

**Etude de la vulnérabilité de la forêt du
Parc du Haut Jura vis-à-vis du changement climatique**

Daniel Joly, Laboratoire ThéMA, CNRS, Université de Franche-Comté



Avants-propos

Ce mémoire a été rédigé à l'issue de la convention de recherche n°2010-100 contractée entre le Parc naturel régional du Haut-Jura et Théma (UMR 6049 du CNRS et Université de Franche-Comté) visant à définir les modalités d'une étude de « la vulnérabilité de la forêt du Parc du Haut Jura vis-à-vis du changement climatique ».

L'un des objectifs de la contribution du Laboratoire ThéMA à cette étude a été d'analyser les caractéristiques du climat actuel et d'évaluer leur probable évolution au cours du XXI^{ème} siècle dans le contexte du « changement climatique » modélisé par les physiciens de l'atmosphère. Les aspects relatifs à la pédologie, l'autre segment important de la vulnérabilité de la forêt, ont été traités par le laboratoire de Chronobiologie (UMR 6249 du CNRS et Université de Franche-Comté). Ce mémoire en utilise les conclusions pour asseoir le modèle de vulnérabilité de la forêt.

Introduction

Le territoire du Parc naturel régional du Haut-Jura est couvert à plus de 60 % par la forêt, ce qui représente une énorme surface à protéger et à valoriser. Cette forêt est en constante évolution suite aux actions de l'homme et aux évolutions naturelles. Si les premières peuvent être, au moins partiellement contrôlées, il n'en va pas des secondes, beaucoup plus imprévisibles. Le fameux changement climatique, dont on commence à évaluer les effets, imposera son empreinte sur la forêt. Sous l'hypothèse, certaine selon les climatologues, d'un réchauffement déjà commencé dès le XX^{ième} siècle et qui se poursuivra au cours du XXI^{ième}, le cortège floristique évoluera, suivant en cela la remontée altitudinale des isothermes : des espèces thermophiles, aujourd'hui confinées dans des niches écologiques protégées, pourront coloniser de vastes espaces ; les essences sensibles aux canicules disparaîtront des lieux où elles s'épanouissent pour gagner les sommets, ou disparaître. Le régime des précipitations jouera également un rôle car la fréquence des sécheresses devrait augmenter.

La forêt telle que nous la connaissons évoluera. Comment, dans quel sens, où se feront sentir les modifications les plus fortes, sont les questions clés que les gestionnaires du territoire du Parc du Haut Jura doivent se poser. Par exemple, connaître la localisation et l'évaluation des surfaces forestières « à risque » par rapport à l'évolution des conditions climatiques probables est incontournable quant à l'aménagement du territoire. Une telle connaissance, portée sur l'ensemble du territoire et concernant l'ensemble de ces questions permettrait d'obtenir une image assez précise des secteurs les plus fragiles vis-à-vis du dépérissement qui risque d'apparaître. Les questions sous-jacentes concernent les problèmes à venir au sujet de la nature et des volumes de bois à exploiter, des modes d'exploitation, de la modification du paysage, des milieux, etc. Mais un tel diagnostic à l'échelle du territoire n'est pas aisé car la forêt est un système au sein duquel un nombre important de facteurs se combinent et interagissent. Il est même sans doute impossible à obtenir sur l'ensemble du Parc sauf à effectuer des mesures précises sur la totalité de son périmètre, ce qui n'est pas possible compte tenu du temps et des coûts qu'une telle démarche suppose. L'objet de ce mémoire est beaucoup plus modeste, consistant à évaluer les facteurs qui, actuellement, contraignent la dynamique de la forêt et à estimer l'évolution à venir du climat. Ce diagnostic doit reposer sur la connaissance préalable des facteurs suivants :

- les sols, avec leur capacité à emmagasiner l'eau (propriétés de rétention en eau),
- les facteurs du climat sous le double aspect des températures et des précipitations,
- les facteurs topographiques tels qu'altitude, pente, orientation, rayonnement global théorique,
- les caractères de la forêt.

Ce mémoire concerne seulement les facteurs climatiques et topographiques. Il détaille les différentes opérations qui ont jalonné cette recherche pour parvenir à l'objectif qui nous était assigné, à savoir l'estimation de la vulnérabilité de la forêt vis-à-vis du changement

climatique. Pour cela, il nous a fallu acquérir des données observées sur le terrain entre 1970 et 2010 par Météo-France (température, précipitations) ou simulées par ce même organisme à horizon de 2100, les interpoler, puis calculer les indicateurs climatiques tels que l'évapotranspiration potentielle qui permet de connaître le bilan hydrique. Les descripteurs retenus ainsi que les indicateurs produits sont présentés au fil des chapitres dans leur chagement temporel et leur variation spatiale. Le tout a été organisé linéairement en retenant les seules données utiles à l'objectif. On trouvera en annexe la présentation et les premiers résultats obtenus d'une étude portant sur la variation de la température sous couvert forestier. C'est l'un des résultats marquants du travail entrepris mais il ne nous a pas semblé opportun de l'insérer dans le cours principal du mémoire. Il a toutefois sa place ici car aucune étude de ce genre n'a son équivalent au plan international.

1. Aire d'étude et acquisition des données

1.1. L'aire d'étude

L'aire d'étude, centrée sur le PNRHJ, mord sur le premier plateau du Jura (fig. 1.1). Les altitudes, qui s'élèvent par pallier, sont comprises entre 200 m (plaine et basses vallées), 350 m (premier plateau) et 1720 m (Crêt de la Neige). De profondes vallées entaillent les plateaux et la montagne (du nord au sud : l'Ain, la Bienne, la Semine, la Valserine). Le taux de recouvrement forestier est tout autant guidé par la topographie que par l'altitude, les vals défrichés s'opposant aux monts boisés. Dans sa composition, la forêt offre les formations typiques de la France de l'Est réparties en trois étages principaux : l'étage collinéen jusqu'à 600 m (chênaie-hêtraie-charmaie), l'étage montagnard inférieur sur le second plateau (hêtraie-sapinière) et l'étage montagnard à partir de 900 m où les résineux dominant (sapin, épicéa). Notons en outre que le sapin a été planté jusqu'en plaine.

Le climat est, au côté de la pédologie, un des facteurs clé de la dynamique forestière. Il intervient pour expliquer la localisation actuelle de la forêt et des essences qui la constituent et comme facteur d'évolution par le biais des changements annoncés. Il détermine la structure et la nature de la forêt, mais, en retour, cette dernière agit sur lui. Ainsi s'établit-il un équilibre dynamique instable où la modification de l'un entraîne celle de l'autre.

1.2. Les données

Le climat sera analysé à partir de deux sources de données :

- Les observations (température et précipitation) effectuées en une cinquantaine de stations gérées par Météo-France et localisées dans ou en périphérie du PNRHJ ; ces données seront traduites en normales mensuelles (1981-2010).
- Les points de sortie du modèle Arpège-climat de Météo-France.

1.2.1. Données collectées par Météo-France

Les postes du réseau de Météo-France sont positionnés de telle manière qu'ils soient environnés d'espaces ouverts avec des masques aussi réduits que possible. Les températures (minimales et maximales) et les précipitations sont enregistrées en

respectivement 46 et 50 stations (fig. 1.1) ; elles sont situées dans ou à proximité du PNRHJ. Elles ont été acquises sous la forme de normales mensuelles (1981-2010).

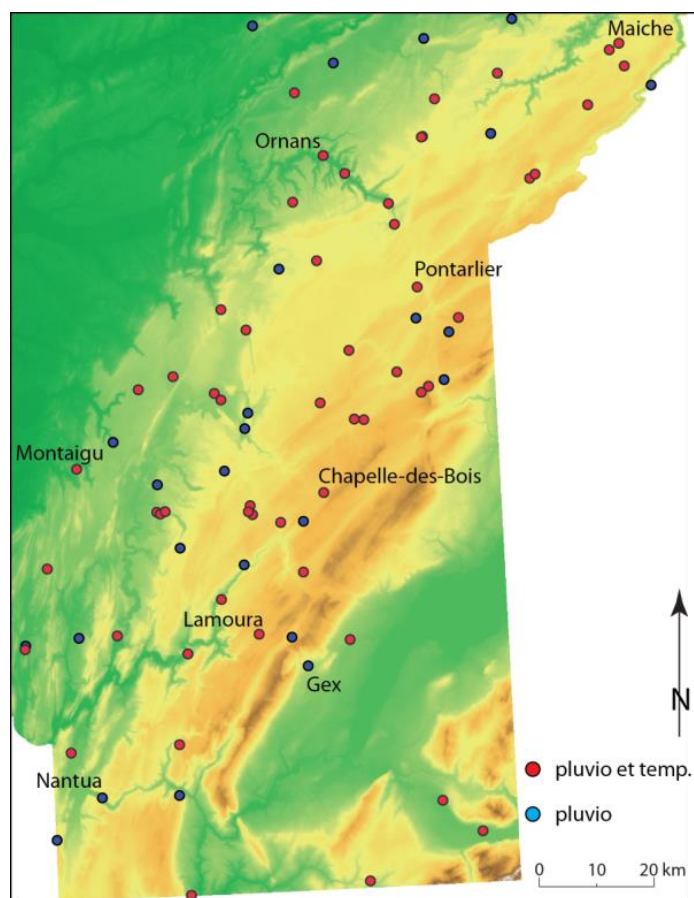


Figure 1.1 : Modèle numérique de terrain et stations climatiques gérées par Météo-France

1.2.2. Sorties du modèle Arpege-Climat

Le Centre national de recherche météorologique (CNRM) de Météo-France, en collaboration avec le Centre européen de prévision, a établi le modèle ARPEGE-climat, modèle climatique global. La plupart des composants du système terre-atmosphère à petite échelle est pris en compte (extension des glaces, chimie de l'atmosphère et notamment concentration en gaz à effet de serre,...). Plusieurs scénarios sont proposés. Nous avons retenu le modèle A1B intermédiaire, situé entre le scénario B1, optimiste par rapport à l'évolution des émissions de gaz à effet de serre au niveau global et le scénario A2, pessimiste (GIEC, 2007).

Les sorties de modèle sont fournies selon une maille régulière d'environ un point tous les 40 km ; au total, la France continentale comporte 389 points (fig. 1.2). Une extraction de ces données a été effectuée en sorte que seuls les points distants d'environ 80 km vers le sud, l'ouest et le nord des limites du PNRHJ ont été conservés. Un total de 27 points est identifié qui serviront aux traitements ultérieurs. Ces données renseignent sur les valeurs quotidiennes, sur une durée de 140 ans (1 janvier 1960 au 31 décembre 2100), des six variables suivantes :

- volume des précipitations,

- humidité relative,
- rayonnement global,
- températures minimale et maximale,
- force du vent.

Seule la force du vent qui n'intervient pas dans le calcul de l'ETP-Turc n'a pas été retenue.

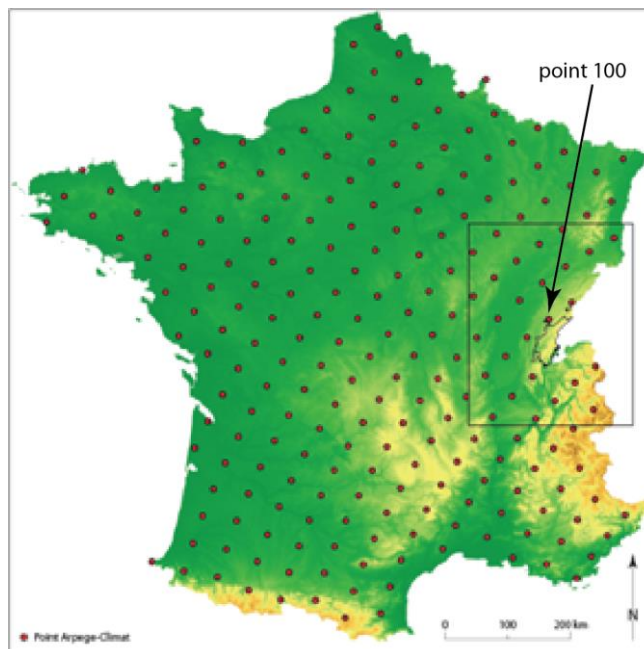


Figure 1.2 : localisation des 230 (France continentale) et 27 (80-120 km autour du PNR) points de grille Arpege-Climat.

Le tableau des données simulées par Arpege-Climat que nous devons traiter comporte 51496 jours et 5 variables pour chacun des 27 points sélectionnés. On se basera d'abord sur cette information pour calculer, en chaque point, la fréquence de dépassement de certains seuils critiques pour les arbres (ces seuils varient selon les essences considérées). On les utilisera aussi pour calculer des moyennes et les valeurs de l'ETP au pas mensuel qui, les unes et les autres, constitueront les trois normales : 1981-2010 (Norm-Arp1), 2021-2050 (Norm-Arp2) et 2071-2100 (Norm-Arp3). Les interpolations seront appliquées sur ce jeu de 12 modèles mensuels pour chacune des variables et ce, pour les trois normales.

Un point particulier (le point 100) a été sélectionné pour sa proximité avec le PNRHJ. Situé vers la station de Supt, à 700 m d'altitude, il est représentatif du second plateau du Jura.

2. Méthodes

Les méthodes qui ont été mises en œuvre concernent plusieurs domaines :

- l'interpolation spatiale des données ponctuelles pour l'estimation des composantes du climat sur la période de trente ans de référence (normale 1981-2010) et sur les normales du climat à venir simulées par Arpege-Climat,
- la descente d'échelle (« downscaling ») des sorties du modèle Arpege-Climat,

- le calcul de l'ETP.

2.1. Interpolation : du ponctuel au continu

L'information climatologique disponible, tant celle qui est observée sur le terrain (Météo-France) que celle qui est issue du modèle de simulation (Arpege-Climat), est ponctuelle, ce qui signifie que les mesures ou les calculs concernent un lieu, un point précis. Théoriquement, les valeurs obtenues ne sont vraiment représentatives que de l'immédiate proximité des points où elles ont été observées. L'analyse spatiale offre la possibilité de dépasser cette limite. On part du principe que l'information disponible contient tout à la fois des variations aléatoires et des régularités. Par aléatoire, on entend tout ce qui relève de l'erreur ou de l'imprécision de la mesure, de la spécificité des lieux. Cette partie de l'information n'est pas modélisable. En revanche, les régularités le sont parfaitement pour peu que l'on ait recours à des outils adaptés qui les mettent en évidence. On sait que les températures ou les précipitations sont très dépendantes de l'altitude ; encore faut-il mesurer la corrélation de ces phénomènes, le signe et le gradient (la pente) qui les lient. D'autres règles d'organisation existent sans doute qu'il nous faut déceler et mesurer : tels sont les objectifs assignés aux analyses qui seront effectuées à l'aide des données altimétriques de l'IGN et d'informations issues des satellites et concernant l'occupation du sol. Les paramètres qui auront été calculés seront utilisés comme opérateurs cartographiques en vue de construire le champ continu des variables analysées à pas de 50 m sur l'ensemble du parc. Cette opération – appelée interpolation – a été effectuée à THÉMA grâce au logiciel LISDQS (Joly, 2009) précisément dédié à l'interpolation de telles données (Joly et al., 2009, 2010 et 2011). Les données interpolées enrichiront le SIG qui aura contribué à les créer et seront intégrées aux modèles de vulnérabilité de la forêt.

En fonction de la nature de ces variables nous aurons recours à deux types de modèles pour les interpoler. Le modèle de régression sera utilisé pour interpoler les observations effectuées sur le terrain tandis que le krigeage permettra de construire les champs continus basés sur les sorties du modèle Arpege-Climat.

2.1.1. Régression et krigeage

Rappelons brièvement que le modèle linéaire de régression exprime mathématiquement la relation entre une variable statistique, appelée variable expliquée ou dépendante (chacune des températures et chacun des abats de précipitations mensuels), et p variables appelées variables explicatives ou indépendantes (les variables archivées dans le SIG : altitude, pente, etc.). Les régressions ne tiennent pas compte de la distance qui sépare les stations. C'est pourquoi elles seront surtout efficaces en secteur hétérogène avec des écarts climatiques élevés pouvant survenir sur de courtes distances.

En secteur homogène, la distance a un fort pouvoir explicatif puisque les deux variables d'intérêt et les variables attributaires présentent toutes des gradients réguliers. C'est également le cas pour les sorties du modèle Arpege-Climat qui tiennent compte des données de la topographie et de l'état de la surface du sol seulement à très petite échelle. En ce cas, il

est préférable de recourir au krigeage. Rappelons brièvement que le krigeage est défini comme une méthode d'estimation linéaire optimale et non-biaisée qui utilise les propriétés structurales du semi-variogramme. Celui-ci permet de déterminer si la distribution du ou des paramètres étudiés est régionalisée (i.e. possède une structure spatiale), aléatoire ou périodique. Le modèle théorique de semi-variogramme met en jeu la semi-variance $\gamma(h)$ qui est fonction de l'intervalle d'échantillonnage (h).

La méthode utilisée ici enchaîne trois étapes :

- La corrélation entre chacune des variables climatiques (variable expliquée) et les 13 variables explicatives, est établie à l'aide d'une régression simple qui donne lieu au calcul du coefficient de corrélation (r). Grâce au r obtenu de chaque régression, on identifie les prédicteurs significatifs au seuil de 10% qui sont ensuite intégrés dans une régression multiple. Nous avons utilisé pour cela la méthode de régression pas-à-pas avec sélection progressive des variables explicatives, de la plus corrélée à la variable dépendante à la moins corrélée. Si le r^2 augmente, on conserve la variable ajoutée, sinon on ne l'introduit pas dans la régression, sa part de variance commune avec la variable expliquée ayant déjà été prise en compte par la ou les variables antérieurement retenues. On procède ainsi jusqu'à ce qu'il ne subsiste plus de variable explicative significative.
- Le calcul des résidus permet de fournir les valeurs qui seront krigées.
- L'estimation des températures en chacun des pixels appartenant au PNRHJ résulte de la somme des valeurs obtenues de la régression multiple et du krigeage.

La performance des estimations est évaluée par validation croisée (Stone, 1974).

2.1.2. Les variables explicatives des régressions

La méthode fondée sur les régressions nécessite le recours à des variables « explicatives » dont l'objet est précisément d'expliquer la variation des variables « expliquées ». Pour ce faire, l'ensemble de la procédure s'appuie d'abord sur la constitution d'un système d'information géographique (SIG) fondé sur le modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN, disponible au pas de 50 m est la transcription numérique de la variation spatiale de l'altitude (fig. 1.1). Par calcul, huit variables sont dérivées du MNT.

- L'altitude (alti) dont le rôle sur les températures et les précipitations a déjà été évoqué. Même si une corrélation positive est généralement observée, celle-ci ne se réduit pas à un coefficient constant dans l'espace simple applicable partout.
- La pente (pente), lorsqu'elle est forte, renforce l'effet de l'altitude sur les précipitations dans la mesure où le phénomène de condensation joue dans la verticale du versant ; des pentes vigoureuses renforcent la turbulence de l'air. Elle joue également un rôle sur les températures par le biais des mouvements d'air qui se déroulent le long des versants.

- L'orientation des versants (orien), le sinus et le cosinus qui en sont tirés, permettent principalement de révéler l'opposition entre des versants aux vents dominants, bien arrosés, et des versants sous le vent asséchés par effet de foehn.
- Le rayonnement global permet d'opposer les versants adret exposés au sud aux versants ubac, plus froids.
- La rugosité topographique (rugos) est un indicateur des irrégularités de relief : elle peut être nulle en présence de plat ou sur un versant parfaitement rectiligne. Ce facteur, quand il se marque de valeurs fortes, peut avoir une incidence locale sur la dynamique des basses couches de l'atmosphère en y générant des turbulences.
- Deux indices, l'un d'encaissement (AmplC), l'autre de surélévation (AmplB) décrivent les positions topographiques en ce qu'elles sont dominées, fond de vallée par exemple, ou qu'elles dominent (crête, bosse, sommet). Un encaissement élevé permet de révéler des positions d'abri données comme significatives par Laborde et Traboulsi (2002) pour les faibles précipitations ; à l'opposé, un indice positif de surélévation peut faire ressortir un effet de barrière favorable aux précipitations. De manière analogue, les micro masses d'air en milieu confiné qui se développent au fond des vallées acquièrent des caractéristiques thermiques particulières qui les différencient des masses d'air qui affectent librement les sites émergents.

Au total, les huit couches d'information issues du MNT auxquelles s'ajoutent les coordonnées de latitude et de longitude des stations, fournissent les 10 variables candidates à tester (par la méthode des régressions). La réalité que celles-ci expriment couvre l'essentiel des facteurs qui sont reconnus pour expliquer les variations spatiales de la température et de la pluviométrie. L'intérêt de la démarche proposée est qu'elle procède d'une manière expérimentale pour établir le degré de significativité des différentes variables explicatives et pour calibrer leur contribution aux valeurs de température et de pluviométrie.

2.2. Descente d'échelle des sorties du modèle Arpege-Climat

2.2.1. Le principe

Toutes les images résultant de l'interpolation sont carroyées à la résolution de 50 m. Cette échelle est tout-à-fait compatible avec la densité et la qualité des réseaux d'observation de la température et des précipitations au sol (Météo-France). Il n'en va pas de même pour les points de sortie du modèle Arpege-Climat dont les informations s'inscrivent, thématiquement, à des échelles beaucoup plus petites. Ainsi, la précision géométrique de l'interpolation fait illusion : l'estimation en un pixel est seulement relative à sa position entre les points du modèle (séparés les uns des autres d'une quarantaine de km) qui l'entourent et aux valeurs qui y sont calculées. Or, dans la mesure où ces dernières présentent en règle générale peu d'écarts d'un point à l'autre, l'interpolation traduit des gradients assez réguliers à grand rayon d'action. Le résultat ne saurait fournir des indications spatiales précises ; or, c'est ce type d'information qui serait utile aux gestionnaires de la forêt qui,

souvent, travaillent sur des parcelles de quelques hectares. Il nous faut donc affiner spatialement l'information apportée par Arpege-Climat.

Les méthodes développées pour obtenir des informations spatiales à grande échelle à partir des variables atmosphériques fournies par les modèles climatiques globaux sont nombreuses (Wilby et Wigley, 1997 ; Wilby et al., 2004). Une méthode, qui relève de la géomatique et dont la mise en œuvre est très simple, a été mise au point en ce sens. Pour cela, nous nous sommes inspirés de la méthode du « delta » qui consiste à corriger les biais et à affiner spatialement le changement climatologique moyen simulé par modèle physique global Arpege-Climat en ayant recours aux images issues des observations, celles qui, dans notre cas, sont effectuées sur le terrain par Météo-France. Il s'agit d'une méthode bien connue pour générer des informations climatiques à l'échelle régionale et locale. La méthode consiste à enchaîner trois étapes :

- Définition d'une période de référence dite « période d'étalonnage » pour laquelle nous disposerons tout à la fois des interpolations des données Météo-France et des interpolations issues des sorties du modèle Arpege-Climat. Dans notre cas, nous avons choisi la normale 1981-2010.
- Calcul de la différence (delta) entre ces deux couches d'information.
- Somme du delta aux trois normales 1981-2010 (le résultat reproduit l'interpolation des données Météo-France), 2021-2050 et 2071-2100.

La forme que prend la fonction de transfert est la suivante :

$$\text{Temp. futur} = \text{Temp. ARPEGE futur} + (\text{Temp. ARPEGE réf.} - \text{Temp. OBS réf.}) \quad \text{équation 1}$$

Où Temp. futur = normales 2021-2050 et 2071-2100

Temp. réf. = normale 1981-2010

Temp. ARPEGE = krigeage des sorties du modèle de simulation

Temp. Obs. = régression puis krigeage sur les résidus des temp. observées par MF

2.2.2. Absence de tendance des gradients altitudinaux

La principale critique qui est opposée à cette méthode est qu'il n'est pas sûr que le delta soit stable dans le temps, donc, peut-être, que son utilisation pour corriger les normales des futur est inappropriée. Pour faire le point sur cette interrogation, nous avons calculé les gradients altitudinaux de température mensuelle entre Besançon (250 m) et Mouthe (900 m) de 1970 à 2008 (fig. 2.1). Il apparaît que 2/3 des gradients sont compris entre -0.6 et -0.79°C/100 m ; 95% s'inscrivent à l'intérieur d'une fourchette légèrement plus large (-0.04 à -0.99°C/100 m). Hormis quelques pics (janvier 1996) imputables à une forte fréquence d'inversions de température sur l'ensemble du massif et quelques creux (janvier 1971 et 1981) dus à une fréquence élevée de situations anticycloniques stables générant des températures très basses au fond des vals d'altitude, les gradients altitudinaux présentent des écarts relativement peu accusés.

Figure 2.1 : Gradients altitudinaux de température mensuelle entre Besançon et Mouthe ; Poly = courbes polynomiales d'ordre 3

Les tendances sur presque 30 ans sont quasi inexistantes. Tout au plus pouvons-nous remarquer une légère ondulation due à des valeurs à peine plus faibles au milieu des années 90 ($-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) que 20 ans plus tôt ($-0.7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$). On peut donc conclure, sinon à une stabilité, du moins à une absence de tendance sur le moyen terme des gradients altitudinaux. Il est probable qu'il en va de même pour les gradients liés aux autres variables explicatives. Ainsi, l'écart de température entre deux lieux apparaissant sur les cartes d'interpolation de Météo-France comme, l'un froid, l'autre chaud au cours de la normale 1981-2010, restera au cours des décennies à venir, selon toute probabilité, analogue à ce qu'il a été au cours des trente dernières années. La méthode des deltas est donc légitime.

2.4. Calcul de l'ETP

L'évapotranspiration est une des composantes essentielles intervenant dans le calcul du bilan hydrique. Selon Wikipedia (consulté le 4 juillet 2013 : « L'évapotranspiration (ET) est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. L'évaporation se définit par les transferts vers l'atmosphère de l'eau du sol, de l'eau interceptée par la canopée et des étendues d'eau. La transpiration se définit par les transferts d'eau dans la plante et les pertes de vapeur d'eau au niveau des stomates de ses feuilles. » L'évapotranspiration réelle est impossible à calculer ; seules des mesures effectuées sur sites extrêmement instrumentés peuvent permettre d'approcher cette valeur. Aussi, les efforts des chercheurs se sont portés vers le calcul d'une valeur d'évaporation potentielle (ETP).

Le concept d'évapotranspiration et ses mesures sont apparus dans les années 1950. Ce concept est très important pour expliquer et quantifier les transferts d'eau dans les écosystèmes, pour calculer les besoins en eau des cultures agricoles et plus globalement pour la gestion de l'eau des espaces naturels (Ricklefs et Miller, 2005 ; Granier, 1987 ; Lecarpentier 1975a ; 1975b). La valeur d'ETP correspond à la quantité de transpiration végétale et d'évaporation du sol en fonction de plusieurs paramètres climatiques : la température, l'humidité relative, le rayonnement global et, pour les formules les plus

complètes, le déficit de saturation, la force du vent, la capacité thermique de l'air, etc. Un travail bibliographique conséquent a fait ressortir de nombreuses formules adaptées à la zone climatique dans lesquelles elles sont appliquées et au pas de temps : annuel, mensuel, décadaire, journalier et horaire. Le choix de l'une ou l'autre formule est en fait surtout guidé par la disponibilité des données. Trois formules reconnues au niveau international sont ressorties : Thornthwaite, Penman et Turc.

Thornthwaite est considéré comme le père de l'ETP : « la nature du complexe sol/plante n'intervenant plus, il devient possible de calculer l'ETP à partir des seules données climatiques » (cité par Beltrando et Chémery, 1995). La formule de l'ETP Thornthwaite est la plus largement utilisée car elle est simple, nécessitant juste la température moyenne mensuelle, un indice thermique annuel et un coefficient dépendant de la latitude.

La formule proposée par Turc (équation 2) est plus complète puisqu'elle fait intervenir, en plus de la température, le rayonnement global ainsi que l'humidité relative :

$$ETP = (0.013 * n) * \left(\frac{t}{t+15}\right) * (Rg + 15) \quad \text{équation 2}$$

$$ETP = (0.013 * n) * \left(\frac{t}{t+15}\right) * (Rg + 15) * \left(1 + \frac{50-hr}{70}\right) \quad \text{équation 3}$$

Où t : température moyenne mensuelle en °C

n : nombre de jours dans le mois

Rg : rayonnement global moyen en cal.

Hr : humidité relative de l'air en % durant le mois considéré

On utilisera l'équation 2 si l'humidité relative moyenne sur la période est inférieure à 70%.

Enfin, l'ETP Penman-Monteith est complexe. Basée sur la physique de l'atmosphère et de l'étude des processus au niveau de la surface évaporant, elle fait intervenir pas moins de 11 paramètres (le rayonnement net, le flux de chaleur du sol, la densité moyenne de l'air, la chaleur spécifique d'air, la chaleur latente de changement d'état, la tension de vapeur à la température t , la tension de vapeur saturante à la température t , la pente de la courbe de tension de vapeur saturante, la résistance aérodynamique, la résistance du couvert végétal et enfin la constante psychrométrique). Si nous précisons en outre que la résistance aérodynamique et la résistance du couvert végétal nécessitent la connaissance de respectivement 7 et 3 autres paramètres, on en conclura que le calcul de l'ETP Penman-Monteith n'est pas adaptée à notre cas.

Nous avons donc choisi la formule proposée par Turc pour calculer l'ETP sur le PNR pour tous les mois de chacune des trois normales. La valeur de l'ETP annuelle est la somme des 12 valeurs mensuelles.

3. Résultats

3.1. Variations temporelles du climat au cours des XX^{ième} et XXI^{ième} siècles

3.1.1. Températures

3.1.1.1. Températures Météo-France

Les températures observées dans les espaces ouverts sont enregistrées en 46 stations par Météo-France. Nous disposons des trente-neuf années de collecte qui s'échelonnent entre 1970 et 2010 pour établir les tendances qui se sont produites au cours de ce laps de temps. Nous avons choisi de présenter les graphiques de Supt (650 m d'altitude) situé sur le premier plateau du jura, à environ 8 km au nord de Champagnole, hors du périmètre du PNR, mais qui présente l'avantage d'être la station enregistrant les températures et les précipitations la plus proche du point 100 d'Arpege-Climat (9 km) dont nous présenterons ultérieurement les valeurs simulées. Il sera ainsi possible de comparer les deux séries de données.

En janvier (fig. 3.1), les valeurs s'écartent sensiblement de la moyenne (0°C). Ainsi, on passe de -7.8 (1985) à 4°C (1996). Si les valeurs supérieures à 2,5°C ont émaillé l'ensemble de la chronique, les moyennes les plus basses se sont toutes produites avant 1990. La tendance traduit un gain de température de 1,7°C d'un bout à l'autre de la période : on passe de -0.7 à 1°C à Supt. Ces valeurs correspondent à une augmentation de 5°C par siècle.

Figure 3.1 : Variation de la température moyenne (°C) de janvier et de juillet observée à la station de Supt entre 1970 et 2008

Les températures de juillet présentent des variations analogues à celles de janvier, avec, notamment, une croissance qui, ramenée au siècle, est également de 5°C.

3.1.1.2. Températures Arpege-Climat

La simulation des températures d'Arpege-Climat au point 100 (fig. 3.2) reproduit les remarques faites précédemment au sujet des températures observées par Météo-France à Supt avec notamment les variations importantes d'une année à l'autre et une hausse indubitable des températures : on passe de -0,3 à 1,7°C. La tendance (+2°C sur les 140 années) représente une augmentation de 2,5°/100 ans.

La température atteinte par les valeurs mensuelles extrêmes croît à mesure que l'on se rapproche de la fin du XXI^{ème} siècle : la probabilité que les mois de janvier les plus froids soient inférieurs à 0°C devient faible, environ une occurrence toutes les décennies, après 2050 ; de même, les moyennes élevées, supérieures à 4°C deviennent fréquentes au cours de la seconde moitié du siècle.

Figure 3.2 : Variation de la température moyenne (°C) de janvier au point 100 de Arpege-Climat entre 1960 et 2100 et de Supt de 1970 à 2008 ; en gras, moyenne mobile à pas de 10 ans

Figure 3.3 : Variation de la température moyenne (°C) de juillet au point 100 de Arpege-Climat entre 1960 et 2100

Les moyennes de Supt enregistrées de 1981 à 2008 sont calées sur le modèle de simulation, à l'exception de la décennie 1978-1987 au cours de laquelle plusieurs mois de janvier à Supt ont été plus froids que ce que la simulation a calculé (la moyenne mobile décale cette phase de 6-7 ans). Notons les moyennes très froides de 1985 (-7,8°C) et 1987 (-5,6°C) alors que, sur la même décennie, Arpege-Climat ne donne qu'une seule température moyenne inférieure à -3°C.

La tendance des moyennes de juillet simulées par Arpege-Climat montre une pente plus accusée que précédemment : les valeurs devraient croître de 6,3°C et passer de 14,9°C en 1960 à 21,3°C en 2100, ce qui représente une hausse de 4,6°C sur le siècle (fig. 3.3). Les moyennes de Supt montrent que le modèle de simulation est en deçà de ce qui s'est réellement produit : les années 1983, 1994 et 2006 ont toutes été supérieures à 20°C alors qu'avec Arpege-climat, de telles valeurs ne devaient pas survenir avant 2050.

La figure 3.4 nous montre que les températures minimales et maximales progresseront de manière hétérogène au cours de l'année. Le gain entre les deux normales 1981-2010 et 2071-2100 sera de 1,8°C en janvier, et de 3,6°C en juillet et près de 5°C en août. Les moyennes enregistrées à Supt suivent bien celles de la première normale, avec, dans le détail, des valeurs à peine plus fraîches en hiver et plus élevées en été-automne.

Figure 3.4 : Variation de la température moyenne mensuelle (°C) au point 100 de Arpege-Climat selon les trois normale (Arpege 1=1981-2010 ; 2= 2021-2050 ; 3 = 2071-2100

3.1.2. Précipitations

Observations Météo-France

Les précipitations recueillies à Supt (fig. 3.5) s'inscrivent à l'intérieur d'une fourchette de 287 mm en janvier (20 à 307 mm) et de 185 mm en juillet (15 à 209 mm). La tendance est modeste en janvier avec une augmentation de 5 mm/siècle tandis que juillet sera plus arrosé à la fin du XXI^{ème} siècle de 13,4 mm par rapport au début siècle.

Figure 3.5 : Variation des abats pluviométriques (mm) à Supt de 1970 à 2000

Arpege-Climat

Arpege-Climat simule également de fortes variations de précipitation d'une année à l'autre (fig. 3.6), avec des abats mensuels minimum proches de 50 mm jusqu'en 2030 puis proches de 0 ensuite, et des abats mensuels maximum supérieurs à 300 mm tout au long de la période de 140 ans. La tendance est légèrement négative (-18 mm/siècle : on passe de 180 mm en 1960 à 150 mm en 2100). Les abats enregistrés à Supt sont inférieurs en moyenne de 5 mm à ceux de Arpege-Climat.

Figure 3.6 : Variation des abats pluviométriques moyens (mm) de janvier au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100 et à Supt de 1970 à 2000

La baisse des précipitations sera plus nette au cours de l'été (fig. 3.7) : juillet passe de 130 mm en 1960 à 70 mm en 2100, ce qui correspond à une baisse de 0.45 mm/an (45 mm/siècle). Les mois pluvieux totalisent 200 mm jusqu'en 2000 puis rarement plus de 150 mm ; un décalage analogue touche les mois secs qui reçoivent entre 70 et 50 mm jusqu'en 2050 puis devraient recevoir entre 10 et 30 mm ultérieurement.

Figure 3.7 : Variation des abats pluviométriques moyens (°C) de juillet au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100 et à Supt de 1970 à 2000

Les variations des précipitations au cours de l'année opposent juillet, août et septembre moins pluvieux que les neuf autres mois. La décroissance des abats pluviométriques sera surtout sensible au cours de la dernière normale (2071-2100) où des valeurs mensuelles inférieures à 70 mm seront atteintes (fig. 3.8). La somme des précipitations mensuelles à Supt entre 1971 et 2010 est très voisine des deux premières normales du modèle de simulation de janvier à juin ; en revanche, au cours de la seconde moitié de l'année, les précipitations observées croissent jusqu'en décembre après un léger tassement durant l'été.

Figure 3.8 : Variation des abats de précipitations moyens mensuels (mm) au point 100 de Arpege-Climat selon les trois normale (Arpege 1=1981-2010 ; 2= 2021-2050 ; 3 = 2071-2100) et à Supt (1971-2000)

3.1.3. Humidité relative et rayonnement global

Humidité relative

Figure 3.9 : Variation de l'humidité relative moyenne au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100

L'humidité relative devrait diminuer sensiblement, passant de 89% au début des années 60 à 84% 140 ans plus tard, suivant en cela, l'augmentation des températures et la baisse du volume des précipitations (fig. 3.9).

Rayonnement global

Le rayonnement global devrait, lui au contraire, augmenter, passant de 1700 kW/an, à 1880 kW/an, du début à la fin de la période de 140 ans (3.10).

Figure 3.10 : Variation du rayonnement global moyen de janvier et juillet au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100

3.1.4. ETP et bilan hydrique

3.1.4.1. ETP

Le modèle de variation de l'ETP croise les valeurs mensuelles calculées à partir des valeurs quotidiennes de trois variables climatiques (température, rayonnement global et humidité relative) selon l'équation 2 (paragraphe 2.4.). Les valeurs annuelles données dans le graphique de la figure 3.11 résultent de la somme des valeurs mensuelles. Le modèle simule les variations de l'évapotranspiration dans l'hypothèse du scénario A1B du GIEC. Le modèle montre une augmentation de l'ETP quasi linéaire depuis des valeurs de l'ordre de 310 mm vers 1960 à des valeurs supérieures à 500 à la fin du XXI^{ème} siècle. Cette tendance est d'abord imputable à la hausse des températures qui gagnent 4°C sur la période et secondairement à celle du rayonnement global.

Figure 3.11 : Variation de l'ETP annuelle moyenne (mm) au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100

3.1.4.2. Bilan hydrique

Le bilan hydrique est calculé par soustraction de l'ETP des abats pluviométriques. Compte tenu des précipitations qui tendent à décroître légèrement et de l'ETP qui croît régulièrement, le bilan de l'eau sera de plus en plus déficitaire (fig. 3.12). Il devrait diminuer du début à la fin de la période de 140 ans d'environ 50 %, passant de 1500 mm à la fin du XXI^{ème} siècle (1500 mm).

Figure 3.12 : Variation des abats pluviométriques et du bilan hydrique moyens annuels (mm) au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100

3.2. Variations spatiales

Le climat varie dans le temps : cela a été mis en évidence grâce aux observations assurées par Météo-France et aux simulations d'Arpege-Climat. Le climat varie également dans l'espace. La station de Supt et le point 100 d'Arpege-Climat, pour autant qu'ils puissent être représentatifs d'une portion assez importante du PNRHJ, sont évidemment insuffisants pour mesurer la diversité des climats locaux qui apparaissent sur ce territoire. Pour ce faire, nous aurons recours à l'ensemble des stations climatiques où sont observées les températures (46 ou 50 de Météo-France selon la variable observée, températures ou précipitations) ainsi que les 27 points du modèle Arpege-Climat situés à proximité du Parc.

3.2.1. Mise en œuvre du « downscaling »

Le champ continu des sorties du modèle Arpege-Climat est construit par krigeage seulement car, rappelons-le, il n'a pas été possible de régresser ces données sur les variables topographiques et d'occupation du sol, le modèle physique ne tenant compte des caractères de surface qu'à très petite échelle. Les températures moyennes de juillet serviront d'exemple pour décrire la démarche.

La figure 3.13 révèle que la structure spatiale des températures est conservée d'une normale à l'autre. Les températures les plus élevées se situent sur la frange ouest de l'aire d'étude (plaine de la Saône) tandis que l'arc jurassien présente les températures les plus fraîches (précisons que la retombée orientale du jura sur le pays de Gex n'est pas pris en compte car nous n'avons pas utilisé de points Arpege situés hors de France). En revanche, ce qui différencie les cartes, c'est la valeur des températures qui suit une progression énorme : la température moyenne calculée à partir des 27 points de grille s'établit à respectivement 17,2, 18,6 et 21,8°C de la première à la troisième normale. A l'ouest, on passe de 17,5°C à plus de 22,5°C ; sur la haute chaîne, les températures, uniformément inférieures à 16,6°C au cours de la normale 1981-2010, seront de l'ordre de 20-21°C cent ans plus tard.

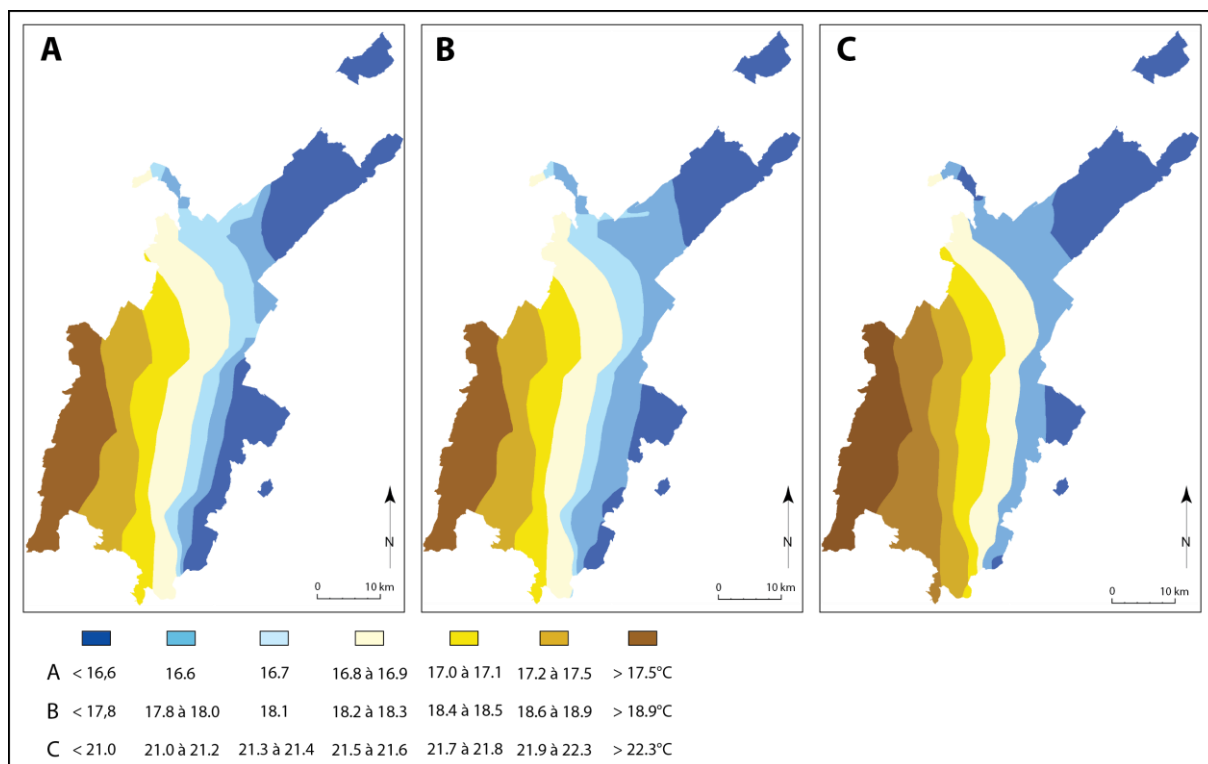


Figure 3.13 : température maximales de juillet issues des 27 points de grille Arpege-Climat proches du PNR ; A=normale 1981-2010 ; B= normale 2021-2050 ; C=normale 2071-2100

En continuant avec l'exemple des températures moyennes de juillet, on constate que la comparaison des cartes issues de l'interpolation des données observées aux 46 stations climatiques (point 4 de l'annexe 1) et celles issues de l'interpolation des 27 points Arpege-climat révèle des écarts (appelés deltas) importants (fig. 3.14).

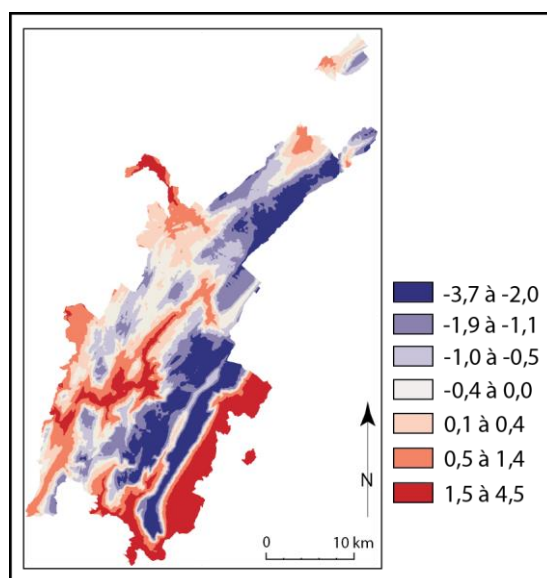


Figure 3.14 : Delta de la température moyenne de juillet

La carte issue de l'interpolation des stations d'observation (fig. 3.15A) est beaucoup plus détaillée que celle issue des points de grille Arpege-Climat (fig. 3.15B). La raison en est bien

sûr l'absence de régression des données Arpege sur les données topographiques et d'occupation du sol. Les deux modèles spatiaux, de même résolution (50 m), ne sont donc pas à la même échelle thématique : la carte Arpege-Climat, beaucoup plus lisse que la carte issue des observations ne distingue pas les formes topographiques telles que la vallée de l'Ain, de la Valserine ou les crêtes. Enfin, la gamme des températures est différente entre les deux cartes tant pour ce qui concerne les valeurs faibles que fortes : l'amplitude des valeurs interpolées à partir de Arpege-Climat (2,6°C, de 15,4 à 18°C) est beaucoup plus faible que celles issues de l'observation (7,5°C, de 12,9 à 20,4°C).

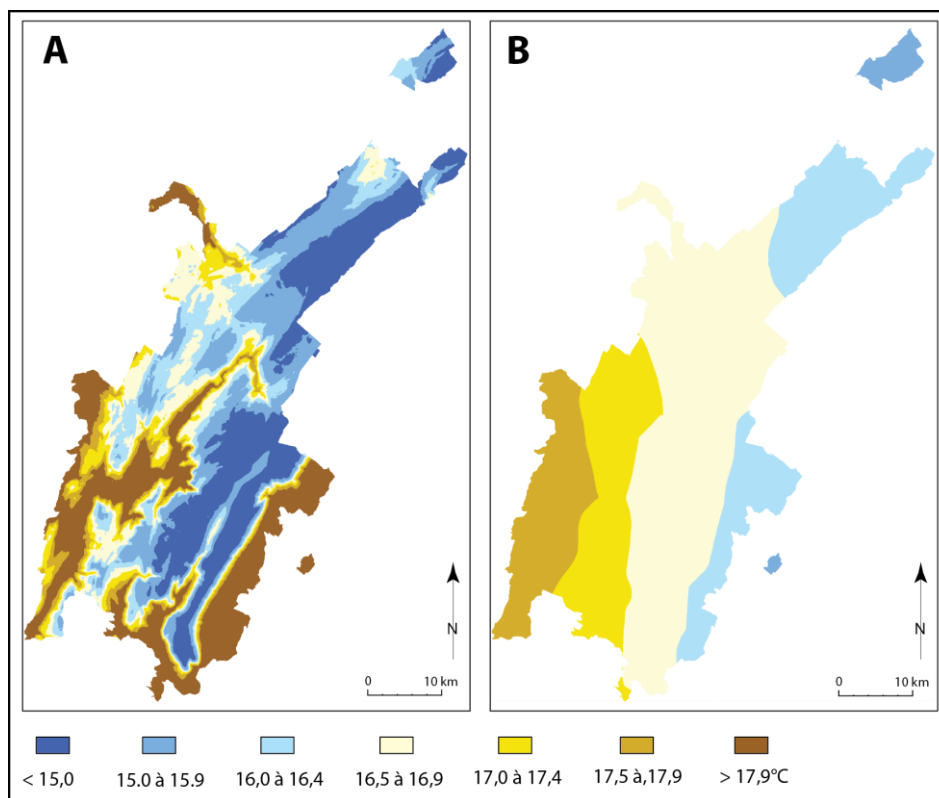


Figure 3.15 : température moyenne de juillet issue des 46 stations d'observation MF (A) et des 27 points de grille Arpege-Climat (B)

Cartes de la température moyenne de juillet selon les trois normales. Le delta va être ajouté à chacune des normales Arpege-Climat interpolées. Ce calcul, appliqué à la première normale, reproduit à l'exact, la carte issue de l'interpolation issue de l'observation. La figure 3.15A devrait, en conséquence, être la même que la figure 3.17A Ce n'est pas le cas parce que le découpage en classes est différent. En effet, nous n'avons pas pu découper les grilles interpolées issues des trois normales Arpege selon des classes homogènes présentant des fréquences comparables, sinon identiques, en raison de la profonde disparité des valeurs d'une normale à l'autre. Par exemple, si nous avons appliqué les seuils utilisés pour découper la série des températures moyennes de juillet de la première normale (maximum= 20,4°C), la fréquence associée à chaque classe aurait été complètement disproportionnée pour les deux normales suivantes, surtout pour la troisième où aucun pixel ne présente une température inférieure à 17,3°C, alors que 83% des pixels de la première normale ont une

température inférieure à ce seuil. La dispersion des trois séries se présente ainsi sous la forme de courbes en cloche plus ou moins dissymétriques, avec un mode calé à 18°C, 20°C et 23°C de la première à la dernière normale (fig. 3.16).

Aussi, un autre découpage a-t-il dû être opéré. Le choix des seuils n'a pas été facile et nous avons dû nous résoudre à un compromis où la fréquence des classes d'aucune des trois normales n'est conforme aux principes d'un découpage harmonieux. Le tableau 3.1 nous montre que les trois classes regroupant les températures supérieures à 25°C sont totalement (Norm-Arp1) ou très déficitaires (Norm-Arp2) pour les deux premières normales tandis qu'elles sont, à l'inverse, très excédentaires pour la normale 2071-2100. Mais il était difficile de faire autrement, notre contrainte étant de trouver une solution qui respecte au mieux la moyenne des trois fréquences associées à chaque classe. Dans l'exemple des températures maximales de juillet, ce n'est guère satisfaisant, mais c'est la meilleure solution et il y en ira de même pour la plupart des deux autres variables climatiques.

Figure 3.16 : dispersion des trois normales découpées en 9 classes

Tableau 3.1 : fréquence des classes découpées selon des seuils compatibles avec les trois normales ; exemple de la température minimale de juillet

	< 16°C	16 à 17.9°C	18°C	19°C	20°C	21 à 22.9°C	> 22.9°C
Arpege 1	41	39	12	8	0	0	0
Arpege 2	15	42	18	12	10	3	0
Arpege 3	0	1	11	18	20	33	17

3.2.2. Application à six variables

3.2.2.1. Température moyenne de juillet

Les cartes qui résultent de ce découpage reflètent les disproportions qui viennent d'être évoquées (fig. 3.17). Au cours de la normale 1981-2000 (fig. 3.17A), les maximales de juillet les plus fraîches (< 16°C) occupent l'essentiel des plateaux du Jura et de la haute chaîne. Les températures les plus élevées (> 20°C) se localisent dans le Pays de Gex et au fond des

vallées. Les aires les plus fraîches (16-17°C) seront, au cours de la normale 2071-2100, confinées au Risoux tandis que les valeurs supérieures à 23°C se disperseront sur les plaines, les vallées et leurs proches abords.

L'ensemble de la procédure décrite précédemment et présentée au travers de l'exemple des moyennes de juillet a été reproduit pour tous les mois, pour les trois normales et toutes les variables climatiques produites dans le cadre de cette étude. Les modèles spatiaux ainsi élaborés serviront de support aux modèles de distribution des principales essences composant la forêt jurassienne, avec, comme perspective, l'évaluation de l'impact du changement climatique sur cette dernière.

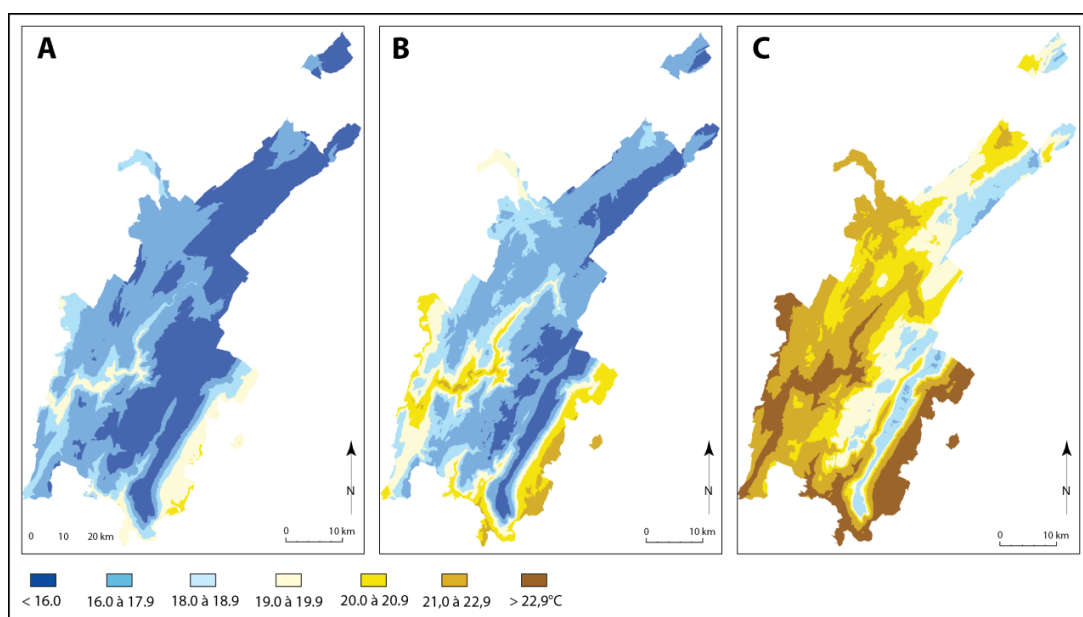


Figure 3.17 : température moyenne de juillet pour les trois normales

3.2.2.2. Température moyenne de janvier

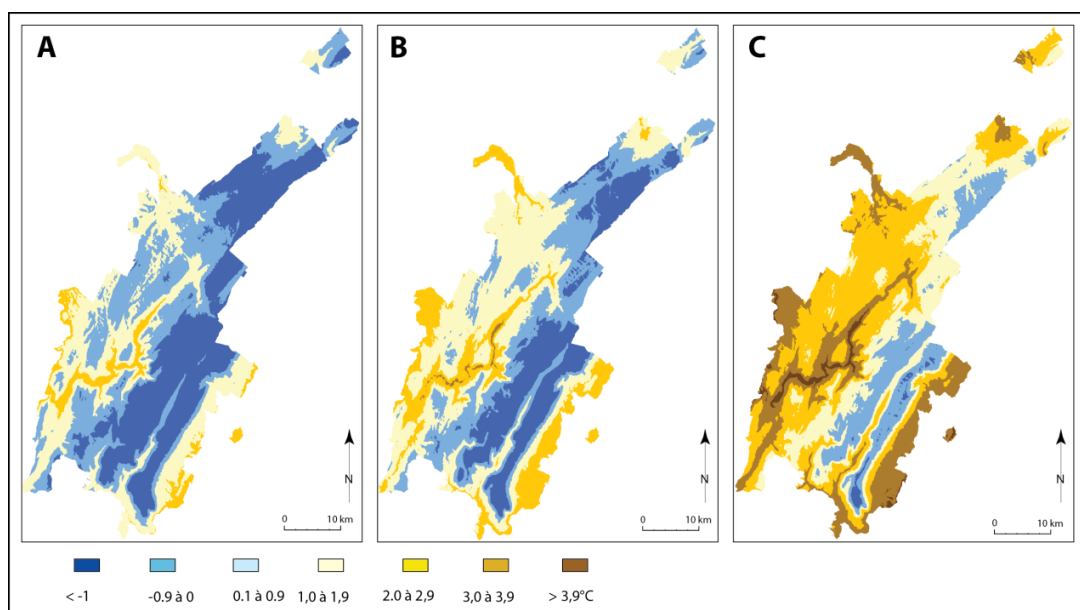


Figure 3.18 : température moyenne de janvier pour les trois normales

En janvier, on retrouve bien évidemment la même structure spatiale que celle qui vient d'être décrite concernant la moyenne de juillet avec l'opposition entre les secteurs dotés d'une altitude faible et les altitudes élevées (Fig. 3.18). La hausse des températures d'une normale à l'autre est ici aussi spectaculaire. Les plaines et basses vallées passent d'une température supérieure de 2 à 3°C en 1981-2010 à des valeurs supérieures à 4°C à horizon 2071-2100. Au-dessus de 900 m d'altitude, toutes les températures sont inférieures à -1°C en 1981-2010. Cent ans plus tard, ces valeurs les plus froides ne concerneront plus que les sommets, les plateaux situés autour de 900 m auront, en moyenne de janvier, des températures de 1 à 2°C.

3.2.2.3. Abats de précipitations

Tableau 3.2 : fréquence des classes découpées selon des seuils compatibles avec les trois normales ; précipitations de janvier

	< 110	120	130	140	150	160	> 160
Arpege 1	1	3	8	15	22	26	25
Arpege 2	7	10	19	27	20	11	6
Arpege 3	3	8	12	20	29	16	12

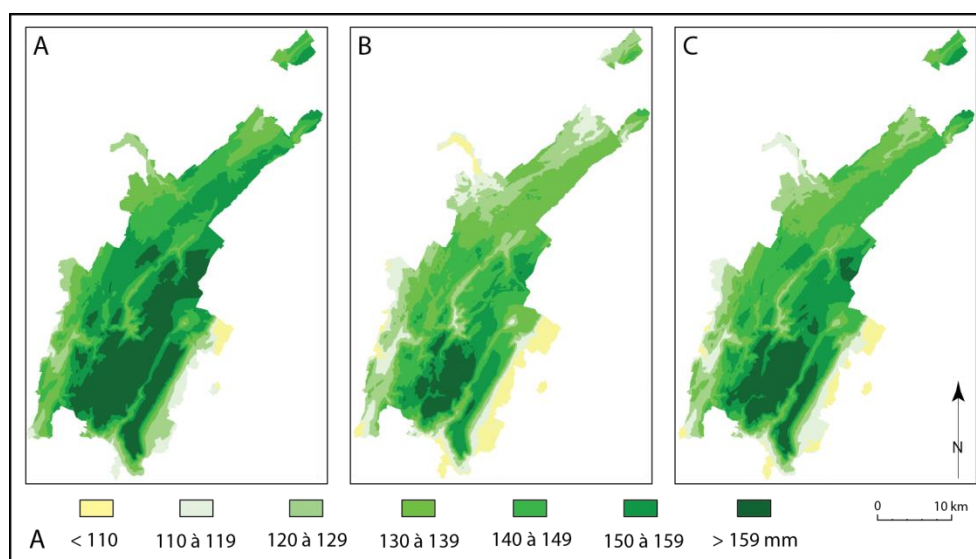


Figure 3.19 : Abats de précipitation de janvier pour les trois normales

Tableau 3.3 : fréquence des classes découpées selon des seuils compatibles avec les trois normales ; précipitations (mm) de juillet

	< 80	90	100	110	120	130	140	> 140
Arp. 1			1	7	16	30	27	19
Arp. 2		2	10	19	35	20	14	
Arp. 3	24	32	23	19	2			

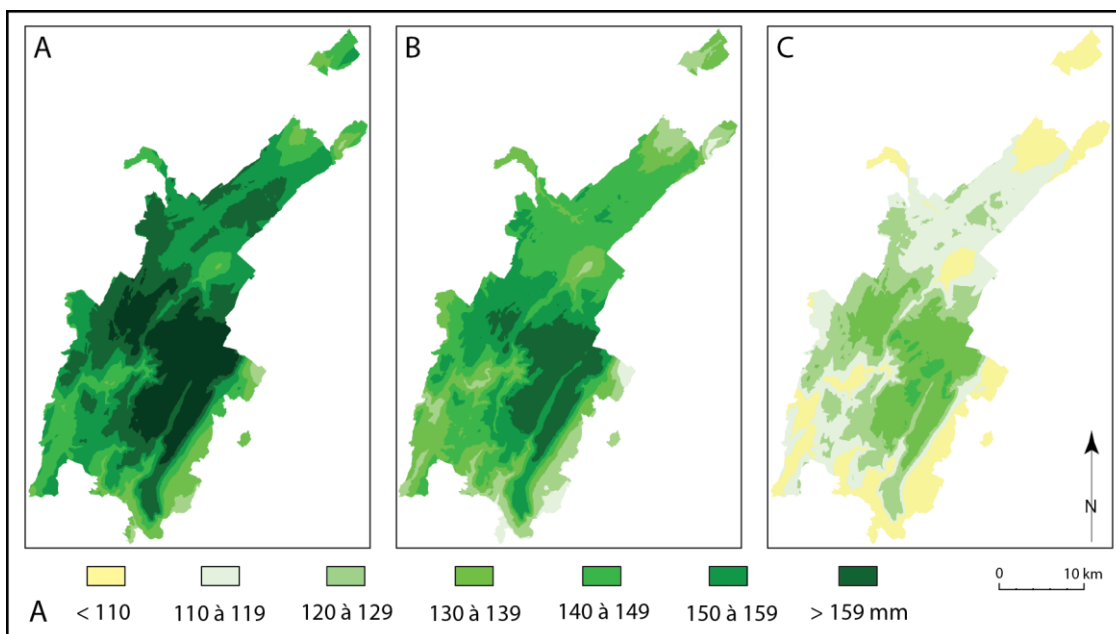


Figure 3.20 : Abats de précipitation de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Au cours de la normale 1981-2010, avec des abats supérieurs à 159 mm, les abats de précipitation de janvier et juillet sont surtout importants au cœur du PNRHJ, au-dessus de 1000 m d'altitude (fig. 3.19) ; les parties basses, quoique bien arrosées, présentent des abats inférieurs à 140 mm. La situation se dégrade progressivement au cours du XXI^{ème} siècle pour arriver, à la fin du siècle, à des valeurs inférieures à 110 mm environ en plaine et à peine supérieures à 140 mm sur les plus hautes crêtes : la diminution est de l'ordre de 30 mm/mois en tous points du PNRHJ (fig. 3.20).

3.2.2.4. Humidité relative et rayonnement global

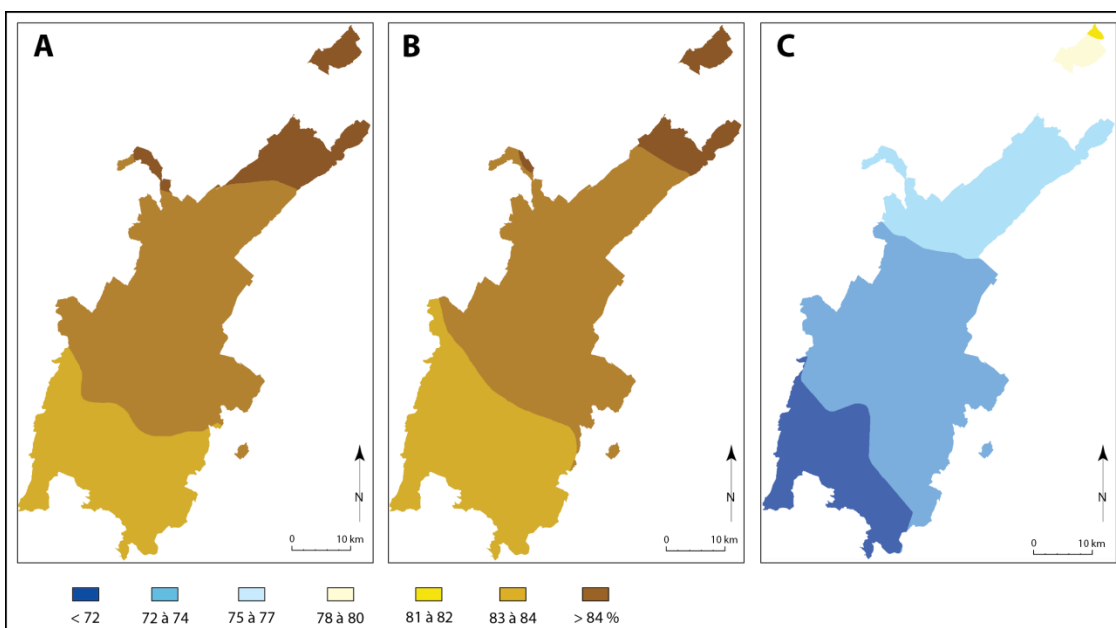


Figure 3.21 : Humidité relative de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

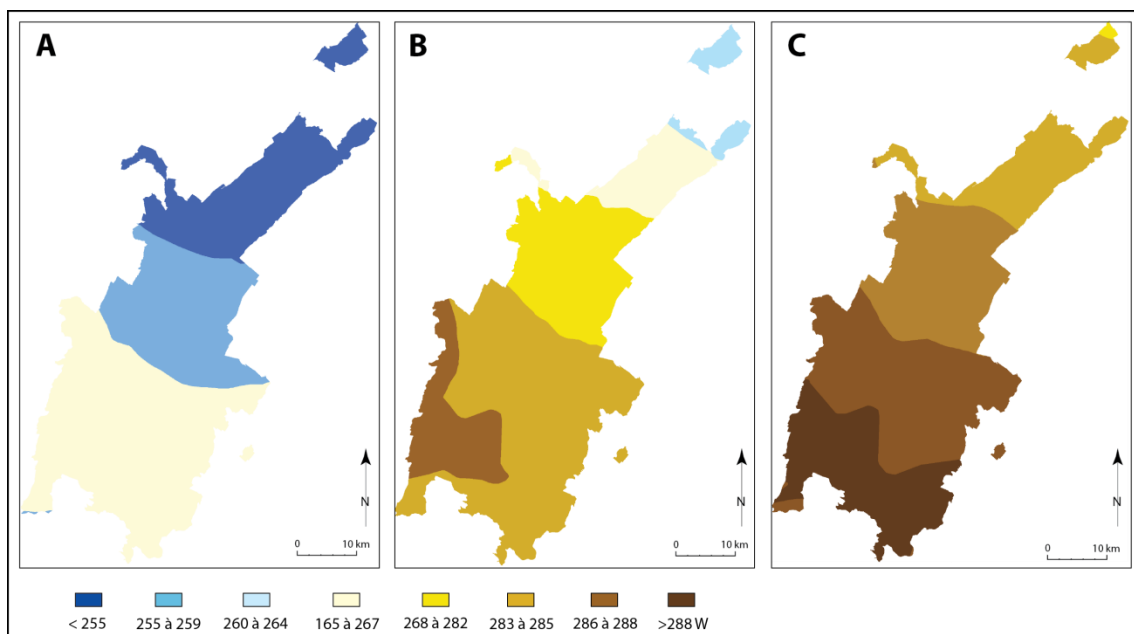


Figure 3.22 : Rayonnement global de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

L'humidité relative (fig. 3.21) décroît du nord vers le sud : supérieure à 84% en juillet vers Pontarlier, elle atteint 81-82% au sud du PNR. La situation reste stable au cours des deux normales. A la fin du XXI^{ème} siècle, l'atmosphère s'assèche d'environ 10%. Le rayonnement global (fig. 3.22) subit un processus inverse : plus élevé au sud qu'au nord, il augmente régulièrement au cours du siècle.

3.2.2.5. ETP

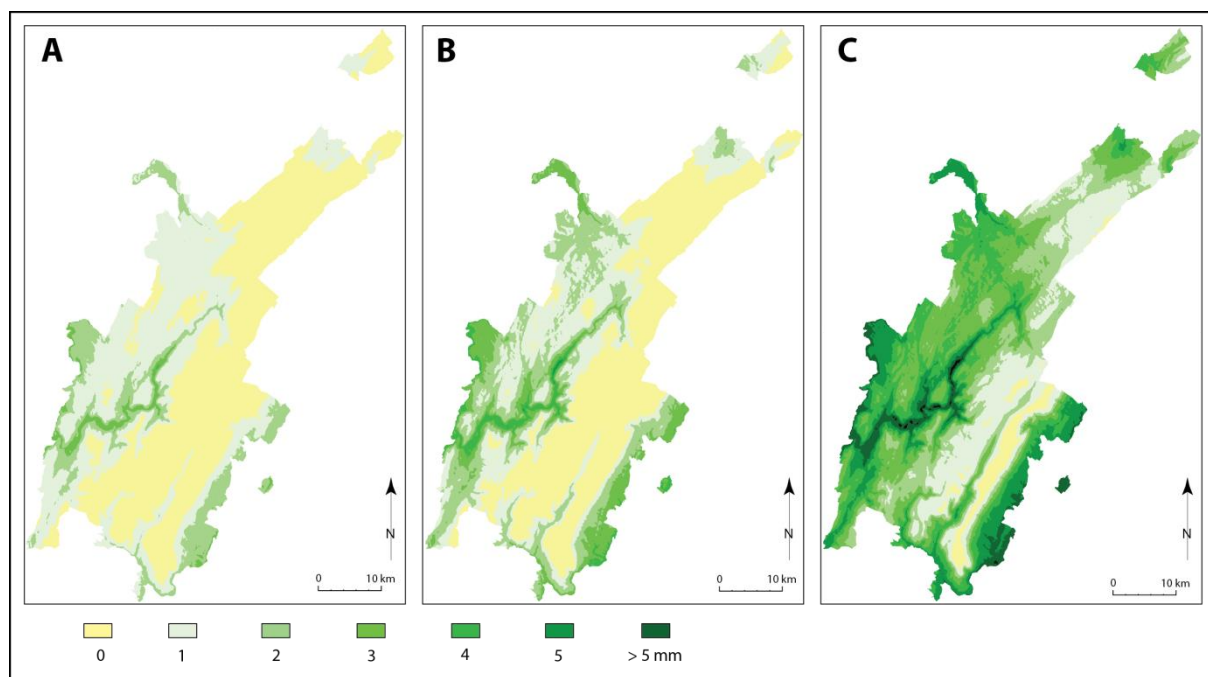


Figure 3.23 : ETP (mm) de janvier pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

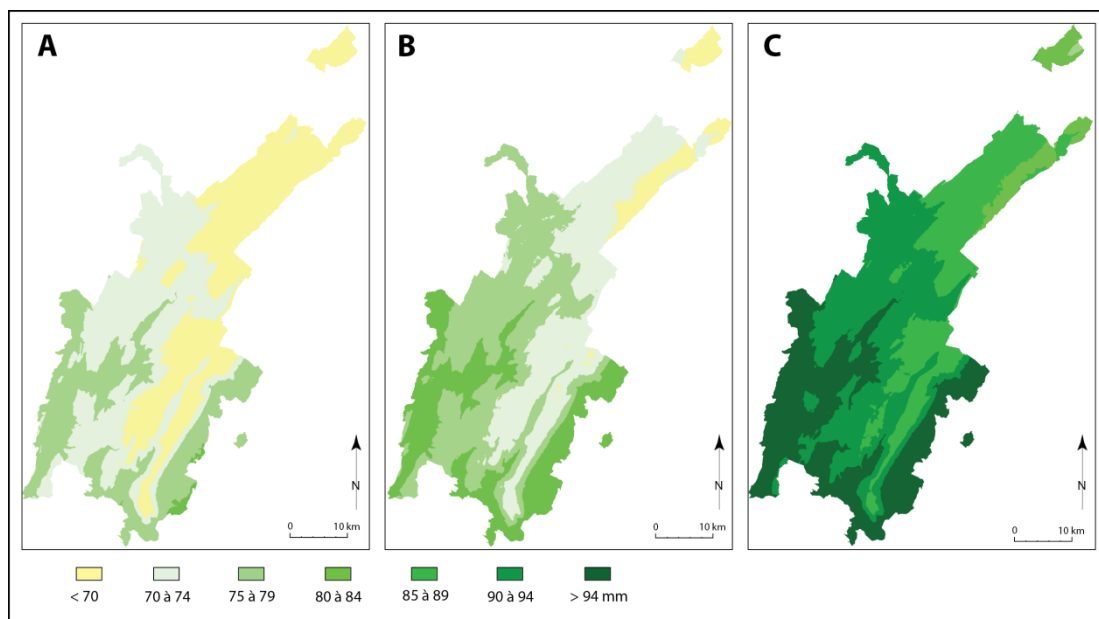


Figure 3.24 : ETP (mm) de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

L'évapotranspiration potentielle est une combinaison de trois des quatre variables dont il vient d'être montré la variation spatiale (températures moyennes calculées à partir du minimum et de maximum journalier, humidité relative et rayonnement global). Elle est très faible en janvier suite aux températures faibles d'hiver (fig. 3.23). En revanche, en juillet, la perte en eau par ce processus atteint 80 mm/mois en plaine et près de 70 mm en altitude. Avec la hausse des températures et du rayonnement au cours du siècle, la perte en eau sera supérieure de 10 mm à ces valeurs à la fin du siècle (fig. 3.24).

3.2.2.6. Bilan hydrique

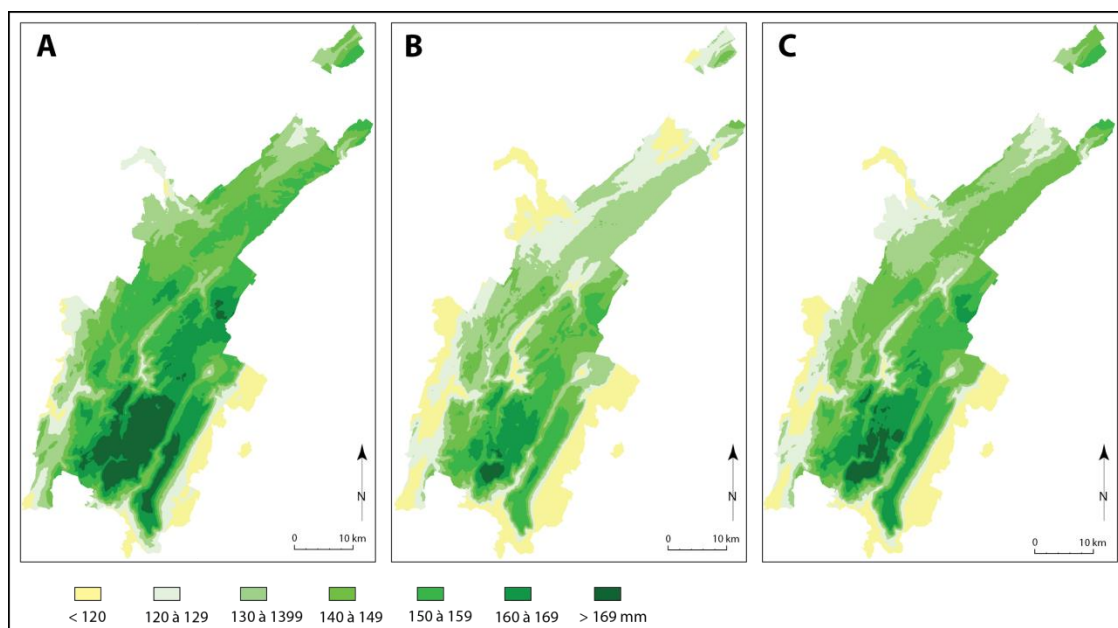


Figure 3.25 : Bilan hydrique (mm) de janvier pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Le bilan hydrique de janvier (P-ETP) est satisfaisant pour les trois normales du fait des températures qui, malgré leur hausse, restent fraîches même à la fin du XXI^{ème} siècle et des précipitations qui, malgré un léger fléchissement, restent abondantes (fig. 3.25).

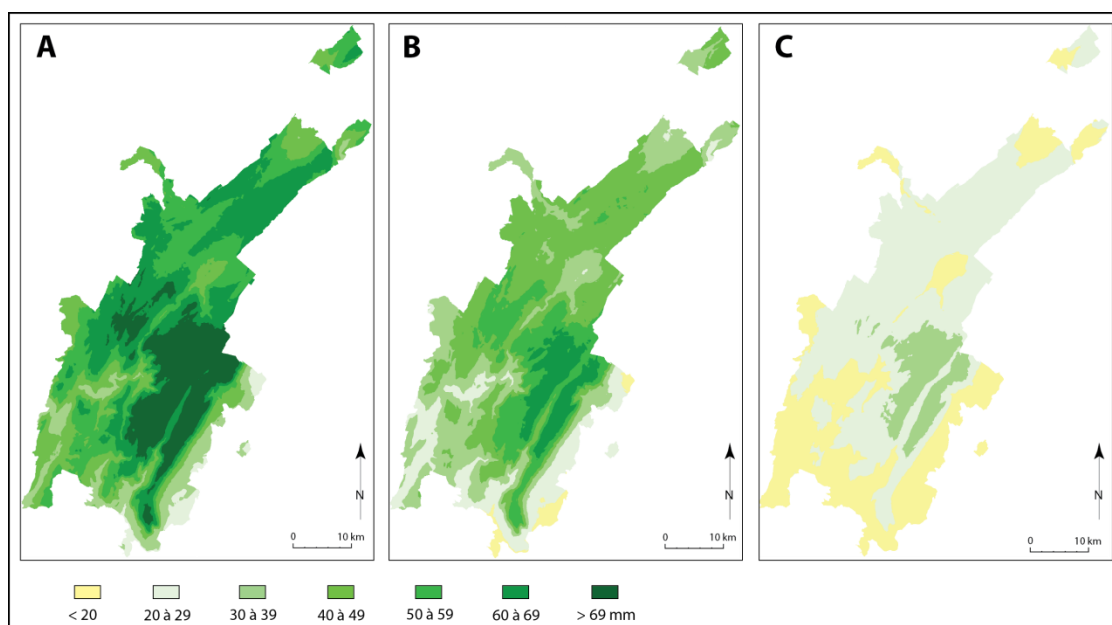


Figure 3.26 : Bilan hydrique (mm) de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Le bilan hydrique de juillet (fig. 3.26), malgré une diminution sensible à partir de 2050, restera suffisant pour la croissance des trois essences majoritaires sur le massif (hêtre, sapin et épicéa). Seules les régions de plaine verront leur bilan passer sous le seuil des 20 mm, ce qui peut, localement poser problème. Mais, tant sur les plateaux que, surtout, sur la Haute-Chaîne, le bilan hydrique dépassera cette valeur.

3.2.3. Synthèse

3.2.3.1. Estimation de la vulnérabilité des forêts

La vulnérabilité est calculée en croisant deux données : le bilan hydrique et la réserve en eau (RU). Chacune d'elles est segmentée en trois classes de valeurs (faible, moyen, fort) qui renseignent sur les conditions plus ou moins favorables offertes aux arbres (fig. 3.27). Ainsi, un bilan hydrique > 50 mm associé à une RU >90 mm fournit les conditions optimales. Inversement, des conditions beaucoup moins favorables résultent d'un bilan < 30 mm et d'une RU < 80 mm.

Jusqu'en 2050, le bilan hydrique (P-ETP) étant très largement positif, même en plaine, les exigences des arbres seront satisfaites presque partout. Seuls quelques endroits dotés de sols pelliculaires, soit très protégés (fond de vallée) ou situés très au sud pourraient présenter quelques problèmes aux arbres qui y résident. La vulnérabilité augmente au cours de la normale 2071-2100 mais il s'agit d'une fragilité toute relative car le bilan hydrique, quoique inférieur à 30 mm (mois de juillet), est très largement supérieur au seuil de -50 mm considéré comme induisant un stress hydrique rédhibitoire aux arbres. L'abondance des

pluies devrait donc neutraliser l'augmentation des températures et offrir, à horizon 2100, des conditions climato-pédologiques assez favorables.

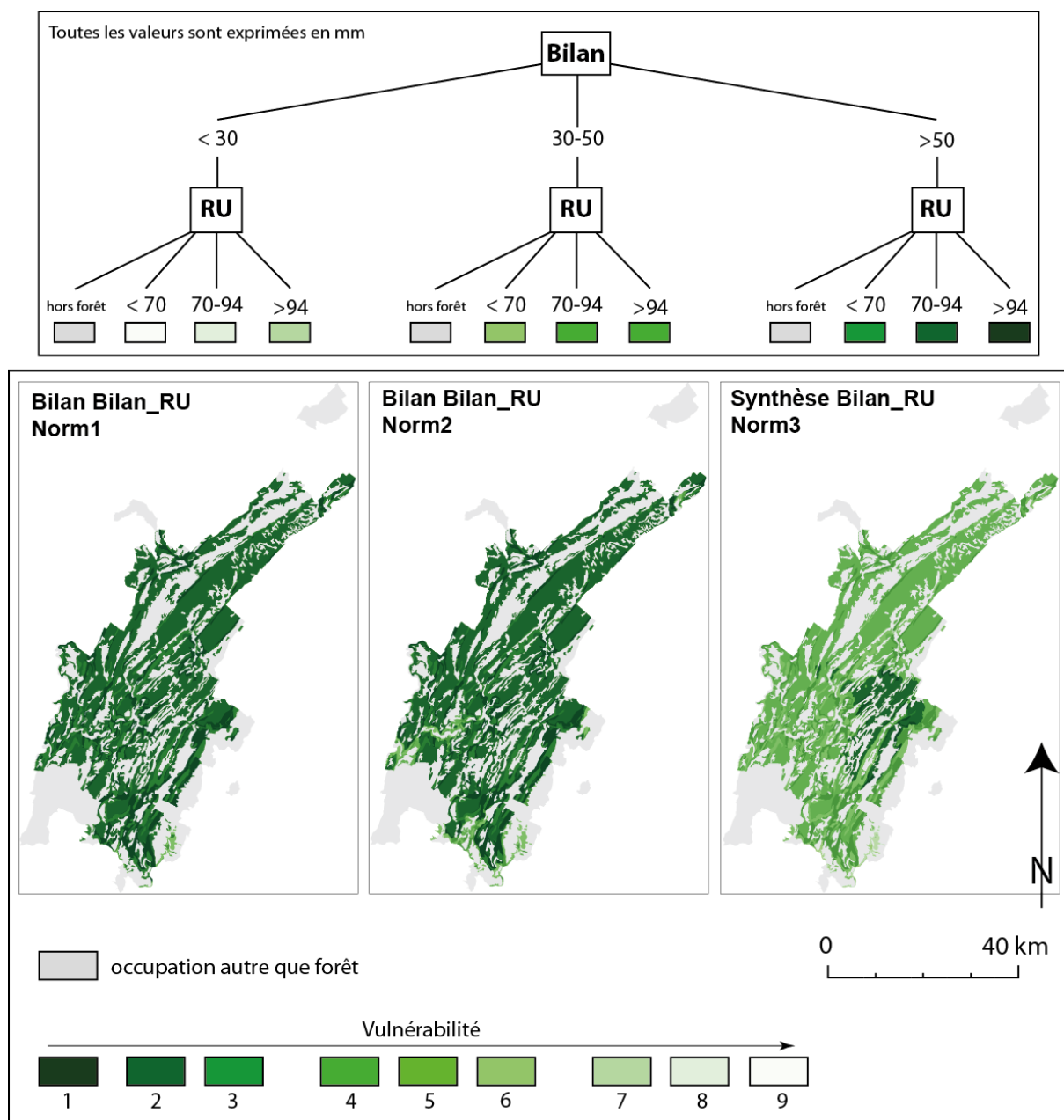


Figure 3.27 : Vulnérabilité de la forêt du PNRHJ pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Mais la normale ne donne que les tendances. Les années se suivent et ne se ressemblent pas : certains étés ont été pluvieux, d'autres secs et cette alternance persistera au cours des décennies à venir. La figure 3.28 montre la variabilité interannuelle des bilans hydriques de juillet simulés par Arpege-Climat pour le point 100. Certaines années sont excédentaires et ce, tout au long de la période de simulation. En revanche, les années déficitaires, peu nombreuses et peu décisives jusqu'à la fin des années 1990, deviennent plus nombreuses et critiques par la suite. La seconde moitié du XXI^{ème} siècle concentre près de 10 mois de juillet avec un bilan inférieur à -70 mm, certains d'entre eux étant même inférieurs à -100 mm.

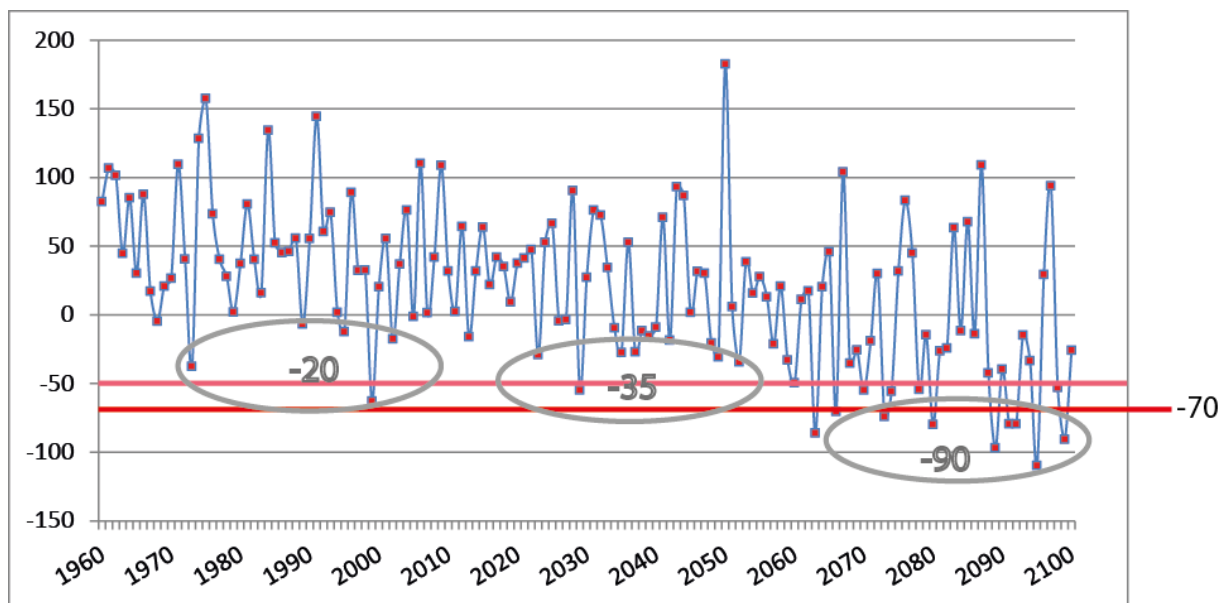


Figure 3.28 : Variation interannuelle des bilans hydriques (mm) des 5 mois de juillet les plus déficitaires de chaque normale au point 100 de Arpege-Climat

Aussi, un second calcul a-t-il été opéré sur la base des 5 mois de juillet les plus déficitaires de chaque normale. La moyenne s'échelonne de -20 mm (normale 1981-2010) à -90 mm, (normale 2071-2100). Les bilans hydriques sont beaucoup plus faibles, que pour les trente années composant chaque normale. Aucun point du territoire du Parc ne présente un bilan inférieur à -50 mm au cours de la première normale (fig. 3.29). Ensuite, avec la seconde normale, la situation se dégrade légèrement car des secteurs avec des bilans compris entre -50 et -70 mm. Au cours de la dernière normale (horizon 2100), seuls les plus hauts sommets conservent des bilans pas trop déficitaires (> -50 mm). En revanche, au fond des vallées, des valls et en plaine, les bilans sont largement inférieurs à -70 mm.

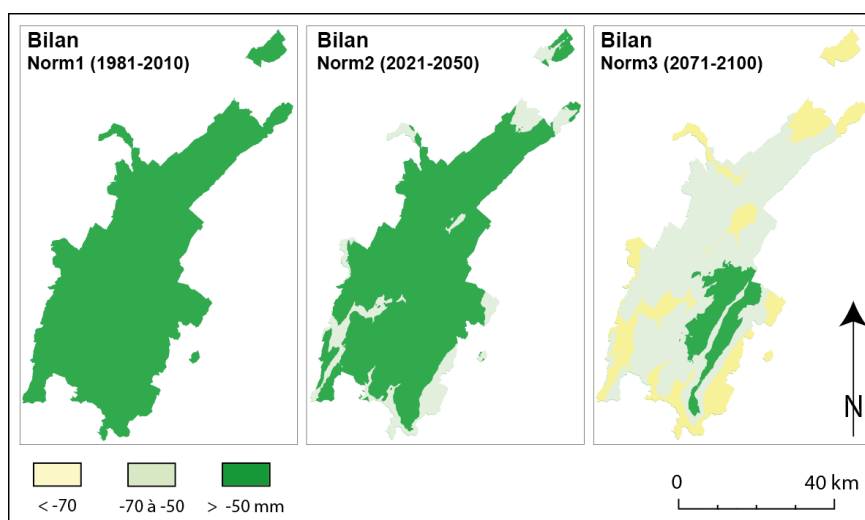


Figure 3.29 : Bilan hydrique (mm) de juillet pour les 5 années les plus déficitaires des trois normales

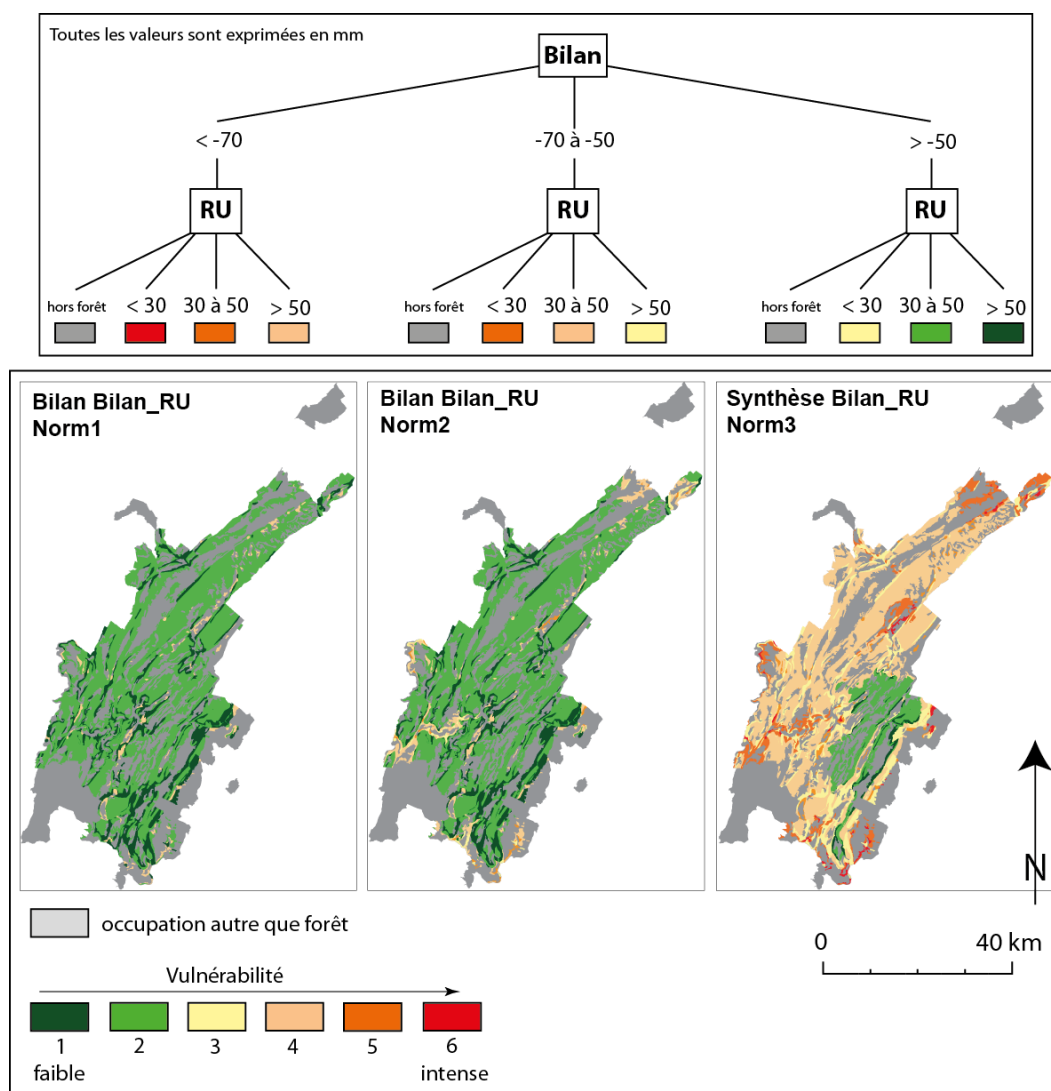


Figure 3.30 : Vulnérabilité de la forêt du PNR-HJ pour les pour les 5 mois de juillet les plus déficitaires des trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

La synthèse climato-pédologique fait apparaître une situation assez satisfaisante jusqu'en 2050 (fig. 3.30). L'essentiel du territoire présente une vulnérabilité de 4 sur une échelle qui comporte six degrés. Quelques secteurs dotés d'une RU supérieure à 50 mm peuvent résister longtemps à l'assèchement des sols, pour peu que le bilan hydrique reste supérieur à -50 mm/mois. Les secteurs dotés d'une RU inférieure à 20 mm, heureusement peu nombreux, sont cependant beaucoup plus fragiles si peu que les bilans descendent en dessous de -50 mm. C'est pourtant cette situation, en pire, qui dominera au cours de la dernière normale. En effet, les RU faibles à moyennes (20 à 50 mm) ne présentent pas une disponibilité en eau suffisante pour résister aux bilans excessivement déficitaires qui se généraliseront. L'association bilans hydriques inférieurs à -70 mm et de RU faible sera dramatique pour les arbres. Finalement, seul le cœur du massif, grâce à des bilans pas trop indigents présentera une vulnérabilité réduite. Partout ailleurs, la forêt telle que nous la connaissons, n'aura guère les moyens de résister aux conditions atmosphériques arides.

Mais ce n'est pas tout, car un autre problème est de savoir si les pluies précipiteront de manière régulière tout au long de l'été ou si de longues sécheresses s'intercaleront entre des périodes plus ou moins humides. Alors, les réserves pourront rapidement s'épuiser, privant ainsi la forêt d'une ressource vitale.

3.2.3.2. Séquences sèches

Les séquences sèches de longue durée accompagnées de températures élevées pourrait donc être un indicateur fondamental. On sait en effet que, le sapin et l'épicéa supportent assez mal les sécheresses (Pierangelo, 2011). En effet, le déficit de précipitations favorise le développement des ravageurs tels les scolytes sur les stations à faible réserve hydrique. De plus, les sécheresses ont un impact fort sur la croissance et la survie des arbres forestiers dans la mesure où elles perturbent le fonctionnement hydrique et l'assimilation carbonnée (Bréda et al., 2006).

Figure 3.31 : Nombre de périodes sèches accompagnées de températures maximales >30°C d'une durée de 15 jours au moins, en juillet et août ; occurrences par tranches de 5 ans

On a considéré qu'un jour chaud et sec se caractérise par une absence de précipitation >0.3 mm et une température maximale de 30°C ou plus. Un stress hydrique modéré peut se développer si de telles conditions se produisent au moins quatre jours successifs. Le stress augmente à mesure que la période de jours secs et chauds se prolonge. Au-delà de 10 jours, les dégâts peuvent être importants, surtout si les arbres croissent sur des sols peu épais. Avec une durée de 15 jours ou plus, on retrouve des conditions comparables à la sécheresse de l'été 2003. Les arbres subissent des dommages irrémediables sur de nombreuses parcelles dotées de sols superficiels. Là où les sols sont plus épais, le stress hydrique est moins fort, mais la résilience des arbres est mise à rude épreuve. La figure 3.31 dénombre, par tranches de 5 ans, les périodes sèches accompagnées de températures élevées d'une durée de 15 jours au moins, en juillet et août. Ces périodes sont peu nombreuses jusqu'en 2040 mais deviennent beaucoup plus fréquentes par la suite. Ainsi, on compte 1 période de sécheresse « type 2003 » sur la normale 1971-2000, 2 sur la normale 2021-2050 et 18 sur la normale 2071-2100, soit plus d'une tous les deux ans ! Le retour rapide de ces stress sans période de répit ne permettra pas aux formations arborées de récupérer un fonctionnement normal. Si cette situation se produit, elle sera fatale aux forêts du Haut-Jura.

Conclusion

La tendance des températures moyennes de janvier observées à Supt (premier plateau du Jura) traduit un gain de température de 1,7°C entre 1970 et 2010. En juillet, on passe de 15.9 à 17.6°C. Ces valeurs correspondent à une augmentation de 5°C par siècle. La simulation des températures par Arpège Climat montre que la tendance de janvier et juillet représente une augmentation de 2,5 et 4,6°C sur le siècle. Les abats de précipitation, qui devraient très légèrement décroître de 20 mm/siècle en janvier et 45 mm en juillet, restent cependant abondantes en toute saison, même à la fin du siècle. L'humidité relative devrait diminuer sensiblement, tandis que le rayonnement global devrait, au contraire, augmenter. Le modèle montre une augmentation de l'ETP quasi linéaire depuis des valeurs de l'ordre de 310 mm vers 1960 à des valeurs supérieures à 500 à la fin du XXI^{ème} siècle.

L'allure rectiligne des tendances mises en évidence n'est pas tout-à-fait conforme à la variation séculaire que l'on a observée depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Par exemple, à Besançon, la tendance sur les 122 ans d'observation est beaucoup plus faible (« seulement » +1,3°C) que ce qui a été observé au cours des quarante dernières années. Cette différence s'explique par les phases de refroidissement (1900-1920 ; 1945- 1970) qui neutralisent partiellement les phases de réchauffement (1920-1940 et surtout 1980-2003). Ces phases sont dues à des phénomènes naturels tels que la circulation océanique, les variations du rayonnement solaire, etc., qui perturbent, mais ne masquent pas la tendance linéaire, due, elle, aux gaz à effet de serre (CO², méthane, CFC, ...) rejetés dans l'atmosphère à un rythme accru depuis 200 ans. L'impact de ces derniers sur le réchauffement climatique au cours du XXI^{ème} siècle devrait être deux à trois fois supérieur à ce qu'il a été au cours du siècle passé. La variation des cinq paramètres (température, abats pluviométriques, humidité relative, rayonnement global, ETP et bilan hydrique) ne sera pas aussi régulière que celle qui a été décrite, les modèles de simulation étant incapables, à l'heure actuelle tout au moins, de prendre en compte les forçages naturels pré-cités.

Le bilan hydrique est calculé par soustraction de l'ETP des abats pluviométriques. Compte tenu des précipitations qui tendent à décroître légèrement et de l'ETP qui croît régulièrement, le bilan annuel de l'eau sera de plus en plus déficitaire, passant de 1500 mm à la fin du XX^{ème} siècle, ce qui est satisfaisant pour la végétation arborée, à 1000 mm un siècle plus tard. Le bilan hydrique de juillet, malgré une diminution sensible à partir de 2050, satisfera presque partout les exigences des trois essences majoritaires sur le massif (hêtre, sapin et épicéa). Seules les régions de plaine verront leur bilan passer sous le seuil des 20 mm, ce qui peut, localement poser problème. Mais, tant sur les plateaux que, surtout, sur la Haute chaîne, le bilan hydrique dépassera cette valeur qui n'est pas critique (c'est ce que les régions de plaine reçoivent aujourd'hui) et, si cette évolution se fait régulièrement, sans à-coups, les arbres devraient pouvoir s'adapter. Seuls quelques endroits dotés de sols pelliculaires, soit très protégés (fond de vallée) ou situés très au sud pourraient présenter quelques problèmes aux arbres qui y résident. La vulnérabilité augmente au cours de la normale 2071-2100 mais il s'agit d'une fragilité toute relative car le bilan hydrique est très

largement supérieur au seuil de -50 mm considéré comme induisant un stress hydrique rédhibitoire aux arbres. L'abondance des pluies devrait donc neutraliser l'augmentation des températures et offrir, à horizon 2100, des conditions climato-pédologiques assez favorables.

Le vrai problème est celui des années sèches dont le volume pluviométrique pourrait passer sous la barre des 700 mm, critique pour le hêtre par exemple, environ une année sur dix. Ces variations ne seront pas sans conséquences sur la survie de certains végétaux et la reconstitution des nappes phréatiques, avec sans doute également, comme corollaire, la disponibilité en eau pour toutes les activités humaines. Mais les étés les plus déficitaires présenteront des bilans catastrophiques. La situation de 2003 (températures supérieures à 30°C sans pluie sur plus de 15 jours), rare jusqu'en 2050 (une occurrence sur 40 ans), deviendra plus fréquente par la suite (une année sur cinq en moyenne à horizon 2075) et même « normale » à partir de 2080 (une année sur deux). Il est peu probable que la forêt du PNRHJ telle qu'on l'a connaît aujourd'hui résiste à de tels stress. Les arbres subiront des dommages irrémédiables sur de nombreuses parcelles dotées de sols superficiels. Là où les sols sont plus épais, le stress hydrique est moins fort, mais la résilience des arbres sera mise à rude épreuve.

Bibliographie

Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought : a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, vol. 63, p.20.

GIEC, 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]*. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.

Hay, L.E., Wilby, R.J.L. and Leavesley, G.H., 2000. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *Journal Of The American Water Resources Association*, 36(2): 387-397.

Joly D, 2009, "LISDQS : logiciel d'interpolation statistique de données quantitatives et spatiales", (<http://thema.univ-fcomte.fr/LISDQS-un-nouveau-logiciel-d>)

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhès J., Hilal M., Wavreski P., 2009, "Interpolation par régressions locales : application aux précipitations en France", *L'Espace Géographique*, No 2, 157-170.

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhès J., Hilal M., Wavresky P., 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale (Types of climate on continental France, a spatial construction). *Cybergeo : European Journal of Geography*, (501).

<http://cybergeogeo.revues.org/index23155.html>

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhès J., Hilal M., Wavresky P., 2011. Temperature Interpolation by local information; the example of France, 2011. *International Journal of Climatology*, 31(14), 2141-2153.

Pierangelo A., 2011. Impact des sécheresses estivales sur la croissance radiale: une étude compare du hêtre commun et du sapin pectiné dans le Bugey. Mémoire de fin d'étude, AgroParisTech, ENGREF, ONF, 94 p.

Wilby R.L. et Wigley T.M.L., (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations, *Progress in Physical Geography*, 21, 530–548.

Wilby R.L., Charles S.P., Zorita E., Timbal B., Whetton P., Mearns L.O., 2004. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. 27 pp. Publié en ligne, supporting material to the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2.

Liste des figures

1. Aire d'étude et acquisition des données

Figure 1.1 : Modèle numérique de terrain et stations climatiques gérées par Météo-France

Figure 1.2 : localisation des 230 (France continentale) et 27 (80-120 km autour du PNR) points de grille Arpege-Climat.

2. Méthodes

Figure 2.1 : Gradients altitudinaux de température mensuelle entre Besançon et Mouthe

3. Résultats

3.1. Variations temporelles

Figure 3.1 : Variation de la température moyenne (°C) de janvier et de juillet observée à la station de Supt entre 1970 et 2008

Figure 3.2 : Variation de la température moyenne (°C) de janvier au point 100 de Arpege-Climat entre 1960 et 2100 et de Supt de 1970 à 2008 ; en gras, moyenne mobile à pas de 10 ans

Figure 3.3 : Variation de la température moyenne (°C) de juillet au point 100 de Arpege-Climat entre 1960 et 2100

Figure 3.4 : Variation de la température moyenne mensuelle (°C) au point 100 de Arpege-Climat selon les trois normale (Arpege 1=1981-2010 ; 2= 2021-2050 ; 3 = 2071-2100

Figure 3.5 : Variation des abats pluviométriques (mm) à Supt de 1970 à 2000

Figure 3.6 : Variation des abats pluviométriques moyens (mm) de janvier au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100 et à Supt de 1970 à 2000

Figure 3.7 : Variation des abats pluviométriques moyens (°C) de juillet au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100 et à Supt de 1970 à 2000

Figure 3.8 : Variation des abats de précipitations moyens mensuels (mm) au point 100 de Arpege-Climat selon les trois normale (Arpege 1=1981-2010 ; 2= 2021-2050 ; 3 = 2071-2100) et à Supt (1971-2000)

Figure 3.9 : Variation de l'humidité relative moyenne au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100

Figure 3.10 : Variation du rayonnement global moyen de janvier et juillet au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100

Figure 3.11 : Variation de l'ETP moyen (mm) de janvier et juillet au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100

Figure 3.12 : Variation des abats pluviométriques et du bilan hydrique moyens annuels (mm) au point 100 de Arpege-Climat de 1960 à 2100

3.2. Variations spatiales

Figure 3.13 : température maximales de juillet issues des 27 points de grille Arpege-Climat proches du PNR ; A=normale 1981-2010 ; B= normale 2021-2050 ; C=normale 2071-2100

Figure 3.14 : Delta de la température moyenne de juillet

Figure 3.15 : température moyenne de juillet issue des 46 stations d'observation MF (A) et des 27 points de grille Arpege-Climat (B)

Figure 3.16 : dispersion des trois normales découpées en 9.classes

Figure 3.17 : température moyenne de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.18 : température moyenne de janvier pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.19 : Abats de précipitation de janvier pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.20 : Abats de précipitation de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.21 : Humidité relative de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.22 : Rayonnement global de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.23 : ETP (mm) de janvier pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.24 : ETP (mm) de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.25 : Bilan hydrique (mm) de janvier pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.26 : Bilan hydrique (mm) de juillet pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.27 : Vulnérabilité de la forêt du PNR-HJ pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.28 : Variation interannuelle des bilans hydriques (mm) des 5 mois de juillet les plus déficitaires de chaque normale au point 100 de Arpege-Climat

Figure 3.29 : Bilan hydrique (mm) de juillet pour les 5 années les plus déficitaires des trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C)).

Figure 3.30 : Vulnérabilité de la forêt du PNR-HJ pour les trois normales (1981-2010 (A), 2021-2050 (B) et 2071-2100 (C))

Figure 3.31 : Nombre de périodes sèches accompagnées de températures maximales >30°C d'une durée de 15 jours au moins, en juillet et août ; occurrences par tranches de 5 ans

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : fréquence des classes découpées selon des seuils compatibles avec les trois normales ; exemple de la température minimale de juillet

Tableau 3.2 : fréquence des classes découpées selon des seuils compatibles avec les trois normales ; précipitations de janvier

Tableau 3.3 : fréquence des classes découpées selon des seuils compatibles avec les trois normales ; précipitations (mm) de juillet

Table des matières

Introduction	2
1. Aire d'étude et acquisition des données	3
1.1. L'aire d'étude	3
1.2. Les données	3
1.2.1. Données collectées par Météo-France	3
1.2.2. Sorties du modèle Arpege-Climat	4
2. Méthodes	5
2.1. Interpolation : du ponctuel au continu	6
2.1.1. Régression et krigeage	6
2.1.2. Les variables explicatives des régressions	7
2.2. Descente d'échelle des sorties du modèle Arpege-Climat	8
2.2.1. Le principe	8
2.2.2. Absence de tendance des gradients altitudinaux	9
2.4. Calcul de l'ETP	10
3. Résultats	12
3.1. Variations temporelles du climat au cours des XX^{ième} et XXI^{ième} siècles	12
3.1.1. Températures	12
3.1.1.1. Températures MF	12
3.1.1.2. Températures Arpege-Climat	12
3.1.2. Précipitations	14
3.1.3. Rayonnement global et Humidité relative	16
3.1.4. ETP et bilan hydrique	17
3.1.4.1. ETP	17
3.1.4.2. Bilan hydrique	
3.2. Variations spatiales	18
3.2.1. Mise en œuvre du « downscaling »	18
3.2.2. Application à six variables	21
3.2.2.1. Température moyenne de juillet	21
3.2.2.2. Température moyenne de janvier	22
3.2.2.3. Abats de précipitations	23
3.2.2.4. Humidité relative et rayonnement global	24
3.2.2.5. ETP	25

3.2.2.6. Bilan hydrique	26
3.2.3. Synthèse	27
3.2.3.1. Estimation de la vulnérabilité des forêts	27
3.2.3.2. Séquences sèches	31
Conclusion	32
Bibliographie	

Annexes (document séparé)

Annexe 1 : Températures sous couvert forestier	1
1.1. Variations temporelles des températures sous couvert forestier	3
1.2. Structures spatiales des températures	6
1.3. Modélisation spatiale	10
1.3.1. Minimums de juillet	11
1.3.2. Minimums de décembre	12
1.3.3. Maximums de juillet	12
1.3.4. Maximums de décembre	13
Annexe 2 : Comparaison des températures observées sous couvert forestier et en espace ouvert dans le Jura (article de colloque)	15
Annexe 3 : Etude comparative de la température en forêt et en espace ouvert dans le Parc Naturel Régional du Haut-Jura (article de revue)	21