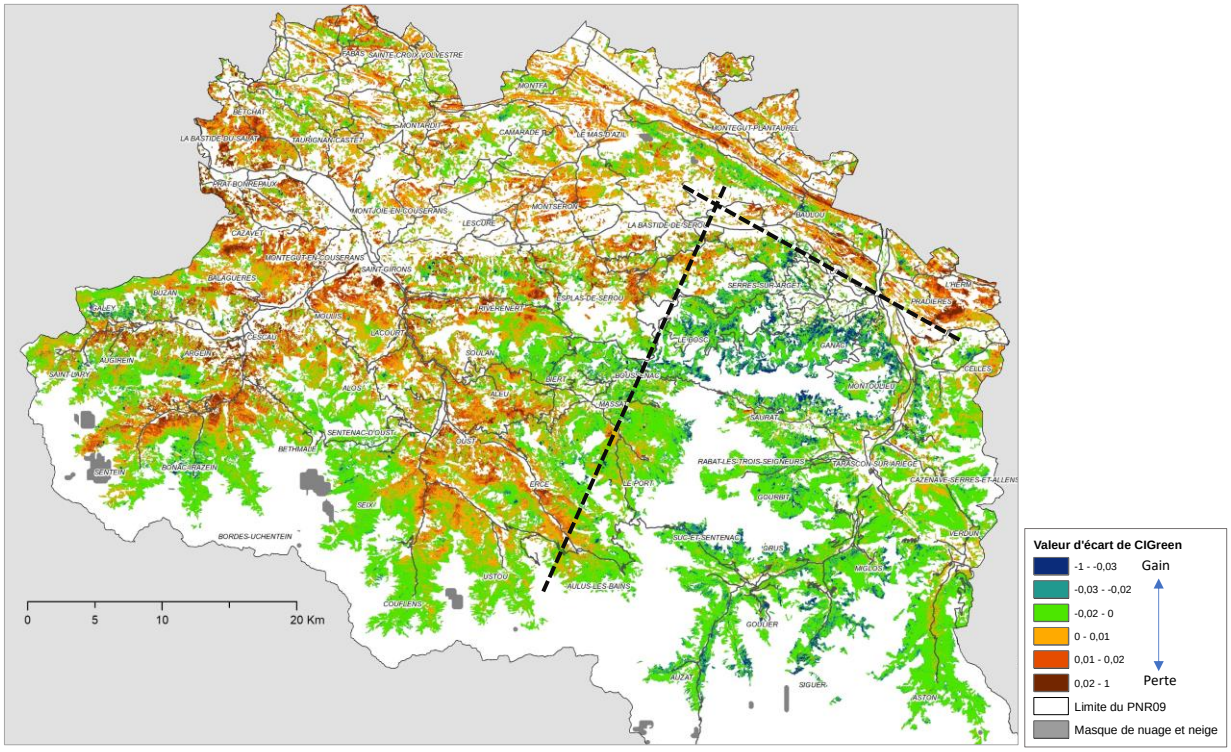


Figure 10 : Ecart estival de CIgreen en 2020 pour l'ensemble des feuillus

Les gradients de valeurs d'écart de CRswir pour l'année 2020 (Carte 8 en annexe) sont par contre d'avantage généralisés spatialement sur l'ensemble du PNR : la baisse estivale de teneur en eau

est fortement marquée en dessous de 1400m d'altitude sur l'ensemble du territoire quelques soient les essences de feuillus.

1. *Les massifs de hêtre*

Les 4 sites choisis pour la hêtraie indiquent des situations contrastées (Figure 11).

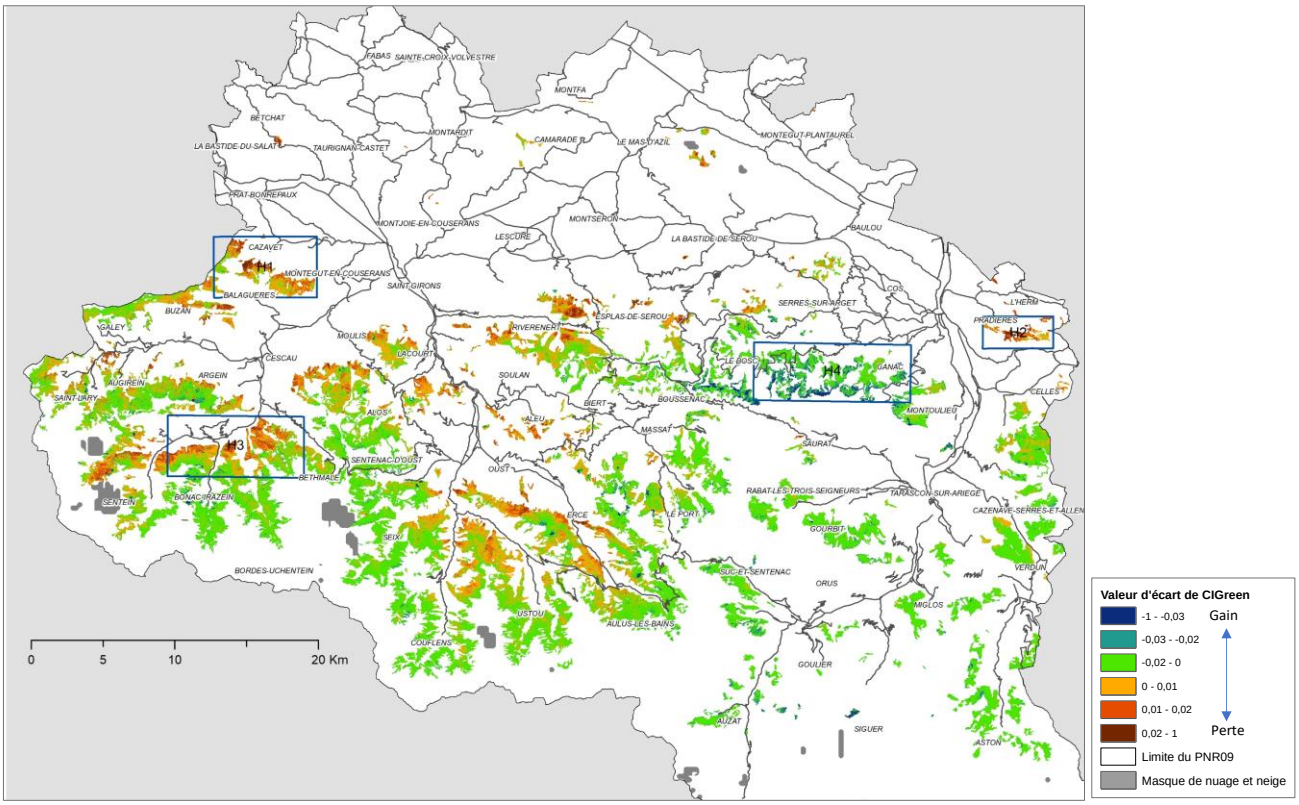


Figure 11 : Ecart estival de CIgreen en 2020 pour la hêtraie

Pour l'écart estival le CIgreen (Figure 12 et Carte 3 en annexe) : les sites H1 (forêt communale de l'Estélas et domaniale de Cazavet, majoritairement sur calcaire et localisées entre 550m et 1100m d'altitude), et H2 (forêt communale de Soula et domaniale de Pech, majoritairement sur calcaire et localisées entre 800m et 950m d'altitude) sont particulièrement marqués par la perte en pigments foliaires en 2020. Pour le site H3 (forêts de la vallée du Biros) le phénomène s'observe avec une intensité un peu moindre et jusqu'aux environs de 1200m, au-delà cette anomalie disparait progressivement. Ce seuil altitudinal est observable sur toute la partie Ouest du PNR (Carte 4 en annexe).

A l'opposé, le site H4 (forêt domaniale du consulat de Foix, majoritairement sur schistes ou granite et répartie entre 850m et 1500m) ne présente pas d'anomalie, les valeurs de l'indicateur montrent un maintien voir une hausse de la teneur en pigments chlorophylliens.

Pour l'écart estival de CRswir (Figure 13 et Carte 9 en annexe) : le site H4 est le moins touché par la baisse de teneur en eau et même pour des situations en dessous de 1400m d'altitude. Pour les 3 autres sites la baisse est observable avec la même intensité au moins jusqu'à 1400m (Carte 10 en annexe).

Pour l'écart de NDVI (SG) (Figure 14 et Carte 14 et 15 en annexe) : les 4 sites sont assez similaires. Les variations sont faibles n'indiquant pas de situations contrastées, hormis les petites surfaces en rouge correspondant à de fortes baisses probablement liées à des passages en coupe sur la période 2018-2021. Comme souligné auparavant, la période d'observation étant courte, ces faibles écarts de valeurs sont difficilement interprétables en termes de changement significatif de vigueur des peuplements forestiers.

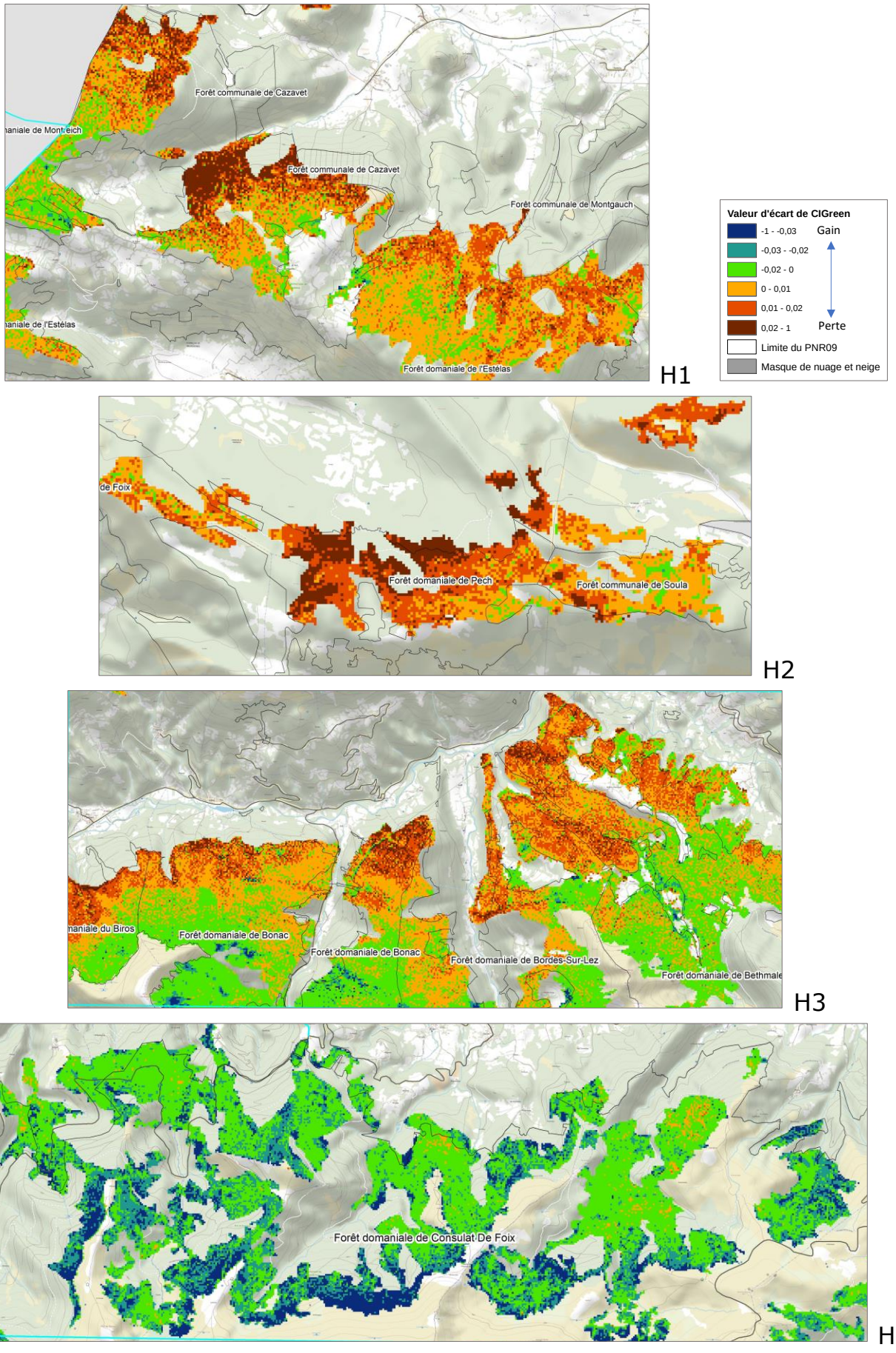


Figure 12 : Ecart estival de CIgreen en 2020, extraits cartographiques pour la hêtraie

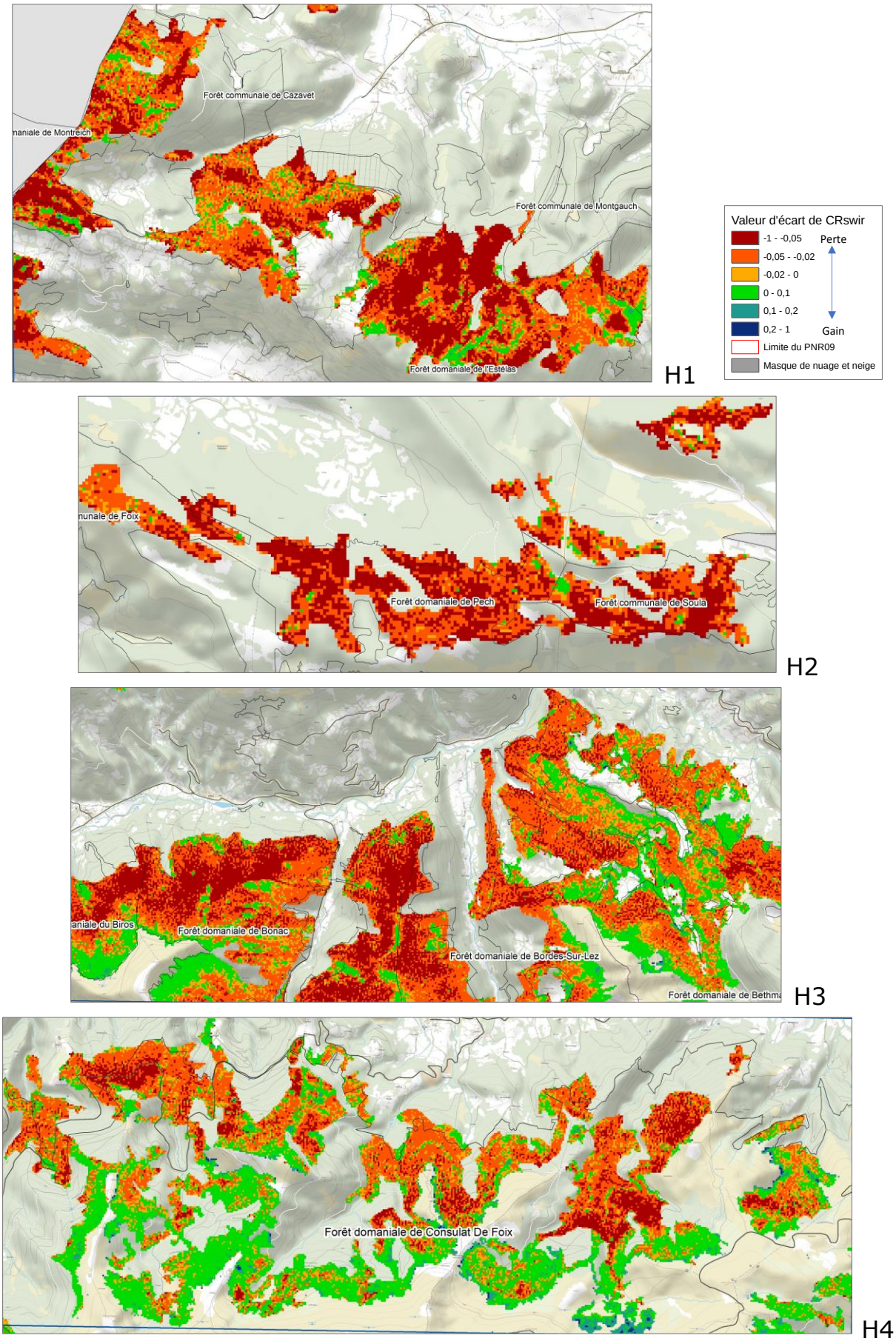
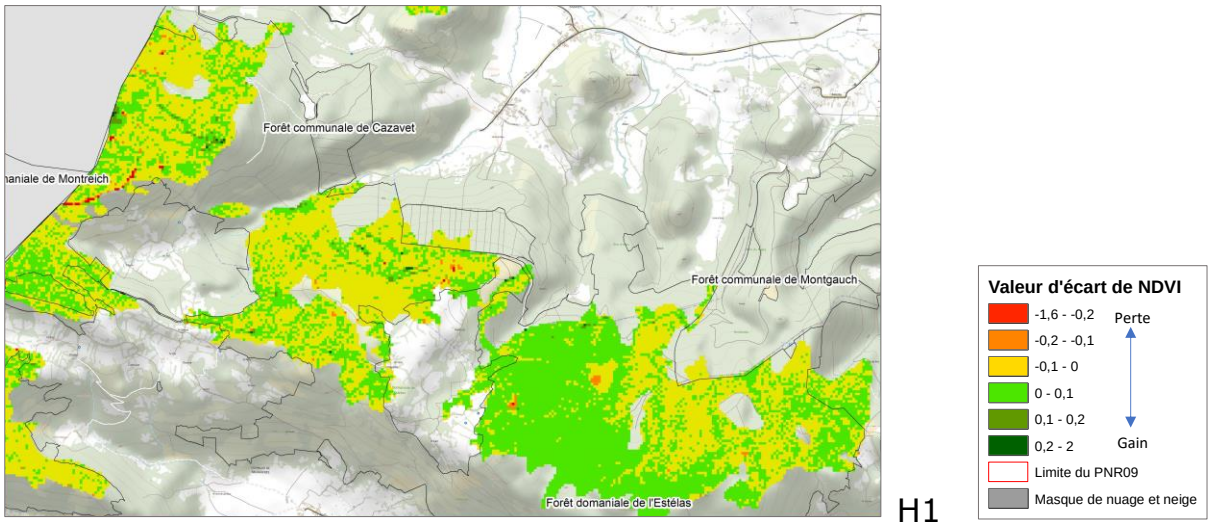
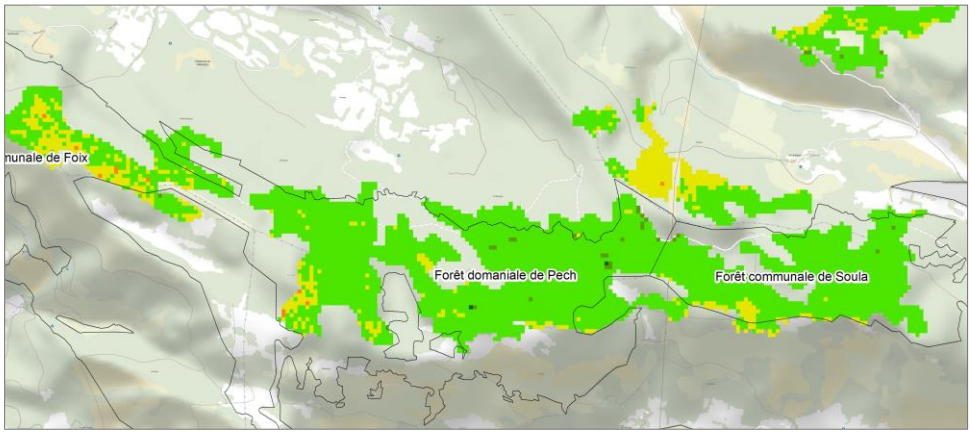


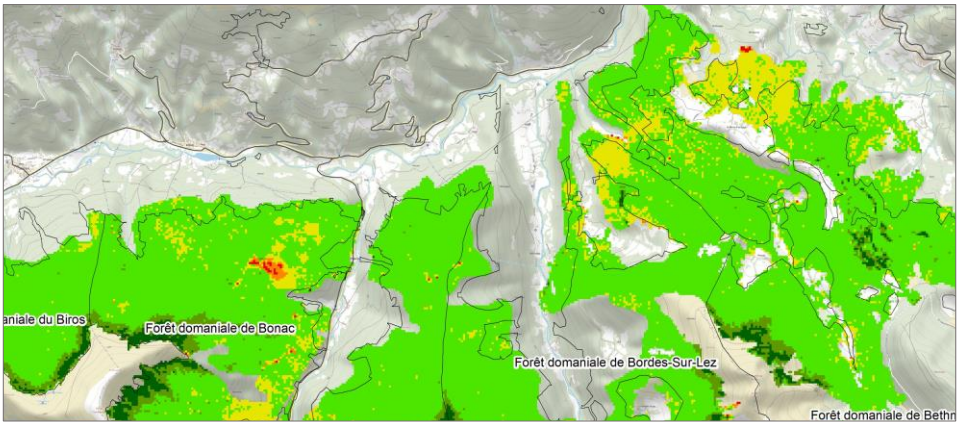
Figure 13 : Ecart estival de CRswir en 2020, extraits cartographiques pour la hêtraie



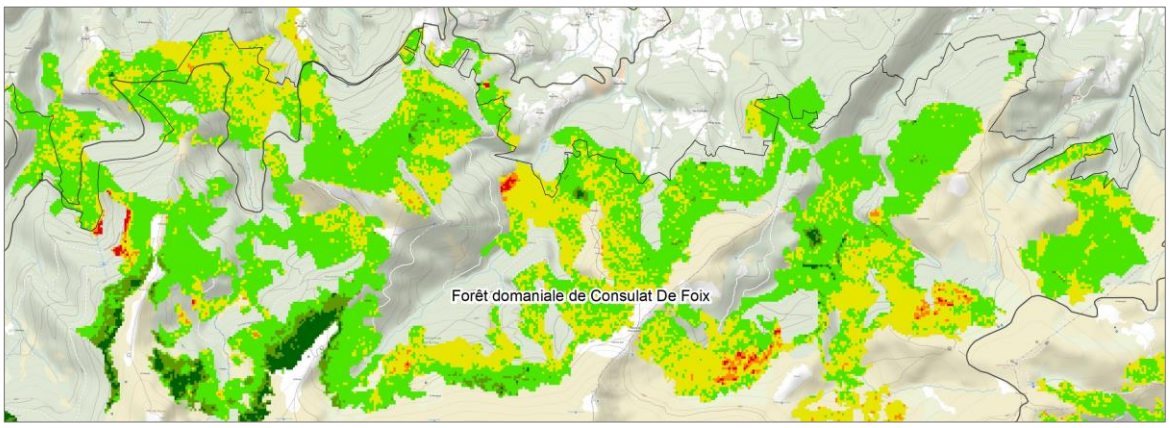
H1



H2



H3



H4

Figure 14 : Ecart de NDVI (SG) 2018-2021, extraits cartographiques pour la hêtraie

2. *Les massifs de chênes décidus*

Comme pour la hêtraie, les 3 sites choisis pour les chênes décidus indiquent des situations contrastées au moins pour l'indicateur CIgreen (Figure 15).

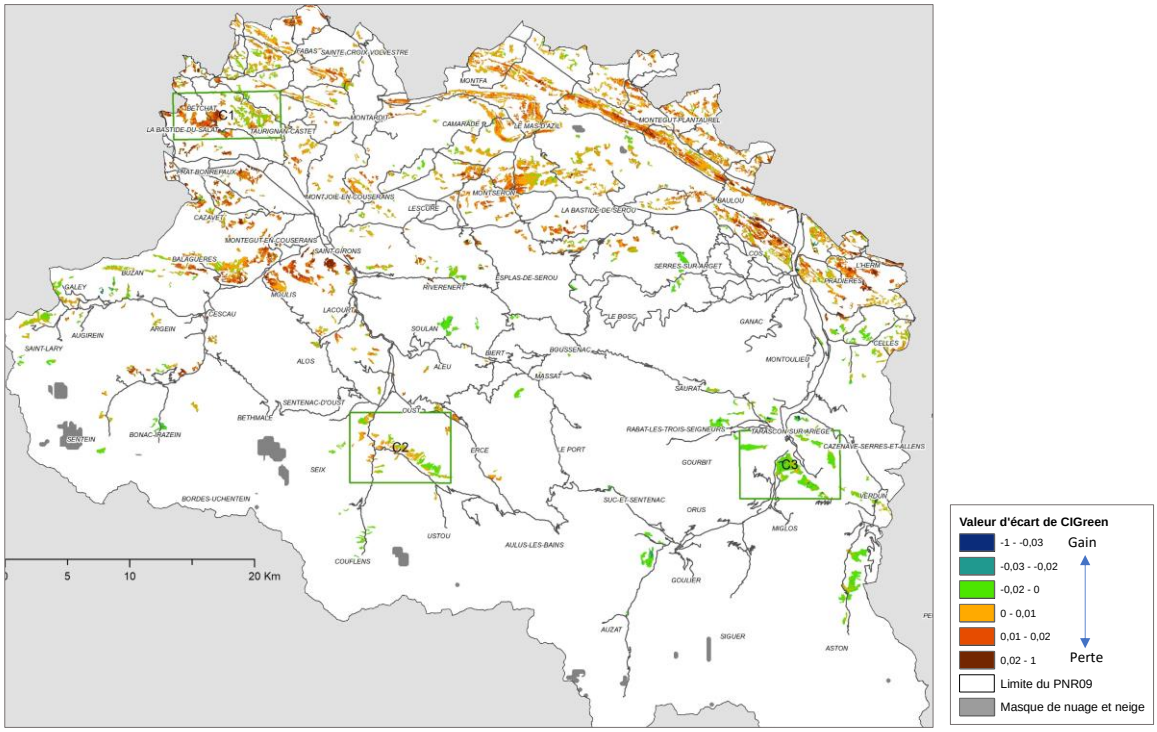


Figure 15 : Ecart estival de CIgreen en 2020 pour la chênaie décidue

Pour l'écart estival de CIgreen : les situations de plus fortes baisses en pigments chlorophylliens sont observables au Nord sur les coteaux accidentés du Plantaurel (Carte 5 en annexe), à l'Ouest sur les Hautes terrasses entre 400 et 500 d'altitude (site C1, Figure 16) ainsi que sur des reliefs calcaires au sud de Saint Girons. Sur le site C1 les conditions semblent cependant plus favorables à l'Est au niveau de Bagert qu'en forêt de Betchat. Sur la partie Sud du PNR et à des altitudes un peu plus élevées allant jusqu'à 1100m, les sites C2 et C3 présentent pas ou peu d'anomalie, les valeurs de l'indicateur indiquant un maintien de la teneur en pigments chlorophylliens.

Pour l'écart estival de CRswir (Figure 17 et Carte 11 en annexe), à l'exception du site C2 avec une variabilité très locale, l'indicateur révèle une baisse généralisée de la teneur en eau.

Pour l'écart de NDVI (Figure 18 et Carte 16 en annexe), le contraste entre les 3 sites suit globalement celui observé pour le CIgreen.

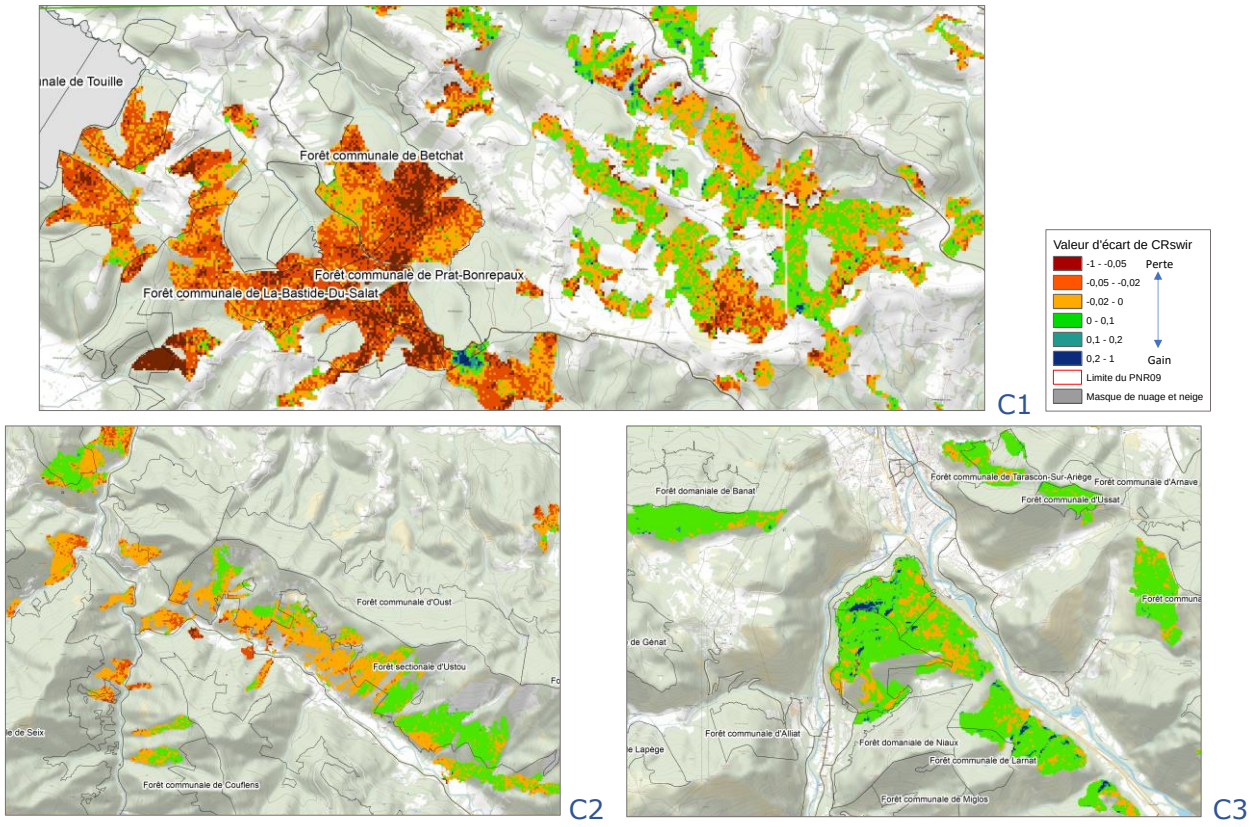


Figure 16 : Ecart estival de CIgreen en 2020, extraits cartographiques pour la chênaie décidue

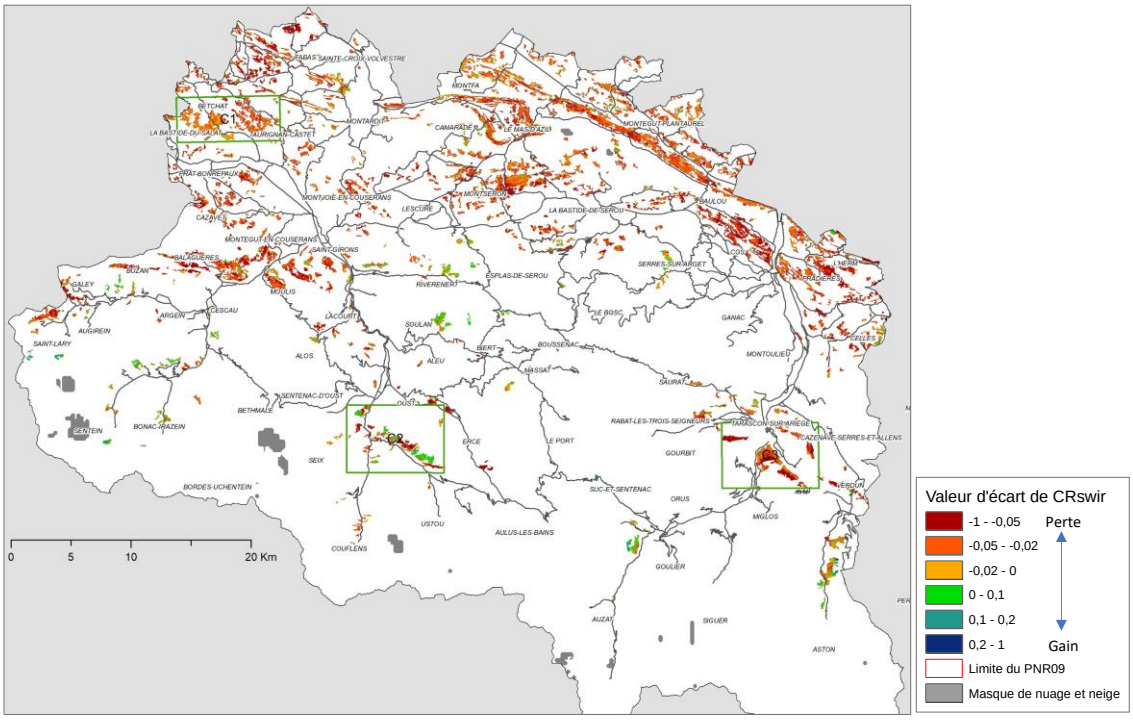


Figure 17 : Ecart estival de CRswir en 2020 pour la chênaie décidue

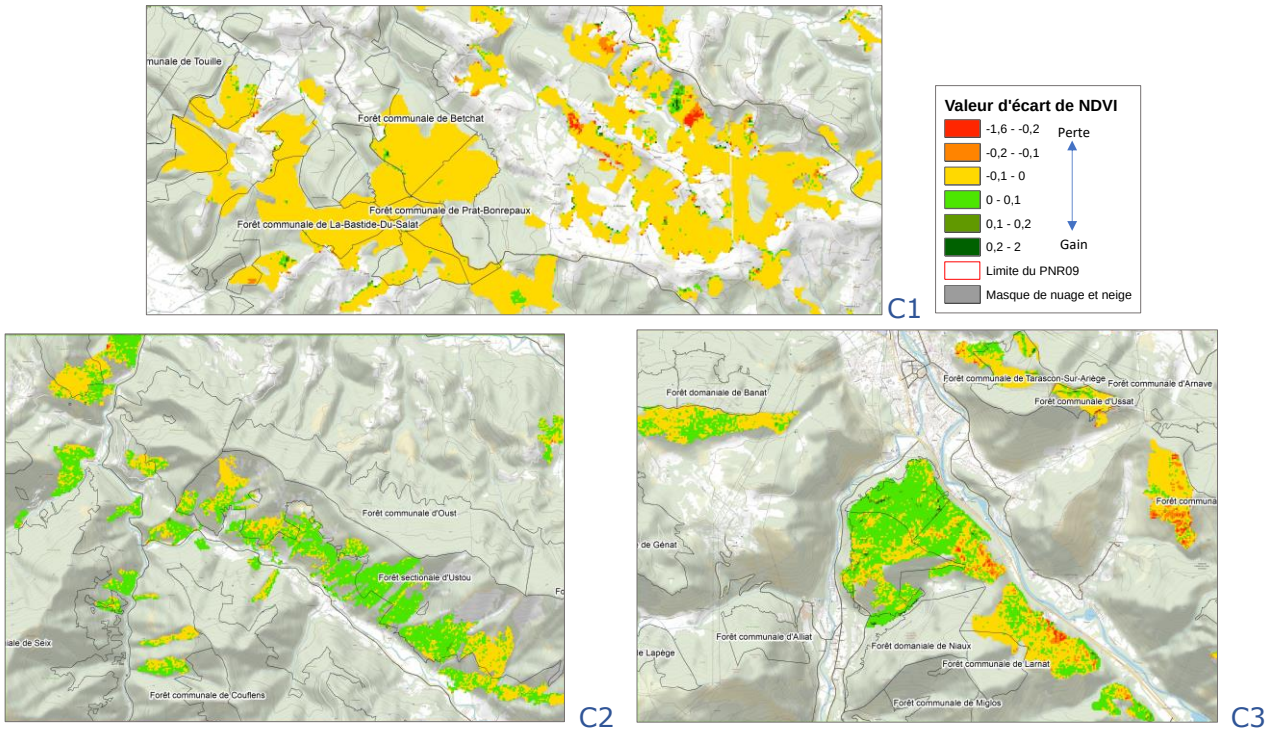


Figure 18 : Ecart de NDVI (SG) 2018-2021, extraits cartographiques pour la chênaie décidue

3. *Les massifs de chênes sempervirents*

Les chênes sempervirents représentent très peu de surface. On les a ajoutés à la description simplement pour mentionner que pour ces forêts aucune anomalie n'a été détectée pour les 3 indicateurs calculés (Cartes 6, 12 et 14 en annexe).

4. *Les massifs de châtaignier*

Les surfaces en châtaignier sont également assez restreintes. Pour celles-ci on n'observe pas de baisse significative de CIgreen (Carte 7 en annexe). On note cependant une baisse de CRswir mais moindre que pour les chênes décidus (Carte 13 en annexe). Nous n'avons pas d'observation particulière concernant l'écart de NDVI (Carte 14 en annexe).

3.2 Observations pour les résineux

Pour les résineux les deux indicateurs présentés sont l'écart estival de CRswir pour 2020 et l'écart de NDVI (SG) sur la période 2018-2021.

Liste des cartes présentées en annexe pour les résineux

- Carte 17 : Ecart de l'indice **CRswir** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de Conifères et Mixtes (BD IGN V2)
- Carte 18 : Ecart de l'indice **CRswir** 06-08 **en 2020** Des forêts fermées de Conifères (BD IGN V2) **Sapin Epicéa**
- Carte 19 : Ecart de **SG** entre **2018** et **2021** Des forêts fermées de Conifères (BD IGN V2) **Sapin Epicéa**

Les forêts de sapin épicéa du PNR ne présentent pas de baisse de teneur en eau (Carte 17 et 18 en annexe) alors que les autres formations de conifères ou mixtes (en orange sur la Carte 17) se différencient en affichant de manière très homogène une très légère baisse de teneur en eau. Pour les sapin épicéa des anomalies s'observent en dehors du PNR, à l'Est, comme par exemple

en Forêt de Prades, de Fougax-Barrineuf et de Villeneuve d'Olmes. Ces situations semblent se distribuer préférentiellement dans les unités géomorphologiques calcaires (Figure 19).

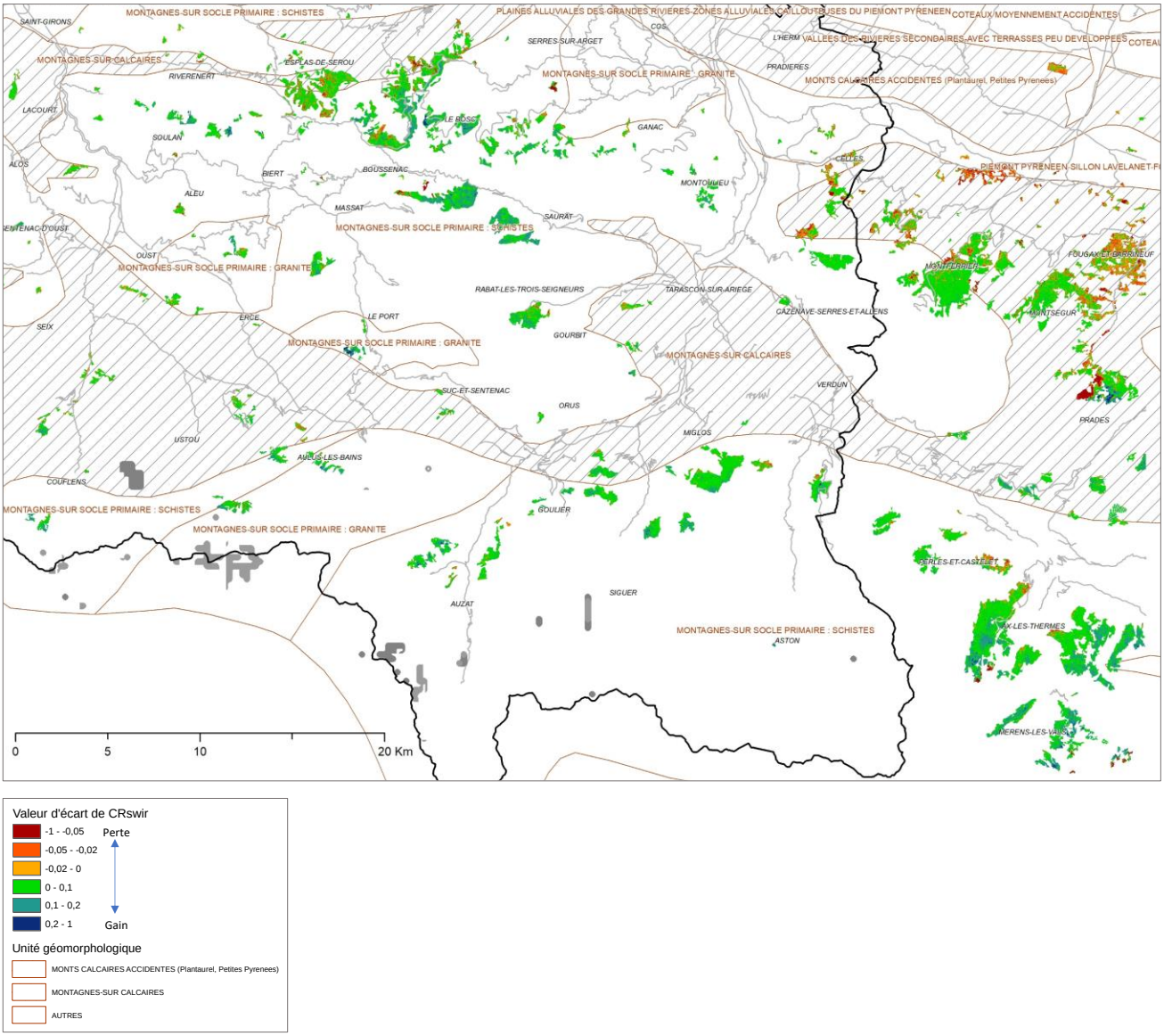


Figure 19 : Ecart estival de CRswir en 2020 pour les sapin épicéa

Comme pour les feuillus, les écarts de NDVI restent difficilement interprétables (Carte 19 en annexe et Figure 20).

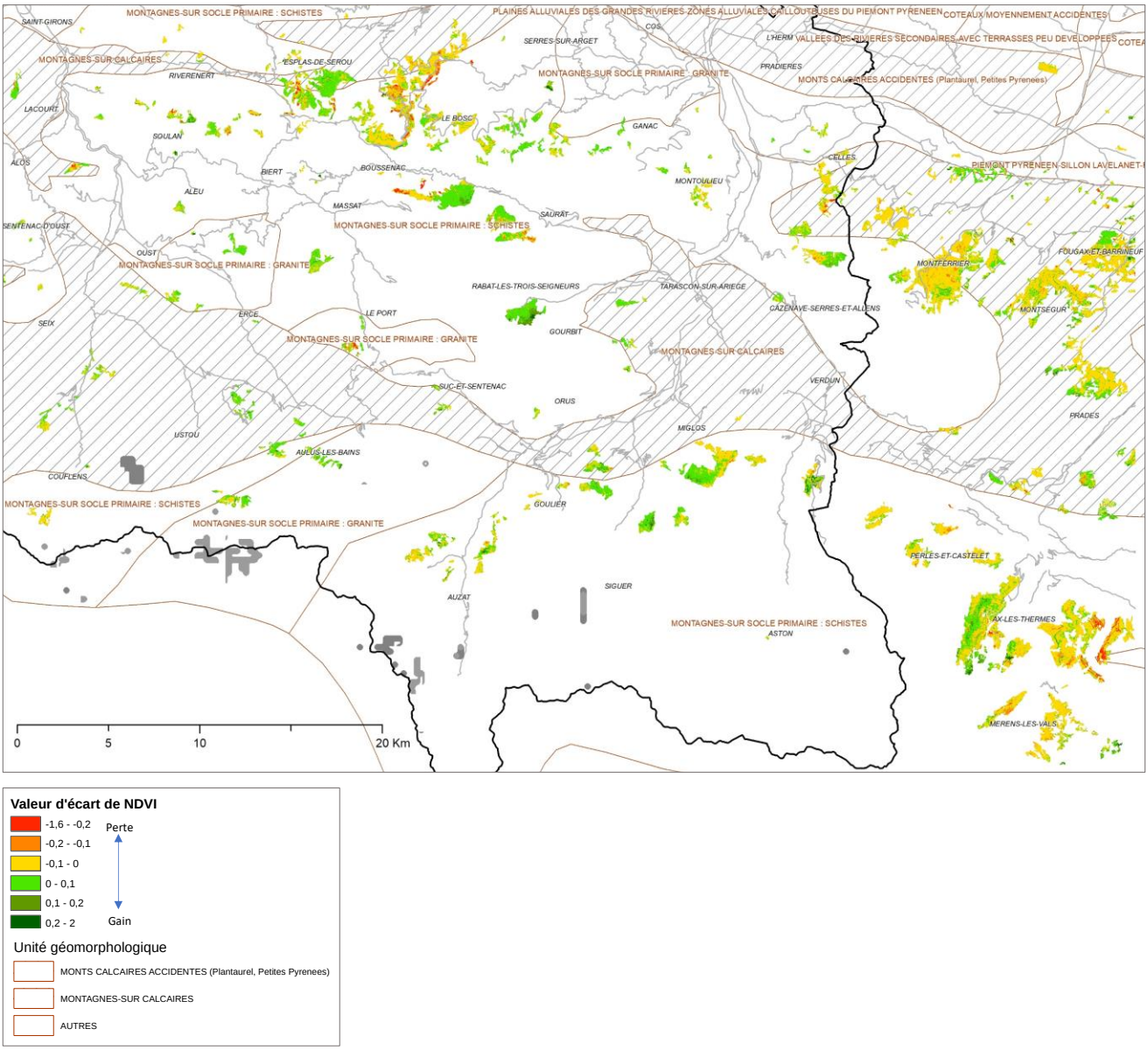


Figure 20 : Ecart de NDVI (SG) 2018-2021 pour les sapin épicéa

4 Conclusion

Des 3 indicateurs calculés les deux qui apportent le plus d'information sont l'écart estival de CIgreen pour les forêts de feuillus et l'écart estival de CRswir pour les résineux. Seule l'année 2020 est véritablement contrastée et la réponse de la végétation est vraisemblablement en lien avec la sècheresse du début d'été de cette année et probablement accentuée par les effets du sol et de l'altitude. Cette approche permet de repérer cartographiquement des peuplements manifestant une baisse de teneur en eau ou de perte de pigments foliaires que l'on peut assimiler à des anomalies d'état de végétation.

Le potentiel des images Sentinel2 est indéniable avec le calcul possible d'un très grand nombre d'indices de végétation, mais sur ce territoire de montagne trop de dates sont inexploitables et la profondeur temporelle de la série d'images (2017) ne nous permet pas d'analyser des changements de vigueur des peuplements. Le nombre limité de dates communes pour les années

disponibles n'a pas permis de calculer l'indicateur SG toute la phase d'activité printanière de la végétation.

On peut également regretter le manque d'observation terrain sur l'état des peuplements en 2020 ainsi que l'absence de signalement géolocalisés de dépérissement forestier qui aurait pu nous aider à interpréter les cartes d'indicateurs.

Bibliographie

Chéret, V. and J. P. Denux (2007). "Mapping wildfire danger at regional scale with an index model integrating coarse spatial resolution remote sensing data." Journal of Geophysical Research-Biogeosciences **112**(G2).

Chéret, V., J. P. Denux, C. Gacherieu and J. Ortisset (2011). "Utilisation de séries temporelles d'images satellitales pour cartographier le dépérissement des boisements résineux du Sud Massif Central." RDV techniques - ONF **31**: 55-62.

Chéret, V., M. Goulard, Y. Hamrouni and M. Chartier (2019). "Faisabilité du diagnostic de l'état sanitaire des peuplements par télédétection, le châtaignier en Dordogne." Forêt entreprise(247): 46-50.

Drusch, M., U. Del Bello, S. Carlier, O. Colin, V. Fernandez, F. Gascon, B. Hoersch, C. Isola, P. Laberinti, P. Martimort, A. Meygret, F. Spoto, O. Sy, F. Marchese and P. Bargellini (2012). "Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services." Remote Sensing of Environment **120**: 25-36.

Dutrieux, R., J. B. Féret and K. Ose (2021). "Mise au point d'une méthode reproductible pour le suivi généralisé des dégâts de scolytes par télédétection satellitaire." ONF - Rendez-vous techniques(69-70): 37-44.

Gitelson, A. A., Y. Gritz and M. N. Merzlyak (2003). "Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves." Journal of Plant Physiology **160**(3): 271-282.

Hardisky, M. A., V. Klemas and R. M. Smart (1983). "The influence of soil-salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of spartina-alterniflora canopies." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **49**(1): 77-83.

Lambert, J. (2014). Evaluation des baisses de vitalité des peuplements forestiers à partir de séries temporelles d'images satellitaires - Application aux résineux du Sud du Massif Central et à la sapinière pyrénéenne. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III.

Malenovsky, Z., H. Rott, J. Cihlar, M. E. Schaepman, G. Garcia-Santos, R. Fernandes and M. Berger (2012). "Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land." Remote Sensing of Environment **120**: 91-101.

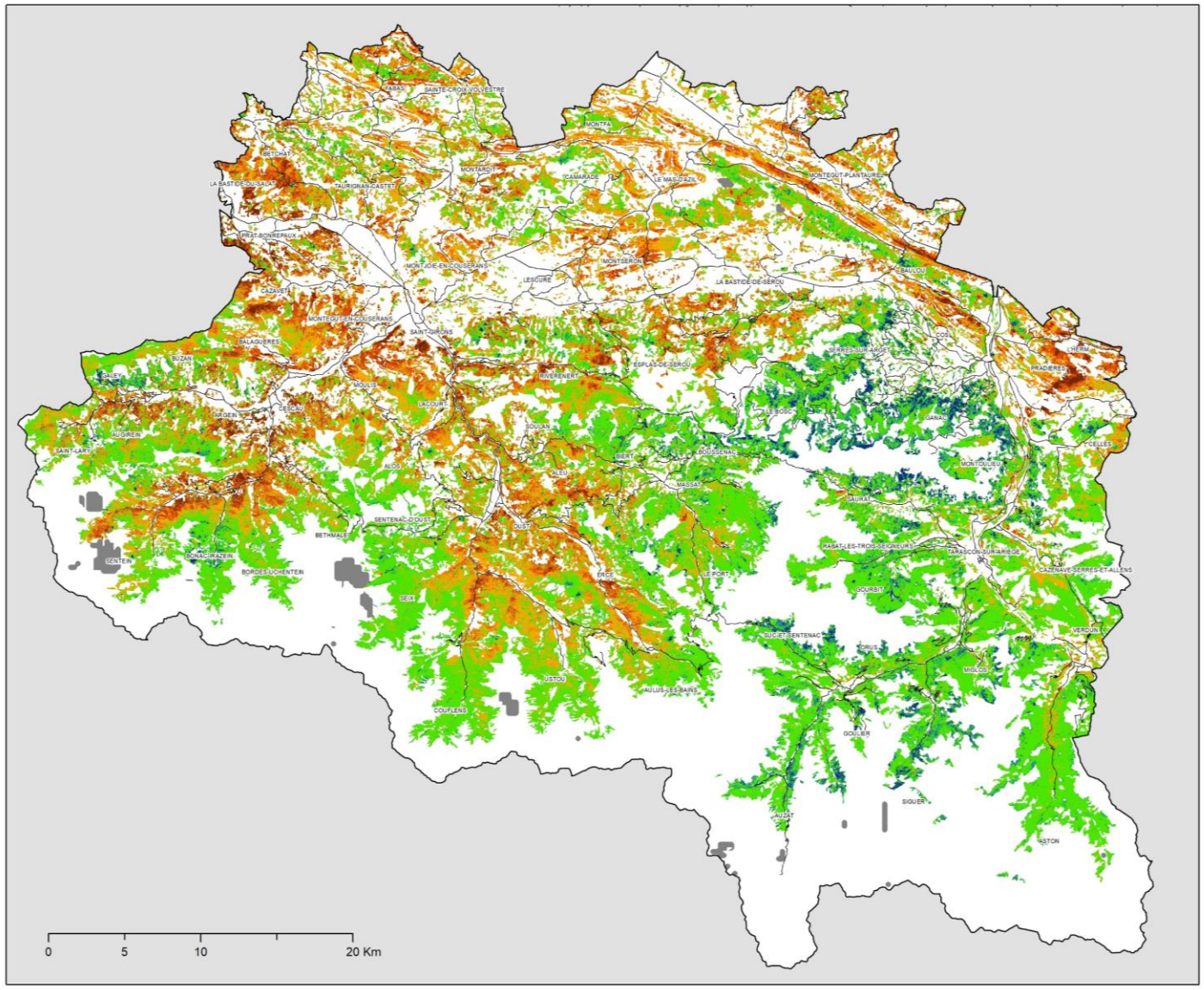
Merzlyak, M. N., A. A. Gitelson, O. B. Chivkunova and V. Y. Rakitin (1999). "Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening." Physiologia Plantarum **106**(1): 135-141.

Reed, B. C. (2006). "Trend analysis of time series phenology of North America derived from satellite data." GIScience & Remote Sensing of Environment **43 (1)**: 1-15.

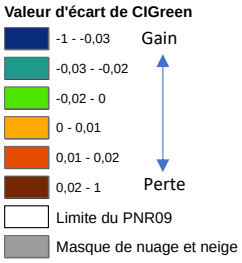
Rouse, J. W., R. H. Haas, S. J. A. and D. W. Deering (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Science and Technical Information Office, Washington D.C., Godard Space Flight Center, NASA.

Annexes

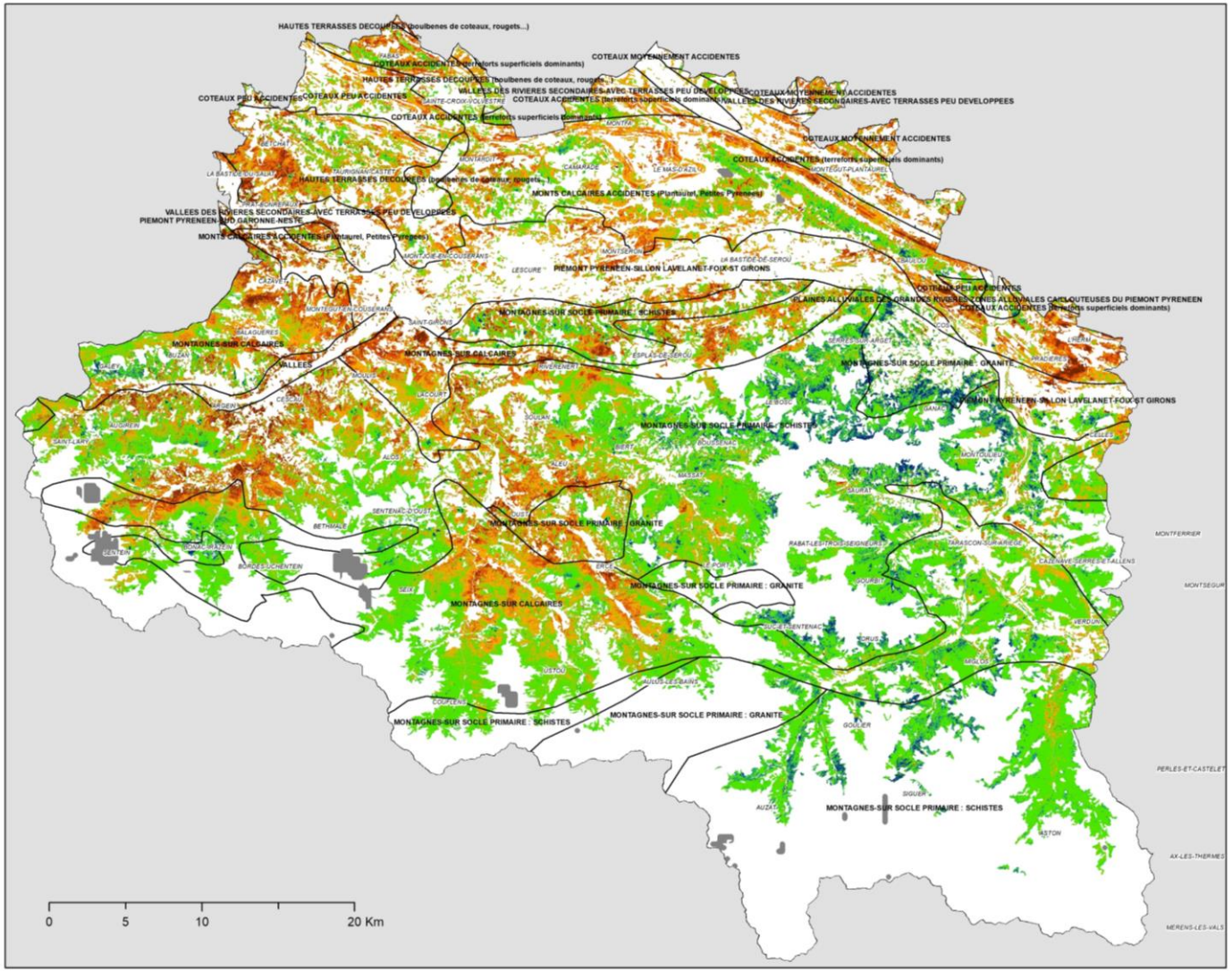
Carte 1



Ecart de l'indice CIgreen 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)



Carte 2



Ecart de l'indice CIgreen 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)

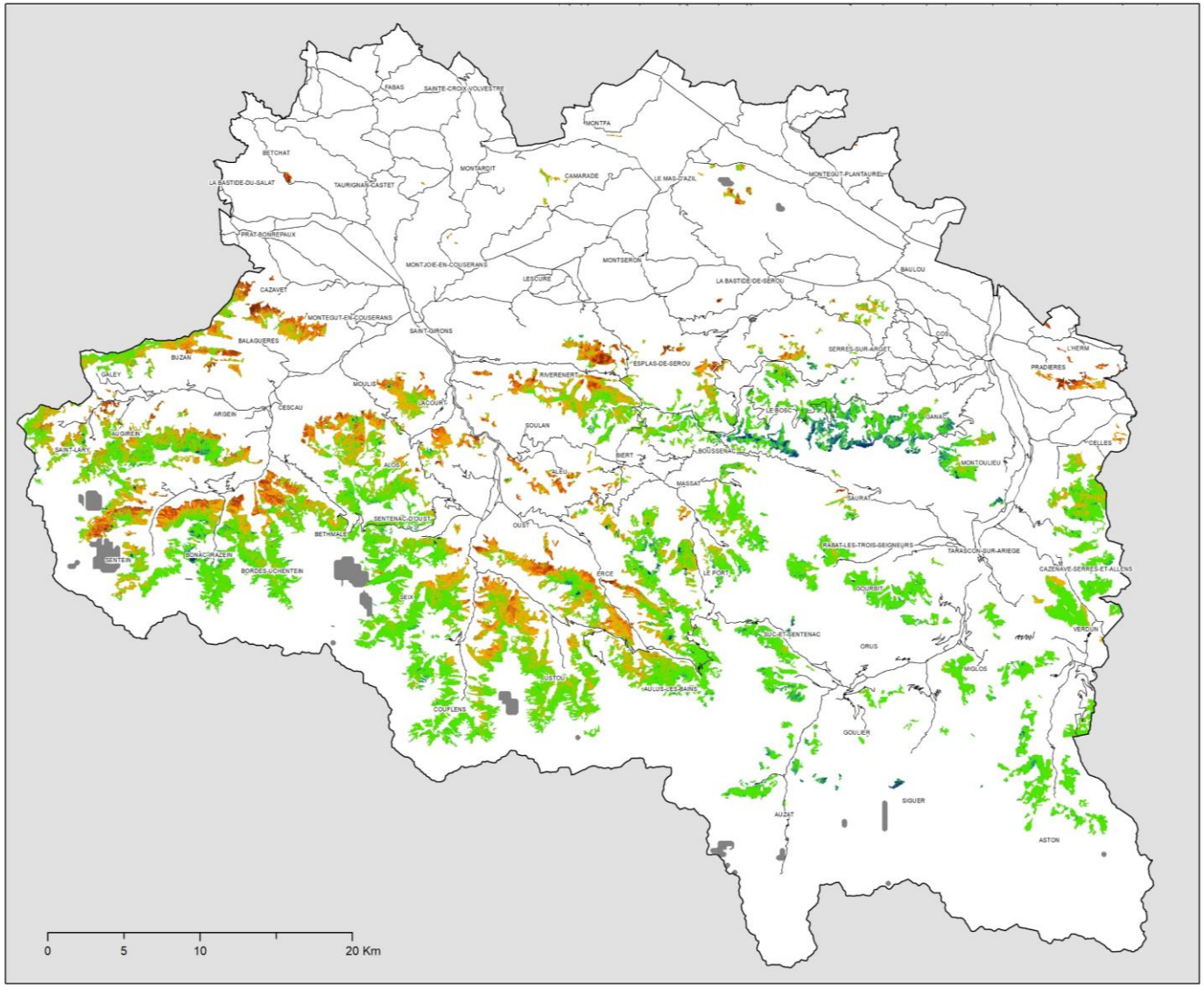
Valeur d'écart de CIGreen

- -1 - -0,03
- -0,03 - -0,02
- -0,02 - 0
- 0 - 0,01
- 0,01 - 0,02
- 0,02 - 1

Gain / Perte

- Limite du PNR09
- Masque de nuage et neige
- Unité géomorphologique (CRAMP)

Carte 3

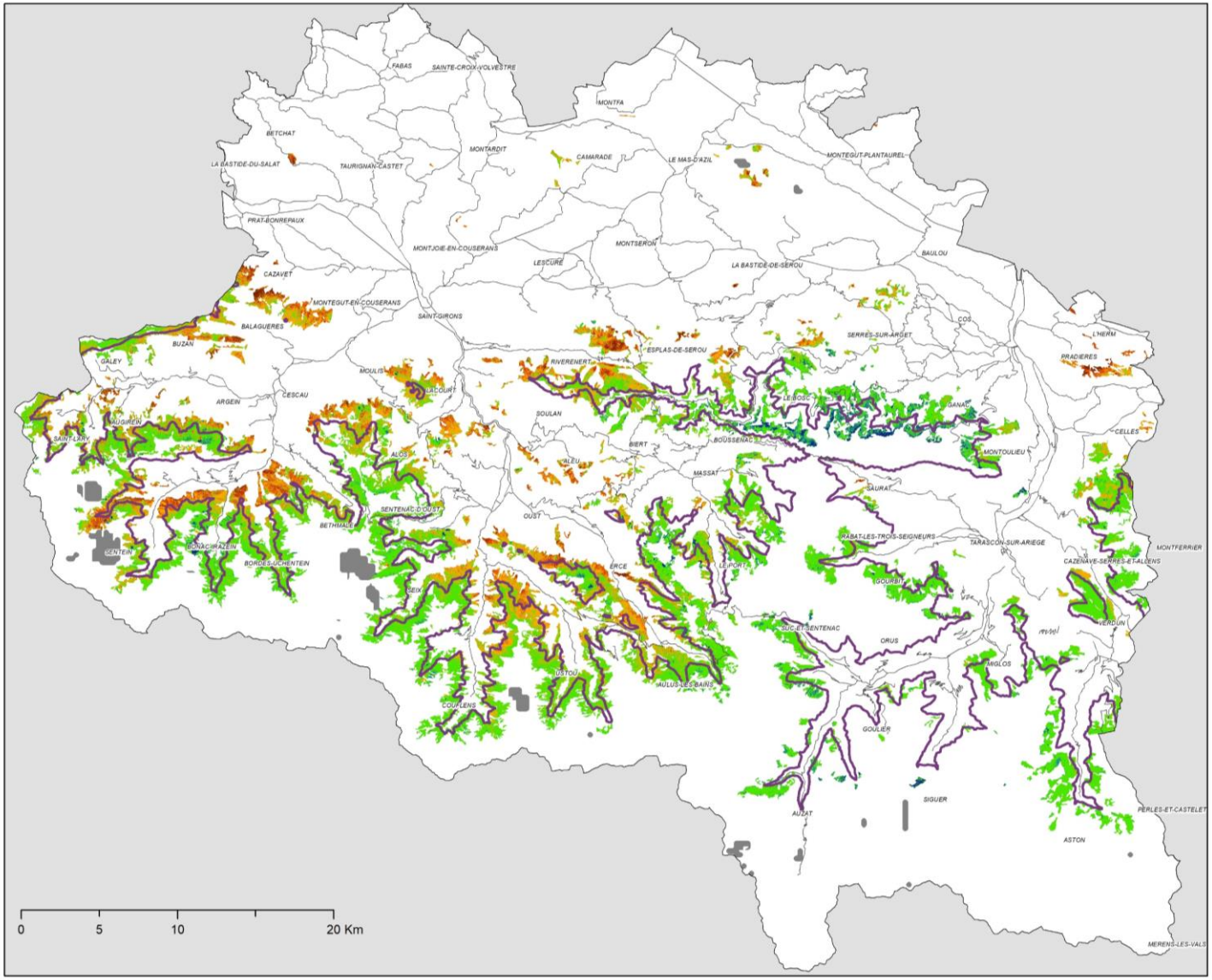


Ecart de l'indice CIgreen 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Hêtre

Valeur d'écart de CIGreen

-1 - -0,03	Gain
-0,03 - -0,02	
-0,02 - 0	
0 - 0,01	
0,01 - 0,02	
0,02 - 1	Perte
Limite du PNR09	
Masque de nuage et neige	

Carte 4



Ecart de l'indice CIgreen 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Hêtre

Valeur d'écart de CIGreen

- -1 - -0,03
- -0,03 - -0,02
- -0,02 - 0
- 0 - 0,01
- 0,01 - 0,02
- 0,02 - 1

Gain

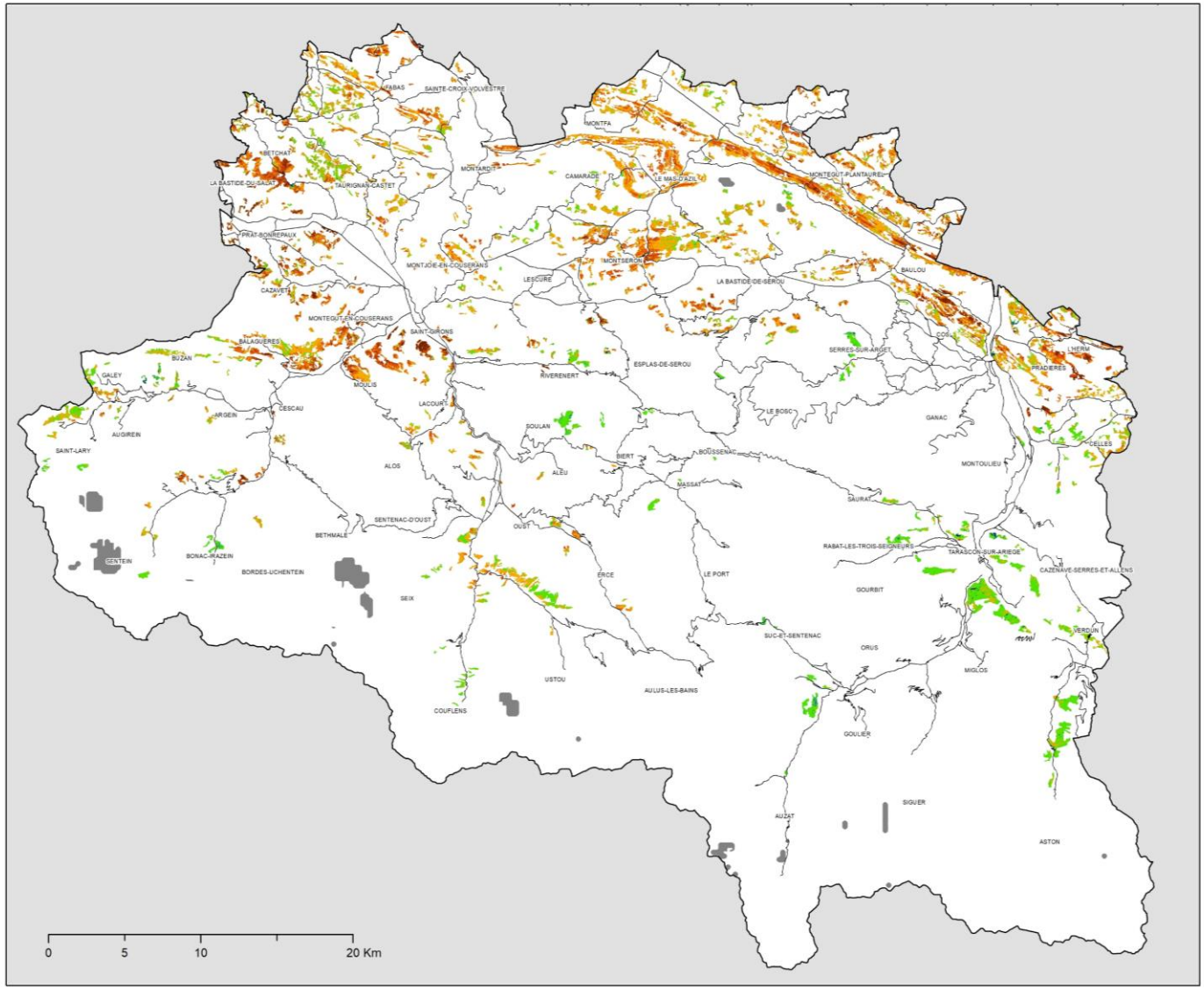
Perte

- Limite du PNR09
- Masque de nuage et neige

Limite altitudinale

- 1200 m

Carte 5

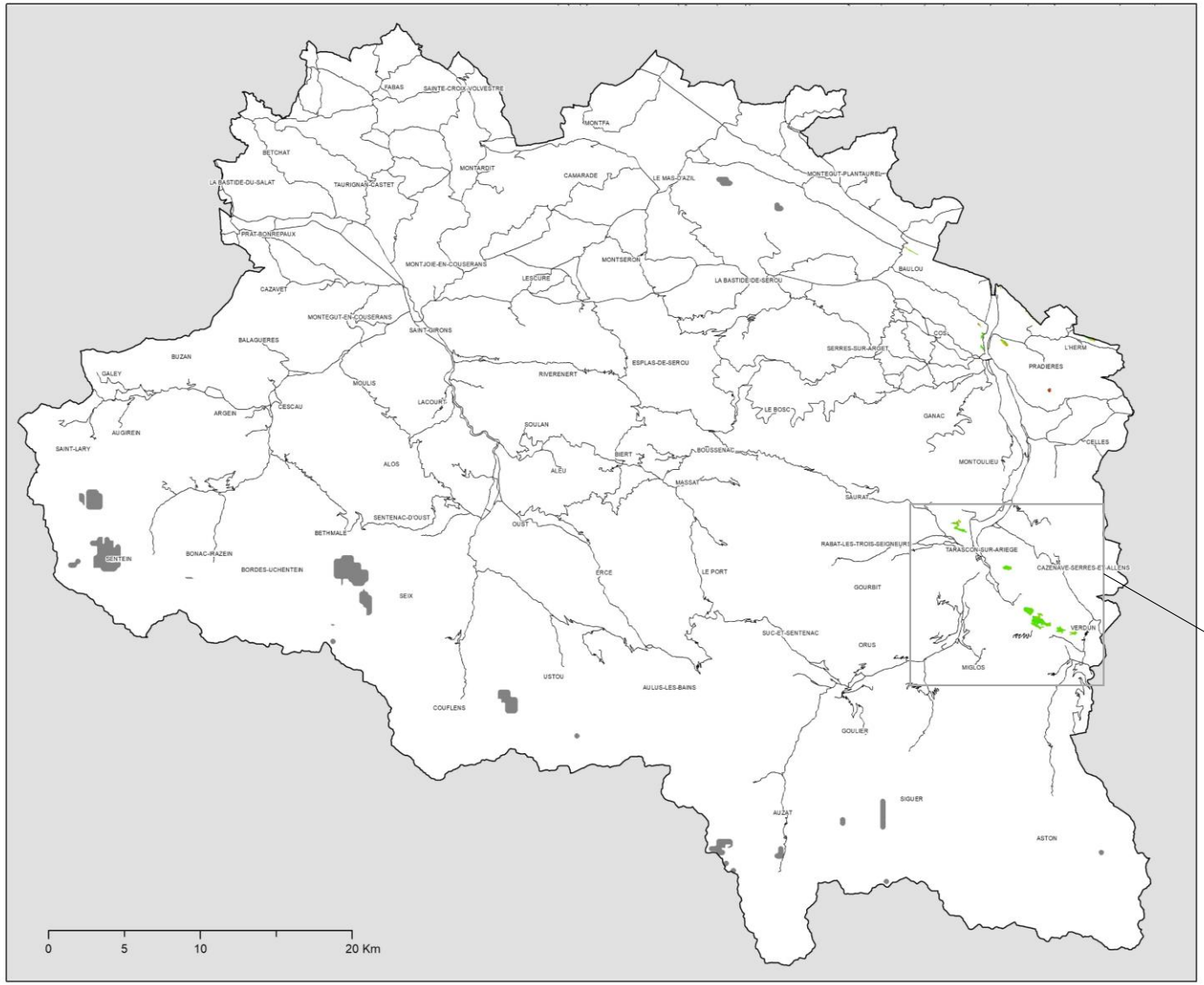


Ecart de l'indice CIgreen 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Chênes décidus

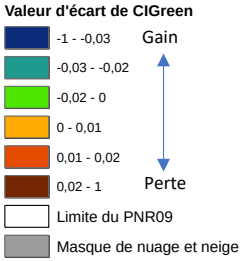
Valeur d'écart de CIGreen

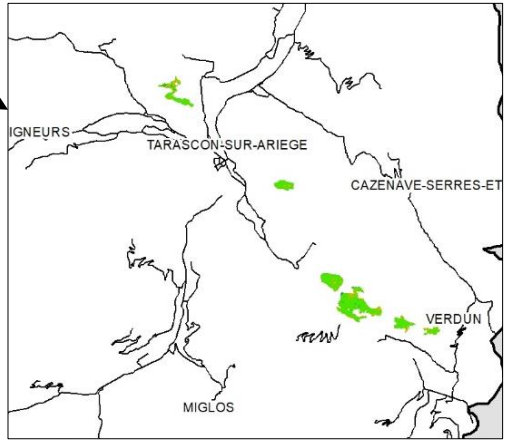
-1 - -0,03	Gain
-0,03 - -0,02	
-0,02 - 0	
0 - 0,01	
0,01 - 0,02	
0,02 - 1	Perte
Limite du PNR09	
Masque de nuage et neige	

Carte 6

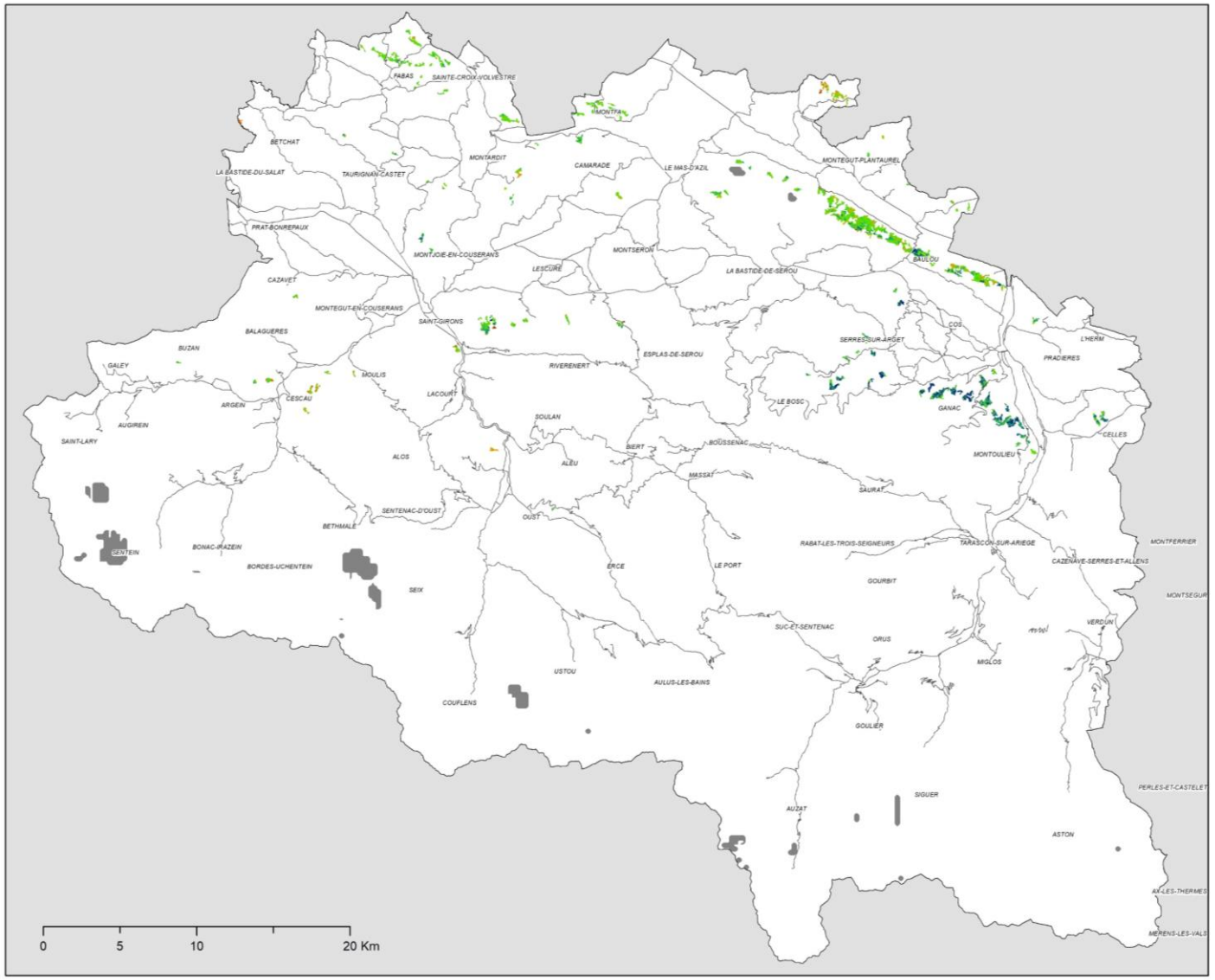


Ecart de l'indice CIgreen 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Chênes sempervirents





Carte 7



Ecart de l'indice CIgreen 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Châtaignier

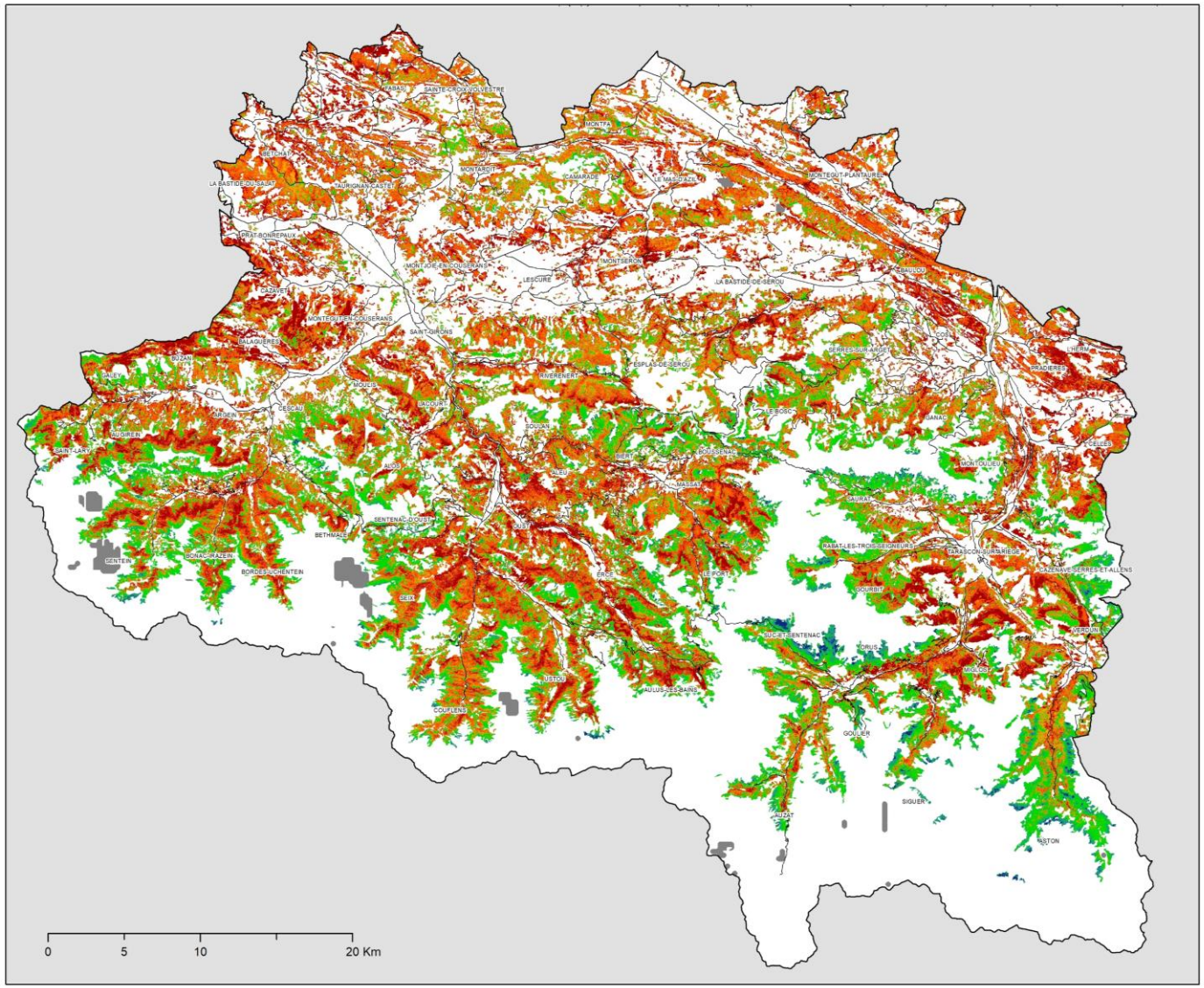
Valeur d'écart de CIGreen

- -1 - -0,03
- -0,03 - -0,02
- -0,02 - 0
- 0 - 0,01
- 0,01 - 0,02
- 0,02 - 1

Gain ↑ ↓ Perte

- Limite du PNR09
- Masque de nuage et neige

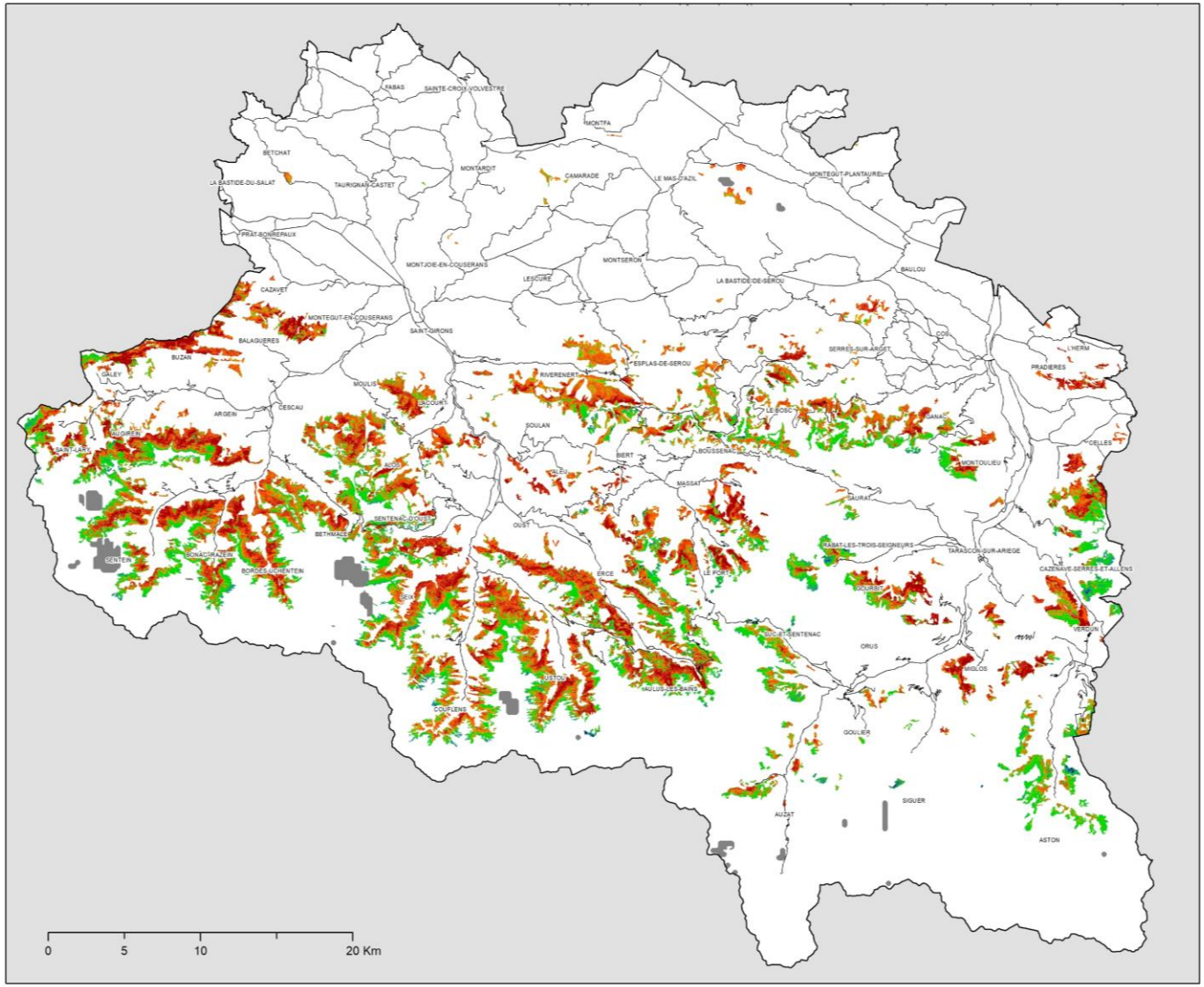
Carte 8



Ecart de l'indice CRswir 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)

Valeur d'écart de CRswir
-1 - -0,05
-0,05 - -0,02
-0,02 - 0
0 - 0,1
0,1 - 0,2
0,2 - 1
Perte
Gain
Limite du PNR09
Masque de nuage et neige

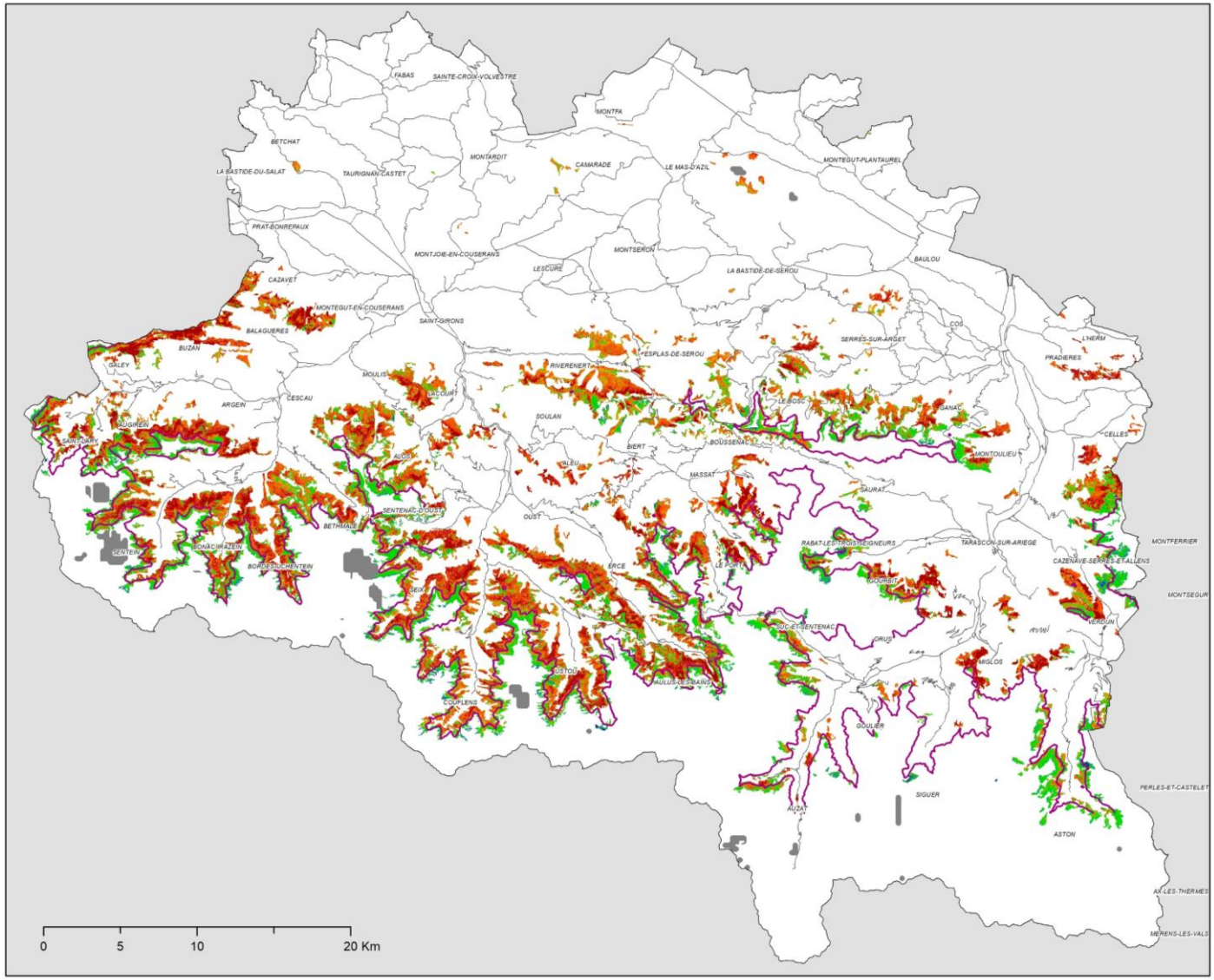
Carte 9



Ecart de l'indice CRswir 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Hêtre

Valeur d'écart de CRswir
-1 - -0,05
-0,05 - -0,02
-0,02 - 0
0 - 0,1
0,1 - 0,2
0,2 - 1
Perte
Gain
Limite du PNR09
Masque de nuage et neige

Carte 10



Ecart de l'indice CRswir 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Hêtre

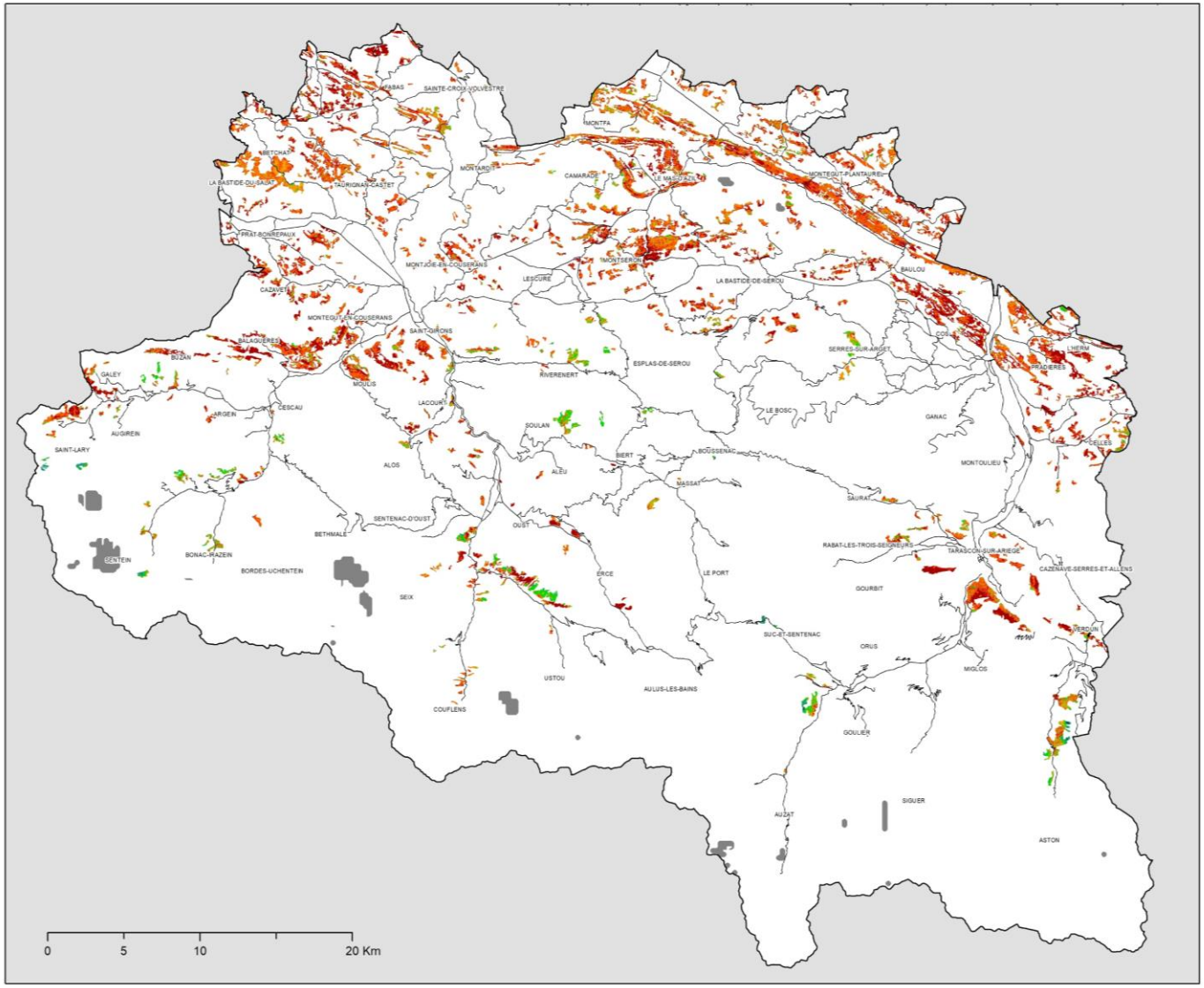
Valeur d'écart de CRswir

-1 - -0,05	Perte
-0,05 - -0,02	
-0,02 - 0	
0 - 0,1	
0,1 - 0,2	
0,2 - 1	Gain
Limite du PNR09	
Masque de nuage et neige	

Limite altitudinale

1400 m

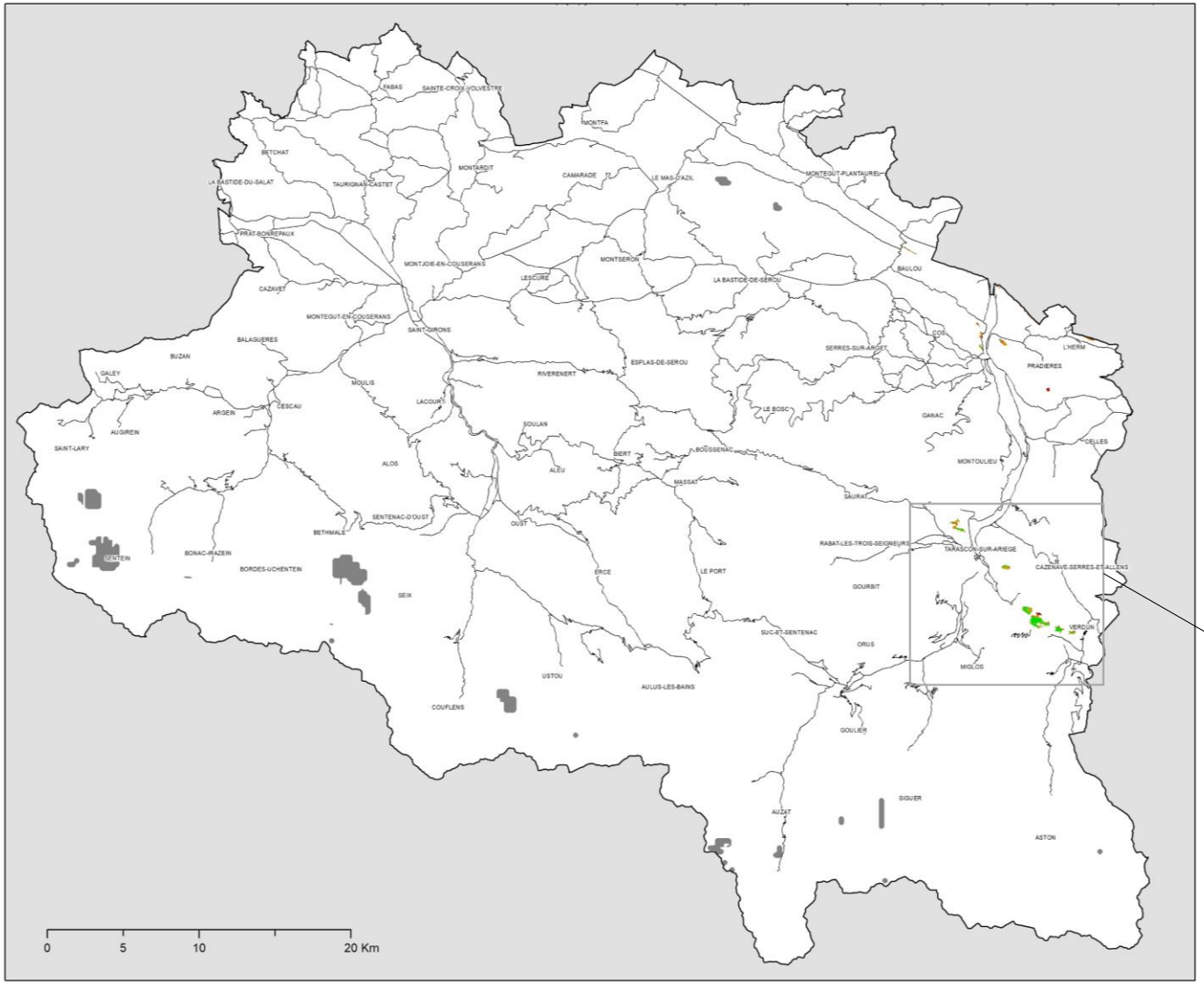
Carte 11



Ecart de l'indice CRswir 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Chênes décidus

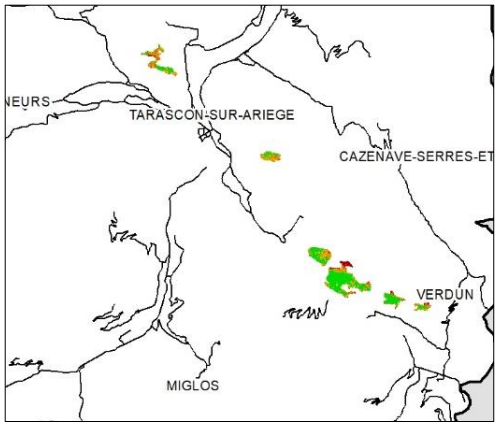
Valeur d'écart de CRswir
-1 - -0,05
-0,05 - -0,02
-0,02 - 0
0 - 0,1
0,1 - 0,2
0,2 - 1
Perte
Gain
Limite du PNR09
Masque de nuage et neige

Carte 12

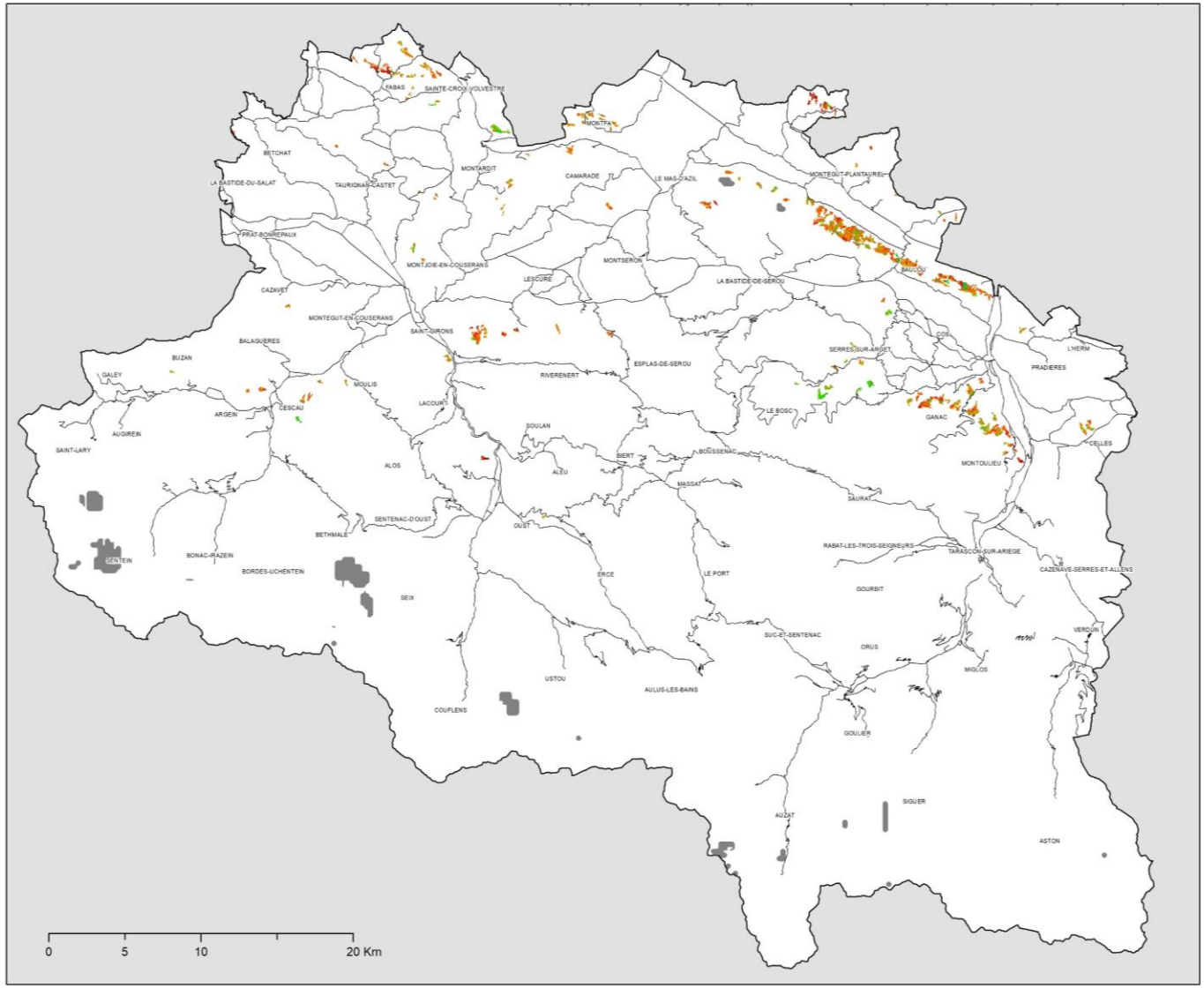


Ecart de l'indice CRswir 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Chênes sempervirents

Valeur d'écart de CRswir
-1 - -0,05
-0,05 - -0,02
-0,02 - 0
0 - 0,1
0,1 - 0,2
0,2 - 1
Perte
Gain
Limite du PNR09
Masque de nuage et neige



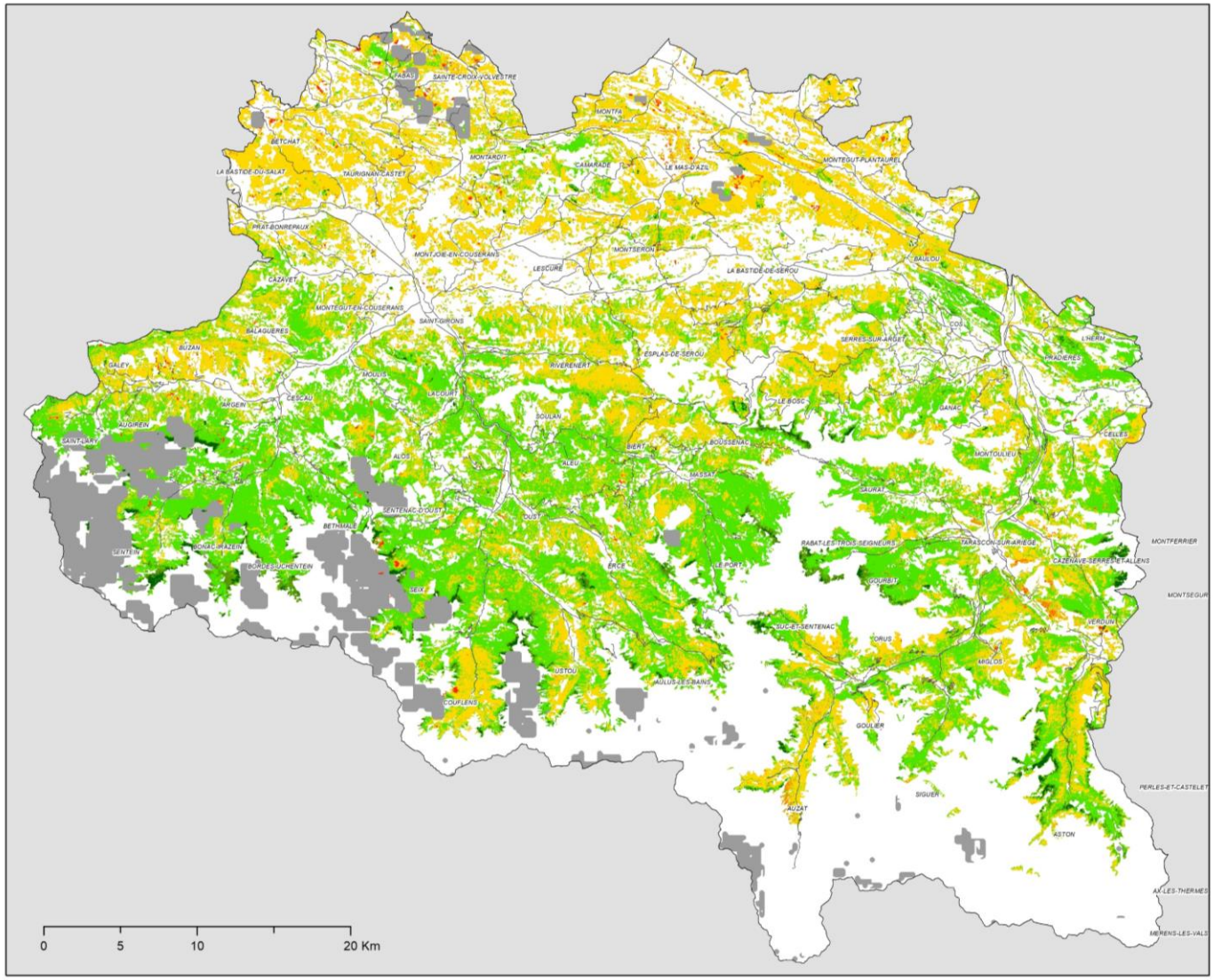
Carte 13



Ecart de l'indice CRswir 06-08 **en 2020**
Des forêts fermées de feuillus (BD IGN V2)
Châtaignier

Valeur d'écart de CRswir
-1 - -0,05
-0,05 - -0,02
-0,02 - 0
0 - 0,1
0,1 - 0,2
0,2 - 1
Perte
Gain
Limite du PNR09
Masque de nuage et neige

Carte 14



Ecart de **SG** entre **2018** et **2021**
Des forêts fermées de Feuillus
(BD IGN V2)

Valeur d'écart de NDVI

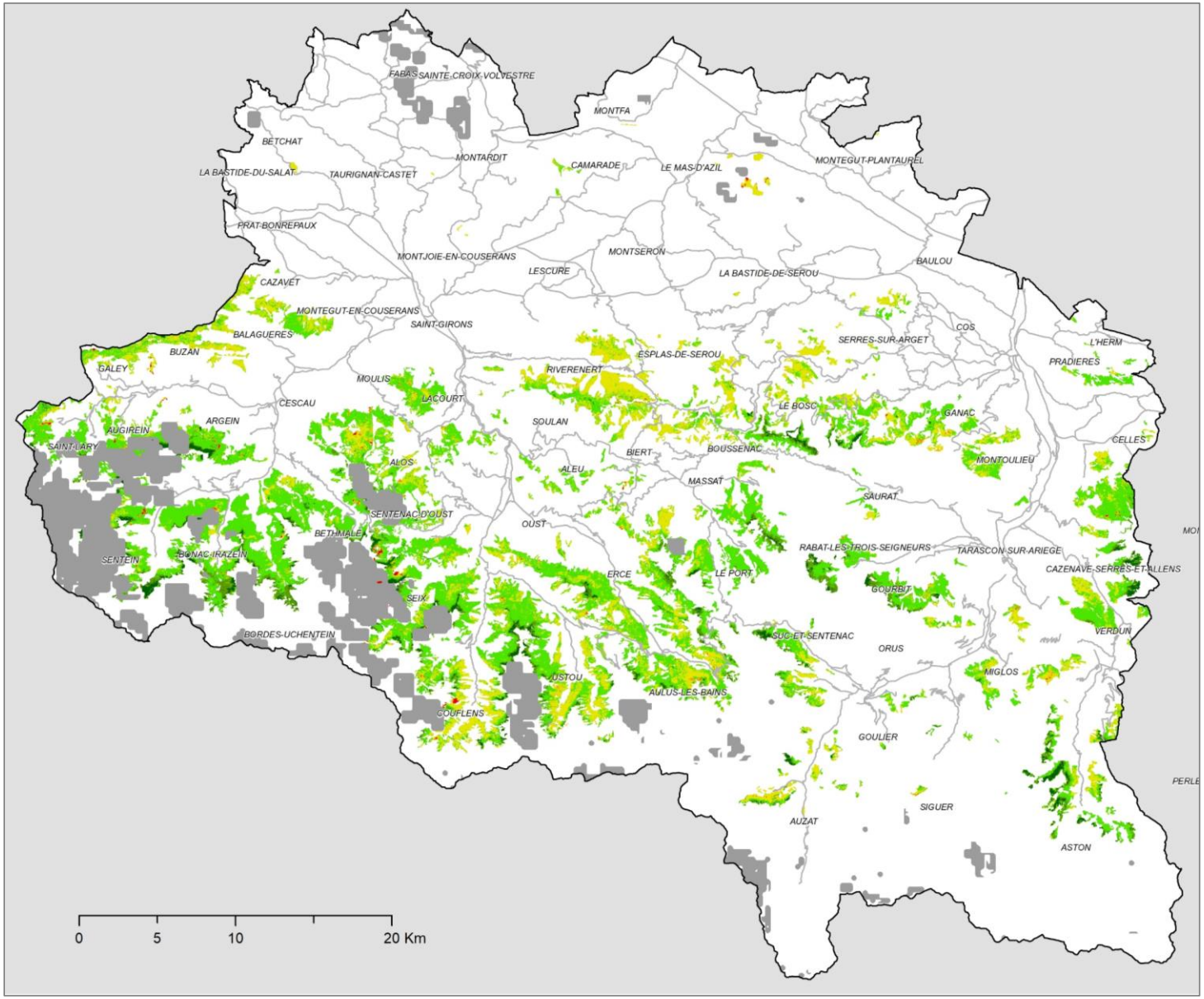
- -1,6 - -0,2
- -0,2 - -0,1
- -0,1 - 0
- 0 - 0,1
- 0,1 - 0,2
- 0,2 - 2

Perte

Gain

- Limite du PNR09
- Masque de nuage et neige

Carte 15



Ecart de **SG** entre **2018** et **2021**
Des forêts fermées de Feuillus
(BD IGN V2) **Hêtre**

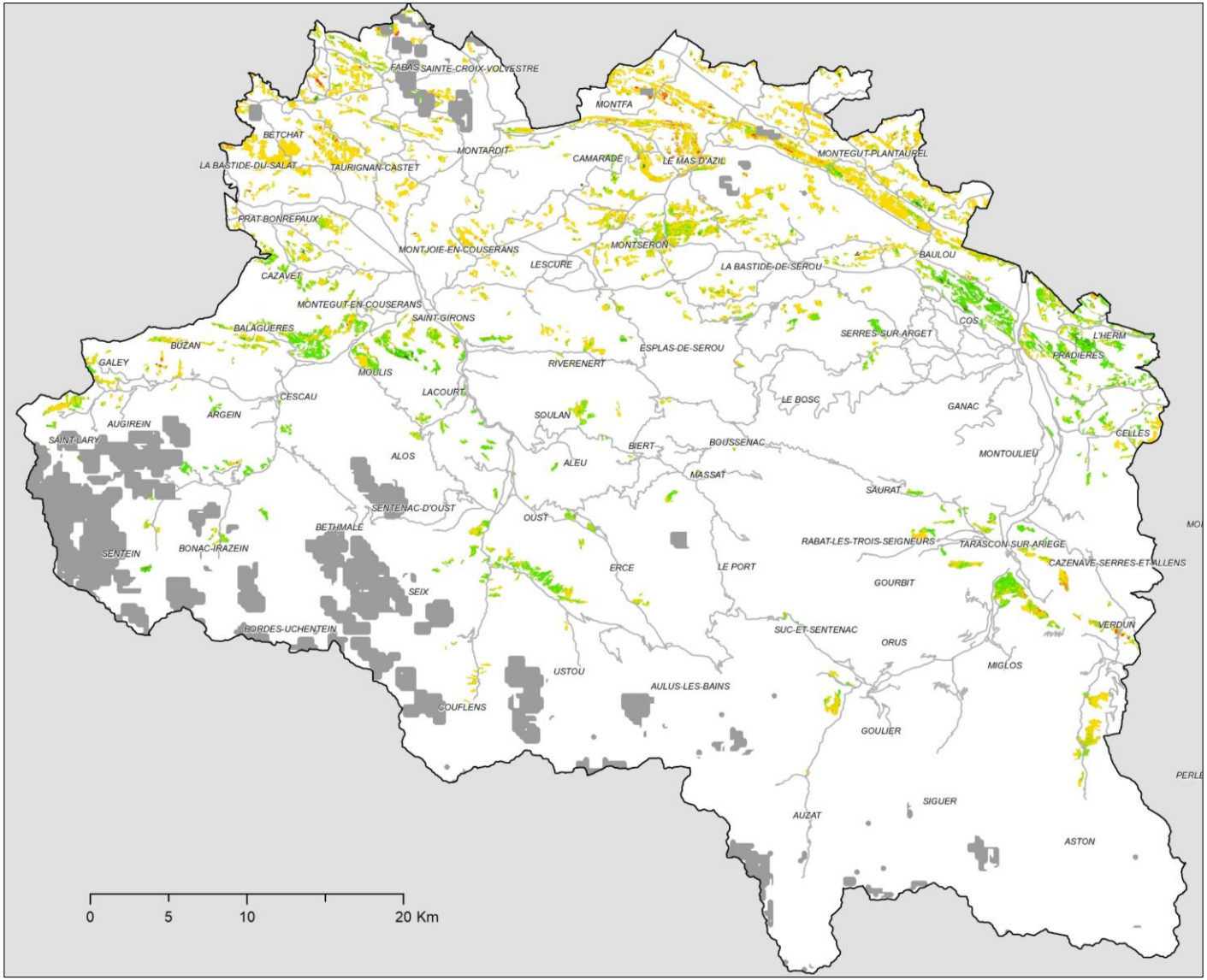
Valeur d'écart de NDVI

- -1,6 - -0,2
- -0,2 - -0,1
- -0,1 - 0
- 0 - 0,1
- 0,1 - 0,2
- 0,2 - 2

Perte ↑ ↓ Gain

- Limite du PNR09
- Masque de nuage et neige

Carte 16



Ecart de **SG** entre **2018** et **2021**
Des forêts fermées de Feuillus
(BD IGN V2) **Chênes décidus**

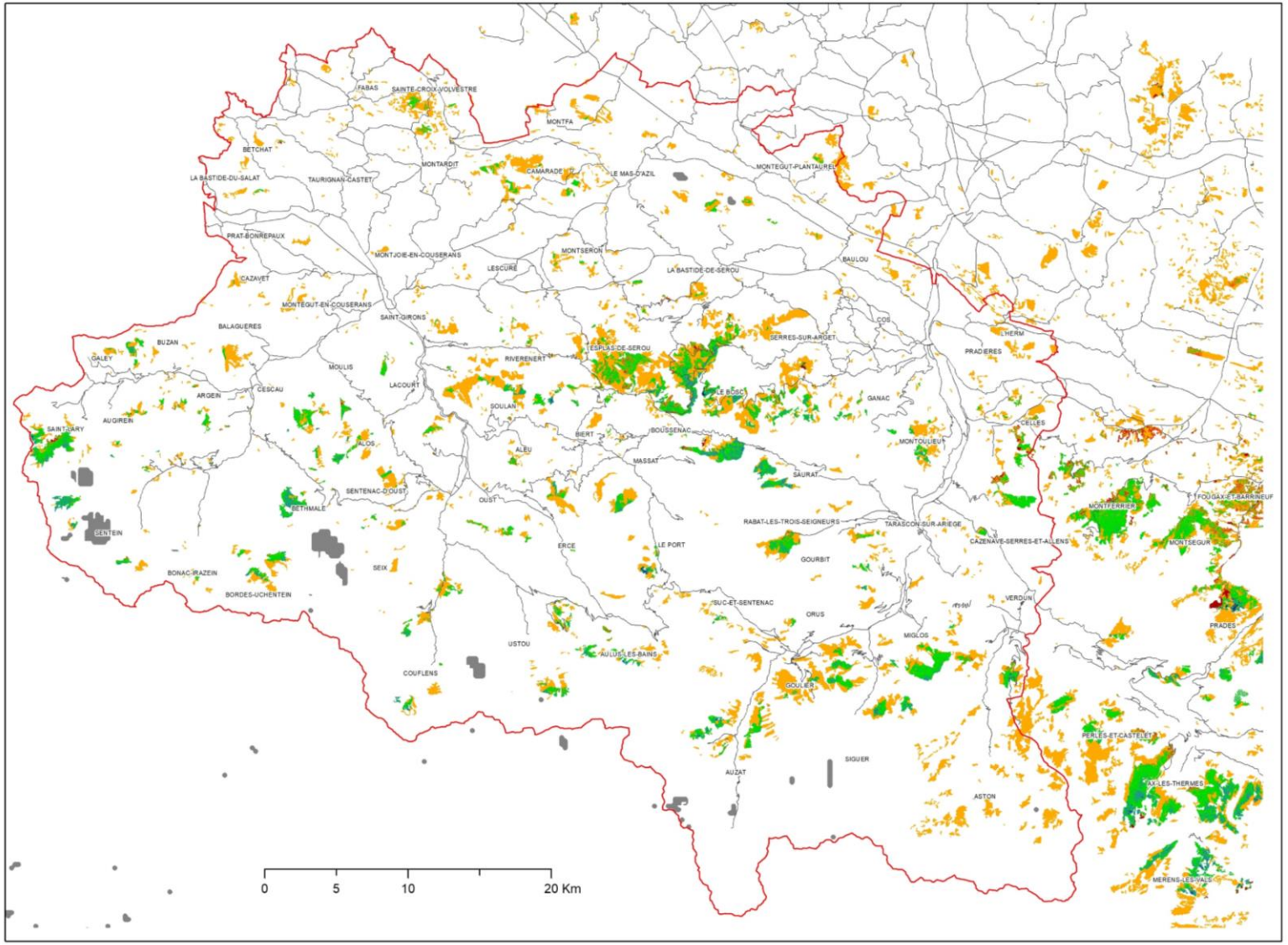
Valeur d'écart de NDVI

- -1,6 - -0,2
- -0,2 - -0,1
- -0,1 - 0
- 0 - 0,1
- 0,1 - 0,2
- 0,2 - 2

Perte ↕ Gain

- Limite du PNR09
- Masque de nuage et neige

Carte 17



Ecart de l'indice CRswir 06-08 **en 2020**

Des forêts fermées de Conifères et Mixtes (BD IGN V2)

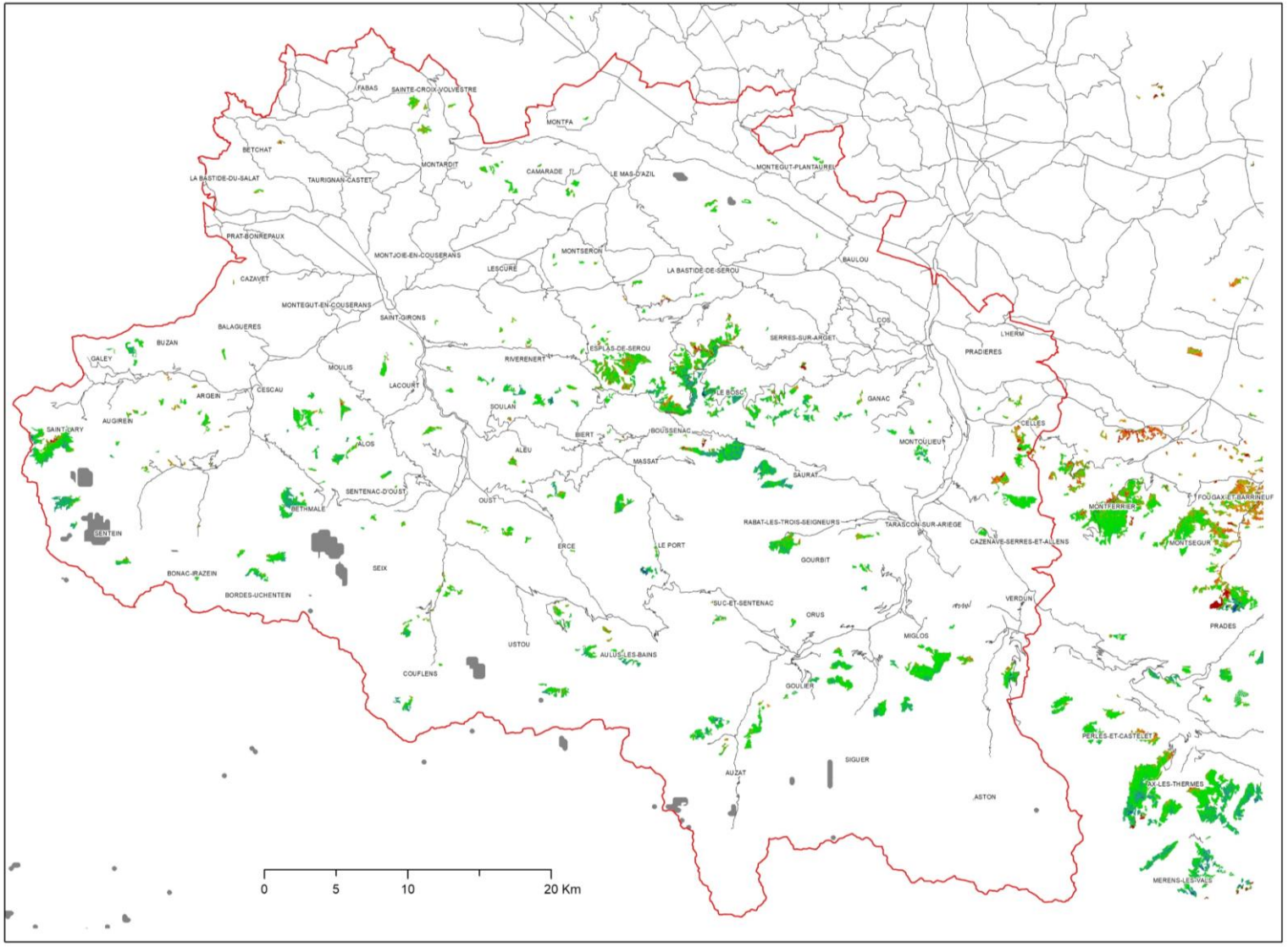
Valeur d'écart de CRswir

- -1 - -0,05
- -0,05 - -0,02
- -0,02 - 0
- 0 - 0,1
- 0,1 - 0,2
- 0,2 - 1

Perte ↑ Gain

- Limite du PNR09
- Masque de nuage et neige

Carte 18



Ecart de l'indice CRswir 06-08 **en 2020**

Des forêts fermées de Conifères (BD IGN V2) **Sapins, épicéas**

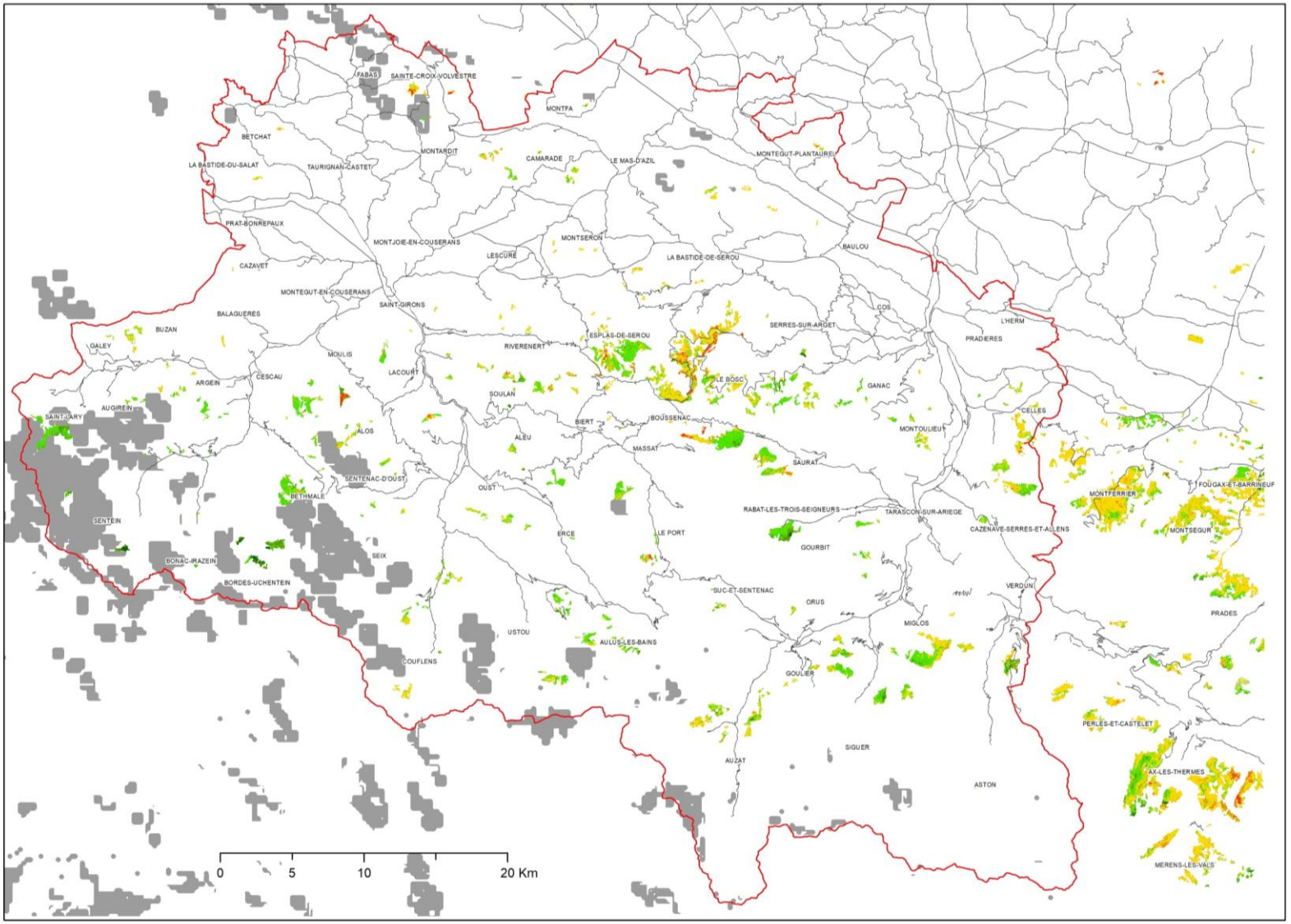
Valeur d'écart de CRswir

- -1 - -0,05
- -0,05 - -0,02
- -0,02 - 0
- 0 - 0,1
- 0,1 - 0,2
- 0,2 - 1
- Limite du PNR09
- Masque de nuage et neige

Perte

Gain

Carte 19



Ecart de **SG** entre **2018** et **2021**
Des forêts fermées de Conifères (BD IGN V2)
Sapins, épicéas

Valeur d'écart de NDVI

-1,6 - -0,2	Perte
-0,2 - -0,1	
-0,1 - 0	
0 - 0,1	
0,1 - 0,2	
0,2 - 2	Gain
Limite du PNR09	
Masque de nuage et neige	