Analyse de la variabilité bioclimatique des forêts du Vercors (Préalpes françaises du Nord) à partir des données NDVI de SPOT-VGT (1998-2009)

Sandra ROME[1], Sylvain BIGOT[1] et Séverine LOUIS[1]

[1] *Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (UJF-Grenoble 1, CNRS, IRD, G-INP, LTHE UMR 5564) BP 53, 38041 Grenoble cedex 9 - France, sandra.rome@ujf-grenoble.fr*

Revue Télédétection, 2012, Vol. 11, No 3, p. 355-372

Résumé

Ce travail participe aux travaux de recherche de la Zone Atelier Alpes du CNRS menés en particulier sur le massif du Vercors, et surtout sur les interactions entre climat et végétation. L'étude se focalise ici sur l'analyse de l'indice de végétation NDVI calculé à partir des données SPOT-VGT sur la période 1998-2009 et à l'échelle du Parc Naturel Régional du Vercors. Elle cherche à discriminer les comportements saisonniers et interannuels de la phénologie des trois principales formations forestières du Vercors, les feuillus, les forêts mixtes et les conifères. Le NDVI révèle de manière très précise les principales phénophases arborées, ainsi que les différences spatio-temporelles caractéristiques du Vercors. Le poids de l'altitude est important, surtout pour comprendre les différentes sensibilités intrasaisonnières lors de la phase de démarrage végétatif printanier, mais aussi pour interpréter les variations interannuelles. La signature de plusieurs épisodes climatiques extrêmes, symptomatiques d'une grande sensibilité de la forêt aux variations des températures et des précipitations, est très nette dans la phénologie transcrite par le NDVI, même s'il demeure compliqué d'en extraire un diagnostic précis de toutes les interactions éco-climatiques. En dehors de ces épisodes spécifiques, à l'échelle régionale, le NDVI intégré sur la saison de végétation active semble cependant indiquer une tendance à la hausse entre 1998 et 2009, peut-être révélatrice d'une augmentation de l'activité foliaire arborée forcée par l'élévation significative des températures depuis la fin des années 1980.
Keywords : Vercors, forêt, SPOT-VGT, NDVI, phénologie

Abstract

Analysis of the bioclimatic forest variability of Vercors Mountains (Northern French Prealps) from the SPOT-VGT NDVI data (1998-2009)

The interdisciplinary field of Long Term Socio-Ecological Research (LTSER) is supported by CNRS (National Center for Scientific Research). The work carried out is in the Central French Alps platform, where LTSER is especially focused on Vercors mountain climate and vegetation interaction. The goal of this paper is to analyse NDVI data derived from remote measurements of SPOT-VGT over the 1998-2009 period. The study area corresponds to Vercors Regional Park. Firstly we identify and discriminate the phenology among particular land forest cover types (leafy, mixed and coniferous forests) and secondly, to monitor their intraseasonal and interannual response to typical climate conditions, as well as their response to anomalous conditions from extreme weather. Forest NDVI shows regional phenological patterns and spatio-temporal contrasts due to altitude, especially to understand the spring greenup variability. Extreme forest phenological anomalies are evident from the NDVI correlated to temperature and precipitation variations observed during 1998-2009 period. However, due to numerous interactions it remains complicated to establish a precise eco-climatic diagnostic. Apart from extreme specific episodes (e.g. 2004 and 2007), NDVI integrated over the growing season (the photosynthetically active radiation period) seems to indicate a positive trend between 1998 and 2009, perhaps indicating an increase in the foliar activity forced by the significant rise in temperature since the late 1980s.
Keywords : Vercors, forest, SPOT-VGT, NDVI, phenology

1 Introduction

1.1 Les forêts de moyenne montagne, un enjeu face au changement climatique

Ce travail constitue une étude des changements climatiques en milieu de moyenne montagne à partir de la variation des dates de débourrement et de sénescence des forêts analysées via le NDVI.

Situé à une altitude charnière entre forêts de moyenne montagne et pelouses alpines (1500-2000 mètres d'altitude), le massif préalpin du Vercors est constitué d'un habitat de montagne en 'mosaïque', représenté par un mélange de pins à crochets et de pelouses, paysage emblématique de la 'zone de combat' écologique des hauts plateaux du Vercors. Or, ce territoire très riche en biodiversité risque de subir les conséquences du changement climatique en cours. En effet, certains écosystèmes seront probablement particulièrement touchés en climat modifié, en particulier la forêt boréale, les milieux de montagne et les écosystèmes de type méditerranéen (Parry *et al.*, 2007). A ce titre, Auer *et al.* (2007) ont montré que les Alpes européennes ont déjà enregistré une hausse d'environ 2°C entre la fin du 19^{e} et le début du 21^{e} siècle, soit deux fois le taux de réchauffement mesuré à l'échelle nord-hémisphérique. Aussi, même une augmentation modérée des températures globales moyennes (inférieure à 2°C) dans les prochaines décennies aura des conséquences socio-économiques et naturelles majeures, nécessitant des adaptations importantes (Bates *et al.*, 2008). C'est pourquoi les régions tempérées de moyenne montagne (par exemple celles situées entre 1000 et 2000 m dans les Alpes françaises), devraient devenir l'espace potentiellement le plus sensible au réchauffement, l'espace préalpin français mêlant à la fois des enjeux économiques (industrie et tourisme), agricoles (élevage, pâturage et foresterie) et environnementaux (paysages et biodiversité).

Beaucoup d'études ont examiné les conditions climatiques des Alpes (par exemple, Plaut et Simonnet, 2001 ; Casty *et al.* 2005 ; Beniston, 2005 ; Bigot et Rome, 2010). De nombreuses incertitudes persistent sur la variabilité climatique locale dans le cadre d'un changement climatique d'échelle supérieure (Durand *et al.*, 2009) ; les inconnues concernent surtout le sens et l'ampleur des impacts dus à ces changements, notamment sur la végétation et sa phénologie (Monteith, 1989 ; Pauli *et al.*, 1996 ; Theurillat and Guisan, 2001 ; Dirnbock *et al.*, 2003 ; Roetzer, 2005 ; Cleland *et al.*, 2007 ; Opdam *et al.*, 2009). A partir d'analyses basées sur les données du capteur AVHRR et menées sur le domaine tempéré nord-hémisphérique, plusieurs travaux ont montré l'augmentation de la période végétative en lien avec le réchauffement atmosphérique (Myneni *et al.*, 1997 ; Zhou *et al.*, 2001). Ces dynamiques phénologiques des écosytèmes forestiers ont une influence directe sur les processus hydrologiques, écologiques et bioclimatiques (Heimann *et al.*, 1998 ; Hogg *et al.*, 2000 ; Cooke et Weih, 2005). A l'échelle des forêts françaises, une grande partie des interactions et enjeux écosystémiques est résumée dans Lebourgeois *et al.* (2010).

Les environnements de montagne en zone tempérée exigent un examen détaillé parce que leur relief crée des topoclimats et apporte une grande complexité climatique, mais également dans les processus biologiques, physiques et chimiques associés (Beniston, 2005). A l'échelle des Alpes, la potentielle réponse bioclimatique de la végétation au réchauffement climatique d'origine anthropique semble maintenant indéniable (Botta *et al.*, 2000 ; Jolly *et al.*, 2005 ; Cannone *et al.*, 2008 ; FAO, 2011). La protection des forêts de montagne revêt un intérêt particulièrement reconnu, incluant des stratégies pour leur adaptation (European Commision, 2010).

Ce travail s'inscrit dans le cadre de recherches pluridisciplinaires menées dans la Zone Atelier Alpes (ZAA), labellisée en 2008 par le CNRS (INEE) et reconnue depuis fin 2010 comme SOERE (Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement). La ZAA rassemble des chercheurs en écologie, en géosciences et en sciences sociales, ainsi que différents gestionnaires d'espaces naturels. Les travaux sont menés sur deux sites ateliers : l'un préalpin avec le massif du Vercors et l'autre alpin, avec le massif de l'Oisans. Les études portent sur l'évolution des écosystèmes et du climat dans ces territoires de montagne marqués par l'importance de certaines activités socio-économiques, en particulier pastorales et touristiques. En parallèle, de 2009 à 2012 s'est déroulé le programme de recherche GICC-ECCLAIRA-DECLIC [1] ciblé spécifiquement sur le Vercors drômois, avec une analyse spécifique des interactions bioclimatiques en domaine forestier.

1. GICC-ECCLAIRA-DECLIC : Gestion et Impact du Changement Climatique - Evaluation du Changement Climatique, ses Adaptations et Impacts en Rhône-Alpes : partenariat opérationnel entre équipes de recherche et collectivités territoriales – Drôme : Eau, Climat et Impacts liés aux Changements.

1.2 Objectifs du suivi photosynthétique via le NDVI

Situées à l'intersection géographique de plusieurs influences climatiques (tempérée, montagnarde, méditerranéenne), les forêts du Vercors sont susceptibles d'enregistrer et de subir les différents changements intra- et interannuels du climat, essentiellement en lien avec les variations des facteurs pluvio-thermiques. Ce travail cherche à étudier la variabilité bioclimatique des espaces forestiers de moyenne montagne du Vercors, traduite à travers l'analyse d'un indice de végétation maintenant couramment utilisé en télédétection, le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), calculé grâce au rapport (pIR - R) / (pIR + R), où pIR est le canal proche infrarouge et R le canal du rouge. Même si encore peu de travaux ont exploré la relation complexe entre le NDVI et la croissance interannuelle des espèces arborées (Wang *et al.*, 2004), cet indicateur environnemental permet pourtant de très bien caractériser l'activité photosynthétique (i.e. sa productivité annuelle) de la végétation et sa variabilité saisonnière (Senay et Elliott, 2000 ; Wang *et al.*, 2003 ; Maselli, 2004 ; Weiss *et al.*, 2004 ; Hountondji *et al.*, 2006 ; Lasaponara, 2006 ; Baldi *et al.*, 2008), notamment pour les forêts tempérées (Spanner *et al.*, 1990) et boréales (Royer *et al.*, 1996). La validation grâce à des mesures au sol confirme la capacité du NDVI, notamment en domaine alpin, d'être un indicateur fiable des changements spatio-temporaux de la végétation forestière (Jolly *et al.*, 2005 ; Fontana *et al.*, 2008). Ce suivi photosynthétique permet l'étude des principales phénophases du cycle de végétation, particulièrement la durée de la période de végétation arborée active et la définition des dates de débourrement (mise en place des feuilles au printemps) et de sénescence (jaunissement et chute des feuilles ou des aiguilles en automne). Mais d'un point de vue méthodologique, il faut bien rappeler que le NDVI permet plutôt l'étude de la symphénologie forestière, c'est-à-dire de la phénologie de l'ensemble des plantes de l'association végétale résumée grâce aux données radiométriques, et non pas d'une phénologie spécifique au sein de la communauté (Bigot, 2004).

2 Description du site d'étude préalpin

2.1 Le Vercors, un relief contrasté

La limite géographique de la zone d'étude correspond à celle du Parc Naturel Régional du Vercors (PNRV), couvrant environ 2062 km^2 et centrée sur approximativement 45°04'N / 5°33'E. Le PNRV regroupe 85 communes réparties sur les départements de la Drôme et de l'Isère, en région Rhône-Alpes. Les Préalpes du Vercors se situent à une altitude moyenne de 1500 mètres, variant de 200 m dans les parties orientale (près de Grenoble) et occidentale (dépression du Royans) de la vallée de l'Isère, et culminant au Grand Veymont à 2341 m sur la façade est de la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors (figure 1).

2.2 Une mosaïque forestière

Le massif du Vercors se caractérise par la diversité de sa couverture végétale (figure 2), avec un mélange entre forêts, prairies ouvertes et roches affleurantes réparties sur quatre étages de végétation (figure 3) :

- entre 200 et 900 m d'altitude, l'étage collinéen (supra-méditerranéen pour le sud du massif) où dominent le chêne pubescent, le pin sylvestre, des reboisements de pin noir d'Autriche sur marnes et calcaires et le chêne sessile, le charme et le châtaignier (Royans et Trièves) sur terrasses alluviales et collines de molasse ;
- entre 900 et 1600 m, l'étage montagnard occupé en ubac par le hêtre et le sapin, et en adret par le pin sylvestre ;
- de 1600 à 2100 m, l'étage subalpin qui supporte le sapin et le pin à crochets (avec de l'épicéa sur les parties basses) et des pelouses subalpines ;
- au-delà de 2100 m d'altitude, l'étage alpin essentiellement représenté par des pentes rocailleuses dépourvues d'arbres (exemple des crêtes du Grand Veymont).

Au total, la superficie forestière représente 139 000 ha, soit près de 62% du PNRV, et est constituée d'une mosaïque d'essences caducifoliées, sempervirentes et de forêts mixtes. Par ailleurs, le PNRV inclue la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors, la plus grande réserve naturelle de France métropolitaine avec 17 000 ha, surtout composée de forêt au nord, et d'un mélange de forêt, végétation arbustive et lande au sud (figure 2). Cette hétérogénéité des peuplements forestiers du Vercors explique la méconnaissance des interactions entre variabilité climatique et phénologie forestière, du fait de la complexité des différentes signatures bioclimatiques régionales.

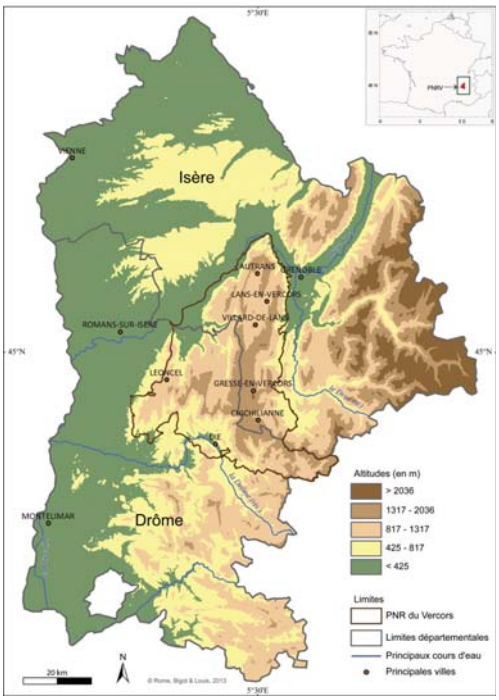


FIGURE 1 – Localisation de la zone d'étude : le massif du Vercors, réparti sur les départements Isère et Drôme (la topographie est représentée à partir du MNT de l'IGN possédant une résolution spatiale de 50 m.). *Location of the study area : Vercors Mountains distributed on Isère and Drôme (departments topography is represented from the MNT of the French National Geographic Institute, 50 m of spatial resolution)*

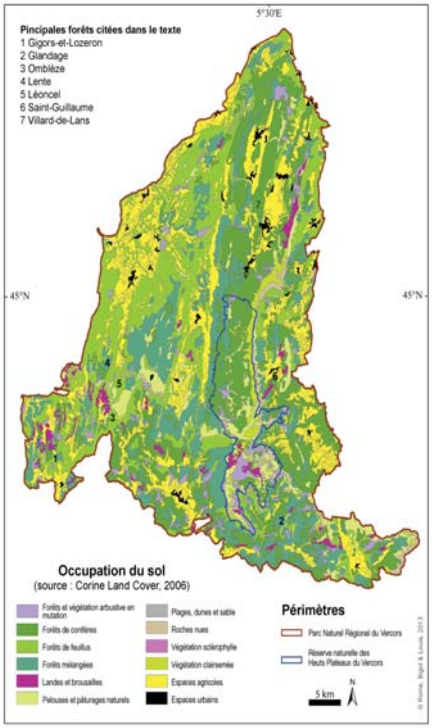


FIGURE 2 – Occupation du sol dans le PNR du Vercors selon les données Corine Land Cover de 2006 (la limite de la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors est indiquée). *Land cover of the Vercors Regional Park from the 2006 Corine Land Cover data (the limits of the Vercors High Plateaux Nature Reserve are indicated).*

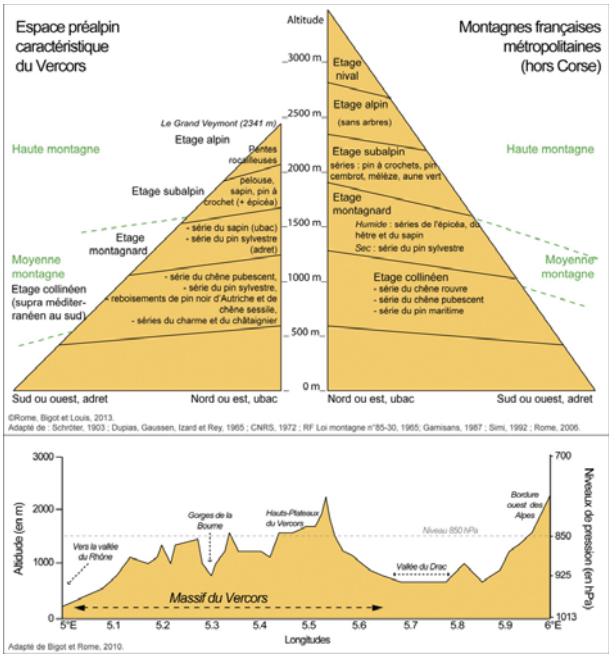


FIGURE 3 – Etagement de la végétation dans les Préalpes du Vercors et les Alpes françaises (en haut) et profil topographique du Vercors (en bas). *Vegetation layer in French Alps and Vercor's Prealp (at the top) and topographical profile of the Vercors Mountains (at the bottom).*

3 Matériel et méthodes

3.1 Les données de NDVI utilisées à l'échelle du Vercors

Disponibles depuis avril 1998, les données radiométriques issues des capteurs SPOT-VGT fournissent des images quotidiennes à l'échelle quasi planétaire dans quatre bandes spectrales (2 dans le visible et 2 dans l'infrarouge), avec une résolution spatiale de 1 km. L'ensemble des données, à la fois les valeurs radiométriques ainsi que toutes les métadonnées nécessaires aux corrections, est obtenu librement auprès du Joint Research Centre, sur le site internet du Flemish Institute for Technological Research (VITO) à l'adresse http ://free.vgt.vito.be.

Les données satellitaires utilisées dans ce travail proviennent des capteurs SPOT-4 et SPOT-5 VEGETATION. Seuls les mois de mars à octobre, correspondant à la saison de végétation des essences forestières de la zone d'étude, sont analysés sur la période 1998-2009 (moins mars 1998). Les valeurs du NDVI correspondent aux synthèses décadaires (de type VGT-S10), l'ensemble étudié dans ce travail rassemblant donc 285 composites (12 années x 24 décades, moins mars 1998). L'approche décadaire permet à la fois d'identifier les principaux signaux phénologiques forestiers et, par ailleurs, de simplifier la phase de stockage, de calculs et d'analyses de données. Plusieurs essais comparatifs entre les données journalières et décadaires du NDVI n'ont pas montré un gain significatif d'interprétation dans le cadre des objectifs de la présente étude.

3.2 Les données d'occupation du sol

L'occupation du sol du PNRV est vue au travers de la typologie CORINE Land Cover (CLC - version 2006) dont l'échelle de production est le 1/100 000 (Agence Européenne de l'Environnement, 2007). Cette typologie se fonde sur l'occupation biophysique du sol en classant la nature des objets (cultures, forêts, surfaces en eau,...), et s'articule suivant une nomenclature en trois niveaux. Le niveau 1, le plus simple, permet, à l'échelle du Vercors, de distinguer les territoires artificialisés, les territoires agricoles, les forêts et les milieux semi-naturels). Le niveau 3, le plus raffiné, distingue 44 thèmes d'occupation du sol, et permet de discriminer les différents espaces forestiers, la résolution spatiale des images SPOT-VGT (1 km^2) limitant cette distinction des patrons de végétation très fins.

Par ailleurs, en complément des données CLC, le PNR du Vercors a fourni des données spatialisées issues d'une typologie d'occupation du sol plus fine (résolution décamétrique) réalisée à partir d'images SPOT-5 de l'année 2005 et ensuite validée grâce à un recoupement sur le terrain. Cette typologie a seulement été réalisée sur une partie du parc, et elle ne comprend par exemple pas les espaces forestiers des contreforts Est du Vercors. Elle sert cependant ponctuellement de base de référence pour l'interprétation de certains résultats.

3.3 Le calcul du NDVI intégré

L'objectif principal étant de comparer les variations intra-saisonnières et interannuelles du NDVI des peuplements forestiers aux conditions climatiques, le calcul du NDVI annuel intégré ($NDVI_{int}$) est utilisé (basé ici sur la saison végétative de mars à octobre, les autres valeurs mensuelles étant biaisées à cause de l'enneigement). En complément des valeurs décadaires, cet indicateur permet un diagnostic comportemental plus précis, fondé sur l'intégration saisonnière de la productivité végétale (Krishna Prasad *et al.*, 2007). Ce calcul permet d'ailleurs d'obtenir une mesure indirecte très fiable de la productivité végétale annuelle, tout en facilitant l'établissement de typologies de la végétation (Wang *et al.*, 2004).

D'autre part, afin d'établir un seuil de confiance statistique à certaines phases d'analyses comparant des situations annuelles, en tenant systématiquement compte de facteurs géographiques discriminants (notamment la pente, l'exposition et l'altitude ; Lebourgeois *et al.*, 2010), la validation des résultats obtenus à l'échelle de toute la zone d'étude s'effectue grâce à un échantillonnage aléatoire de 200 points de contrôle. Sélectionnés à partir de la base de données Corine Land Cover, ces pixels de 1 km^2 représentent donc un aperçu significatif de 200 km^2 des différents types de forêts du PNR du Vercors, sur les 1280 km^2 d'espaces forestiers qu'il possède (figure 4).

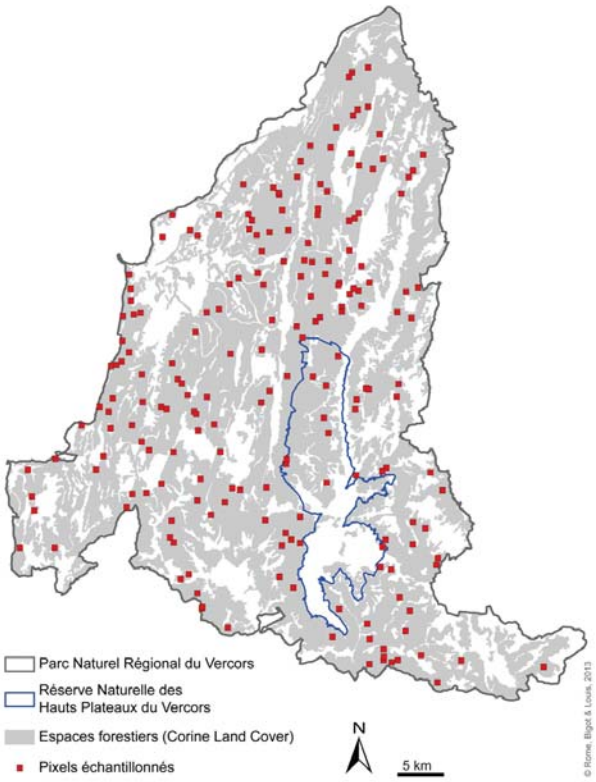


FIGURE 4 – Localisation de 200 pixels forestiers (d'après les données Corine Land Cover) échantillonnées aléatoirement en fonction de leurs caractéristiques topographiques.*Location of 200 forest pixels (from the Corine Land Cover data) sampled randomly according to their topographic characteristics.*

4 Résultats

4.1 Une productivité primaire moyenne dépendante des types de peuplement

Calculé à l'échelle du PNR, le NDVI intégré moyen (avril-octobre 1998-2009) des forêts du Vercors est de 4,77. Mais cette valeur varie significativement (test en T de Student) entre les trois principaux peuplements, de 4,40 pour les forêts de conifères, 4,84 pour les forêts mixtes à 4,88 pour les forêts de feuillus (figure 5). Ces résultats expriment la réflectance inférieure des résineux par rapport à celle des feuillus, du fait de la différence fondamentale de leur structure et phénologie de la masse foliaire (épines et feuilles), notamment la plus grande sensibilité dans le proche infrarouge des limbes caducifoliés. L'analyse spatiale du $NDVI_{int}$ indique que les forêts situées approximativement au sud d'une ligne entre Léoncel (44°54'N/5°11'E) et Saint-Guillaume (44°57'N/5°35'E) possèdent des valeurs plus faibles que celles situées au nord, notamment la partie nord-ouest du massif du Vercors (figure 5a). Cette zone occidentale exposée au flux humide d'ouest est composée essentiellement de forêts de feuillus et de forêts mixtes. Toutefois, les hêtraies-sapinières et sapinières (sans épicéa) dans le secteur des Quatre Montagnes (N-NE du PNR) enregistrent un $NDVI_{int}$ tout aussi élevé. Les forêts de feuillus dans le secteur de Gigors-et-Lozeron et Omblèze, au sud-ouest, et les forêts mélangées vers Glandage, au sud-est, forment des îlots, avec des valeurs supérieures à 4,88. La faible productivité primaire observée à l'est de la Réserve ($NDVI_{int} < 3$) correspond à la bordure orientale couverte de pelouses alpines et/ou rocheuse du massif du Vercors. Cependant, en moyenne, le $NDVI_{int}$ est assez peu corrélé à l'altitude des forêts, avec un coefficient de corrélation de -0,20 (et un seuil de signification à 95%). On observe par ailleurs la forte variabilité saisonnière et interannuelle du $NDVI_{int}$ des conifères, alors que forêts de feuillus et forêts mixtes enregistrent des comportements assez proches (figure 5b). Cette plus grande variabilité photosynthétique peut être due à des causes naturelles, mais aussi surement en partie au rôle de la topographie et des états de surface d'altitude occupés par les conifères (versants, espaces enrochés,...).

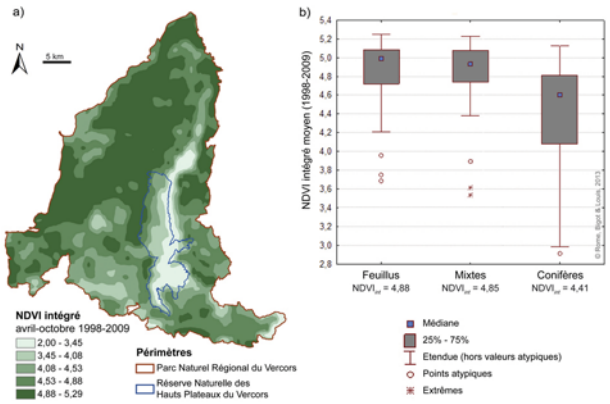


Figure 5 – a) NDVI intégré moyen (avril-octobre 1998-2009) à l'échelle du PNR du Vercors ; b) caractéristiques statistiques du NDVI selon les trois grands types de peuplement forestier. *Average integrated NDVI (April-October 1998-2009) of the Vercors Regional Park ; b) statistical characteristics of NDVI values according to three major forest types.*

4.2 Quelles phénologies saisonnières moyennes ?

Le cycle annuel moyen de la phénologie végétale, tel qu'il peut être synthétisé grâce à la télédétection satellitaire, se caractérise par quatre grandes transitions remarquables (Zhang *et al.*, 2003) : 1) le démarrage de l'activité photosynthétique ('greenup'), que l'on peut approximativement associer à la notion écologique de débourrement ; 2) la maturité, période à laquelle l'activité foliaire et/ou herbacée est maximale d'un point de vue chlorophyllien ; 3) la sénescence, date à partir de laquelle l'activité photosynthétique diminue rapidement ; 4) la dormance, phase à partir de laquelle l'activité physiologique est très faible (et les valeurs de NDVI basses). A l'échelle d'un domaine de montagne et, dans le cadre de l'interprétation de ces phénophases grâce aux variations du NDVI, il faut particulièrement faire attention au début et à la fin du cycle, car l'enneigement précoce et/ou tardif peut très sensiblement perturber le calcul des indices de végétation. Il faut dans ce cas utiliser d'autres indices néocanaux adaptés (Bigot et Rome, 2008), et essayer de croiser les signaux liés à la fusion nivale et ceux propres à l'activité végétale (l'idéal étant d'avoir une validation *in situ* en parallèle). Pour ce travail sur le Vercors, l'interprétation des cycles végétatifs déterminés via le NDVI tiendra donc particulièrement compte de cet artefact possible, surtout pour les mois d'avril et octobre. Par ailleurs, à l'échelle régionale, les variations complexes de la composition arborée spécifique ainsi que celles de la densité de couverture (à la suite d'interventions sylvicoles), conjuguées aux contrastes topoclimatiques et pédologiques, peuvent expliquer qu'une même espèce arborée enregistre différents modes de croissance et de sénescence saisonnière, même s'il sera très difficile de le discerner à partir du NDVI possédant une résolution spatiale kilométrique (Zhang *et al.*, 2003).

Les variations du NDVI mensuel moyen indiquent que la saison de végétation des forêts du Vercors dure environ 6 mois ; elle commence pour l'ensemble des formations forestières au mois d'avril (durant la deuxième décade), avec la fin de l'hiver thermique et le débourrement des arbres, les températures moyennes étant par exemple à nouveau supérieures à 6°C au-dessus de 1000 m d'altitude (figure 6). Cette période enregistre cependant des écarts interannuels importants, déterminés par les variations thermiques printanières et la fusion nivale. Cette alternance thermique entre les températures froides hivernales et clémentes printanières, plus ou moins rapide et décalée dans le temps d'une année à l'autre, conjuguée à l'allongement de la photopériode, jouent un rôle majeur sur la date de réalisation de la levée de dormance et de la mise en place des feuilles (Lebourgeoix et Godfroy, 2006). C'est particulièrement vérifié pour certains feuillus et les résineux pour lesquels la température agirait clairement sur le débourrement.

On observe par exemple des coefficients de variation mensuels de l'ordre de 19% pour l'étage montagnard (forêts des Quatre montagnes, hêtraie-sapinière de Lente, Réserve des Hauts Plateaux), le gradient altitudinal restant le principal facteur de variation du NDVI en avril (figure 7). Le NDVI moyen des forêts du Vercors est en fait significativement corrélé à la variable altitudinale durant les mois de mars (R = -0,58), avril (R = -0,67) et mai (R = -0,49), mais pas durant l'été (JJA), quand la foliation homogénéise les valeurs. Aucune corrélation significative n'est par ailleurs trouvée avec la pente ou l'exposition topographique.

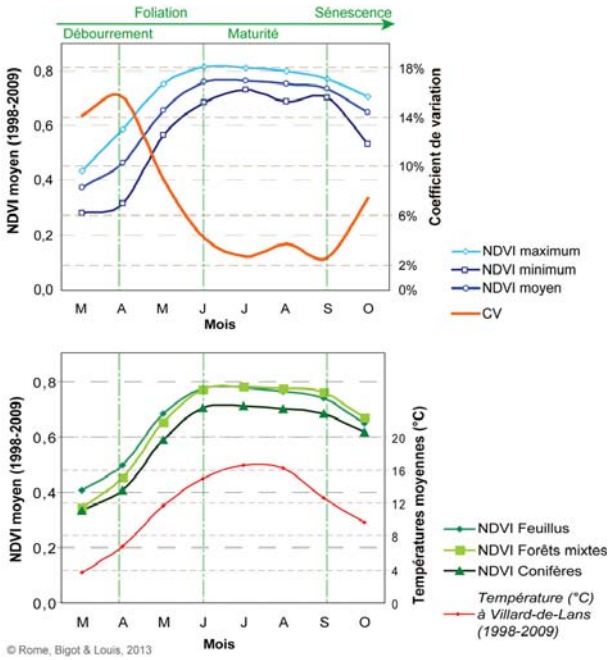


Figure 6 – Variations moyennes du NDVI des forêts du Vercors entre mars et octobre (1998-2009) : a) principales caractéristiques statistiques ; b) distinction entre les trois grands types de peuplements forestiers (la température mensuelle moyenne à la station de Villard-de-Lans est également ajoutée). Les principales phénophases forestières sont indiquées par des traits verticaux. *Temporal average NDVI variations of the Vercors forests between March and October (1998-2009) : a) main statistical characteristics ; b) differences between three major types of forest (the monthly average temperature of Villard-de-Lans is also indicated). The mean timing of forest phenophases are indicated by vertical lines.*

L'activité photosynthétique croît ensuite jusqu'en juin (2^{e}décade), et se stabilise pendant les deux mois suivants, traduisant la phase de maturité saisonnière des forêts et le maximum de la phase chlorophyllienne liée à la foliation (figures 6 et 7). Entre juin et août, les valeurs moyennes du NDVI des feuillus et des forêts mixtes se confondent, les valeurs des conifères demeurant inférieures. Alors que les températures moyennes ont déjà significativement baissé entre août et septembre (passant par exemple d'environ 16°C à 12°C à Villard-de-Lans, située à 1025 m d'altitude), le NDVI reste relativement stable (0,73 contre 0,77 en juillet). Ce n'est qu'à la première décade d'octobre qu'on observe un seuil véritable (avec un coefficient de variation de 18%), caractéristique du jaunissement automnal des feuilles et aboutissant à des valeurs de NDVI arborées relativement similaires, indépendamment des formations (figure 7).

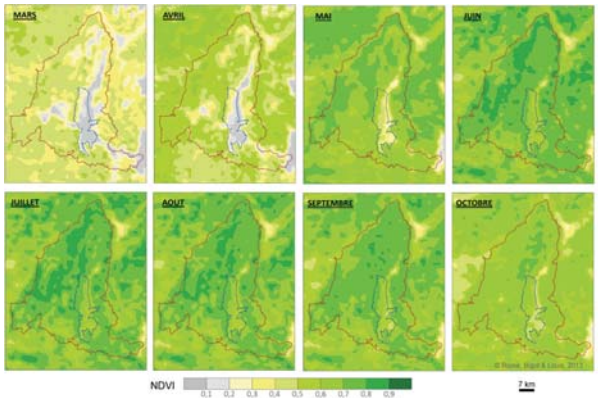


Figure 7 – Valeurs du NDVI mensuel moyen (1998-2009) calculées de mars à octobre à l'échelle du Vercors (les limites du PNR sont indiquées en rouge, celles de la Réserve Naturelle en bleu). *NDVI monthly average (1998-2009) calculated between March and October at Vercors scale (the limits of the National Park are indicated in red, those of the Nature Reserve are in blue).*

4.3 Une forte variabilité interannuelle du NDVI

L'activité chlorophyllienne des forêts du Vercors enregistre des variations significatives sur la période d'étude, oscillant autour de la valeur saisonnière moyenne du $NDVI_{int}$ de 4,71, avec des écarts négatifs en 1998, 1999, 2002 et surtout 2004, et des écarts positifs en 2000, 2003, 2006, 2007 et 2009 (figure 8). Les années 2001, 2005 et 2008 sont proches des valeurs normales sur l'échantillon SPOT étudié (1998-2009). L'étude spécifique des variations interannuelles lors des mois d'avril, juillet et octobre, mois caractéristiques des trois principales phénophases observées auparavant, permet de préciser la cartographie à l'échelle du massif du Vercors (figure 9). En avril, tous milieux végétalisés confondus, les coefficients de variation du NDVI moyen varient entre 5 et 170%, les plus fortes valeurs correspondant aux espaces de prairies et de pelouses préalpines (figure 9a). Mais en zones forestières, le coefficient de variation moyen du NDVI est seulement de 19% (figure 6a). Pour ces espaces, les amplitudes interannuelles les plus importantes (CV $>$ 17%) s'observent dans l'étage montagnard, au-dessus de 900 m d'altitude, indiquant bien à nouveau que l'altitude est le déterminant principal des variations photosynthétiques à cette période, en relation avec la couverture nivale et l'accumulation de degrés-jours pour la fin de dormance de la végétation. A l'inverse, les forêts de feuillus situées à l'ouest du massif ainsi que tout le domaine au sud enregistrent des valeurs inférieures à 18%. En juillet, l'amplitude des coefficients de variation interannuels demeure élevée (entre 2 et 150%), mais les valeurs sont en revanche très faibles sur l'ensemble forestier du parc, avec des valeurs moyennes proches de 5%, en dehors de quelques exceptions comme la partie sud-est de la forêt de la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors (figure 9b). Mais cette particularité des plateaux est surement due aussi au mélange forêt/pelouse que la résolution spatiale kilométrique de SPOT-VGT ne permet pas ici de discriminer de manière fine. Les fortes variations estivales sont donc plutôt associées aux zones agricoles, aux espaces urbanisés ou encore à des pelouses et pâturages naturels, révélant la grande variabilité bioclimatique interannuelle de la végétation herbacée. A l'échelle du parc, les coefficients de variation s'étalent de 3 à 190% en octobre, et ils sont en moyenne de 9% pour les espaces forestiers. On distingue pour ce mois une relative opposition entre nord et sud, avec les valeurs les plus élevées dans la partie méridionale, notamment les forêts de Lus-la-Croix-Haute, du Diois et du sud de la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux (figure 9c).

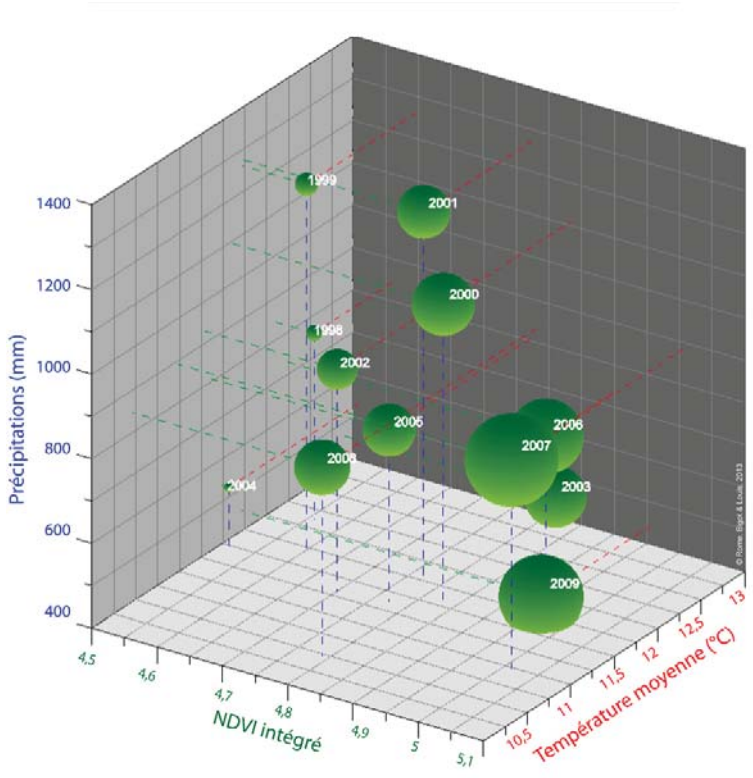


Figure 8 – Ecarts à la moyenne du NDVI intégré calculés entre avril et octobre (1998-2009) pour l'ensemble des espaces forestiers du Vercors. *Standard deviation of the integrated NDVI calculated between April and October (1998-2009) for the forest areas of Vercors.*

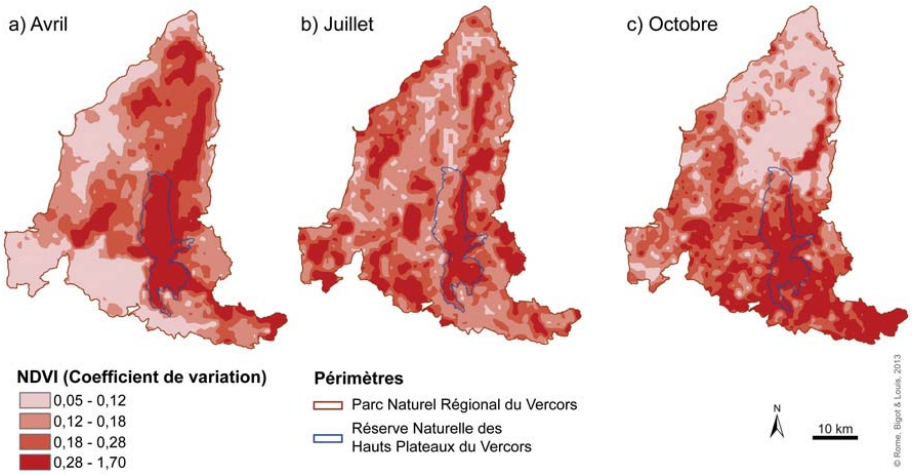


FIGURE 9 – Coefficients de variation mensuels du NDVI (selon la méthode des quantiles, calculés sur la période 1998-2009) : a) en avril ; b) en juillet ; c) en octobre.*Figure 9 : Monthly NDVI coefficients of variation (using the quantile method, calculated over the 1998-2009 period) : a) for April ; b) for July ; c) for October.*

L'étude de la variabilité interannuelle de l'activité photosynthétique en fonction des trois grands types de peuplement complète cette approche cartographique (figure 10). Confirmant la distinction fondamentale des signatures NDVI entre d'une part les forêts de feuillus et forêts mixtes et, d'autre part, les forêts de conifères, leurs coefficients de variation calculés sur le $NDVI_{int}$ sont pourtant similaires (proche de 3,3%), et les variations interannuelles identiques. Ainsi, l'ensemble des espaces forestiers enregistre les mêmes années avec un $NDVI_{int}$ anormalement bas (1999 et 2004) ou élevé (2007 et 2009). Plus généralement, indépendamment du type de peuplement forestier, et si on ne tient pas compte des années atypiques 2004 et 2007, la productivité végétale traduite grâce au $NDVI_{int}$ augmente sur l'ensemble de la période d'étude (figure 10), ce qu'il est peut-être possible de mettre en relation avec la tendance thermique à la hausse observée régionalement depuis la fin des années 1980 (Rome *et al.*, 2009).

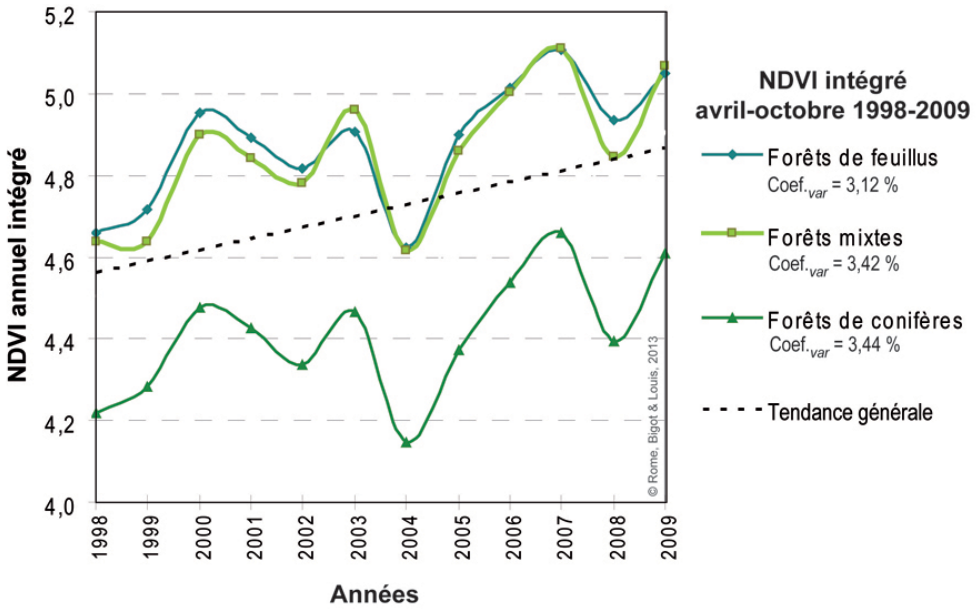


FIGURE 10 – Variabilité du NDVI intégré (avril à octobre) entre 1998 et 2009 selon les trois principaux types de forêts du Vercors. *Temporal variability of the average integrated NDVI (April-October) between 1998 and 2009 according to the three major types of Vercors forests.*

Le $NDVI_{int}$ des forêts de feuillus est généralement supérieur ou proche de celui des forêts mixtes, à l'exception de l'année 2003 durant laquelle on observe l'inverse. Cet élément semble indiquer que la productivité foliaire des forêts de feuillus a été davantage touchée régionalement par la période chaude (voire caniculaire) observée dès juin 2003 que les forêts mixtes. Cette année est également sèche, de même que 2004 et 2009 (année la

plus sèche de la période d'étude). Ainsi, à la station météorologique de référence de Villard-de-Lans, les cumuls pluviométriques de la période végétative (avril à octobre) avoisinent 1000 mm lors des quatre années humides 1998-2001, contre seulement 630 mm les années sèches (2003, 2004, 2006, 2007), et même plus que seulement 400 mm en 2009, année la plus sèche (avec également 1989) depuis l'ouverture de la station météorologique en 1959.

Année la plus fraîche (en degrés-jour cumulés) de la période d'étude, 2008 enregistre une nette baisse du NDVI, avec à nouveau une nette distinction des valeurs du NDVint des forêts de feuillus et des forêts mixtes (figure 10). D'un point de vue pluviométrique, les cumuls enregistrés sont pourtant proches de la moyenne 1959-2009, avec environ 800 mm reçus durant la saison végétative. Cela rappelle donc que la température est la principale variable écologique qui gouverne la croissance foliaire arborée (Chuine, 2000 ; Schaber et Badeck, 2003). En tenant compte de la variable altitudinale à l'échelle du Vercors, on observe un contraste entre les basses (400-800 m) et les hautes altitudes (1100-1500 m). Alors que les corrélations du NDVI avec les variations pluvio-thermiques absolues sont faibles pour le niveau le plus bas, elles sont à l'inverse très significatives au niveau altimétrique supérieur, expliquant 70% de la variance de l'activité photosynthétique du printemps et de l'été.

4.4 La variabilité spatio-temporelle du NDVI lors d'années climatiques extrêmes

Afin de détailler la variabilité intra-saisonnière du NDVI des formations forestières du Vercors, en tenant compte des spécificités climatiques antécédentes et synchrones, une analyse particulière des années 2004 ($NDVI_{int}$ minimum) et 2007 ($NDVI_{int}$ maximum) est menée. Elle repose surtout sur deux Classifications Ascendantes Hiérarchiques (CAH) calculées, pour chaque année, sur les valeurs du NDVI des 200 pixels forestiers représentatifs à l'échelle du PNR du Vercors (figure 4 et tableau 1).

Classes	Altitude moyenne (m)		Nombre de pixels		Pixels (en%)	
	2004	2007	2004	2007	2004	2007
1	1123	1063	146	102	73	51
2	769	1052	36	83	18	41,5
3	1474	1444	18	15	9	7,5

Tableau 1 – Principales caractéristiques des trois classes calculées par Classification Ascendante Hiérarchique sur les 200 pixels forestiers échantillonnés aléatoirement. *Main characteristics of the three classes calculated by Ascending Hierarchical Classification on 200 forest pixels sampled randomly.*

4.4.1 Une baisse exceptionnelle du NDVI : le cas de l'année 2004

Tous peuplements forestiers confondus, le NDVI intégré durant l'été 2004 est très inférieur à la moyenne 1998-2009 dans le PNR du Vercors, avec une valeur de 4,52 contre 4,77. Mais le NDVI saisonnier des forêts du Vercors diffère nettement selon l'altitude, à des seuils correspondant aux étages collinéen ainsi que montagnard inférieur et supérieur (figure 11). Le NDVI moyen des classes correspondant aux altitudes les plus élevées (classes 1 et 3 ; tableau 1) augmente rapidement en mai, avec une signature bimodale en juin et en septembre ; la diminution des valeurs est ensuite rapide dès octobre. Cette chronologie est surtout valable pour les forêts du nord et du centre du Vercors (altitude moyenne : 1123 m) et de la réserve, sur la bordure Est du massif du Vercors (altitude moyenne : 1474 m). Le profil saisonnier associé à la seconde classe correspond en revanche à un NDVI déjà élevé en début de saison de végétation, qui croît doucement jusqu'en juin. Il se comporte ensuite de la même manière que les deux autres classes, avec une légère baisse d'activité photosynthétique en juillet et août. Il s'agit ici essentiellement des forêts situées au sud du massif (Diois et Gervanne), à une altitude assez faible (769 m en moyenne) typique des étages collinéen et supra méditerranéen.

Cela semble donc indiquer qu'en 2004, l'activité chlorophyllienne à basse altitude est plus intense en début de saison par rapport à celles situées en altitude, mais que comparativement, la dynamique saisonnière a été globalement plus intense dans l'étage montagnard forestier. L'impact écologique décalé de l'épisode chaud et relativement sec de 2003 est ici essentiel pour interpréter la réponse phénologique du printemps et de l'été 2004, dans une logique de résilience de la végétation après ce stress thermo-pluviométrique très significatif, l'anomalie chaude observée à l'échelle nationale étant par exemple de +4,8°C par rapport à la moyenne 1961-90 (source issue de Météo-France). Cette période très chaude s'observe également très bien à l'échelle régionale, avec des températures diurnes stables de 27-29C entre juin et août 2003, à plus de 1000 m d'altitude, alors qu'on

retombe à 22-24°C l'été suivant (figure 12). Mais c'est surtout cet épisode stressant, cumulé à la sécheresse du printemps-été 2004, qui explique la baisse de productivité végétale observée dans le Vercors.

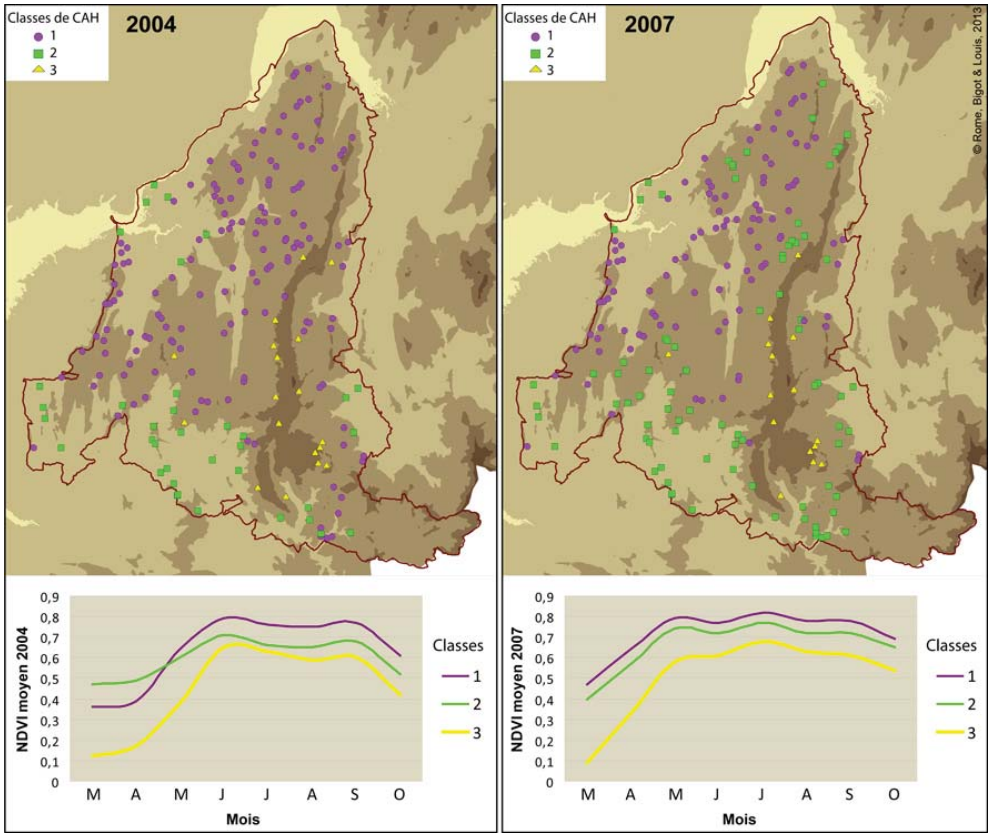


Figure 11 – Résultats d'une classification statistique automatique (de type Classification Hiérarchique Ascendante) en trois classes calculée sur le NDVI de 200 pixels forestiers du PNR du Vercors pour les saisons de végétation active 2004 (année de faible activité photosynthétique) et 2007 (année de forte activité photosynthétique) : en haut, les cartes des classes pour chaque année ; en bas, les phases annuelles moyennes correspondantes, entre mars et octobre ; le dégradé de marron correspond aux quatre étages altimétriques : collinéen (200-900 m), montagnard (900-1600 m), subalpin (1600-2100 m) et alpin (> 2100 m).*Results of a statistical classification (Ascending Hierarchical Classification) in three classes calculated on the NDVI of 200 forest pixels at the Vercors Regional Park scale in 2004 (year of weak regional photosynthetic activity) and in 2007 (year of strong photosynthetic activity) : at the top, map of different classes for 2004 and 2007 ; at the bottom, seasonal timing of the NDVI between March and October for the three statistical classes. The color gradation corresponds to the four vegetation mountain zonations : plains and low mountains (200-900 m), middle mountains (900-1600 m), subalpine (1600-2100 m) and alpine (> 2100m).*

4.4.2 Une forte augmentation du NDVI : le cas de l'année 2007

La situation climatique de 2007 est donc radicalement différente de celle observée en 2003, surtout si on compare les deux printemps (figure 13). En 2007, l'activité photosynthétique montre un débourrement précoce dès fin mars, qu'il faut mettre en relation avec la période octobre 2006 - avril 2007 anormalement douce à l'échelle de toute la France (de 4 à 5°C au-dessus de la normale dans les Préalpes), avec seulement deux courts épisodes froids (i.e.<0°C) fin janvier et mi-mars. Janvier 2007 est d'ailleurs le troisième mois de janvier le plus chaud enregistré en France depuis 1900. La fin de la saison hivernale correspond aussi à un mois d'avril défini par Météo-France comme le plus chaud observé depuis 1900. L'enneigement de l'hiver 2006-2007 est finalement l'un des plus faibles enregistrés depuis 1960 dans les Alpes (d'après le référentiel nivologique de Météo-France situé au Col de Porte, dans le massif de la Chartreuse), avec une limite pluie-neige située au-dessus de 2000 m d'altitude. Le Vercors enregistre alors des précipitations conséquentes (221 mm à Villard-de-Lans) en février-mars (figure 12). La pluviométrie du mois de mai enregistre des valeurs très anormalement élevées, avec par exemple 217 mm à Villard-de-Lans (figure 12), les excédents allant de 50 à 100% au-dessus de la normale dans le Vercors (figure 13). Le printemps 2007 a finalement été le plus chaud depuis 130 ans dans la région grenobloise (source : Météo-France).

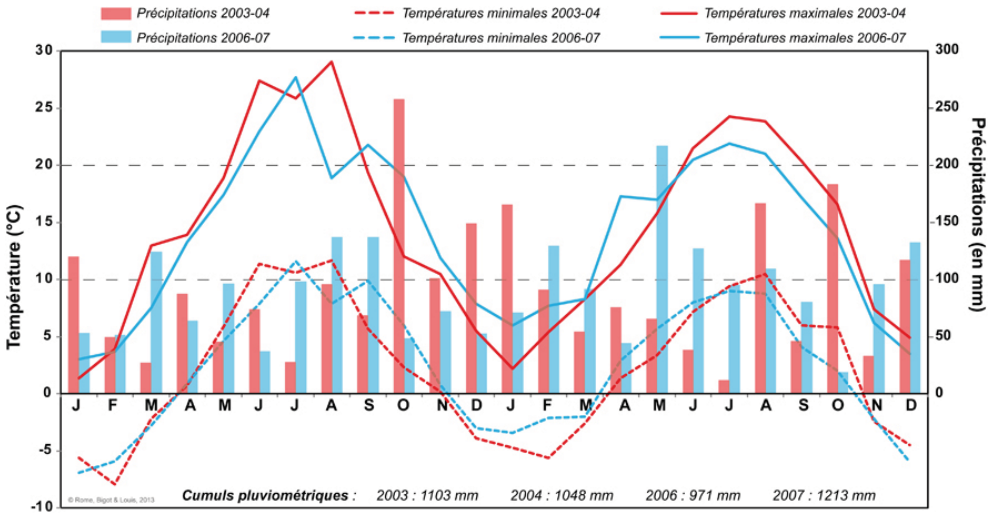


FIGURE 12 – Variations pluvio-thermiques mensuelles moyennes à la station de Villard-de-Lans sur les périodes janvier 2003-décembre 2004 (en rouge) et janvier 2006-décembre 2007 (en bleu) ; les cumuls pluviométriques sont indiqués en histogramme ; les températures minimales moyennes (Tn) en pointillés et les températures maximales moyennes en trait continu (source des données : Météo-France). *Average monthly rainfall and temperature variations for Villard-de-Lans over the periods January, 2003 - December, 2004 (in red) and January, 2006 - December, 2007 (in blue) ; the rainfall amounts are indicated with histogram, the minimal average temperatures in dotted lines and the average maximal temperatures in line (source of data : Météo-France).*

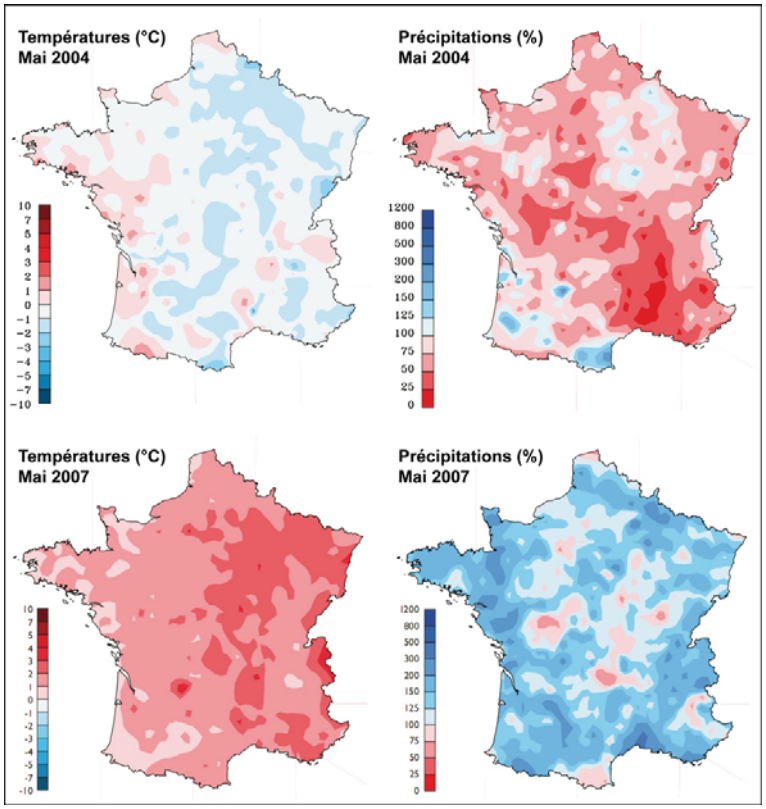


FIGURE 13 – Ecarts à la normale climatique enregistrés en France métropolitaine en mai 2004 (cartes du haut) et mai 2007 (cartes du bas) pour : a) les températures (à gauche ; en °C), b) les précipitations (à droite ; en pourcentages) ; adaptés d'après les Bulletins Climatiques 2004 et 2007 de Météo-France. *Climate anomalies observed in Metropolitan France in May, 2004 (the top maps) and in May, 2007 (the bottom maps) for : a) the temperatures (to the left ; in °C), b) the precipitation (to the right ; in percentages) ; adapted according to the Climatic Bulletins of 2004 and 2007 of Météo-France.*

Le NDVI du mois de mai est donc anormalement élevé par rapport à la période 1998-2009, avec une valeur proche de 0,70 pour les classes forestières d'altitude qui concernent 92,5% des pixels étudiés (figure 10 et tableau 1). Le NDVI estival se stabilise en juin-juillet, avant de décroitre légèrement à partir du mois d'août. On observe que la classification statistique discrimine une classe forestière (classe 2) intégrant à la fois le domaine méridional du Vercors et l'étage montagnard supérieur à l'est, la classe 1 de la CAH correspondant donc plus à l'étage montagnard inférieur, essentiellement le domaine exposé aux flux atmosphériques (et aux précipitations) de nord-ouest. Les forêts liées à la classe 3 ont un NDVI très inférieur à celles des deux autres classes, révélant le comportement singulier des forêts de l'étage montagnard supérieur (> 1400 m).

5 Discussion

Les résultats obtenus grâce à l'analyse du NDVI SPOT-VGT sur la période 1998-2009 confirment certaines observations régionales du RENECOFOR (*Réseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers*), en particulier l'établissement des principales phénophases arborées (Lebourgeois et Godfroy, 2006).

Les périodicités moyennes retranscrites grâce aux données NDVI coïncident avec les observations *in situ* du RENECOFOR, par exemple un débourrement entre le 22 et le 30 avril pour le hêtre (*Fagus sylvatica*), mais plutôt relevé seulement début mai dans les forêts drômoises, au sud du Vercors. Ce démarrage est également plus tardif pour les résineux (2-12 mai pour le pin sylvestre, 10-19 mai pour l'épicéa commun et 11-21 pour le sapin pectiné). Le jaunissement automnal du hêtre est enregistré entre le 3 et le 19 octobre. La durée moyenne de la saison de végétation de cette espèce est donc régionalement d'environ 179 jours, mais seulement de 149 jours lorsqu'il y a une influence prépondérante de l'altitude (par exemple au-dessus de 1300 m dans le Vercors). Les résultats obtenus à partir du NDVI pour les différents peuplements arborés cernent une durée allant de 16 à 18 décades, ce qui est donc totalement cohérent.

La phase saisonnière moyenne des formations arborées du Vercors est également proche de celles observées grâce aux données NOAA/AVHRR (1989-1994) par Duchemin *et al.* (1999) sur trois échantillons de forêts tempérées françaises monospécifiques. Les résultats obtenus ici sur les Préalpes indiquent cependant le rôle déterminant de l'altitude à l'échelle interannuelle. Ainsi, les typologies réalisées à partir d'un échantillon représentatif de 200 pixels forestiers révèlent bien les comportements typiques des trois grandes formations arborées (feuillus, forêts mixtes et conifères) en fonction de l'altitude et, moindrement, de l'exposition. La distinction entre les forêts du nord du Vercors, sous influence dominante du climat tempéré océanique et celles de l'extrême sud du massif (Gervanne et Diois) sous influence du climat de type méditerranéen, est apparente, aussi bien en année de forte activité photosynthétique (2007) qu'en année de faible activité (2004). L'étage montagnard (altitude > 1500 m) se distingue également par un comportement différent sur les hauts plateaux du Vercors lié à la prédominance de conifères (pins à crochet, épicéas, sapins). Rome *et al.* (2009) indiquent que c'est la circulation anticyclonique de nord-ouest qui occasionne le plus grand nombre de jours chauds extrêmes sur le Vercors, les circulations cycloniques d'ouest ou de sud-ouest beaucoup moins fréquentes, occasionnent cependant aussi régionalement les journées les plus chaudes en moyenne ($>+20$C). Finalement, les circulations de sud, contrairement à ce qui l'on pourrait intuitivement attendre, sont peu liées à des extrêmes thermiques dans le Vercors. Mais dans le contexte de l'évolution interannuelle de la fréquence et de l'intensité de ces circulations sur l'Europe, observée depuis plusieurs décennies, leurs influences bioclimatiques devraient sûrement évoluer très sensiblement, ce dont il faudra tenir compte dans les prochaines phases d'analyse éco-climatiques.

Plus largement, les résultats à partir du NDVI indiquent une grande variabilité spatio-temporelle de la phénologie du Vercors, les réponses bioclimatiques asynchrones de l'activité végétale étant complexes à interpréter et très variables dans ce domaine préalpin soumis à de multiples influences topoclimatiques dépendantes du contexte synoptique (circulation générale atmosphérique) et de la mosaïque topographique. De même, quoique discernable dans l'étude des phénophases, il demeure difficile de quantifier précisément l'influence écologique décalée dans le temps d'évènements climatiques extrêmes, à l'image de l'épisode de 2003 (rôle du stress hydrique, de la dessiccation arborée, des atteintes phyto-sanitaires, ...). Le NDVI (i.e. la productivité végétale) dépend en effet aussi bien des conditions pluvio-thermiques du début de la saison végétative que des contraintes climatiques de la saison estivale et hivernale précédente. A l'échelle du Vercors et en fonction de la période d'étude 1998-2009, on peut considérer (statistiquement) que l'épisode de l'été 2003 se caractérise par une diminution d'au moins 15% du NDVI (donc de la croissance végétale), le poids de son 'effet-mémoire' participant à la baisse de 5% observée en 2004. Mais une analyse écologique, fondée sur des modèles de productivité primaire, devrait évidemment venir confirmer et préciser ces résultats purement analytiques.

Cette grande variété de réponses complique d'ailleurs fondamentalement la perspective de simulations numériques des processus physiques tenant compte de l'impact de tels évènements climatiques stressants pour la végétation, la réponse spatiale attendue étant peu uniforme (Beniston, 2004 ; Fischer *et al.*, 2007). Les travaux de modélisation indiquent que les conséquences d'évènements chauds extrêmes dépendent essentiellement des espèces (Gottfried *et al.*, 1999 ; Jonas *et al.*, 2008) et de la fragmentation des niches écologiques (Luque, 2000). D'un point de vue méthodologique, le suivi phénologique par satellite en milieu de montagne a actuellement recourt à plusieurs types d'indices de végétation qui peuvent amener une diversité des diagnostics. Mais c'est surtout l'utilisation de différentes formulations dans l'estimation de la phase de démarrage de la végétation, en lien avec la dynamique nivale, qui peut apporter des résultats pas toujours convergents (White *et al.*, 2009).

Par ailleurs, le diagnostic détaillé, grâce au NDVI, des modifications environnementales liées au changement climatique observé régionalement est encore difficile. A l'échelle du PNR du Vercors, la corrélation observée entre la hausse des températures atmosphériques et l'augmentation du NDVI intégré semble indiquer un bénéfice pour la production foliaire arborée, à condition de ne pas dépasser un 'optimum physiologique thermique', confirmant les résultats d'écologues (Myneni *et al.*, 1997 ; Gottfried *et al.*, 1999). Ce seuil peut par exemple être quantifié à 30C pour la masse foliaire des conifères, signifiant donc que l'air doit atteindre une température supérieure (Spurr et Barnes, 1980). En outre, le facteur limitant des précipitations peut contrebalancer cette boucle de rétroactions positives.

Cependant, si l'on considère le climat des Préalpes françaises, et notamment du Vercors, au cours des 50 dernières années (Bigot et Rome, 2008 ; Bigot et Rome, 2010), plusieurs changements pluvio-thermiques significatifs sont apparents, le plus évident étant la rupture de stationnarité postérieure à 1988, accompagnée d'une modification des amplitudes thermiques et d'un réchauffement à la fois hivernal et estival. Cela se traduit en particulier par une diminution de l'amplitude thermique quotidienne, particulièrement entre début mars et fin octobre, mais aussi par un printemps plus précoce et un hiver plus tardif. En moyenne montagne, la conséquence est une réduction de la durée moyenne de l'enneigement de plus d'un mois depuis la décennie 1970. Ces éléments pourraient donc signifier une meilleure capacité de croissance végétale aux hautes altitudes (Körner et Paulsen 2004), alors qu'elle serait au contraire désavantagée aux plus basses altitudes à cause des conditions éco-climatiques désormais beaucoup plus sèches (Barr *et al.*, 2002). Jolly *et al.* (2005) aboutissent aux mêmes conclusions à partir de l'exemple des Alpes suisses et de l'étude de l'épisode de 2003. Mais il faut aussi tenir compte du fait que si ce réchauffement des températures modifie la durée de la saison de végétation (et sa productivité), les modifications phénologiques peuvent aussi rendre certains peuplements forestiers plus sensibles aux gelées tardives et/ou au déficit hydrique de début de saison. Enfin, de nombreuses espèces semblent déjà avoir commencé à s'adapter physiologiquement aux changements de fréquence et d'intensité intra- et interannuelle de stress bioclimatiques (Parmesan, 2006 ; Cleland *et al.*, 2007 ; Jonas *et al.*, 2008). Gottfried *et al.* (1999) suggèrent cependant que ce sont les pelouses alpines qui seront vraisemblablement favorisées par le réchauffement climatique, augmentant leur production de biomasse. Les conclusions actuelles sur les conifères et les feuillus sont beaucoup plus mitigées, leur sensibilité et capacité d'adaptation variant énormément en fonction des peuplements de montagne.

6 Conclusions et perspectives

Ce travail descriptif général contribue à l'étude de l'activité photosynthétique des forêts des Préalpes françaises, à partir de l'exemple du Vercors, sur la période d'avril à octobre 1998-2009, grâce aux données décadaires du NDVI issues de SPOT-VGT à une résolution de 1 km^2, ainsi qu'aux données d'occupation du sol CORINE Land Cover qui permettent de préciser les différentes surfaces forestières. Les résultats à partir de la télédétection indiquent que la saison de végétation dure en moyenne six mois à cette altitude montagnarde, d'avril à octobre, avec une dépendance des signatures des couverts forestiers vis-à-vis de l'altitude. Le gradient altitudinal est ainsi le principal facteur de la variation du NDVI en avril, en début de saison de végétation, alors qu'il est moins déterminant en été. Sur la période d'étude, l'analyse révèle aussi une tendance générale à la hausse du NDVI saisonnier intégré, pouvant indiquer une augmentation de la productivité foliaire des espèces arborées, en lien avec une augmentation concomitante des températures. Mais plusieurs épisodes atypiques (par exemple 2004 et 2007) compliquent cependant singulièrement cette conclusion générale, les effets-mémoires venant largement brouiller les interactions et réactions écologiques asynchrones.

Pour préciser ce travail, notamment à partir d'indicateurs issus de la télédétection satellitaire, les analyses doivent maintenant être complétées grâce aux données du capteur MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) embarqué à bord du satellite Terra, et disponibles sur la période 2000-2010. Ces données permettront d'une part, d'établir un diagnostic spatial plus précis grâce à une résolution de 250 m, mais aussi d'autre part,

de déterminer une mesure du LAI (Leaf Area Index), indicateur foliaire mieux adapté aux milieux forestiers que le seul NDVI. Cependant, comme l'indiquent très justement Wang *et al.* (2004), une interprétation précise des impacts de variations climatiques sur la végétation doit s'appuyer sur une calibration et une validation à partir de données in situ. En conséquence, plusieurs expérimentations de terrain sont en cours depuis fin 2009 dans le Vercors (mesure de la teneur en eau du sol à plusieurs niveaux, installation de radiomètres de terrain mesurant le NDVI de parcelles tests, suivi thermographique de domaine de prairie et de forêt, suivi photographique pluri-quotidien des phénophases et de l'enneigement, ...), mais qu'il n'est pas encore possible de valoriser actuellement, faute d'avoir au moins trois ou quatre saisons de végétation à comparer.

Remerciements : Les auteurs remercient le centre VITO pour l'obtention des données NDVI, ainsi que le Parc Naturel Régional du Vercors et la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors pour leur collaboration, en particulier Pierre-Eymard Biron, Conservateur de la Réserve. Ces recherches sont conduites dans le cadre de la Zone Atelier Alpes (CNRS-INEE), membre du réseau ILTER-Europe (publication ZAA2011-13).

7 Références Bibliographiques

Agence Européenne de l'Environnement (2007) CLC2006 technical guidelines. EEA Technical report, No. 17/2007, EEA, Copenhagen, 66 pp. Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P. D., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z. and Nieplova E. (2007) HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *Int. J. Climatol.*, No. 27, p. 17-46.

Baldi, G., Nosetto, M. D., Aragón, R., Aversa, F. Paruelo, J. M. and Jobbágy, E. G. (2008) Long-term satellite NDVI data sets : evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in South America. *Sensors*, No. 8, p. 5397-5424.

Barr, A. G., Griffis, T. J., Black, T. A., Lee, X., Staebler, R. M., Fuentes, J. D., Chen, Z. and Morgenstern, K. (2002) Comparing the carbon budgets of boreal and temperate deciduous forest stands. Can. J. For. Res., No.32(5), p. 813-822.

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. et Palutikof, J. P. (Eds) (2008) Le changement climatique et l'eau. Document technique VI publié par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.

Beniston, M. (2004) The 2003 heat wave in Europe : A shape of things to come ? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, No. 3, p. 1-4.

Beniston, M. (2005) Mountain Climates and Climatic Change. An Overview of Processes focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics*, No. 162, p. 1587-1606.

Bigot, S. (2004) *Variabilité climatique, interactions et modifications environnementales – L'exemple de la Côte d'Ivoire*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, 399 pp.

Bigot, S. et Rome, S. (2008) Etude des variations climatiques récentes dans les Préalpes françaises : le cas du Vercors. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, No.51, p. 63-77.

Bigot, S. et Rome, S. (2010). Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures ». *EchoGéo* [En ligne], No. 14, http ://echogeo.revues.org/12160.

Bigot, S., Rome, S. et Dedieu, J.-P. (2009) La variabilité interannuelle de l'enneigement dans les Préalpes françaises (massif du Vercors) : recherche de prédicteurs climatiques à l'échelle synoptique. *Geographica Technica*, special issue, p. 73-78.

Botta, A., Viovy, N., Ciais, P., Friedlingstein, P. and Monfray, P. (2000) A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data. *Global Change Biology*, No. 6(7), p. 709-725.

Cannone, N., Diolaiuti, G., Guglielmin, M. and Smiraglia, C. (2008) Accelerating climate change impacts on alpine glacier forefield ecosystems in the European Alps. *Ecological Applications*, No. 18, p. 637-648.

Casty, C., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J. and Böhm, R. (2005) Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *International Journal of Climatology*, No. 25(14), p. 1855-1880.

Chuine, I. (2000) A unified model for tree phenology. *Journal of Theoretical Biology*, No. 207, p. 337-347.

Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A. and Schwartz, M. D. (2007) Shifting plant phenology in response to global change. *TRENDS in Ecology and Evolution*, vol. 22, No. 7, p. 357-365.

Cooke, J. E. K. and Weih, M. (2005) Nitrogen storage and seasonal nitrogen cycling in Populus : Bridging molecular physiology and ecophysiology. *New Phytologist*, No. 167, p. 19-30.

Dirnbock, T., Dullinger, S. and Grabherr, G. (2003) A regional impact assessment of climate and land-use change on alpine vegetation. *Journal of Biogeography*, No. 30, p. 401-417.

Duchemin, B., Goubier, J. and Courrier, G. (1999) Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA/AVHRR data. *Remote Sens. Environ.*, No. 67, p. 68-82.

Durand, Y., Laternser, M., Giraud, G., Etchevers, P., Lesaffre, B. and Mérindol, L. (2009) Reanalysis of 44 years of climate in the French Alps (1958-2002) : methodology, model validation, climatology and trends for air temperature and precipitation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, No. 48, p. 429-449.

European Commission (2010) Green Paper : On Forest Protection and Information in the EU : Preparing forests for climate change. SEC(2010)163 final, European Commission, Brussels, 23 p.

FAO (2011) State of the World's Forests 2011. Food and Agriculture Organization of the United States, Rome, Italie, 164 p.

Fischer, E. M., Seneviatne, S. I., Vidale, P. L., Luthi, D. and Schar, C. (2007) Soil moisture-atmosphere interactions in the 2003 European heatwave. *Journal of Climate*, No. 20, p. 5081-5099.

Fontana, F., Rixen, C., Jonas, T., Aberegg, G. and Wunderle, S. (2008) Alpine grassland phenology as seen in AVHRR, VEGETATION, and MODIS NDVI time series - a comparison with in situ measurements. *Sensors*, No. 8, p. 2833-2853.

Gottfried, M., Pauli, H., Reiter, K. and Grabherr, G. (1999) A finescaled predictive model for changes in species distribution patterns of high mountain plants induced by climate warming. *Diversity and Distributions*, No. 5, p. 241-251.

Heimann, M., Esser, G., Haxeltine, A., Kaduk, J., Kicklighter, D. W. and Knorr, W. (1998) Evaluation of terrestrial Carbon Cycle models through simulations of the seasonal cycle of atmospheric CO2 : First results of a model intercomparison study. *Global Biogeochemical Cycles*, No. 12(1), p. 1-24.

Hogg, E. H., Price, D. T. and Black, T. A. (2000). Postulated feedbacks of deciduous forest phenology on seasonal climate patterns in the western Canadian interior. *Journal of Climate*, No. 13, p. 4229-4243.

Hountondji, Y-C., Sopkon, N. and Ozer, P. (2006) Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982-1999) for the monitoring of desertification. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, No. 5, p. 871-884.

Jolly, W. M., Nemani, R. and Running, S. W. (2005) A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biology*, No. 11(4), p. 619-632.

Jonas, T., Rixen, C., Sturm, M. and Stoeckli, V. (2008) How alpine plant growth is linked to snow cover and climate variability. *Journal of Geophysical Research*, No. 113, G03013, 10.

Körner, C. and Paulsen J. (2004) A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, vol. 31, No. 5, p. 713-732.

Krishna Prasad, V., Badarinath, K. V. S. and Eaturu, A. (2007) Spatial patterns of vegetation phenology metrics and related climatic controls of eight contrasting forest types in India – analysis from remote sensing datasets. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 89, No. 1-2, p. 95-107.

Lasaponara, R. (2006) On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series. *Ecological Modelling*, No. 194, p. 429-434.

Lebourgeois, F. et Godfroy, P. (2006) Analyse de la variabilité spatiale et temporelle et du déterminisme climatique de la phénologie des peuplements du Réseau National de Suivi à Long Terme des Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR). Rapport Scientifique Final, UMR LERBOB, ENGREF, septembre 2005, 43 pages.

Lebourgeois, F., Pierrat, J.-C., Perez, V., Piedallu, C., Cecchini, S. and Ulrich E. (2010) Simulating phenological shifts in French temperate forests under two climatic change scenarios and four driving global circulation models. *Int. J. Biometeorol.*, No.54, p. 563-581.

Luque, S. (2000) Evaluating temporal changes using Multi-Spectral Scanner and Thematic Mapper data on the landscape of a natural reserve : The New Jersey Pine Barrens, a case study. *International Journal of Remote Sensing*, No. 21(13-14), p. 2589-2611.

Maselli, F. (2004) Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, No. 89, p. 423-433.

Monteith, J. L. (1989) Reflection and review. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, *Biological Sciences*, vol. 324(1223), p. 433-436.

Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G. and Nemani, R. R. (1997) Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, No. 386, p. 698-702.

Opdam, P., Luque, S. and Jones, K. B. (2009) Changing landscapes to accommodate for climate change impacts : a call for landscape ecology. *Landscape Ecology*, No. 24(6), p. 715-721.

Parmesan, C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, No. 37, p. 637-639.

Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. et Hanson, C. E., (Eds) (2007) Rapport du Groupe de travail II au 4e Rapport du GIEC sur le changement climatique - Conséquences, adaptation et vulnérabilité. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 976 pp.

Pauli, H., Gottfried, M. and Grabherr, G. (1996) Effects of climate change on mountain ecosystems-upward shifting of alpine plants. *Word Resource Review*, No. 8(3), p. 382-390.

Plaut, G. and Simonnet, E. (2001) Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Climate Research*, No. 17, p. 303-324.

Roetzer, T. (2005) Climate change, stand structure and the growth of forest stands. *Annalen der Meteorologie*, No. 41(1), p. 40-43.

Rome, S., Bigot, S. et Dumas, D. (2009) Les extrêmes thermiques dans le massif du Vercors (2004-2008). *Geographica Technica*, numéro spécial, p. 395-400.

Royer, A., Goïta, K., Ansseau, C., Faizoun, A. and Saint, G. (1996) Analysis of boreal forest dynamics using the global vegetation index. *Remote Sens. Rev.*, No. 15, p. 265-282.

Schaber, J. and Badeck, F. W. (2003) Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. *Int. J. Biometeorol.*, No. 47(4), p. 193-201.

Senay, G. B. and Elliott, R. L. (2000) Combining AVHRR-NDVI and land use data to describe temporal and spatial dynamics of vegetation. *Forest Ecology and Management*, No. 128, p. 83-91.

Spanner, M. A., Pierce, L. L., Running, S. W. and Peterson, D. L. (1990) The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forests : relationship with leaf area index. *Remote Sens. Environ.*, No. 33, p. 97-112.

Spurr, S. H. and Barnes, B. V. (1980). Forest Ecology. Ed. John Wiley & Sons, New York, USA, 687 pp.

Theurillat, J.-P. and Guisan, A. (2001) Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps : A review. *Climate Change*, No. 50, p. 77-109.

Wang, J., Rich, P. M. and Price, K. P. (2003) Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, No. 11, p. 2345-2364.

Wang, Q., Tenhunen, J., Falge, E., Bernhofer, C., Granier, A. and Vesala, T. (2004) Simulation and scaling of temporal variation in gross primary production for coniferous and deciduous temperate forests. *Global Change Biology*, No. 10, p. 37-51.

Wanga, Q., Adikua, S., Tenhunena, J. and Granier, A. (2005) On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, No. 94, p. 244-255.

Weiss, J. L., Gutzler, D. S., Allred Coonrod, J. E. and Dahm, C. N. (2004) Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, No. 59, p. 249-272.

White, M. A., de Beurs, K. M., Didan, K., Inouye, D. W., Richardson, A. D. and Jensen, O. P. (2009) Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology*, No. 15, p. 2335-2359.

Zhang, X., Friedl, M. A., Schaafn, C B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gaoa, F., Reed, B. C. and Huete, A. (2003) Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, No. 84, p. 471-475.

Zhou, L. M., Tucker, C. J., Kaufmann, R. K., Slayback, D., Shabanov, N. V. and Myneni, R. B. (2001) Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, No. 106, p. 20069-20083.