

Etude du changement climatique pour le SRCAE Rhône-Alpes

Etude réalisée
par Météo-France Centre-Est
Division Développements-Etudes-Climatologie

pour la DREAL Rhône-Alpes

décembre 2010

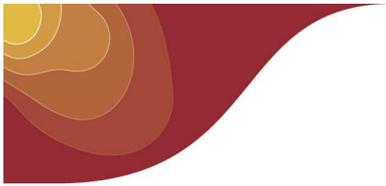
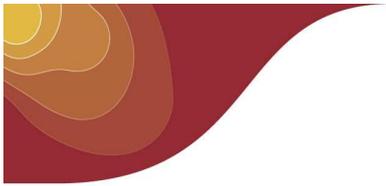


TABLE DES MATIERES

I.	INTRODUCTION	3
II.	LES CLIMATOLOGIES DE REFERENCE	4
A.	Climatologie à maille fine : la climatologie AURELHY	4
B.	Climatologie de la canicule	5
C.	Climatologie de la sécheresse et des fortes chaleurs	6
D.	Climatologie des DJU	7
E.	Climatologie du vent	7
III.	LES PROJECTIONS CLIMATIQUES	9
A.	Les simulations climatiques - le modèle ARPEGE-CLIMAT	9
B.	Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre	9
C.	Correction des sorties du modèle	11
D.	La descente d'échelle	12
E.	Les incertitudes	13
IV.	RESULTATS DE L'ETUDE	16
A.	Les indicateurs climatiques	16
1.	Rappel des définitions	16
2.	Liste des indicateurs étudiés	16
3.	Périodes d'étude	17
4.	Eléments de lecture des cartes	17
5.	Spatialisation de l'indicateur canicule	18
6.	cartographie de chaque indicateur	19
B.	Evolution du vent moyen	61
C.	l'évolution des DJU à l'horizon 2030	64
1.	Les DJU du chauffagiste (seuil 18°C en plaine, 16°C en montagne)	65
2.	Les DJU du climaticien (seuil 25°C)	67
D.	Recherche de saisons représentatives	70
V.	CONCLUSIONS	72



I. Introduction

Dans le cadre de l'élaboration de son Schéma Régional Climat Air Energie (SRCAE), la DREAL Rhône-Alpes a commandé à Météo-France une étude sur les changements du climat de la région Rhône-Alpes pour le siècle à venir.

L'étude proprement dite comporte trois parties.

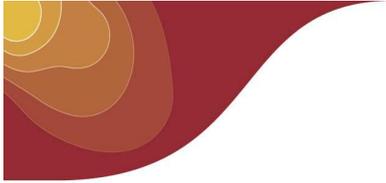
La première est une analyse d'indicateurs climatiques calculés à partir de deux paramètres de base, les précipitations et la température. Ces indicateurs ont été projetés sur 3 fenêtres temporelles ouvertes sur le XXI^{ème} siècle puis comparés aux valeurs de référence qui reflètent le climat actuel. L'analyse de ces indicateurs est faite à une échelle suffisamment fine pour discerner les grands territoires qui composent la région rhône-alpine.

La seconde partie est l'étude de l'évolution du vent moyen, paramètre d'entrée pour étudier l'évolution du potentiel éolien. La méthode employée est la même que celle utilisée pour les indicateurs climatiques : modélisation du vent sur le siècle à venir et comparaison des valeurs obtenues avec les valeurs actuelles. Compte tenu de la très grande variabilité spatiale du vent, il n'est cependant pas possible de réduire l'échelle spatiale imposée par le modèle utilisé.

Les deux dernières parties répondent aux besoins des Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) associées au SRCAE. Il s'agit d'une part de quantifier l'évolution du paramètre Degré Jour Unifié (DJU) jusqu'à l'horizon 2030 et d'autre part de déterminer quel hiver et quel été parmi ceux des années 2000 à 2009 sont les plus représentatifs en terme de conditions favorables à l'apparition de pic de pollution par les particules l'hiver, par l'ozone l'été.

Pour quantifier l'évolution du climat, nous confrontons donc, paramètre par paramètre, une climatologie de référence, décrivant les valeurs actuelles de ces paramètres, avec une climatologie du futur issue de la projection sur l'ensemble du XXI^{ème} siècle de leurs valeurs.

Avant de présenter les résultats des trois parties de l'étude, nous détaillons comment les climatologies de référence ont été élaborées puis nous explicitons la modélisation utilisée pour la projection des paramètres météorologiques jusqu'à 2100, en insistant sur les incertitudes associées.



II. Les climatologies de référence

Le climat correspond à la distribution statistique des conditions atmosphériques dans une région donnée pendant une période de temps donnée. La caractérisation du climat est effectuée à l'aide de statistiques annuelles, saisonnières et mensuelles établies à partir de mesures atmosphériques locales.

La période de référence doit être suffisamment longue pour prendre en compte la variabilité inter-annuelle que montrent de nombreux paramètres météorologiques parmi lesquels les précipitations et la température. Communément, la période de référence choisie par Météo-France comporte les 30 années de 1971 à 2000. Les statistiques calculées sur cette période, au premier rang desquelles figure la moyenne arithmétique, sont souvent appelées les normales 1971-2000.

Un inconvénient inhérent à la méthode de calcul de ces normales est qu'on ne dispose de statistiques pour un paramètre que pour les points du territoire qui disposent de 30 années de mesure de ce paramètre alors qu'il serait très utile d'en disposer pour tout point du territoire. La climatologie AURELHY remédie à cet inconvénient.

A. Climatologie à maille fine : la climatologie AURELHY

AURELHY (Analyse Utilisant le Relief pour l'Hydrologie) est une méthode développée par Météo-France pour réaliser une climatologie fine, à 1 km de résolution spatiale.

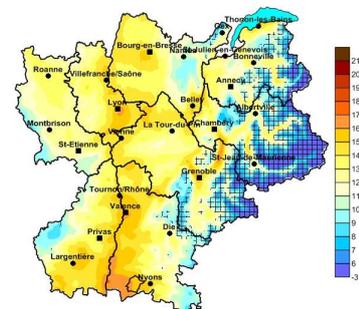
Le principe général de la méthode AURELHY consiste à interpoler les valeurs entre les points disposant des 30 années de mesure d'un paramètre, en reliant la variabilité spatiale du paramètre à celle du relief.

La méthode se déroule en trois étapes principales :

- reconnaissance automatique du lien statistique entre le paramètre étudié et les composantes du relief avoisinant les stations météorologiques (formes générales de paysage),
- utilisation de ce lien statistique pour reconstituer les valeurs mensuelles du paramètre, sur l'ensemble de la période de référence, sur une grille de maille régulière de 1km,
- calcul des normales du paramètre à maille fine.

Outre la résolution apportée, la méthode renseigne sur le rôle que joue le relief (lien statistique) sur la répartition spatiale du paramètre.

Le principal inconvénient de cette méthode repose sur le fait de devoir disposer de suffisamment de points de mesure pour que l'interpolation entre ces points soit légitime. **Hors, les stations de montagne sont trop peu nombreuses et au-dessus de 1500 mètres d'altitude, l'interpolation effectuée dans cette méthode est souvent hasardeuse.** C'est en particulier le cas pour toutes les statistiques qui concernent la température. Nous avons donc choisi de masquer partiellement ces valeurs d'altitude, par la superposition d'un quadrillage, dans les cartes présentées plus loin.



Exemple: normale aurelhy 1971-2000 de température minimale estivale

Si nous avons pu utiliser les normales AURELHY 1971-2000 pour la plupart des indicateurs climatiques figurant dans cette étude, elles ne sont pas disponibles pour certains paramètres.



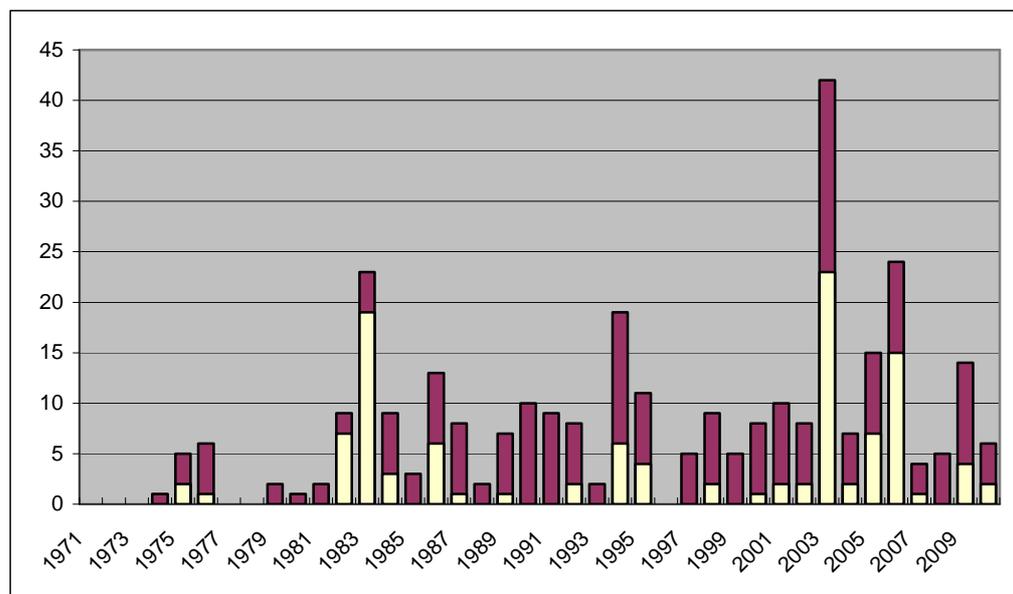
Nous avons donc réalisé une climatologie spécifique pour les indicateurs climatiques canicule et sécheresse, pour les DJU et pour le vent.

B. Climatologie de la canicule

Nous avons pris comme définition de la canicule, celle utilisée dans la procédure vigilance canicule : celle-ci est activée dès lors qu'il est prévisible que l'on mesure conjointement et pendant 3 jours consécutifs des températures minimales et maximales supérieures à des seuils pré-établis. Ces seuils sont fixés par département :

Département	Seuil température minimale	Seuil température maximale	Département	Seuil température minimale	Seuil température maximale
01	20	35	42	19	35
07	20	35	69	20	34
26	21	36	73	19	34
38	19	34	74	19	34

Pour notre climatologie, nous ne travaillons pas sur les prévisions mais uniquement sur les observations. Nous avons recherché dans l'ensemble des mesures de températures effectuées en Rhône-Alpes entre 1971 et 2010, toutes les dates pour lesquelles les 2 seuils ont été conjointement dépassés. Nous choisissons ici d'allonger la période de référence pour augmenter le nombre de cas d'observation du phénomène canicule. Le graphique suivant montre en effet que c'est un phénomène peu observé.



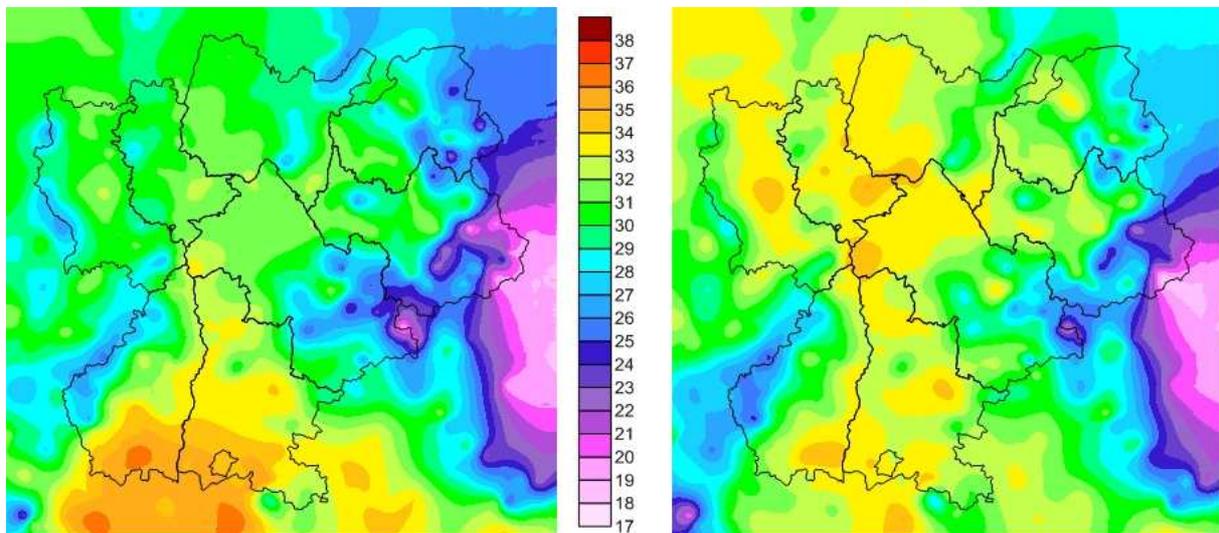
Canicule : la hauteur totale des barres indique le nombre de jours annuel de dépassement conjoint des 2 seuils de température en un point quelconque du territoire rhône-alpin. La part colorisée en jaune représente le nombre de ces dépassements pendant 3 jours consécutifs (sans contrainte sur le lieu).

Pour chacune de ces dates, les champs de températures minimales et maximales sont spatialisés par un krigeage simple sur une grille de 1km de résolution. Il ne reste plus pour



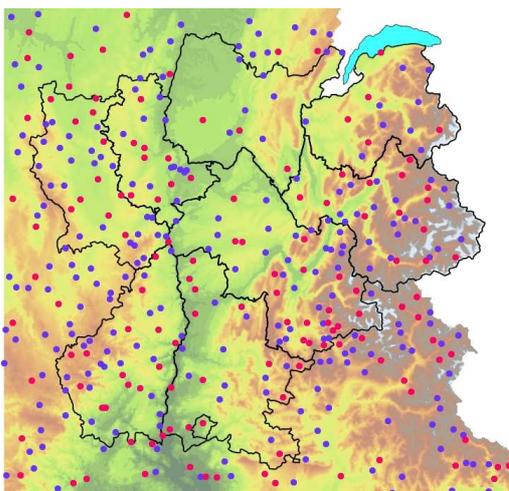
établir la climatologie de la canicule qu'à compter en chaque point de la grille les occurrences d'apparition de 3 jours consécutifs de dépassement des 2 seuils de température (4 jours consécutifs donnent 2 occurrences).

Parallèlement à la constitution de cette climatologie, nous effectuons une partition en 7 classes de l'ensemble de ces dates en fonction du dépassement ou non des seuils de température en certains points particuliers de la grille, ceux coïncidant aux points de modélisation du climat futur et situés en plaine. Les champs de températures minimales et maximales sont alors moyennés par classe. On obtient ainsi une topologie des diverses situations à canicule qui peuvent frapper la région rhône-alpine. Cette topologie nous servira pour appréhender la répartition spatiale de la canicule dans le futur.



Canicule : moyenne de la température maximale des situations avec seuils de température dépassés au sud seulement (à gauche) et au nord seulement (à droite)

C. Climatologie de la sécheresse et des fortes chaleurs



Position des stations utilisées pour constituer la climatologie de la sécheresse (points bleus et rouge) et des fortes chaleurs (points rouges uniquement)

La climatologie de la sécheresse a été établie sur tous les postes possédant l'ensemble des mesures de pluies entre 1971 et 2000 sur la zone d'étude, soit 253 au total dont 161 en Rhône-Alpes. Le maximum annuel de jours consécutifs avec moins d'un millimètre de précipitation quotidienne a été déterminé pour chaque station et pour chacune des 30 années puis moyenné par station. Ces moyennes ont ensuite été spatialisées par krigeage simple sur une grille régulière d'un kilomètre de résolution. La même méthode a été appliquée pour établir la climatologie des fortes chaleurs (nombre de jours annuel ayant une température maximale supérieure à 35°C). Le nombre de postes utilisés est plus restreint que pour la sécheresse : 137 au total dont 90 en Rhône-Alpes.



D. Climatologie des DJU

Pour répondre à la demande des AASQA sur l'évolution des DJU, il était nécessaire d'en établir une climatologie.

Rappelons tout d'abord les méthodes de calcul des DJU utilisées dans cette étude. Elles sont au nombre de deux et prennent T_{moy} , la température moyenne quotidienne, en entrée :

- la première, utilisée pour étudier les besoins liés au chauffage (on parle de DJU méthode chauffagiste), cumule les déficits quotidiens de température par rapport à un seuil S , fixé dans l'étude à 18°C en dessous de 1000 mètres d'altitude et 16°C à partir de 1000 mètres d'altitude. Les DJU quotidiens sont alors donnés par la formule suivante : si $S \leq T_{moy}$ alors $DJU=0$ sinon $DJU=S-T_{moy}$
- la seconde, utilisée pour étudier les besoins liés à la climatisation (on parle de DJU méthode climaticien), cumule les excédents quotidiens de température par rapport à un seuil S , fixé dans l'étude à 25°C . Les DJU quotidiens sont alors donnés par la formule suivante : si $S > T_{moy}$ alors $DJU=0$ sinon $DJU=T_{moy}-S$

La spatialisation par krigeage simple des valeurs de DJU calculées aux points de mesure de notre réseau n'aurait pas permis de restituer l'influence du relief. Nous avons donc calculé ces DJU en chaque point de la grille Aurelhy, à 1km de résolution spatiale. Pour cela, nous avons utilisé une méthode qui s'appuie sur les moyennes mensuelles Aurelhy de températures minimales et maximales calculées sur la période 1991-2000. Pour calculer les DJU quotidiens sur la grille Aurelhy, nous déroulons l'algorithme suivant :

- 1) Pour chaque point de mesure, calcul de la différence entre la température minimale mesurée et la température minimale Aurelhy du mois (moyenne 1991-2000)
- 2) Krigeage simple de ce champ de différences de température à la résolution Aurelhy (1km)
- 3) Obtention du champ de température minimale par somme du champ obtenu en 2) et du champ aurelhy utilisé en 1)
- 4) On reproduit les étapes 1) à 3) avec les températures maximales
- 5) Calcul des champs des DJU chauffagistes et climaticiens à partir des champs de températures minimales et maximales en appliquant en chaque point les méthodes décrites ci-dessus.

Les champs annuels de DJU sont obtenus en cumulant les champs quotidiens de DJU ainsi produits et la climatologie est la moyenne de ces champs annuels. La restriction faite à la climatologie Aurelhy concernant la non-pertinence de cette climatologie au-dessus de 1500 mètres d'altitude est également valable pour les climatologies de DJU.

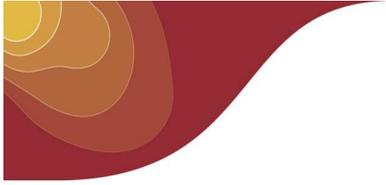
E. Climatologie du vent

Le paramètre vent étudié ici est le vent moyen quotidien. Le vent moyen horaire est mesuré par nos stations comme la moyenne arithmétique sur l'intervalle de 10 minutes qui précèdent l'heure ronde, des nombreuses vitesses instantanées du vent mesurées par l'anémomètre du site durant cet intervalle. Le vent moyen quotidien est la moyenne des 24 valeurs de vent moyen horaire établies sur une journée.

Du fait de sa très forte dépendance aux phénomènes orographiques, le vent n'est pas un paramètre qu'il est possible de spatialiser facilement. Nous nous contentons donc pour le vent d'une climatologie sur les points de mesure de ce paramètre. La variabilité inter annuelle du vent moyen est faible, c'est pourquoi, pour ne pas restreindre ce nombre de points de mesure



déjà faible, nous limitons la période d'étude aux dix dernières années, de 2000 à 2009. Malgré cela, notre climatologie ne repose que sur 25 points de mesure.

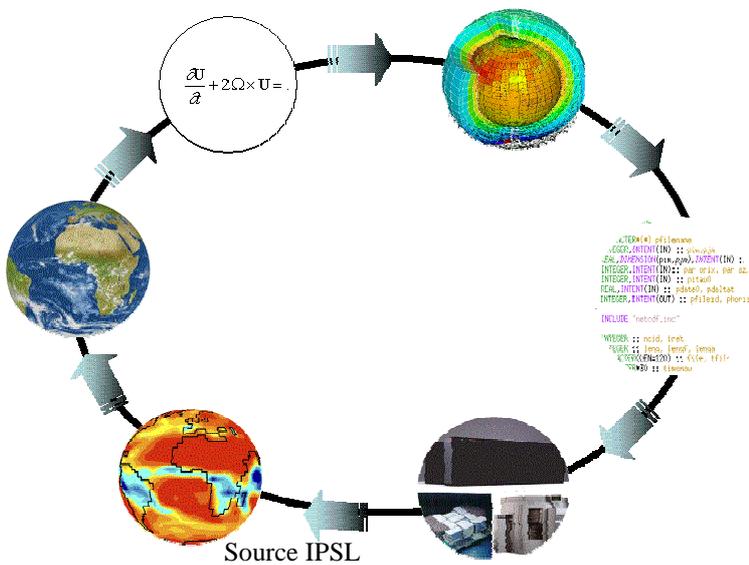


III. Les projections climatiques

Ce chapitre présente les différents outils que nous avons utilisés dans cette étude pour déterminer les scénarios du climat futur, scénarios qui ne sont pas des prévisions mais des évolutions possibles en l'état actuel des connaissances. Une attention particulière est portée pour qualifier et quantifier si possible l'incertitude associée à ces outils.

A. Les simulations climatiques - le modèle ARPEGE-CLIMAT

Seuls des outils mathématiques très complexes sont capables de reconstituer l'évolution des éléments qui composent le système climatique. Ce sont les modèles climatiques.





l'économie, le développement industriel et agricole, et de façon assez simplifiée la chimie atmosphérique.

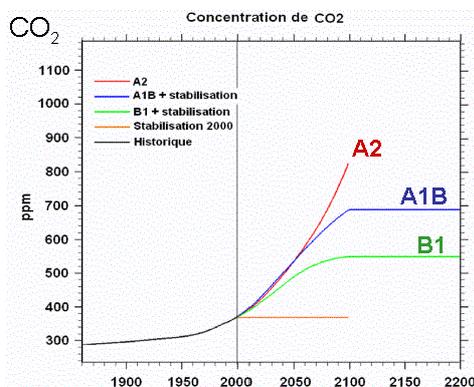
Nous retiendrons pour cette étude, les scénarios A1B, A2 et B1 du GIEC.

Le scénario A1B décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principales caractéristiques sous-jacentes sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, ainsi qu'une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant. Ce scénario retient un équilibre entre les sources ("équilibre" signifiant que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies de l'approvisionnement énergétique et des utilisations finales). Autrement dit, le scénario A1B table sur une forte croissance économique qui suppose des échanges mondiaux importants.

Le scénario A2 décrit un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale ; la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que pour les autres scénarios.

Autrement dit, le scénario A2 table sur une croissance économique qui met l'accent sur les échanges régionaux.

Le scénario B1 décrit un monde convergent avec la population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le scénario A1B, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat. Autrement dit, le scénario B1 suppose des échanges mondiaux importants tout en privilégiant l'environnement.



Le graphique ci-contre, tiré du rapport du GIEC 2007, montre l'évolution de la concentration de la dioxine de carbone dans l'atmosphère au cours du XXI^{ème} siècle selon différents scénarios d'émission.



C. Correction des sorties du modèle

Les données simulées par les modèles climatiques présentent certaines erreurs systématiques sur les moyennes, et reproduisent assez mal certains extrêmes. Par exemple, le modèle Arpège-Climat sur-estime les pluies faibles et sous-estime les pluies fortes. Il est donc nécessaire de corriger les variables du modèle. Heureusement, les modèles climatiques comportent une simulation, dite de référence, sur la période 1950-2000 qui permet par comparaison avec les séries de mesures réalisées sur cette même période de recalibrer les résultats du modèle. La façon la plus exhaustive d'analyser le comportement du modèle en

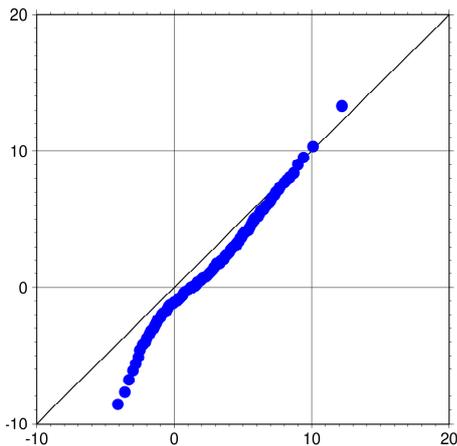


Diagramme quantile-quantile pour les températures minimales à Paris en hiver (°C). Les quantiles du modèle sont en abscisse et ceux de l'observation sont en ordonnée

une station est de comparer les fonctions de densité probabiliste pour chaque saison et paramètre. Le diagramme quantile-quantile devient ainsi un outil d'analyse et une méthode de correction.

La méthode de correction quantile-quantile est une méthode non-linéaire. Elle consiste à corriger les valeurs des quantiles du modèle par ceux calculés à partir des observations. En chaque point du modèle, pour chaque variable météorologique on calcule les 99 centiles des séries quotidiennes. On calcule de même les 99 centiles des séries observées. Chaque variable est corrigée indépendamment et au pas de temps quotidien. La fonction de correction consiste à associer chaque centile du modèle au centile observé. Pour toute valeur du modèle située entre deux centiles, on fait une interpolation linéaire. Au-delà du 99ème et en deçà du 1er, on applique une correction constante estimée sur le centile extrême correspondant.

Cette méthode permet de corriger les plus gros défauts du modèle notamment en terme d'intensité des phénomènes extrêmes ou de fréquence de jours pluvieux. Cette méthode possède en particulier l'avantage de corriger les biais du modèle.

La méthode offre la possibilité d'utiliser les observations de plusieurs stations à l'intérieur d'une zone ou d'une maille du modèle, ce qui permet d'augmenter la taille de l'échantillon et de prendre en compte la variabilité sous-maille. Elle est adaptée pour l'étude des extrêmes et présente une bonne cohérence temporelle permettant, par exemple, l'étude de périodes de sécheresse ou de nombre de jours consécutifs de fortes précipitations ou de fortes/faibles températures.

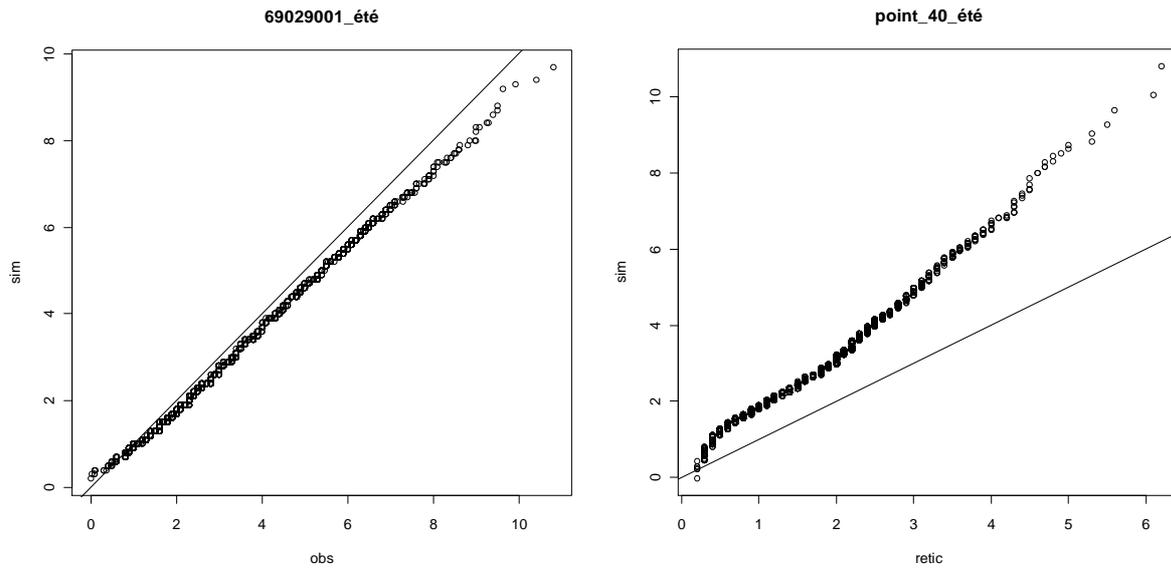
Pour les précipitations et les températures, la confrontation directe des sorties du modèle avec des observations est possible grâce à la densité du réseau de mesure et à la relativement faible variabilité spatiale de ces paramètres. Par contre, pour le vent, il n'est pas possible de mettre en face de chaque point de grille de modélisation une série de mesures. La méthode de correction quantile-quantile appliquée au vent ne s'appuie donc pas sur des séries d'observation mais sur les réanalyses d'un modèle, le modèle SAFRAN, qui fournit sur la France, en mailles régulières de 8km de côté, 8 paramètres météorologiques dont la vitesse du vent à 10m.

Ce modèle offre une bonne distribution géographique à haute résolution, mais il est nécessaire d'en corriger les sorties en fonction de vraies observations. On lui applique donc au préalable une correction quantile-quantile, saison par saison, suivant la méthode:

- calcul des 99 centiles des séries d'observation et de ceux des points safran aux points de la grille safran les plus proches de l'observation ;



- interpolation de ces 2 familles de quantiles des points d'observation vers la grille safran (pour lisser spatialement la fonction de correction et éviter ainsi des discontinuités artificielles générées par la différence du nombre de points d'observation et de points safran) ;
- correction des séries quotidiennes safran par la méthode quantile-quantile à partir des deux familles de quantiles (observation et safran) sur la grille safran. Les détails spatiaux à haute résolution viendront donc des valeurs safran, pas des fonctions de correction (qui sont lisses grâce à l'étape précédente) .



Diagrammes quantile-quantile du vent moyen pendant les mois d'été pour Bron :

à gauche, le vent modélisé par le modèle Safran (en ordonnées) est proche des mesures effectuées à Bron malgré une légère tendance à la sous-estimation des vents les plus forts

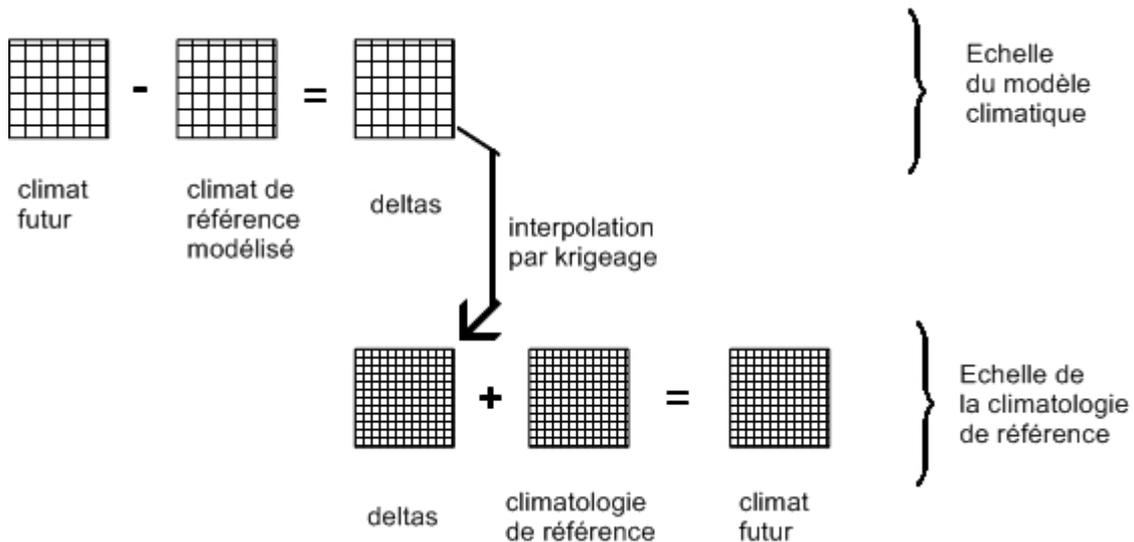
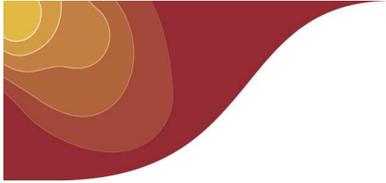
à droite, le point de modélisation d'Arpège-climat le plus proche de Bron montre une forte sous-estimation du vent moyen quasi-proportionnelle à la vitesse de ce dernier dans le modèle Safran (en ordonnées)

D. La descente d'échelle

La descente d'échelle, ou régionalisation, est le passage des sorties de modèle climatique global, généralement à une échelle de l'ordre de 300 km, à une échelle plus fine. Cette étape est nécessaire pour appréhender les modulations du signal climatique à l'échelle d'un territoire. Les méthodes de descente d'échelle sont basées soit sur des modèles climatiques de plus forte résolution (les modèles climatiques régionaux), soit sur des modèles statistiques, soit sur une combinaison des deux.

Le modèle climatique utilisé dans notre étude, Arpège-Climat, est un modèle climatique global, mais sa maille étirée offre sur la métropole une résolution de 50 km, résolution d'un modèle climatique régional. Nous sommes donc dans la première catégorie de méthode de descente d'échelle.

Pour obtenir une information plus fine encore, nous spatialisons les sorties de notre modèle Arpège-Climat par une méthode dite méthode des deltas dont voici la description schématique.



Nous disposons pour le paramètre à étudier d'une climatologie de référence à échelle fine, par exemple, la climatologie Aurelhy). Nous calculons les évolutions climatiques (les deltas) en chaque point de grille du modèle Arpège-Climat. Cette évolution est la différence entre la moyenne du paramètre modélisé sur la période de référence de la climatologie fine et sa valeur moyenne dans la période future. Ces différences qui sont donc calculées à une échelle de 50 km sont ensuite spatialisées par un krigeage simple à la résolution de la climatologie de référence. Ces différences à échelle fine sont finalement ajoutées à la climatologie de référence à échelle fine pour obtenir l'échelle fine du paramètre dans le futur.

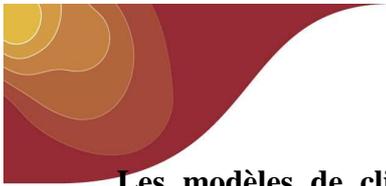
Il est important de noter

- **que la résolution fine est apportée uniquement par la climatologie de référence c'est à dire par la méthode utilisée pour spatialiser des observations (par la méthode AURELHY, par exemple). La méthode des deltas est une méthode d'interpolation et non une méthode de descente d'échelle**
- **L'information sur l'évolution climatique depuis la période de référence, issue du modèle climatique Arpège-Climat ne pas fait l'objet d'une véritable descente d'échelle. Sa résolution est de 50 km.**

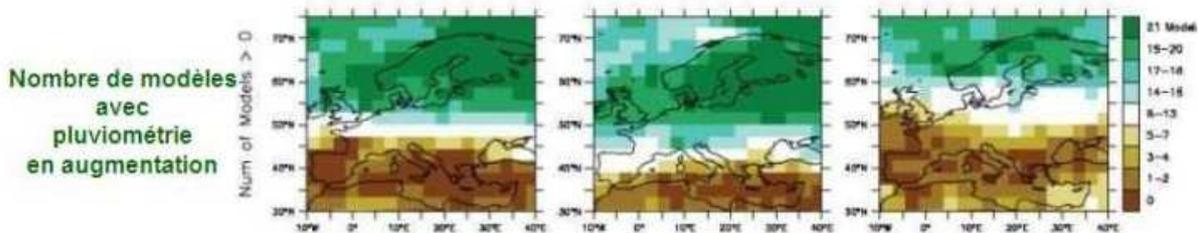
E. Les incertitudes

Chaque étape dans la chaîne de production des simulations climatiques génère une incertitude.

La première concerne **les scénarios d'émission de gaz à effet de serre** produit par le GIEC en fonction d'hypothèses socio-économiques. Ces scénarios sont plus ou moins optimistes ou pessimistes, et nous ne savons pas s'il y en a un qui reflète ce que seront réellement les émissions dans le siècle en cours. De plus, ces émissions de gaz à effet de serre doivent être traduites pour les modèles climatiques en concentration des différents gaz dans l'atmosphère, générant une nouvelle source d'incertitude.



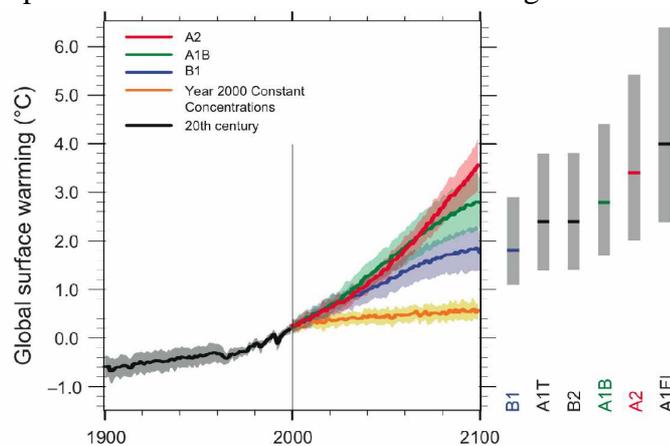
Les modèles de climat sont également très imparfaits : s'ils prennent en compte de nombreuses interactions (océans, glace de mer, nature du sol...) tous les processus intervenant dans l'évolution du climat ne sont pas pris en compte et la façon dont ils le sont peut varier d'un modèle à l'autre.



Accord des modèles concernant l'évolution des précipitations
Scénario A1B, évolution entre 2080-2099 et 1980-1999
sur l'année (à gauche) l'hiver (au centre) et l'été (à droite)

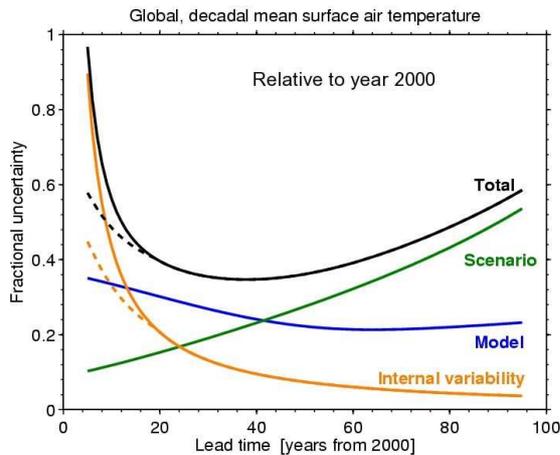
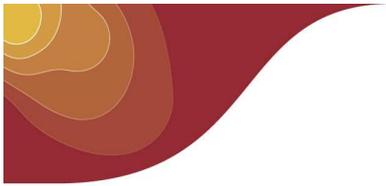
Dans les cartes ci-dessus, extraites du rapport du GIEC 2007, on constate par exemple que la tendance d'évolution des précipitations est partagée par une grande majorité de la vingtaine de modèles étudiés : augmentation au nord diminution au sud. Par contre, la ligne de démarcation entre le nord et le sud varie selon le modèle et la saison.

Dans le graphique ci-contre, toujours extrait des documents revus par le GIEC en 2007, les courbes montrent la moyenne de l'estimation d'un ensemble de 23 modèles climatiques. L'enveloppe de couleur indique la dispersion de ces modèles et les barres grisées à droite étendent ces résultats en y ajoutant les résultats de modèles plus simples. On constate ainsi que l'incertitude sur la température globale liée à l'utilisation d'un modèle ou d'un autre est de l'ordre de 1 à 2°C en fin de siècle si l'on ne considère que les modèles les plus sophistiqués.



Une couleur différente est attribuée à chacun des scénarios d'émission de gaz à effet de serre et permet de se rendre compte que l'incertitude liée à ces scénarios est très importante après le milieu du siècle pour atteindre 2°C à la fin de celui-ci. (La ligne orange montre les résultats des modélisations à partir d'un scénario où les concentrations ont été maintenues constantes au niveau de celles de l'an 2000.)

La variabilité interne du système climatique apporte une source d'incertitude dont le poids par rapport aux autres sources d'incertitude décroît lorsque l'échéance étudiée s'éloigne. Le graphique ci-après est extrait d'une étude publiée par Sutton et Hawkins dans le Bulletin of the American Meteorological Society en 2009. Il montre que la part de ces 3 types d'incertitude varie selon la période modélisée. L'étude montre qu'elle varie également selon le paramètre et le lieu modélisés.



Incertitude fractionnelle (rapport entre l'incertitude liée à un forçage et la réponse totale) pour la température globale.

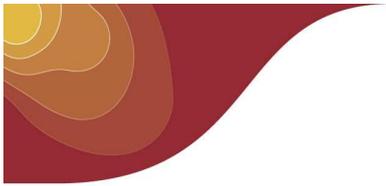
On note la variabilité interne du système climatique prépondérante pendant les 15 à 20 premières années de simulation, l'incertitude du modèle quasi-constante et l'incertitude liée aux scénarios qui devient prépondérante à partir des années 2040-2050.

Les tirets montrent la part à gagner en intégrant dans les modèles climatiques les oscillations décennales océaniques, ce qui sera fait dans les prochains travaux fournis au GIEC (2012)

(graphique extrait de Sutton, BAMS 2009)

Une autre incertitude est introduite lors du changement de résolution des résultats de la modélisation : malgré sa sophistication, la méthode Aurelhy reste une estimation statistique et porte donc une marge d'erreur. Le changement de résolution spatiale par krigeage des résultats de la modélisation en amène une autre.

Le choix de ne pas étudier de période antérieure à 2030 permet d'éviter la période où l'incertitude totale est la plus forte et celui d'utiliser systématiquement 3 scénarios d'émission pour chaque échéance étudiée permet la prise en compte de l'incertitude sur les scénarios. Par contre l'incertitude liée au modèle n'est pas contrée dans cette étude.



IV. Résultats de l'étude

A. Les indicateurs climatiques

1. Rappel des définitions

Pour cette étude, la référence des températures est une mesure « sous abri ».

La température minimale d'une journée est le minimum de la température depuis 18 heures UTC la veille jusqu'à 18 heures UTC le jour.

La température maximale d'une journée est le maximum de la température depuis 6 heures UTC jusqu'à 6 heures UTC le lendemain.

La température moyenne est la moyenne de la température minimale et de la température maximale.

Le nombre de jours de gel par an est le nombre de jours par an où la température minimale est inférieure ou égale à 0°C.

La pluviométrie d'une journée se mesure entre 6 heures UTC le jour et 6 heures UTC le lendemain.

2. Liste des indicateurs étudiés

La liste suivante constitue les indicateurs climatiques analysés dans l'étude.

Paramètre ou phénomène	Indicateur	Unité
Température	Température moyenne annuelle	°C
Température minimale	Moyenne saisonnière ¹ des températures minimales quotidiennes	°C
Température maximale	Moyenne saisonnière des températures maximales quotidiennes	°C
Très Fortes chaleurs	Nombre de journées où la température maximale quotidienne dépasse 35°C	Jour
Précipitations	Pluviométrie moyenne annuelle	mm
Précipitations	Pluviométrie moyenne saisonnière	mm
Très Fortes précipitations	Nombre de jours de très fortes précipitations (précipitations dépassant 20 mm)	Jour
Gel	Nombre de jours de gel annuel (température minimale inférieure à 0°C)	Jour
Gel	Nombre de jours de gel au printemps	Jour

¹ Saisons : hiver (décembre, janvier, février), printemps (mars, avril, mai), été (juin, juillet, août), automne (septembre, octobre, novembre).



Canicule	Nombre de jours où les moyennes glissantes sur 3 jours des températures minimales et maximales dépassent simultanément des seuils fixés par département. C'est l'indicateur utilisé dans le système d'alerte canicule.	Jour
Sécheresse	Nombre maximum annuel de jours secs consécutifs (RR<1mm)	Jour

3. Périodes d'étude

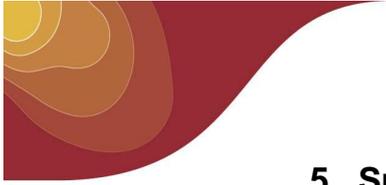
Les indicateurs climatiques sont calculés à partir des données modélisées pour la période de référence et, pour chaque scénario d'émission B1, A1B et A2, aux 3 horizons 2030, 2050 et 2080

Pour lisser la variabilité interannuelle du climat, on cherche à qualifier le climat aux horizons étudiés, en moyennant les indicateurs climatiques sur des périodes de 30 ans, à savoir :

- 1971-2000 pour la climatologie de référence
- 2016-2045 pour l'horizon 2030
- 2036-2065 pour l'horizon 2050
- 2066-2095 pour l'horizon 2080

4. Eléments de lecture des cartes

- Les valeurs qui sont pointées montrent l'évolution entre la modélisation du futur (pour un scénario et un horizon donné) et la modélisation sur la période de référence 1971-2000.
- L'unité de cette évolution pointée est la même que la variable cartographiée sauf celle des précipitations et du nombre de jours de gel qui est exprimée en pourcentage par rapport à la période de référence. Par exemple -10 pour les précipitations signifie une diminution de 10% par rapport à la valeur de la simulation de référence ; -10 pour le nombre de jours secs consécutifs signifie une baisse de 10 jours par rapport à la valeur de la simulation de référence.
- L'emplacement de ces valeurs pointées est celui des points de modélisation du modèle Arpège-Climat (tous les 50 km)
- La carte insérée dans le cadre observation est la cartographie de nos mesures avec spatialisation par la méthode Aurelhy. Ceci est vrai sauf pour les très fortes chaleurs, les très fortes précipitations, le nombre de jours secs consécutifs et la canicule pour lesquelles la spatialisation est un simple krigeage. Pour plus de détail, se référer au chapitre sur les climatologies (page 4).
- Sur les cartes relatives au paramètre température, le quadrillage qui masque partiellement les valeurs rappelle la très mauvaise qualité de la spatialisation sur les zones d'altitude supérieure à 1500 m.
- Les cartes qui visualisent la modélisation d'un paramètre dans le futur sont le résultat de la carte observation modifiée par addition d'une carte issue de la spatialisation par simple krigeage des valeurs pointées. C'est la méthode des deltas explicitée au paragraphe sur la descente d'échelle (page 12). Ce n'est cependant pas la méthode employée pour la canicule calculée à partir de cartes spatialisées au pas de temps quotidien comme détaillée au paragraphe suivant.



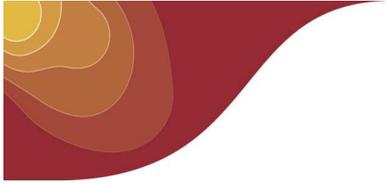
5. Spatialisation de l'indicateur canicule

La spatialisation de l'indicateur canicule est issue d'un traitement particulier qui s'apparente à celui utilisé pour établir la climatologie des DJU. La différence réside dans l'utilisation comme champs de températures minimales et maximales de référence, de ceux établis pour chaque « type » de canicule d'après la topologie réalisée lors de la constitution de la climatologie de la canicule (voir page 3). Pour spatialiser l'indicateur canicule, on a donc procédé comme suit :

1. sélection, dans les données de simulations climatiques, des dates pour lesquelles les seuils de température minimale et maximale qualifiant la canicule ont été conjointement dépassés.

Pour chacune de ces dates

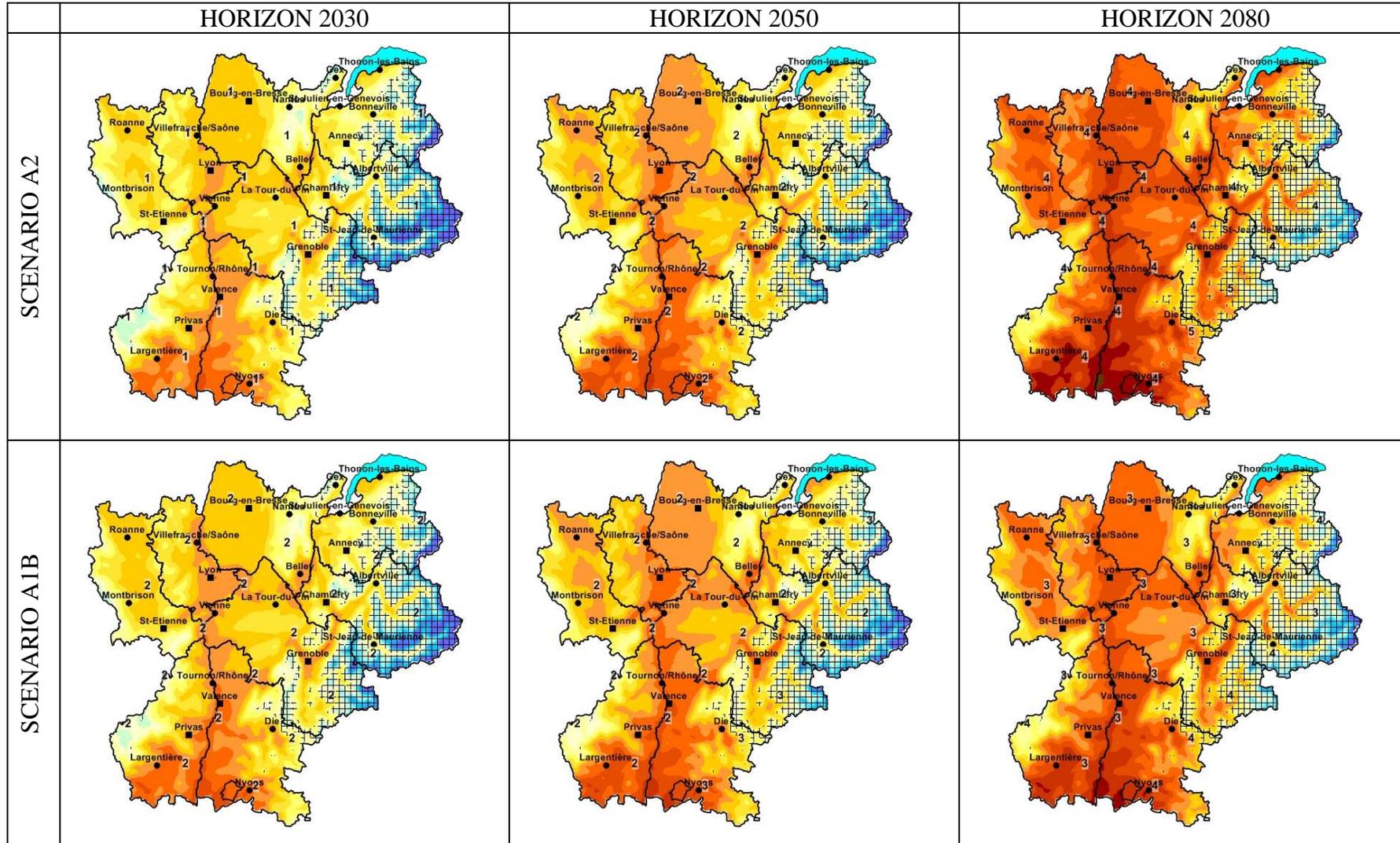
2. affectation à une classe de la typologie de la canicule, en fonction de la localisation géographique des dépassements des seuils. On sélectionne ainsi les champs de températures minimales et maximales de référence.
3. en chaque point de grille du modèle climatique, calcul de la différence entre la température minimale modélisée et la température minimale du champ de référence
4. krigeage simple de ce champ de différences de température à la résolution de 1km.
5. obtention du champ de température minimale par somme du champ obtenu en 4) et du champ de référence utilisé en 3)
6. on reproduit les étapes 3) à 5) avec les températures maximales
7. détection des points en condition de canicule, sur la grille au km, en appliquant les seuils départementaux aux champs obtenus en 5) et 6)
8. à partir de tous les champs quotidiens obtenus en 7), calcul en chaque point, du nombre de fois où les conditions caniculaires ont été détectées 3 jours de suite

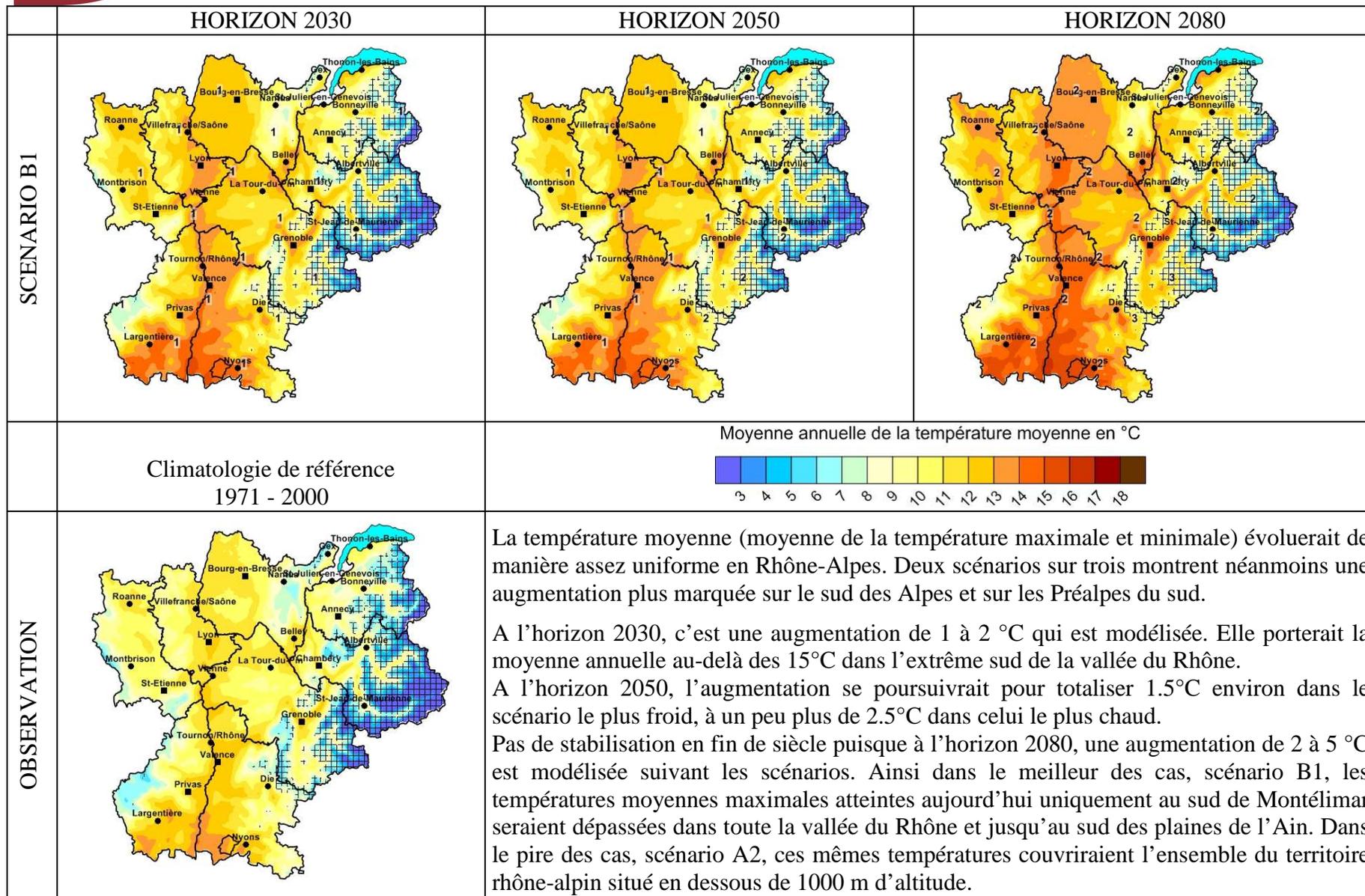


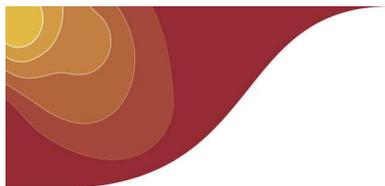
6. cartographie de chaque indicateur



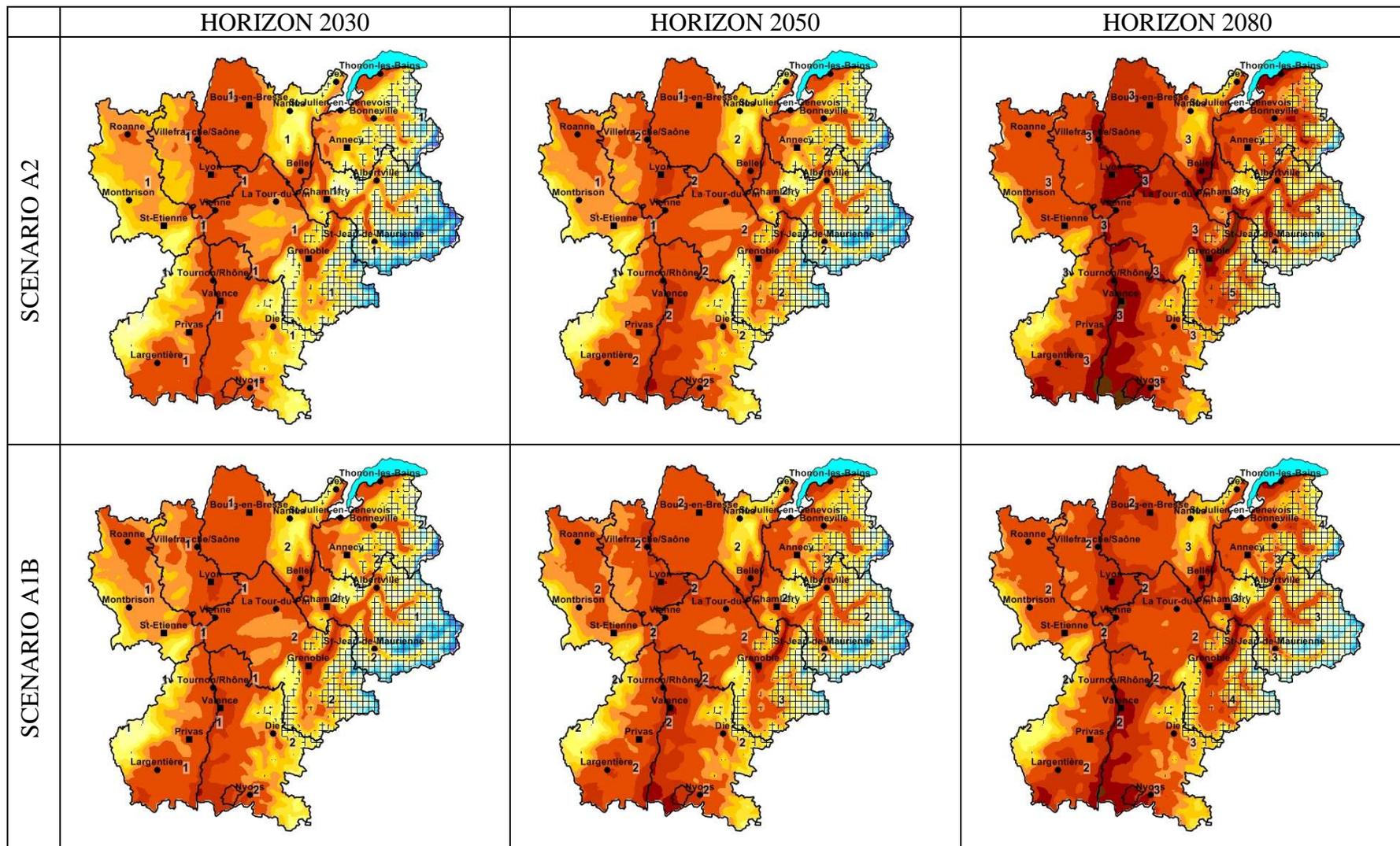
TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE





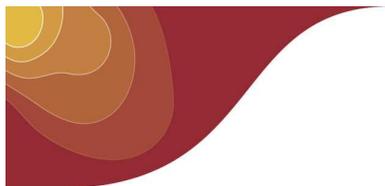


TEMPERATURE MINIMALE PRINTANIERE

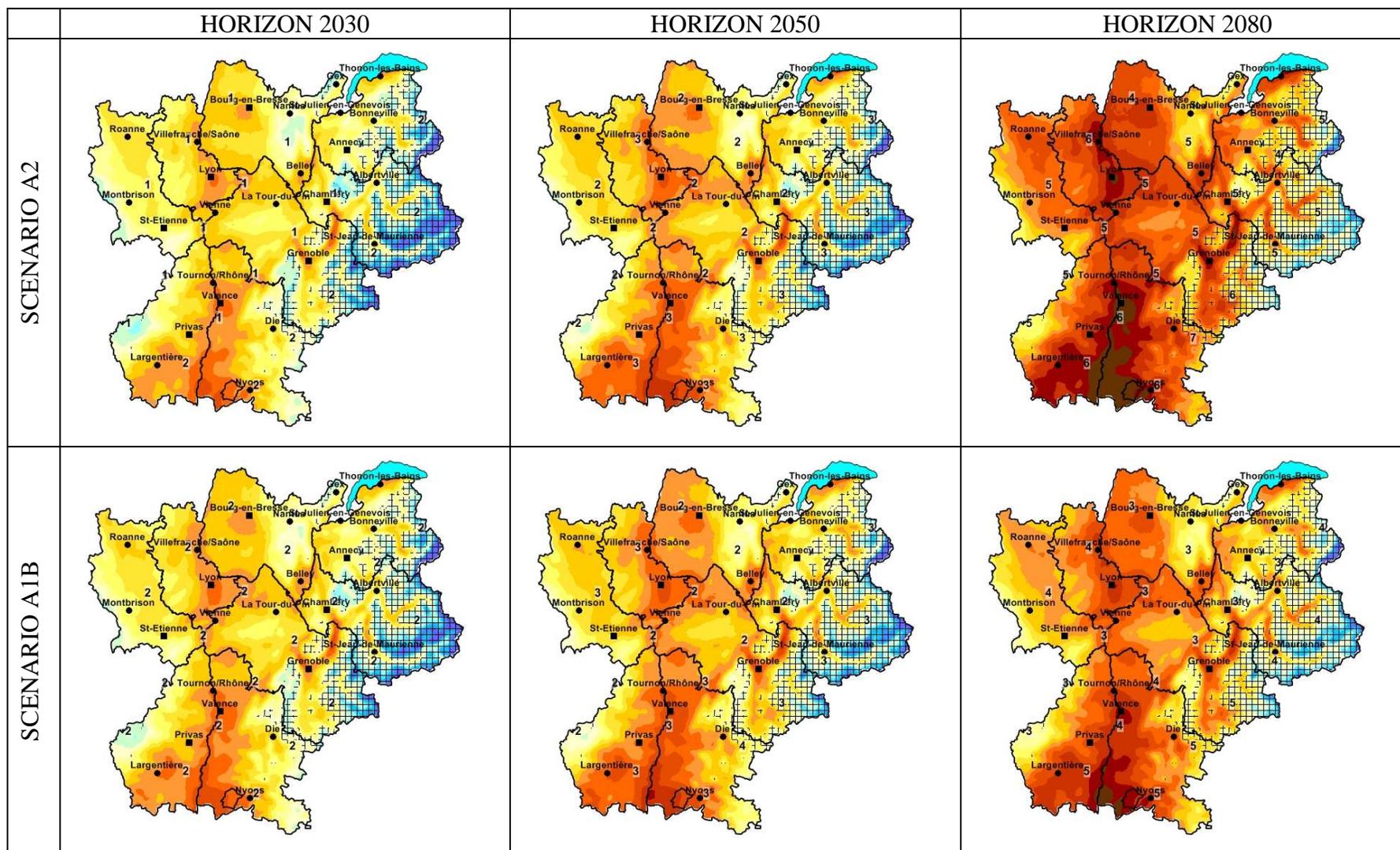


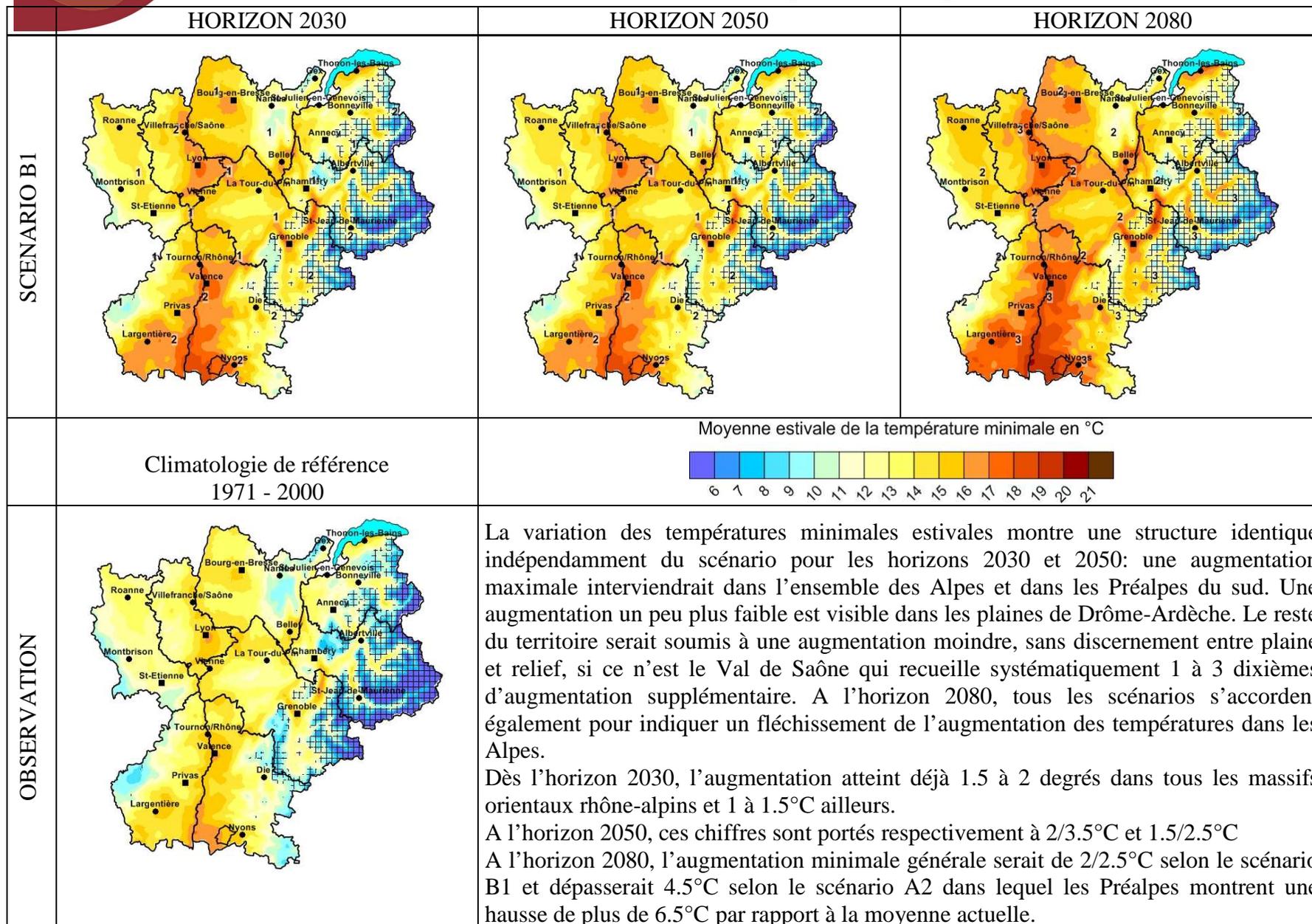


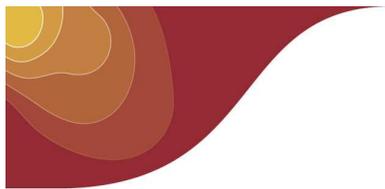
	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO B1			
	Moyenne printanière de la température minimale en °C 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12		
	Climatologie de référence 1971 - 2000		
OBSERVATION		<p>La variation des températures minimales du printemps montre la même structure quelque soit le scénario et l'horizon considéré : une augmentation maximale interviendrait dans le nord des Alpes (en Haute-Savoie) et dans les Préalpes du sud. Une augmentation moindre toucherait le reste de la moitié Est de Rhône-Alpes. L'augmentation serait la plus faible dans la moitié ouest, sans discernement entre plaine et relief.</p> <p>A horizon 2030, la fourchette d'estimation de l'augmentation oscille entre un peu moins de 1°C à 1.5°C à l'ouest et entre un peu plus de 1°C à 2.5°C à l'est.</p> <p>A horizon 2050, le scénario B1 ajoute 3 à 4 dixièmes supplémentaires par rapport à l'horizon 2030, alors que le scénario A2 ajoute entre 0.5 et 1°C en accentuant les écarts constatés ci-dessus.</p> <p>A l'horizon 2080, on mesurerait une moyenne des températures minimales printanières qui dépasserait la moyenne actuelle de 2 à 2.5°C dans la moitié ouest et de 2.5 et 4.5°C en Haute Savoie et Préalpes du sud. La moyenne de 9°C qu'on ne rencontre aujourd'hui qu'autour de Lyon, Valence et Montélimar serait dépassée partout dans la vallée du Rhône, le sillon alpin et la plaine de l'Ain.</p>	



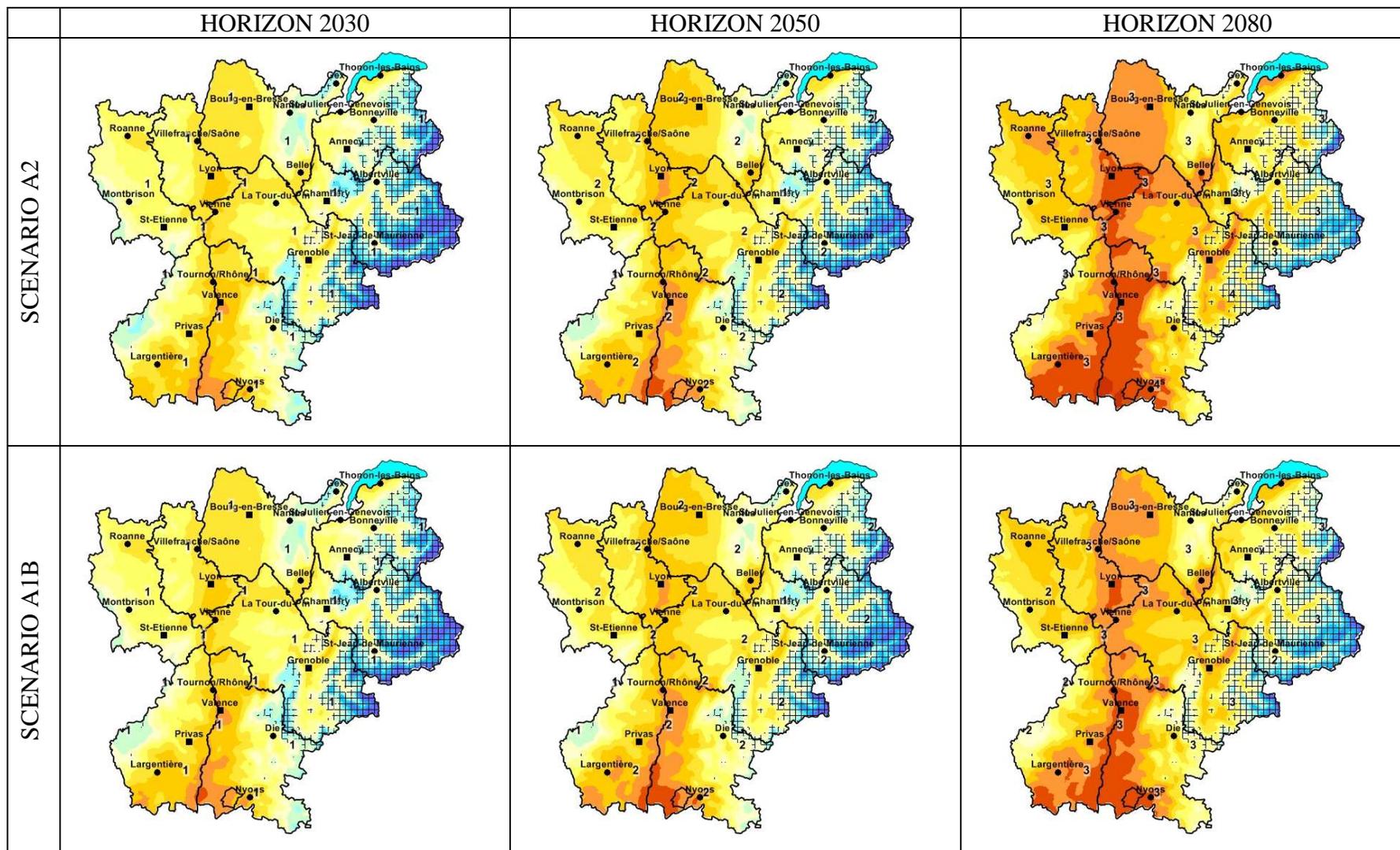
TEMPERATURE MINIMALE ESTIVALE





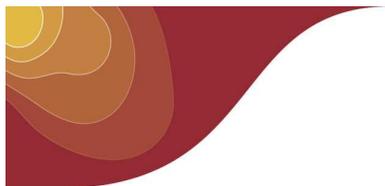


TEMPERATURE MINIMALE AUTOMNALE

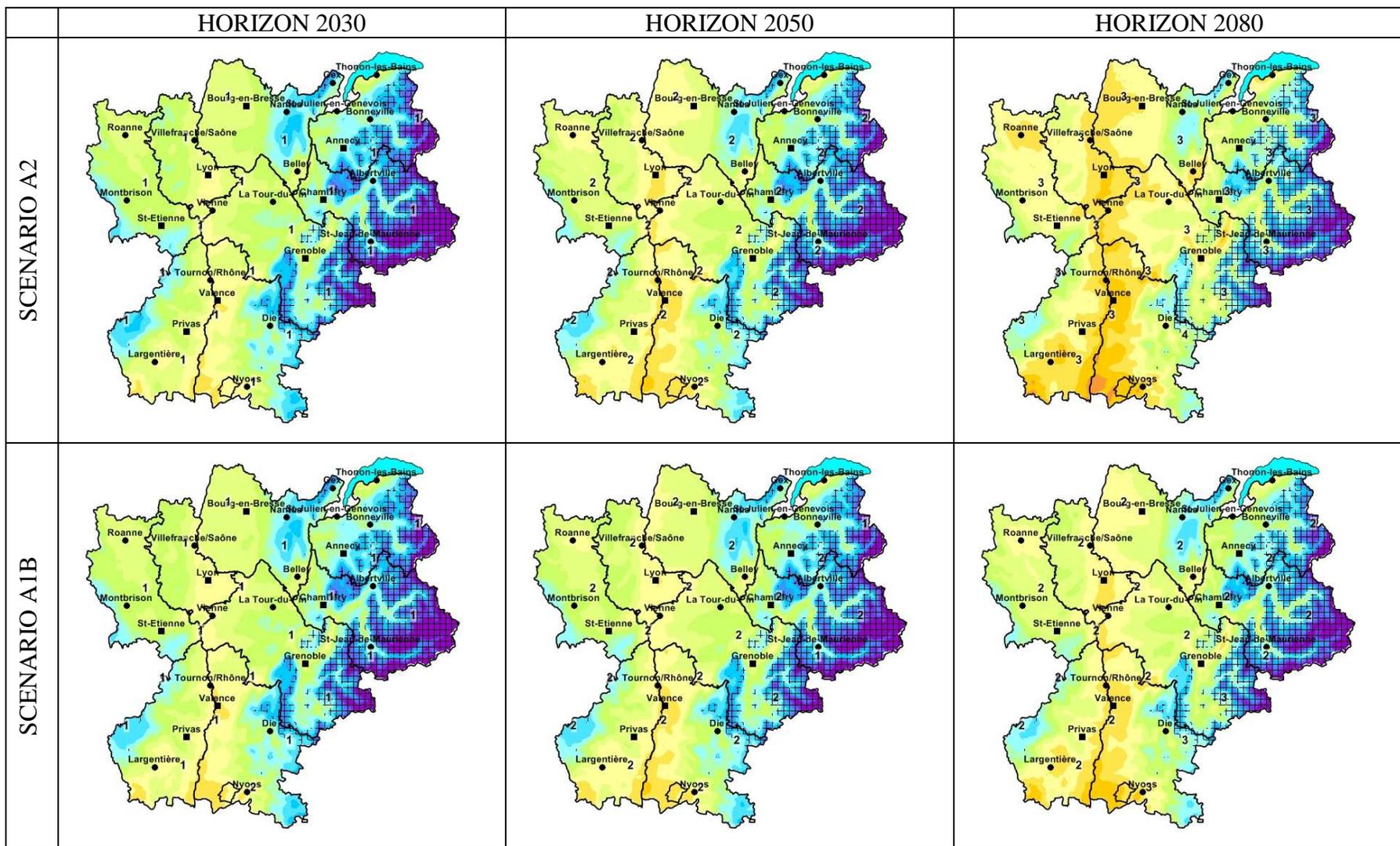




	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO B1			
	<p>Moyenne automnale de la température minimale en °C</p> <p>3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14</p>		
	<p>Climatologie de référence 1971 - 2000</p>		
OBSERVATION		<p>L'évolution de la moyenne des températures minimales automnales est relativement uniforme dans tout Rhône-Alpes. Parmi les 9 modélisations, seul un léger accroissement supplémentaire, de l'ordre de quelques dixièmes, est repéré systématiquement dans les Préalpes du sud et dans le sud de Drome Ardèche sous influence du climat méditerranéen.</p> <p>Ainsi à l'horizon 2030, la moyenne augmenterait partout entre 0.5 et 1.5°C. Cet accroissement aux moyennes actuelles atteindrait entre 1 et 2°C à l'horizon 2050 et entre 1 et 4°C à l'horizon 2080, A noter que le scénario B1 ne montre pas d'évolution entre 2050 et 2080 dans les Alpes et moins d'un demi-degré d'augmentation ailleurs.</p>	

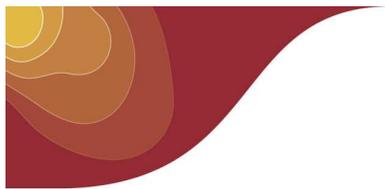


TEMPERATURE MINIMALE HIVERNALE

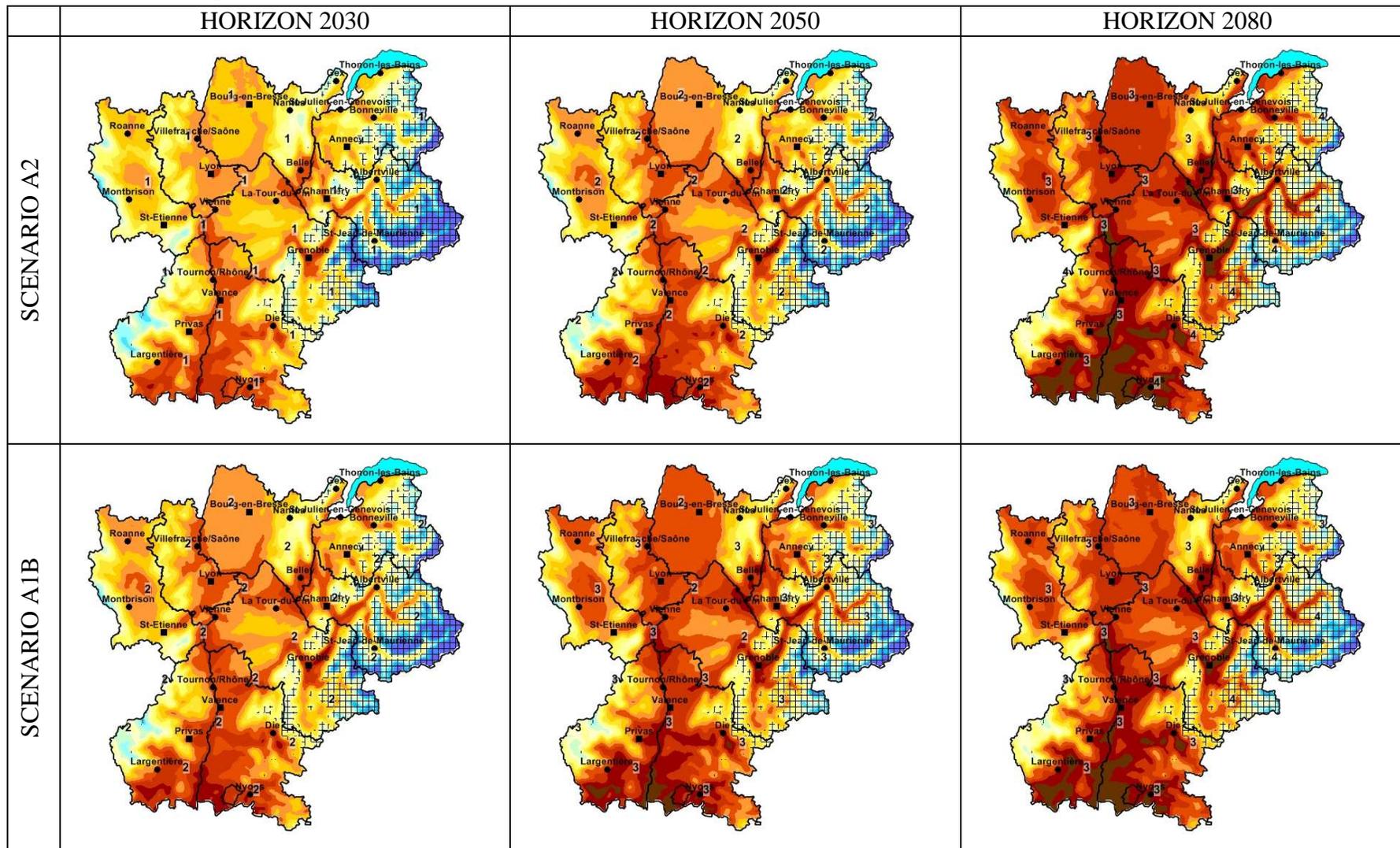




	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO B1			
	Moyenne hivernale de la température minimale en °C 1 2 3 4 5 6		
	Climatologie de référence 1971 - 2000		
OBSERVATION		<p>Les deux premiers horizons nous montrent une augmentation relativement uniforme de la moyenne des températures minimales en hiver. Seule la haute montagne montre une augmentation moins importante de quelques dixièmes de degré. En 2030 la fourchette basse de l'augmentation est donnée par le scénario A2 et vaut entre 1 et moins de 1.5°C. La fourchette haute est donnée par le scénario B1 et vaut entre 1 et plus de 1.5°C. En 2050, la moyenne devrait être de 1 à 2°C plus élevée que la moyenne calculée sur la période 1971-2000. On remarque que le scénario B1 conduit à une légère baisse de la moyenne entre les horizons 2030 et 2050.</p> <p>A l'horizon 2080, ce n'est plus la haute montagne mais les Préalpes du sud qui se distinguent du reste du territoire rhône-alpin avec une augmentation un peu plus accentuée qu'ailleurs, de 2.5 à 3.5°C contre 1.5 à un peu plus de 2°C.</p> <p>Une moyenne positive, qui affecte aujourd'hui la vallée du Rhône, le Roannais, le Val de Saône, la moitié occidentale de la plaine de l'Ain et une fraction du sillon rhône-alpin, pourrait ainsi s'étendre, selon le scénario le plus chaud, à l'ensemble du territoire situé sous la barre des 1000 mètres d'altitude.</p>	

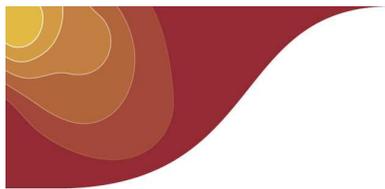


TEMPERATURE MAXIMALE PRINTANIERE

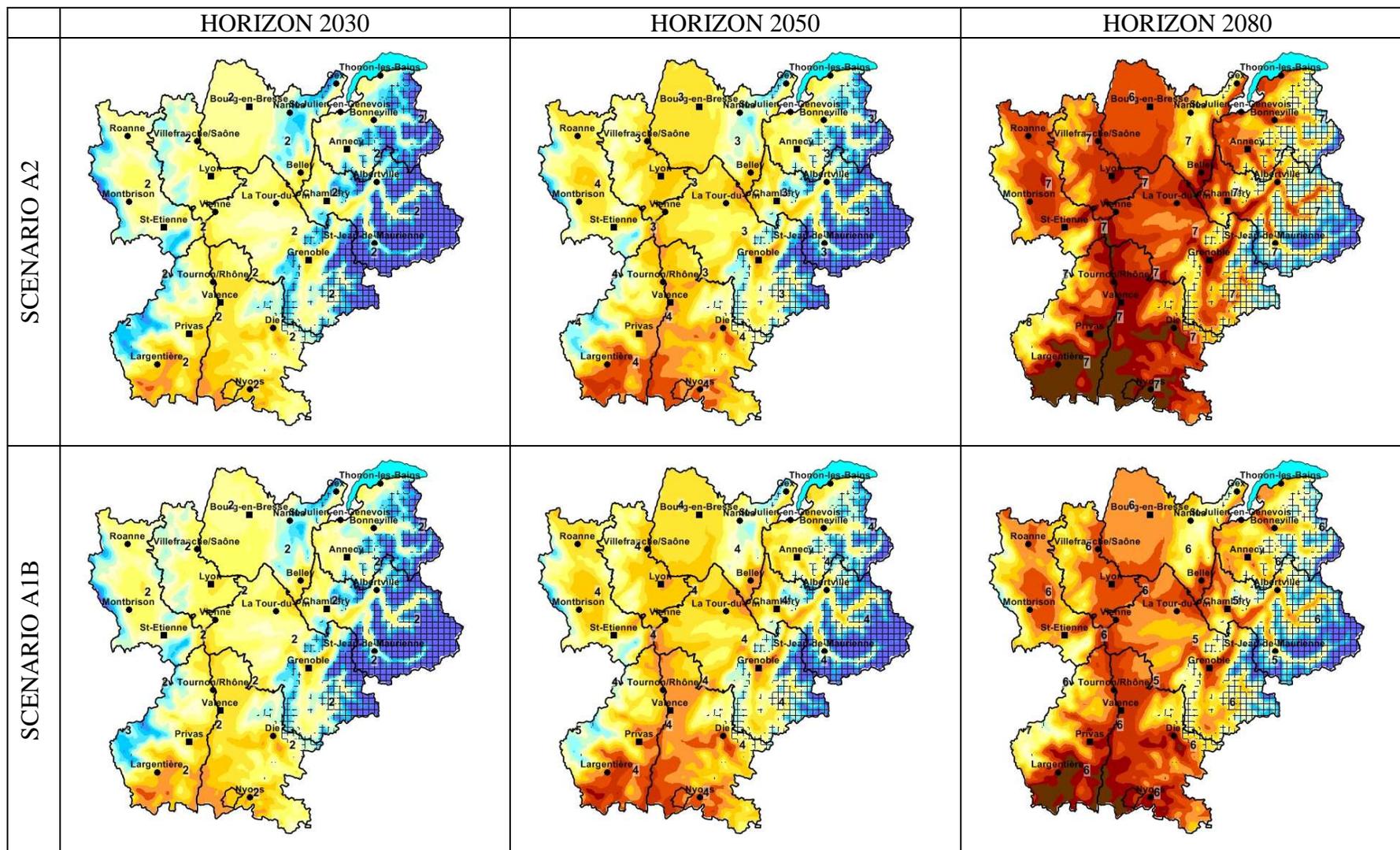


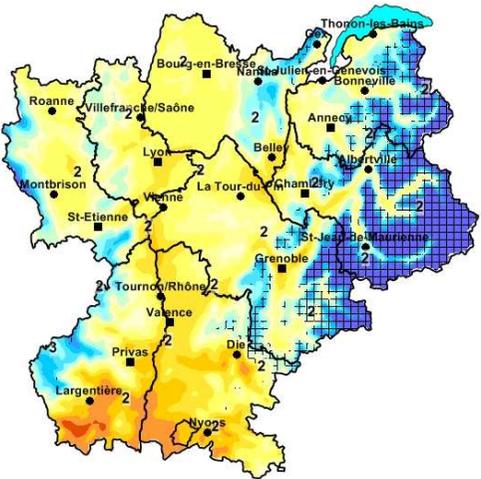
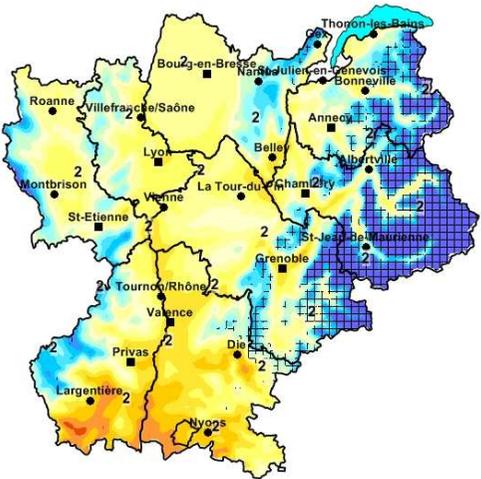
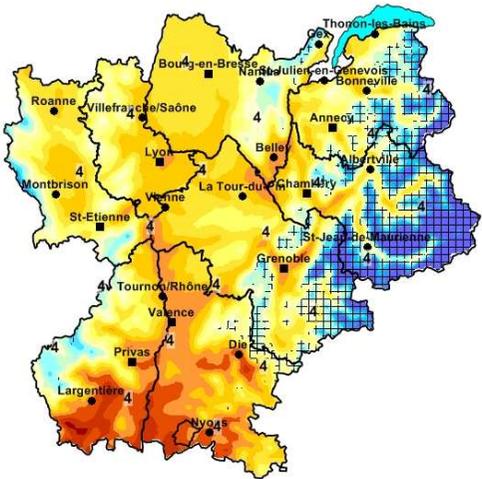
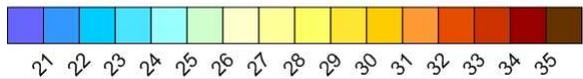
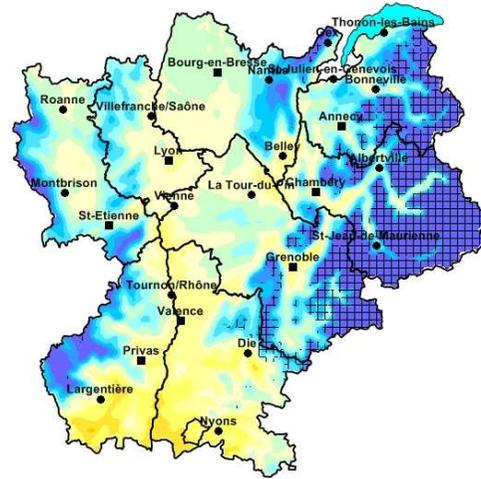


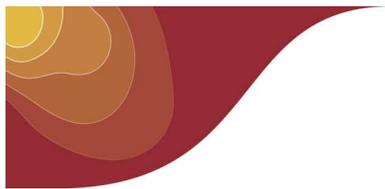
	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO BI			
	<p>Moyenne printanière de la température maximale en °C</p> <p>9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23</p>		
	<p>Climatologie de référence 1971 - 2000</p>		
OBSERVATION		<p>La moyenne des températures maximales du printemps augmenterait tout au long du siècle. L'augmentation serait plus importante dans les Cévennes ardéchoises, les Préalpes du sud et dans l'ensemble des massifs de hautes montagnes des Alpes. Dans ces dernières, l'augmentation de cette moyenne est plus importante qu'ailleurs en fin de siècle.</p> <p>Ainsi à l'horizon 2030, l'augmentation serait identique dans les Cévennes et en haute montagne, comprises entre 1 et 2°C.</p> <p>A l'horizon 2050, on trouve également la même augmentation dans ces deux lieux, entre 1.5 et 3°C.</p> <p>Par contre à l'horizon 2080, les températures modélisées fournissent une augmentation qui en haute montagne est comprise entre 2.5 et plus de 4°C selon les scénarios et dépasse d'un demi-degré environ celle localisée dans les Cévennes</p> <p>Dans le reste du territoire, quel que soit l'horizon et le scénario, l'augmentation est toujours inférieure à celle modélisée dans les Cévennes, de moins d'un demi-degré.</p>	



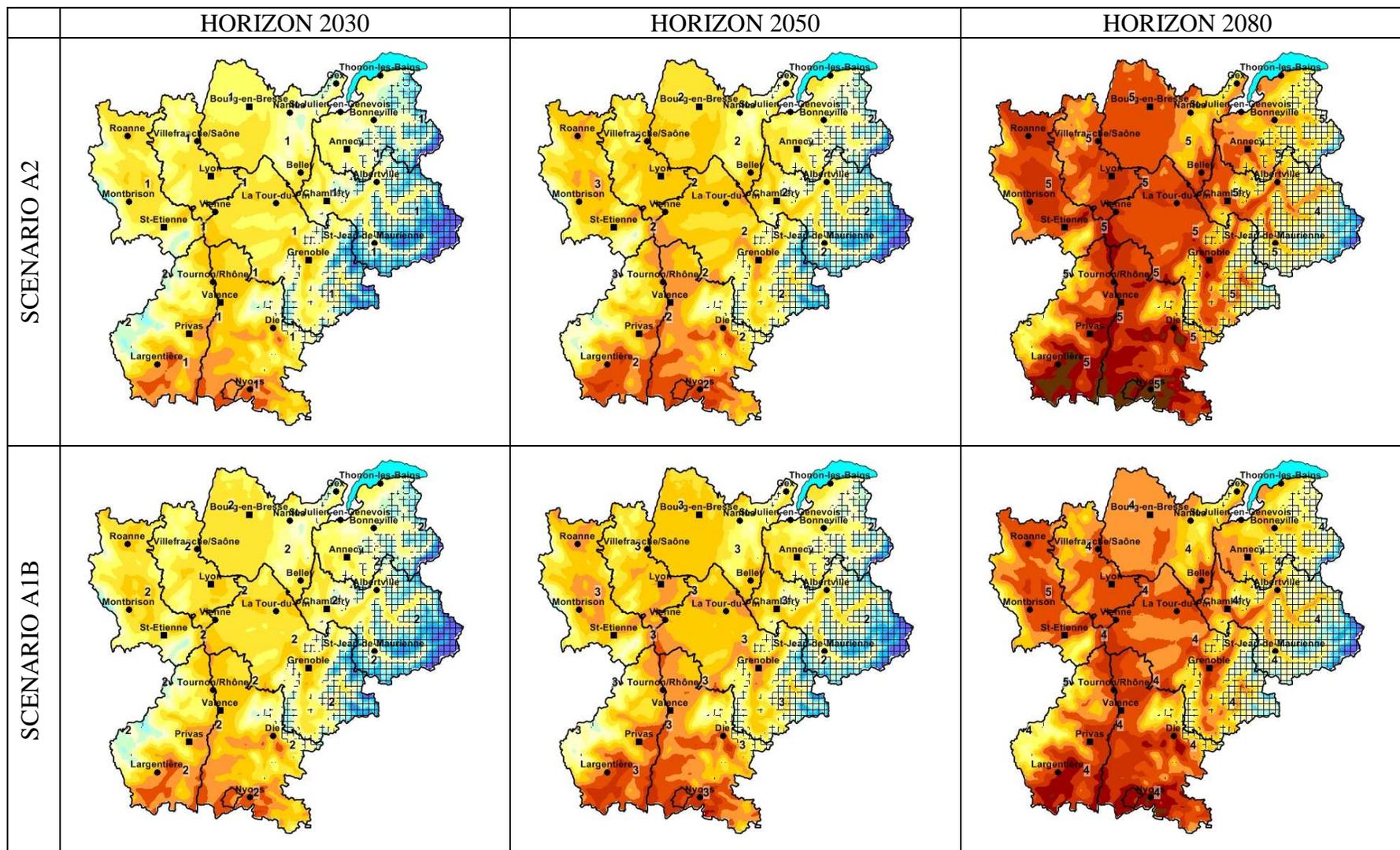
TEMPERATURE MAXIMALE ESTIVALE

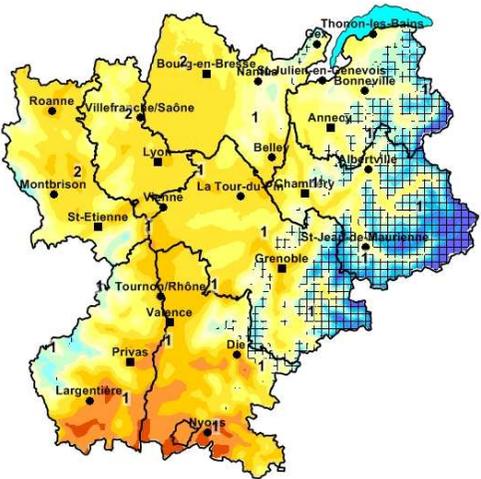
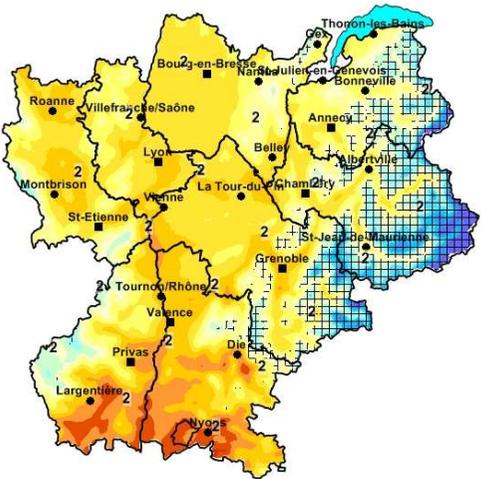
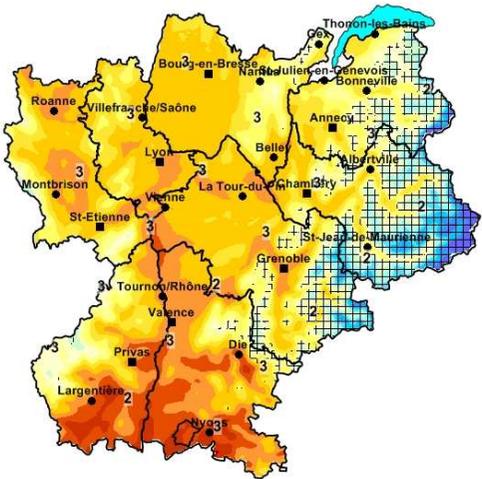
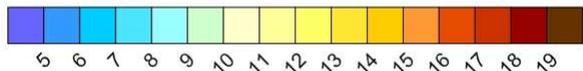
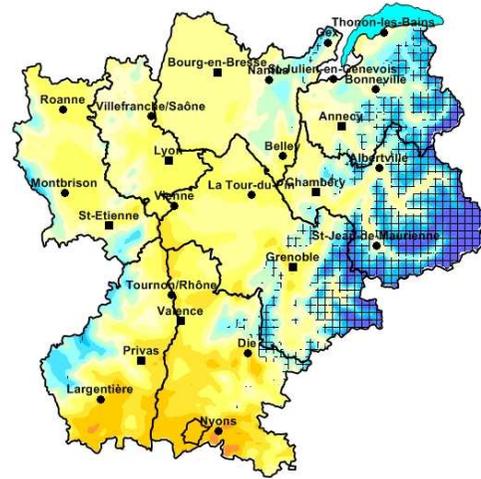


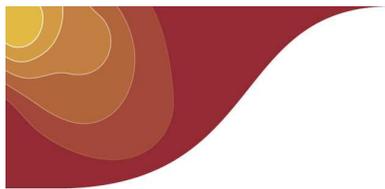
	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO B1			
	Moyenne estivale de la température maximale en °C 		
	Climatologie de référence 1971 - 2000		
OBSERVATION		<p>Une constante dans la modélisation des températures maximales d'été : en moyenne l'augmentation par rapport à la période 1971-2000 est toujours plus élevée dans les Cévennes qu'ailleurs. Les zones qui vont le plus se réchauffer concernent ensuite le sud de la Drôme et de l'Ardèche, les Préalpes mais aussi toutes les plaines de la Loire, notamment à l'horizon 2080.</p> <p>A l'horizon 2030, l'augmentation serait comprise entre 2 et 2.5°C.</p> <p>A l'horizon 2050, elle serait de 2/2.5°C dans le scénario B1 mais de 3.5/4.5°C sous scénario A1B.</p> <p>A l'horizon 2080, l'augmentation ne cesse de s'amplifier : 3.5/4°C sous scénario B1, mais 6.5/8°C avec le scénario A2. Ainsi à cette échéance, même avec le scénario le plus froid, la moyenne de 30°C qui n'est pas atteinte aujourd'hui serait dépassée dans toute la vallée du Rhône (jusqu'à Genève) et de la Saône, le sillon alpin et dans les plaines de la Loire. Avec le scénario le plus chaud, la moyenne de 35°C serait dépassée dans les plaines au sud de Valence, dans la vallée de la Drôme et dans celle du haut Grésivaudan.</p>	



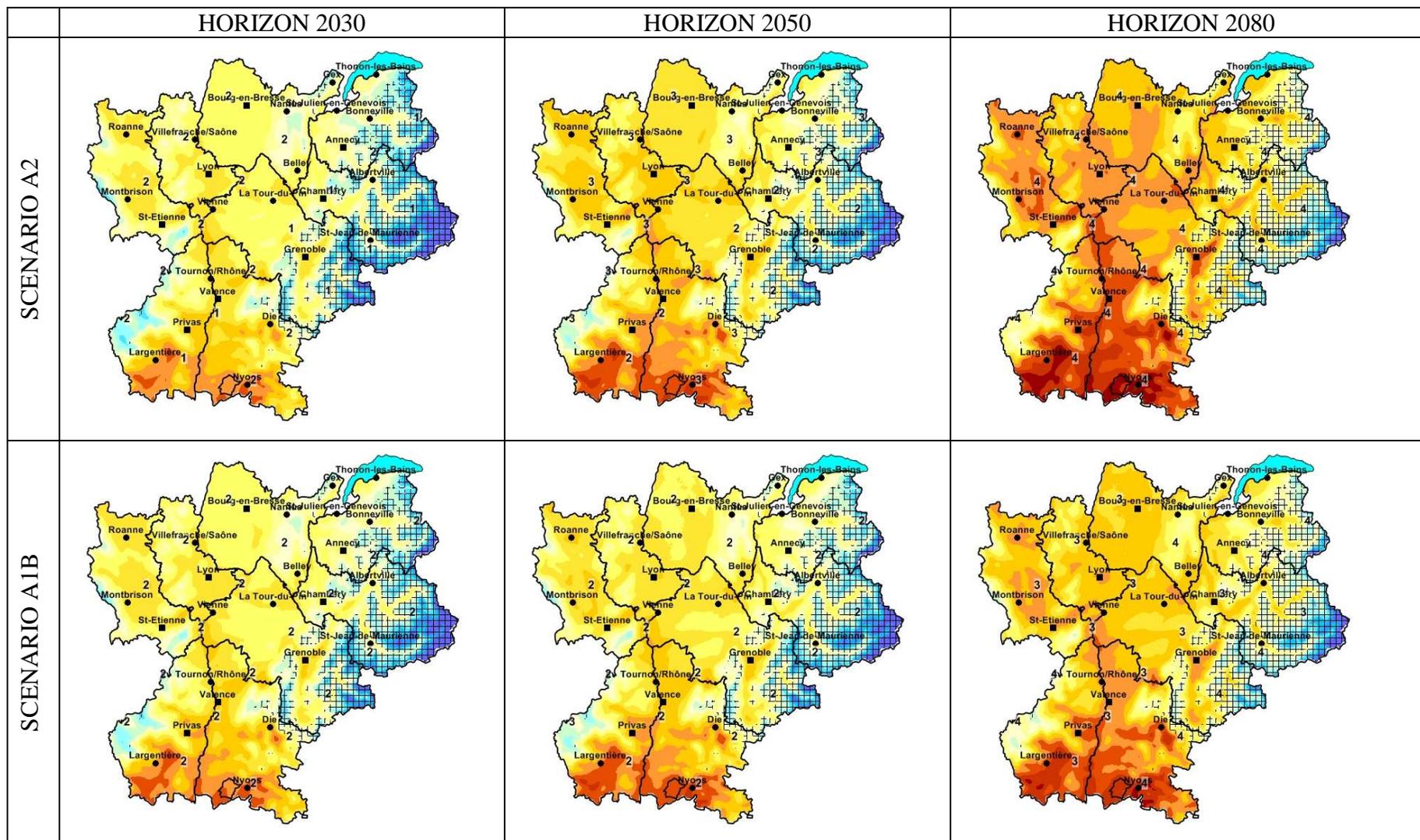
TEMPERATURE MAXIMALE AUTOMNALE

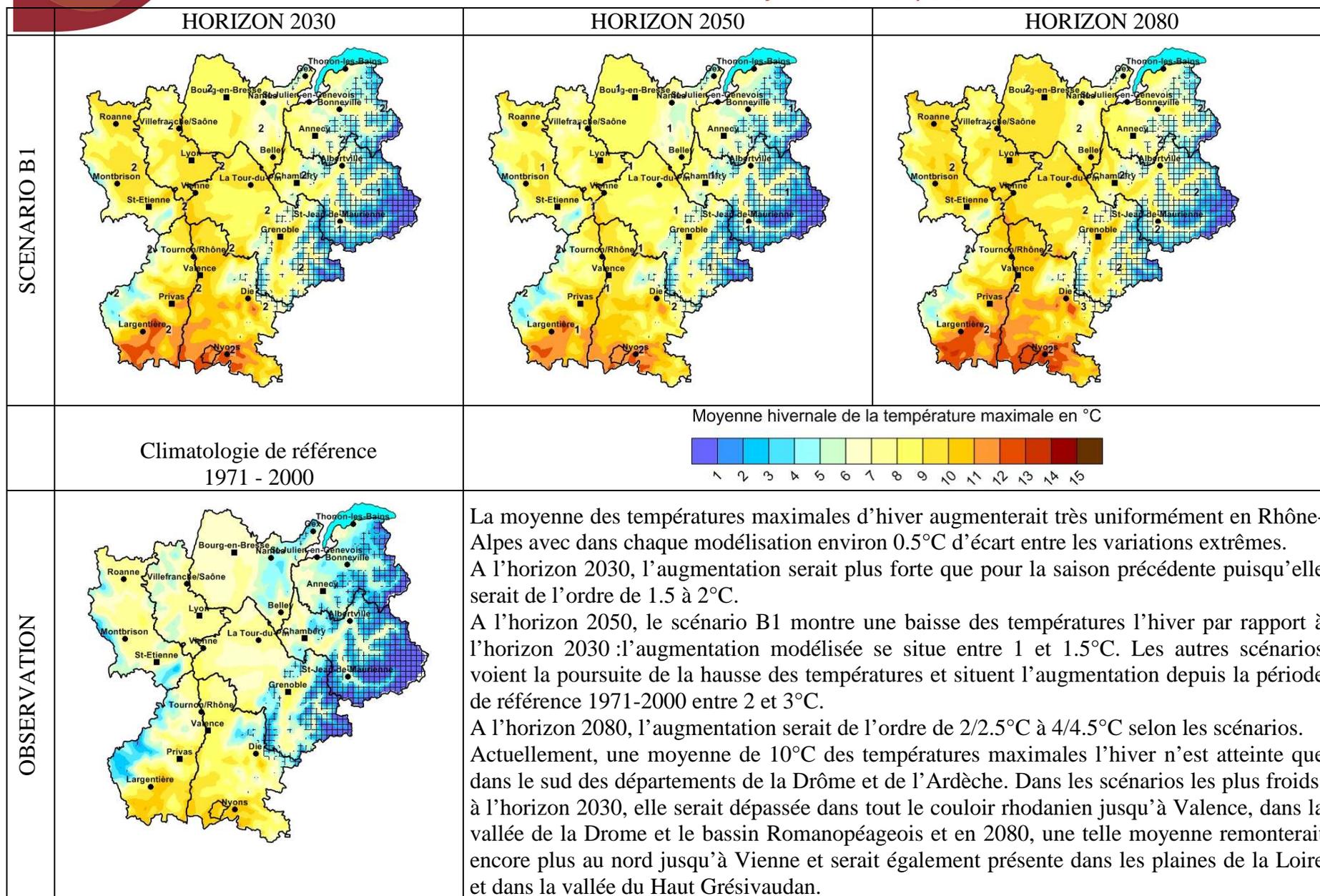


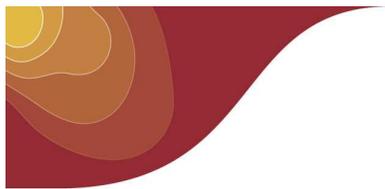
	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO B1			
	Moyenne automnale de la température maximale en °C 		
	Climatologie de référence 1971 - 2000		
OBSERVATION		<p>La moyenne des températures maximales d'automne augmenterait presque uniformément en Rhône-Alpes. En effet, excepté pour l'horizon 2080, l'écart entre l'augmentation la plus faible qui serait localisée dans les massifs savoyards et l'augmentation la plus forte qui se situerait dans la moitié ouest, n'est que d'un demi-degré.</p> <p>A l'horizon 2030, les différents scénarios s'accordent pour donner une augmentation de l'ordre de 1 à 1.5°C.</p> <p>A l'horizon 2050, ils divergent un peu, portant les bornes de l'augmentation à 1.5°C et 3°C</p> <p>Pour l'horizon 2080, l'augmentation modélisée va du simple au double selon que l'on considère le scénario B1 ou A2. Dans le premier, la température maximale augmenterait d'un peu plus de 2°C dans la Vanoise à un peu moins de 3°C dans les plaines du Forez. Dans le second scénario, la Vanoise verrait une augmentation de plus de 4°C et les Cévennes connaîtraient avec presque 5.5°C la plus forte augmentation de Rhône-Alpes.</p>	



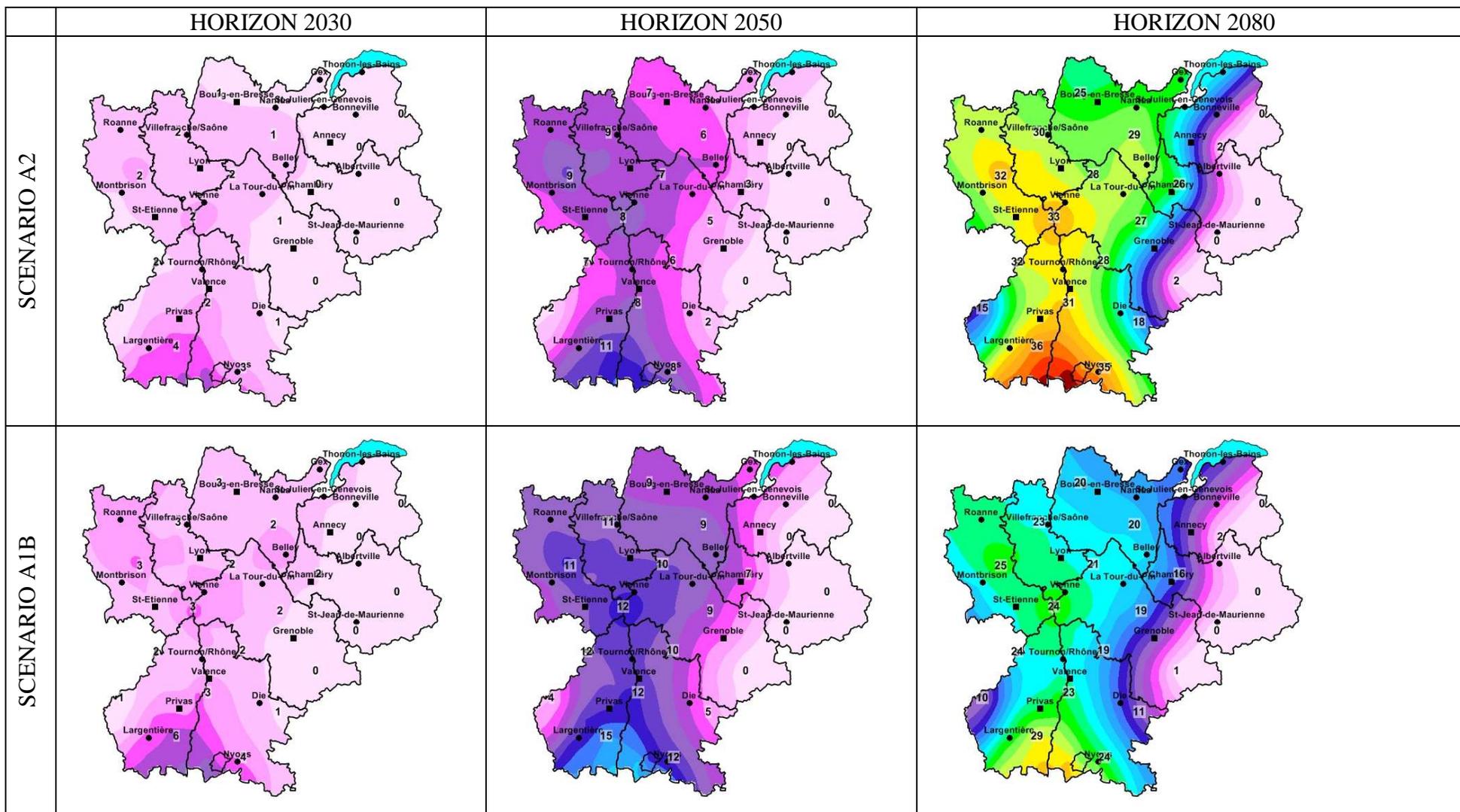
TEMPERATURE MAXIMALE HIVERNALE

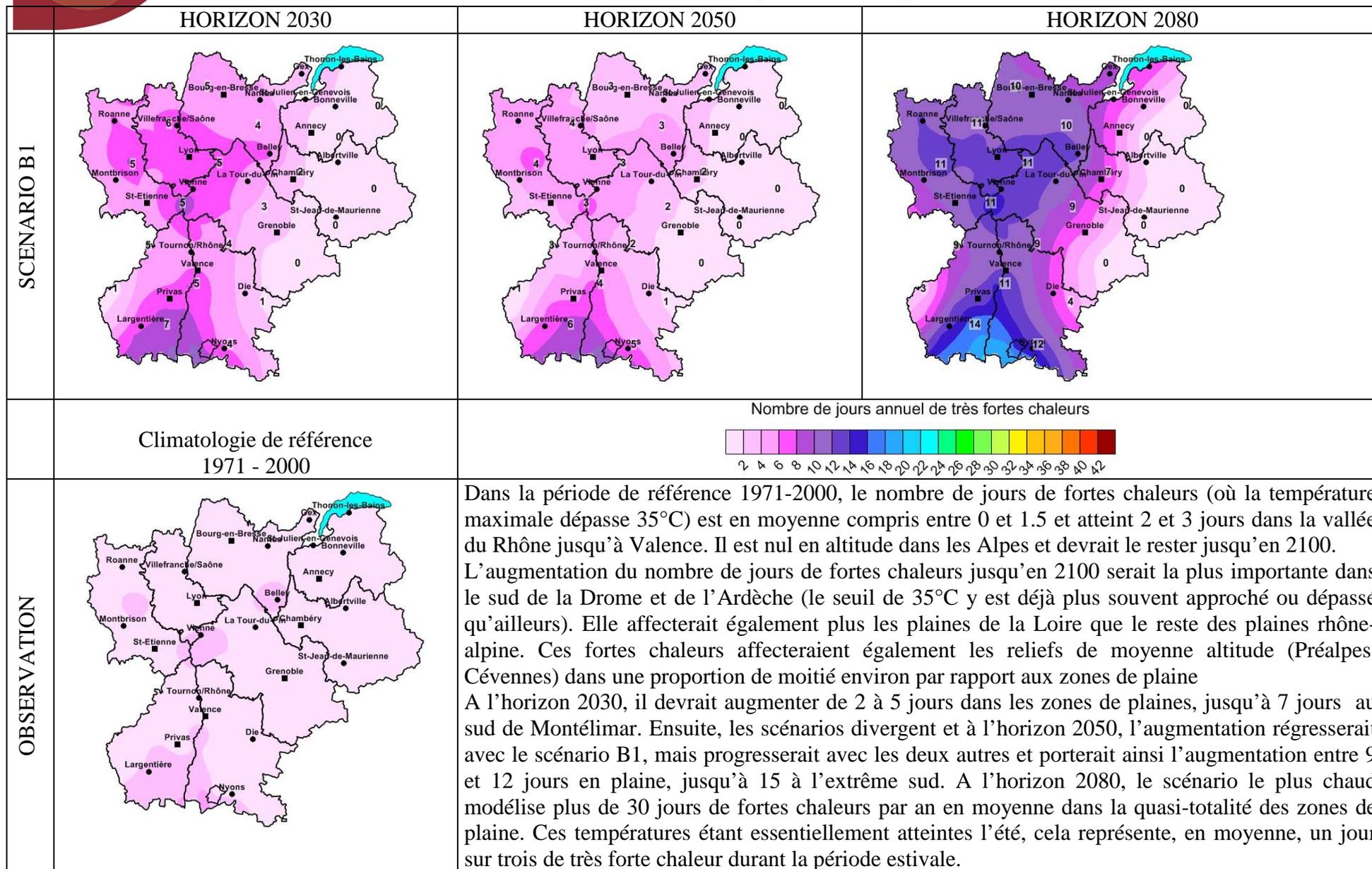


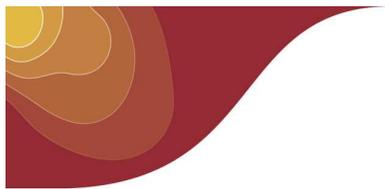




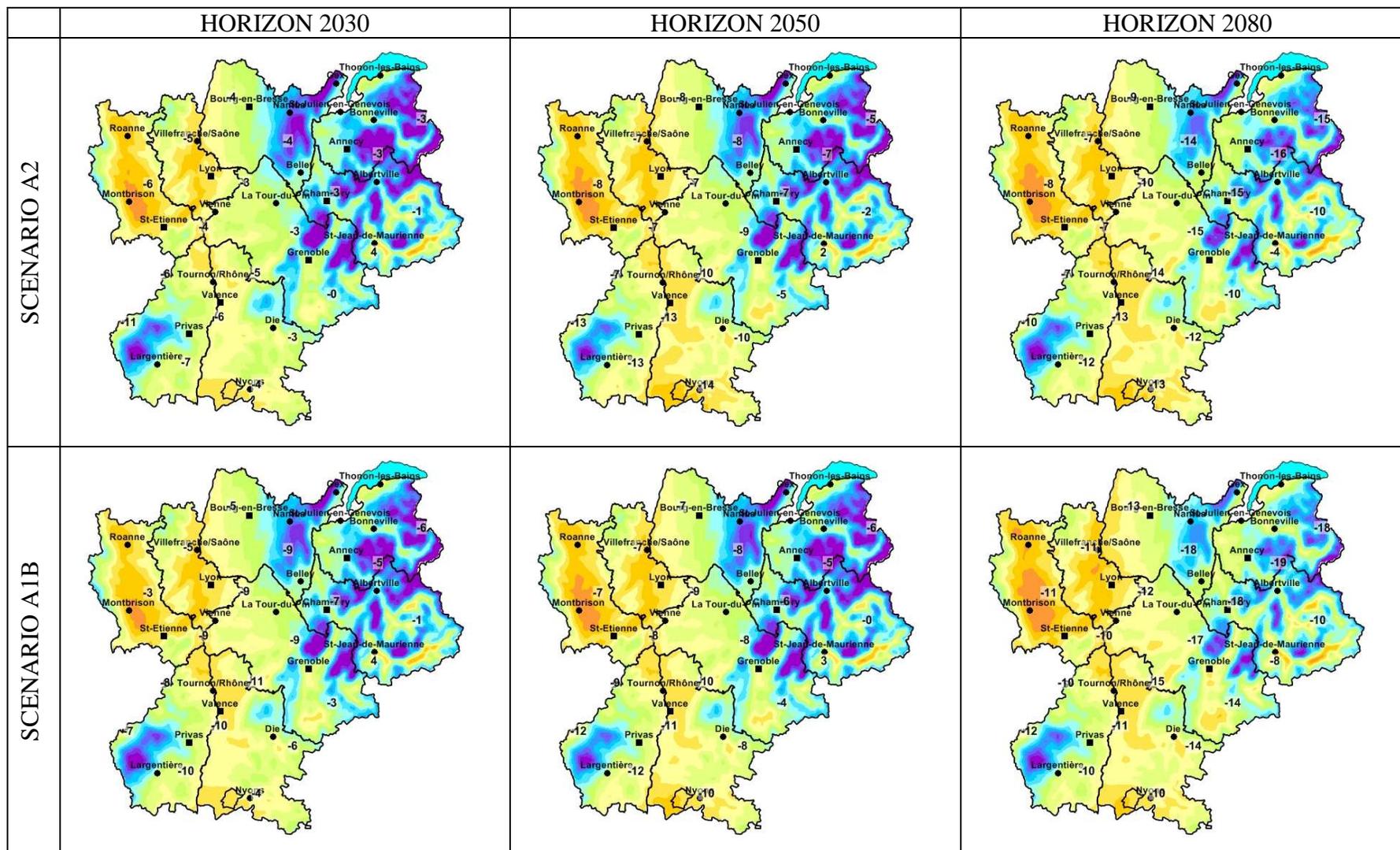
FORTES CHALEURS

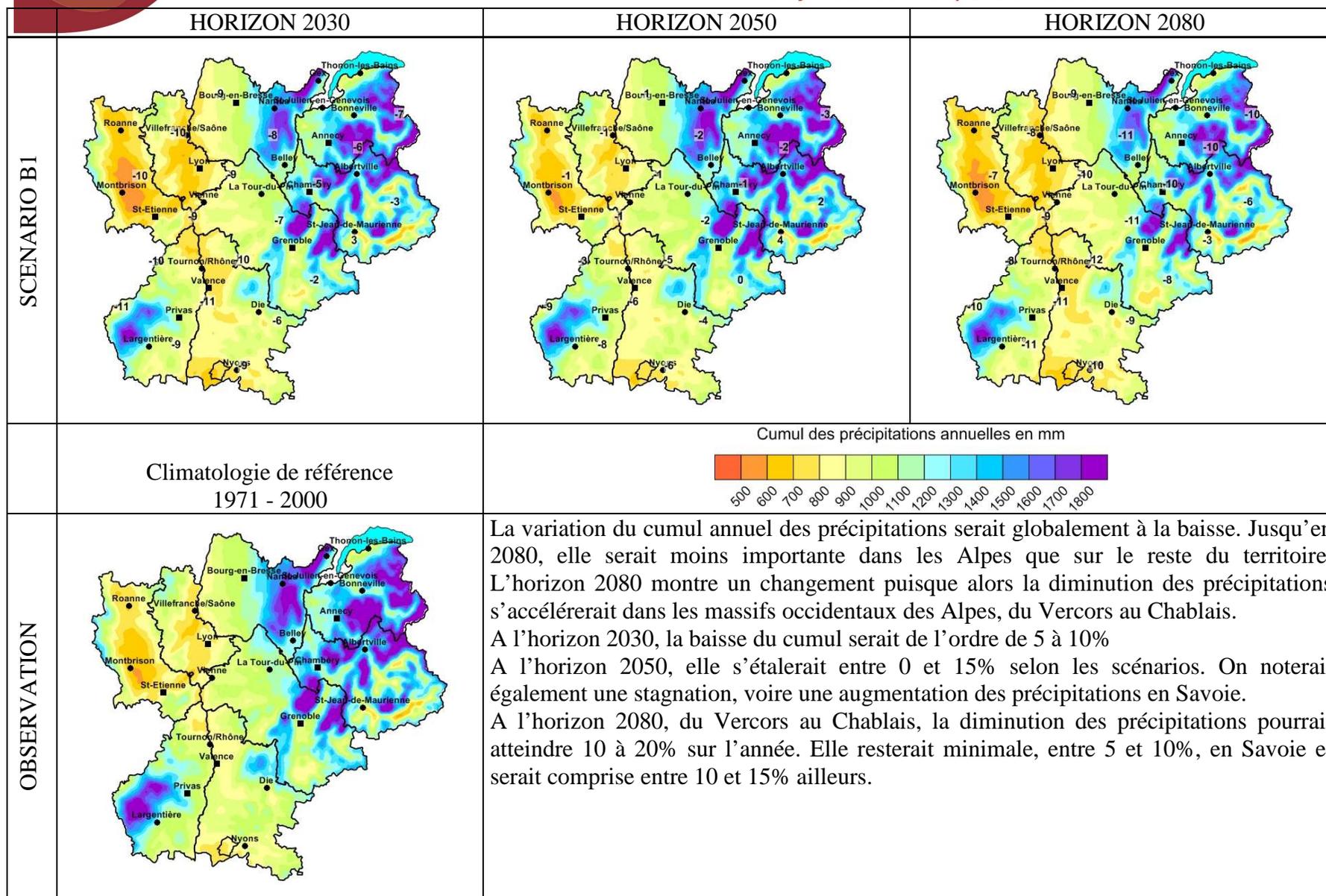


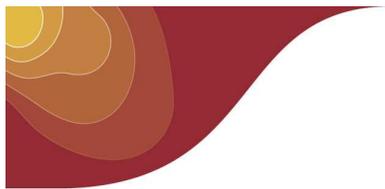




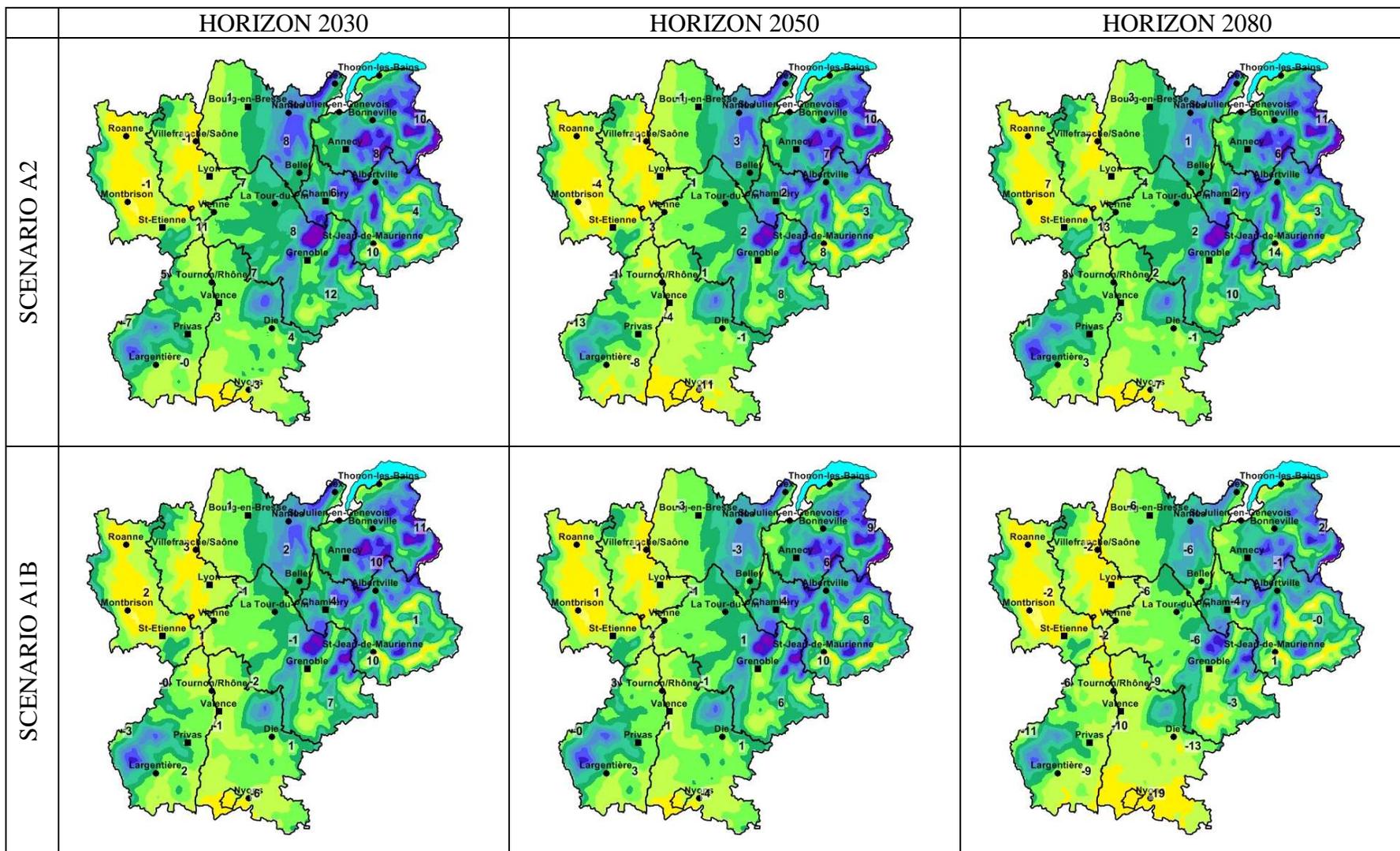
PLUVIOMETRIE ANNUELLE





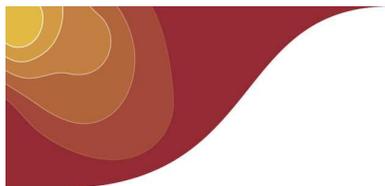


PLUVIOMETRIE PRINTANIERE

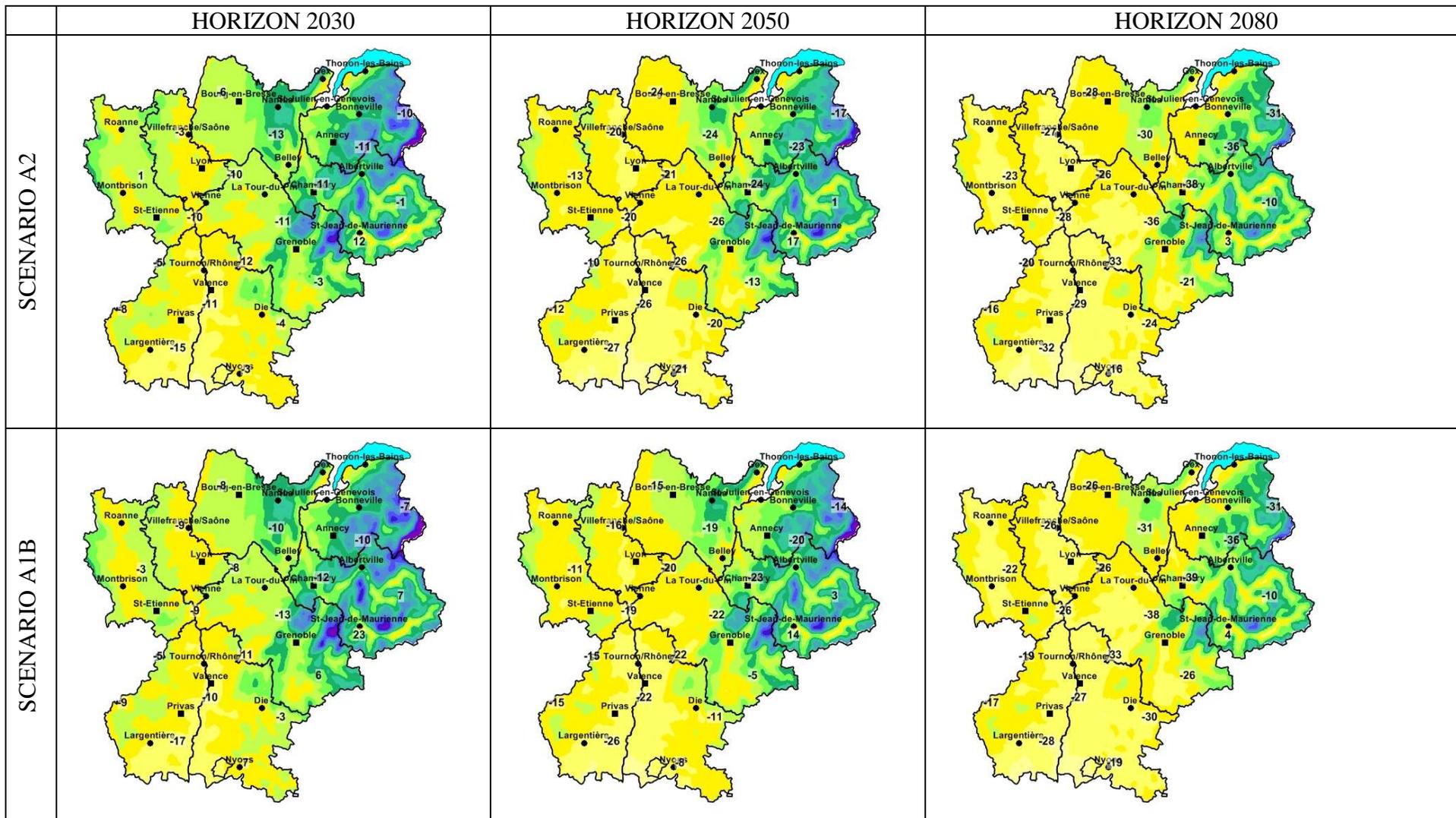




	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO BI			
	Climatologie de référence 1971 - 2000		Cumul des précipitations printanières en mm Valeurs pointées exprimées en %
OBSERVATION		L'évolution au cours du siècle des précipitations printanières découpe Rhône-Alpes en trois zones : <ul style="list-style-type: none"> - La moitié sud de Drôme Ardèche qui voit ses précipitations chuter de 5 à 10% aux horizons 2030 et 2050 puis remonter à l'horizon 2080 pour arriver au niveau actuel dans deux scénarios ou poursuivre cette tendance pour arriver à une baisse de 15 à 20% dans le scénario le plus sec. - Les Alpes avec un accroissement des précipitations sur l'ensemble du siècle et des scénarios, de l'ordre de 5 à 10%, sauf pour le scénario la plus sec de l'horizon de 2080 qui ramène les pluies alpines du printemps à leur niveau actuel - Le reste du territoire dans lequel on ne discerne pas de changement significatif avec des variations tantôt positives, tantôt négatives et le plus souvent inférieures à 5% en valeurs absolues 	

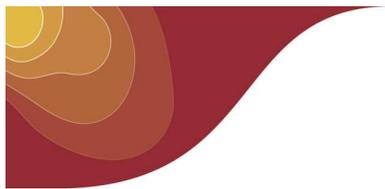


PLUVIOMETRIE ESTIVALE

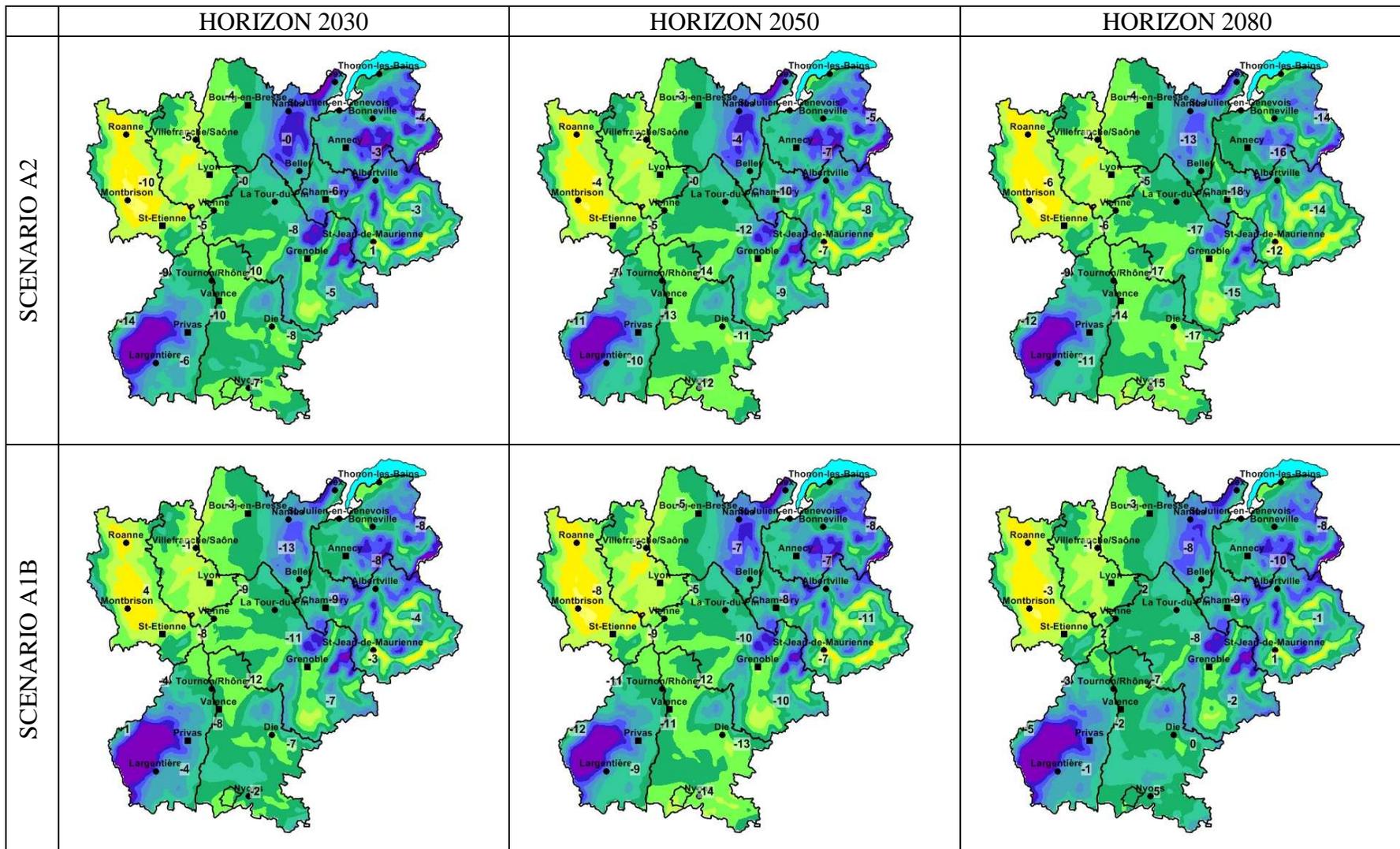




	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO BI			
	Cumul des précipitations estivales en mm 		
	Climatologie de référence 1971 - 2000 Valeurs pointées exprimées en %		
OBSERVATION		<p>Le régime des précipitations estivales devrait subir un certain bouleversement au cours du siècle : les précipitations devraient augmenter dans la partie sud des Alpes du nord et fortement diminuer en plaine.</p> <p>La modélisation découpe Rhône Alpes en trois zones.</p> <p>La première est constituée des massifs en bordure sud-est des Alpes, de l'Oisans au Mont Blanc. L'accroissement des précipitations l'été pourrait y atteindre 10 à 20% à horizon 2030, moins de 10% à horizon 2080, l'ensemble de Rhône-Alpes suivant une tendance à la baisse en fin de siècle.</p> <p>La seconde zone borde la première à l'ouest et inclut également la vallée du Rhône au sud de Lyon, le nord Isère et les reliefs de l'Ain. C'est dans cette zone que la diminution du cumul pluviométrique estival serait la plus importante ; de 10 à 20% à l'horizon 2030 et de 25 à 40% à l'horizon 2080</p> <p>La dernière zone couvre les départements de la Loire et du Rhône, la plaine de l'Ain et les massifs de l'Ardèche. On peut y adjoindre également les Baronnies et le Dévoluy qui ont un comportement proche mais tirant vers celle de la première zone. Les précipitations baisseraient dans cette zone de 5 à 15% à horizon 2030, de 10 à 25% à horizon 2080.</p>	

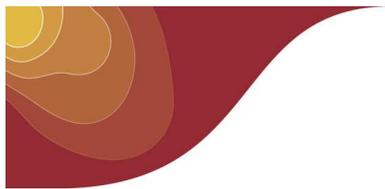


PLUVIOMETRIE AUTOMNALE

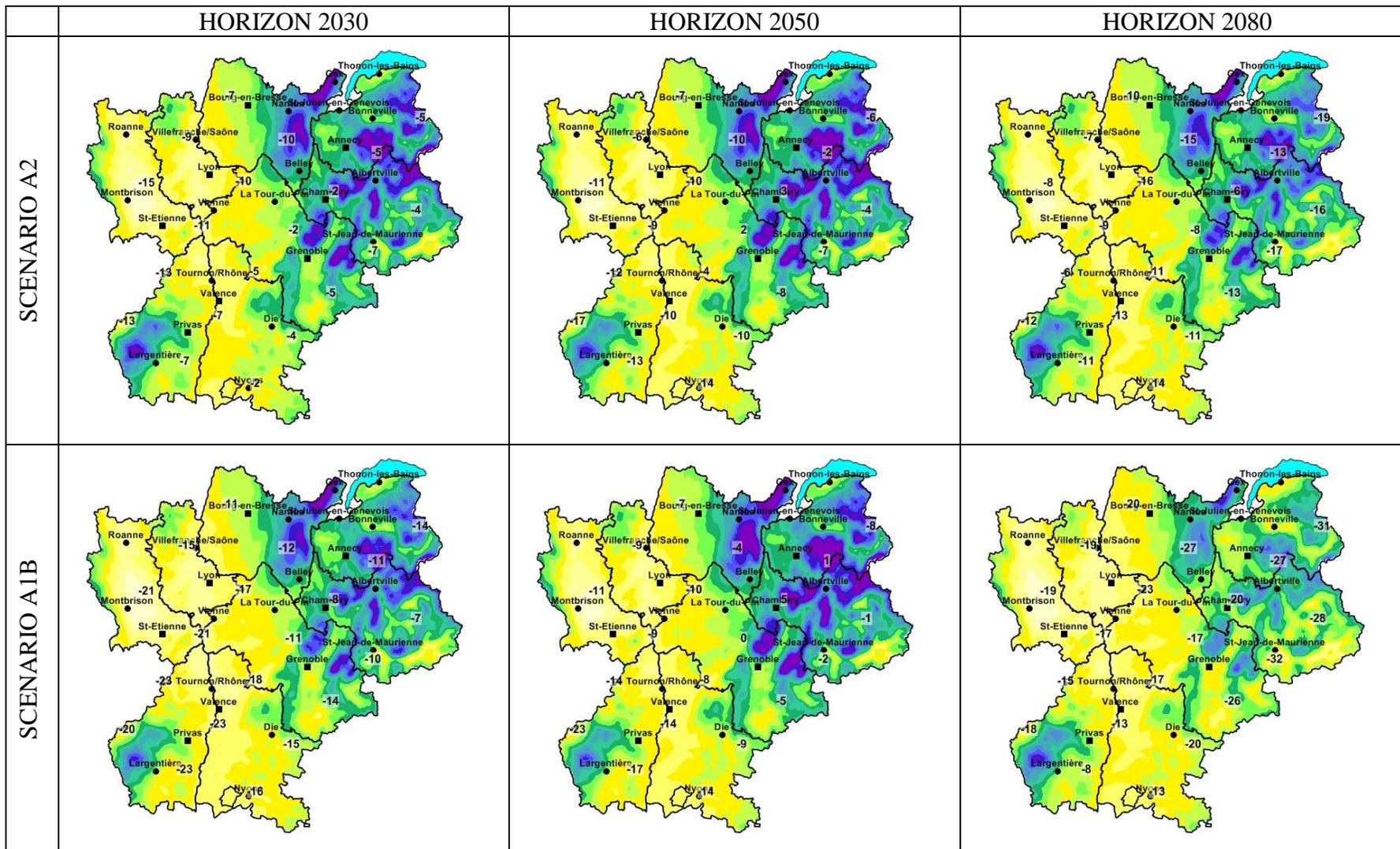




	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO BI			
	Climatologie de référence 1971 - 2000		Cumul des précipitations automnales en mm Valeurs pointées exprimées en %
OBSERVATION		<p>Pas vraiment de fortes variations de la pluviométrie en automne. La tendance est néanmoins orientée à la baisse avec jusqu'à 15% de diminution localement selon les scénarios et les tendances. Il ne se dégage pas de constante géographique dans la gradation des variations. Néanmoins, dans la majorité des modélisations, la Savoie et les plaines de la Loire et du Rhône montrent une baisse moins importante de la pluviométrie voire parfois une légère augmentation. Peu d'évolution d'un horizon à l'autre avec des variations qui s'étalent dans pratiquement toutes les modélisations de -15 à +5%.</p>	

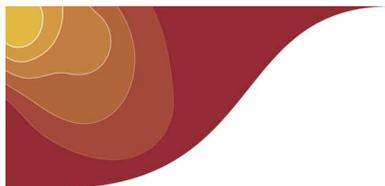


PLUVIOMETRIE HIVERNALE

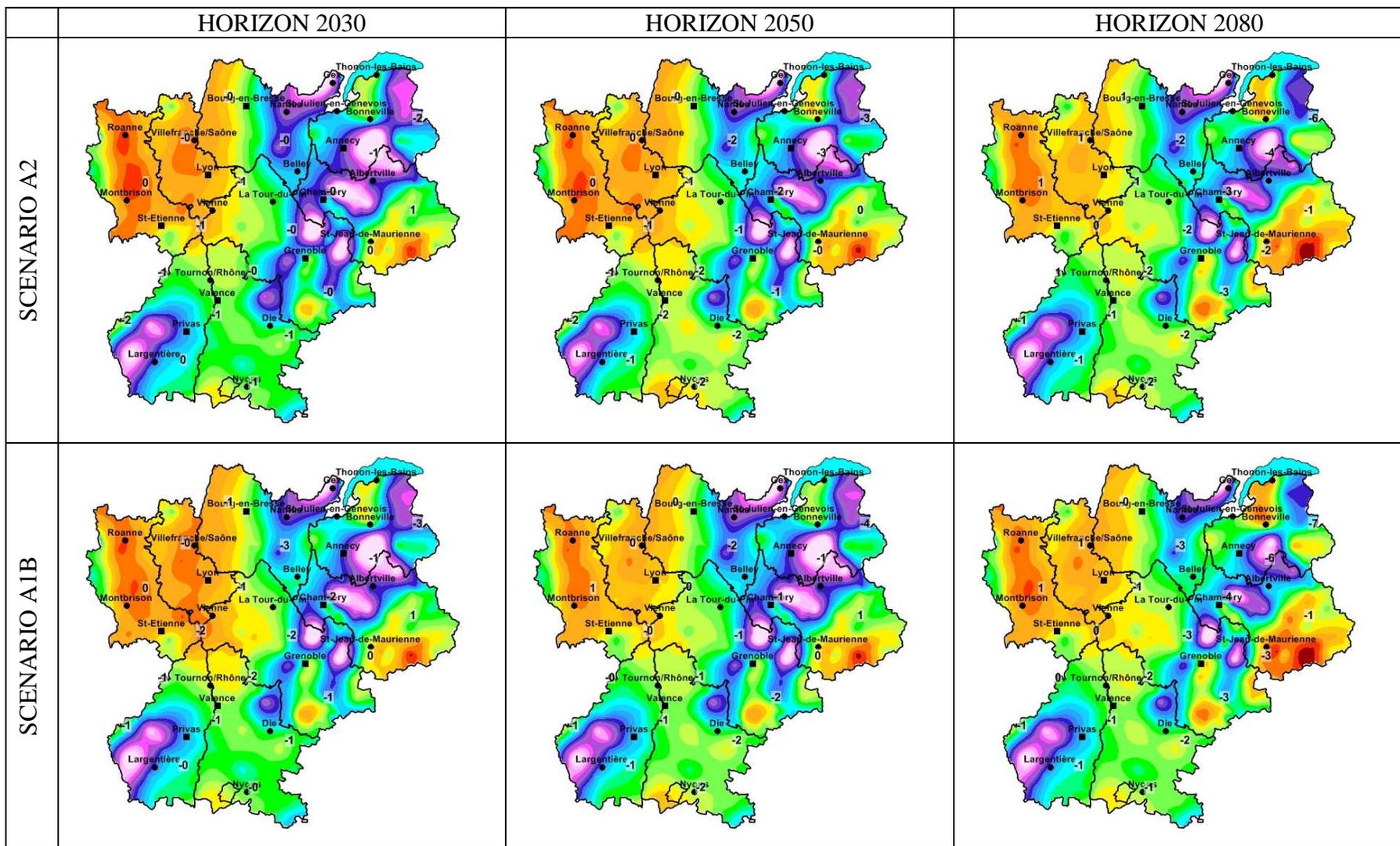


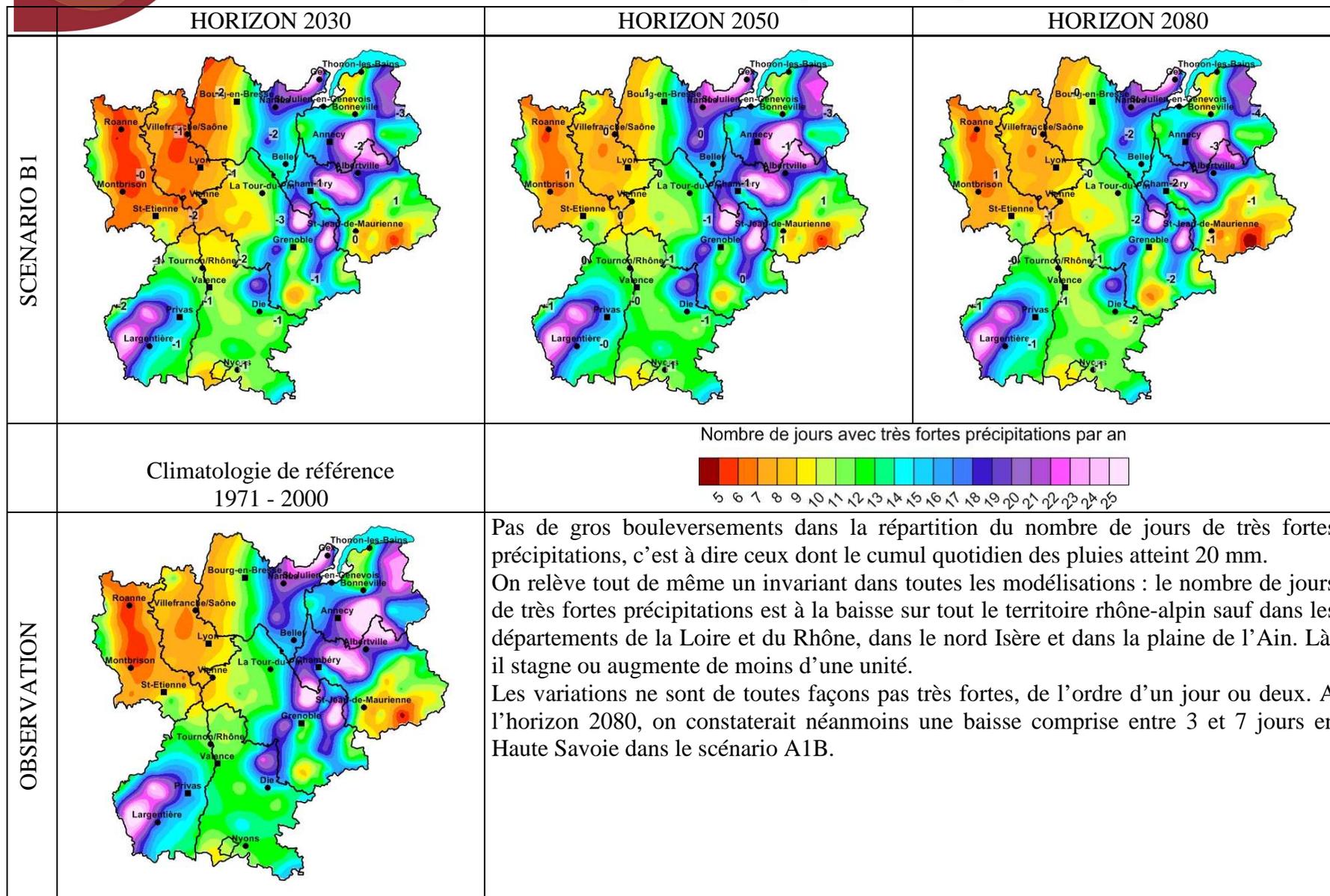


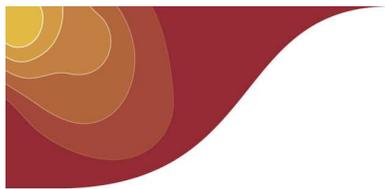
	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO BI			
	Climatologie de référence 1971 - 2000		Cumul des précipitations hivernales en mm Valeurs pointées exprimées en %
OBSERVATION		<p>De nouveau une saison qui connaîtrait une baisse des précipitations généralisée en Rhône-Alpes. La zone des Alpes dont le cœur est constitué des Savoies mais dont le contour s'étend, suivant les modélisations, à l'ouest et au sud aux massifs proches se distinguerait néanmoins l'intensité des variations.</p> <p>A l'horizon 2030, on constaterait une baisse de 0 à 10% des précipitations sur les Alpes, de 10 à 20% ailleurs.</p> <p>L'horizon 2050 verrait une variation de -5 à +5% des précipitations sur les Alpes, une baisse de 15 à 20% dans la moitié sud de la Drôme et de l'Ardèche, et baisse de 5 à 10% ailleurs.</p> <p>Les scénarios sont plus divergents pour l'horizon 2080 : deux sur trois voient une diminution plus importante des précipitations sur les Alpes que dans le reste de Rhône-Alpes. Cette diminution atteindrait 25 à 30 % dans le scénario le plus sec. Dans le dernier scénario, la baisse des précipitations dans les Alpes est de 10 à 20% soit très légèrement inférieure à celle de 15 à 20% modélisée sur le reste du territoire.</p>	



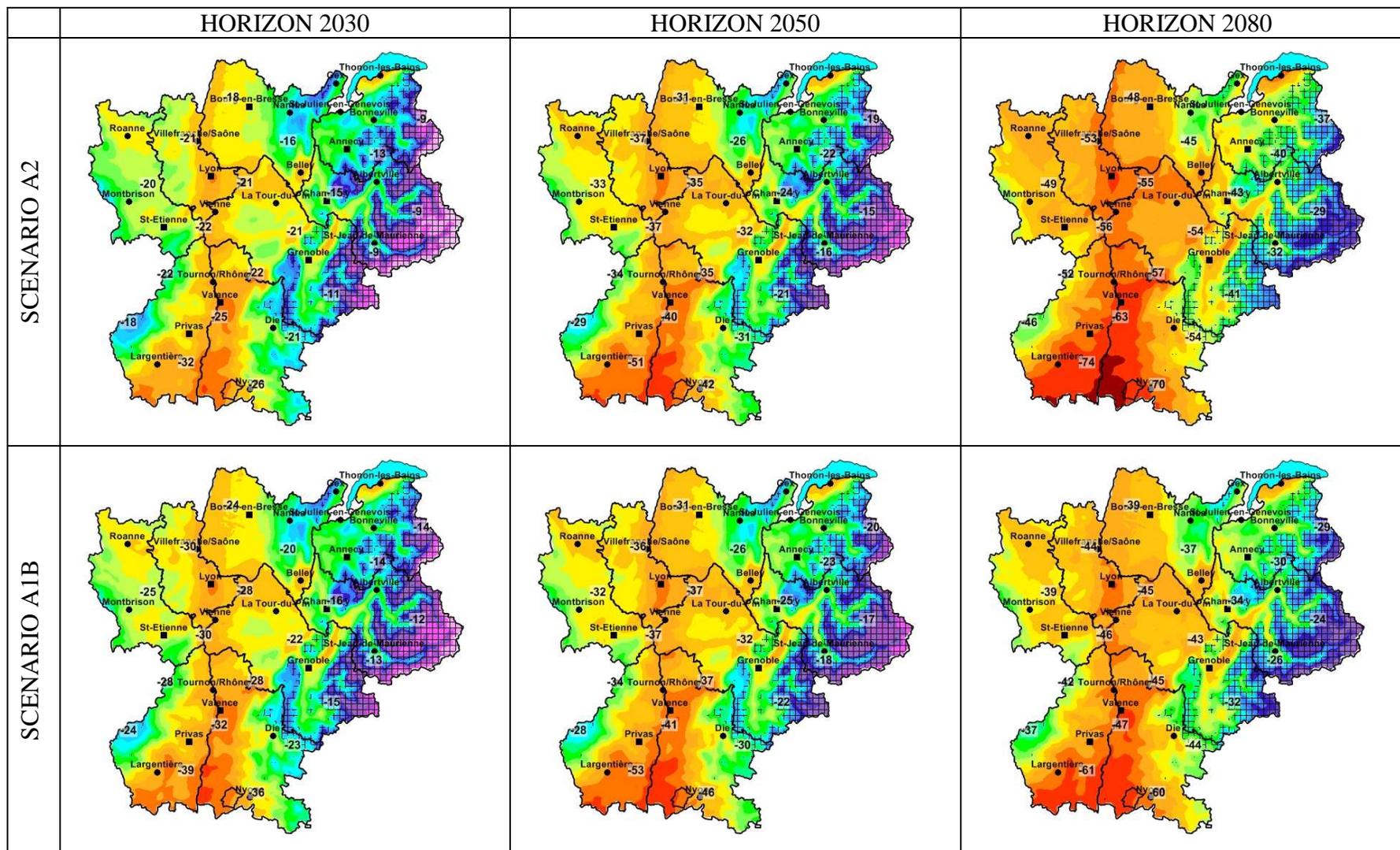
FORTES PRECIPITATIONS ANNUELLES





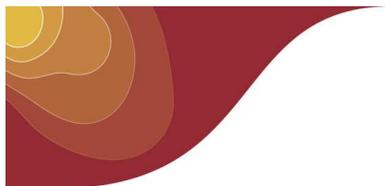


NOMBRE DE JOURS DE GEL ANNUEL

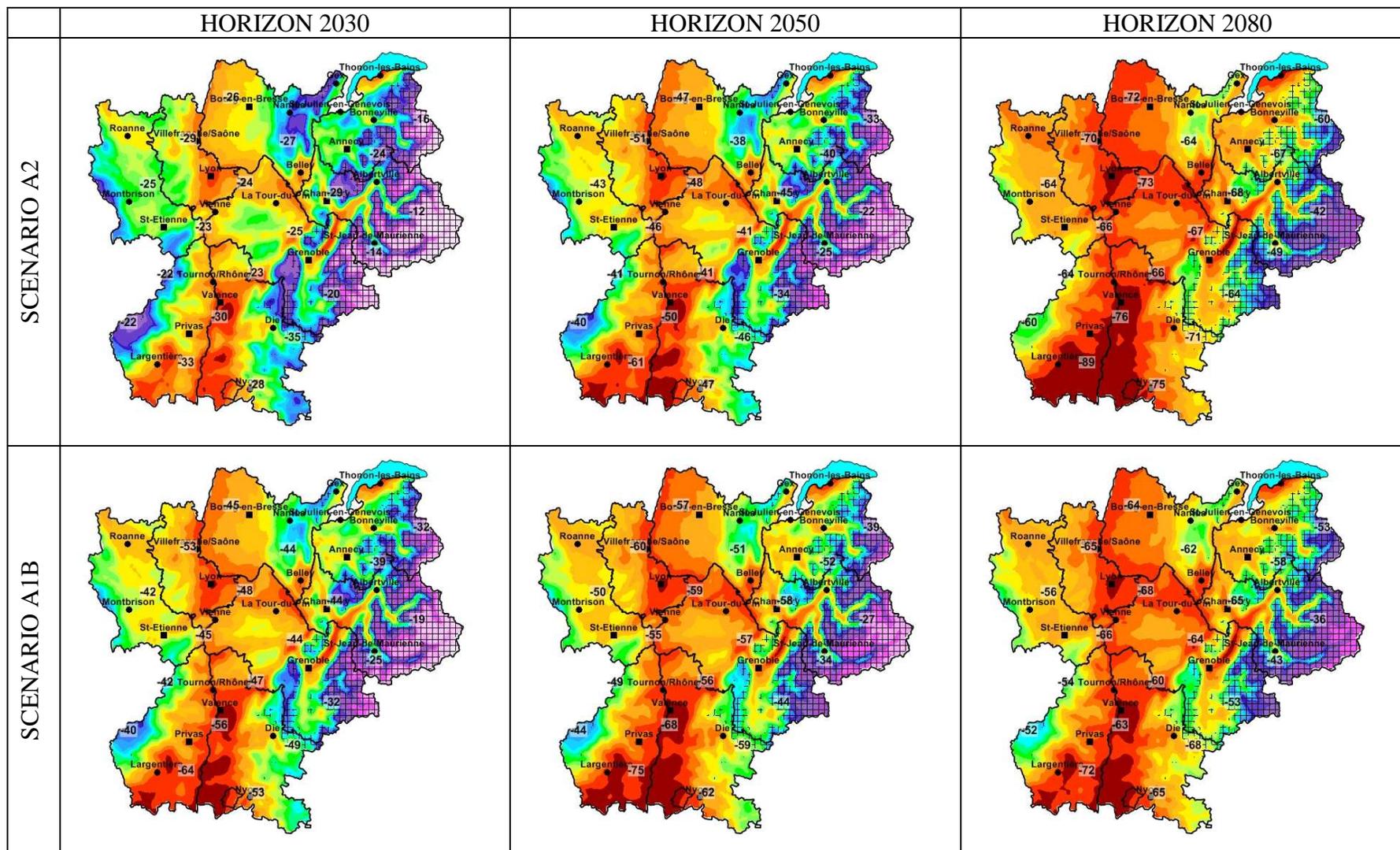




	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO BI			
	Climatologie de référence 1971 - 2000		<p>Nombre de jours de gel par an</p> <p>Valeurs pointées exprimées en %</p>
OBSERVATION		<p>C'est dans le sud des Alpes, les Préalpes et les Cévennes que le nombre de jours de gel annuel va baisser le plus fortement en volume. Ensuite ce sont les autres massifs qui voient le plus baisser le nombre de jours de gel, puis enfin les zones de plaine. A l'horizon 2030, la baisse est globalement comprise entre 10 et 20 jours. Ces chiffres deviennent 15 et 55 à l'horizon 2080, montrant ainsi la différence entre les trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre.</p> <p>Si on raisonne en pourcentage du nombre de jours de gel annuel de la période de référence, le résultat est tout autre : à l'horizon 2030, c'est environ 25 à 40% de baisse dans les plaines du nord au sud, 15 à 25% de baisse dans les massifs les moins élevés et seulement 10 à 15% de baisse dans les Alpes. A l'horizon 2080, on arrive dans le scénario le plus chaud à une baisse de 70 à 75% du nombre de jours de gel dans les plaines du sud de la Drôme et de l'Ardèche, 45 à 55% de baisse dans celles de la moitié nord de Rhône-Alpes, mais aussi dans les Préalpes et les Cévennes, tandis que dans les Alpes, la baisse ne porte que sur 30 à 40% du total actuel.</p>	

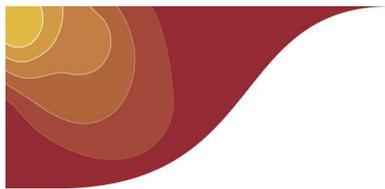


NOMBRE DE JOURS DE GEL PRINTANIER

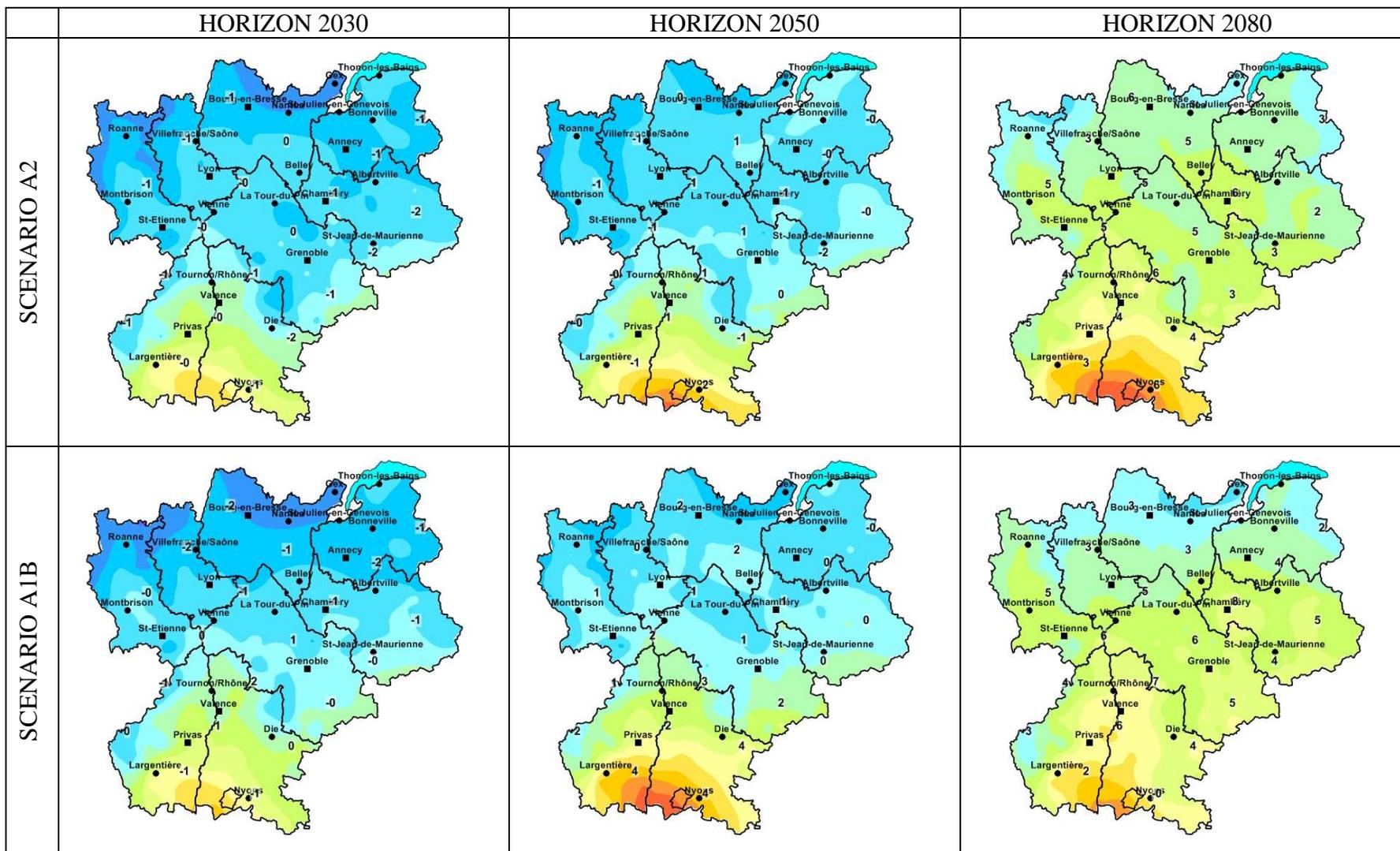


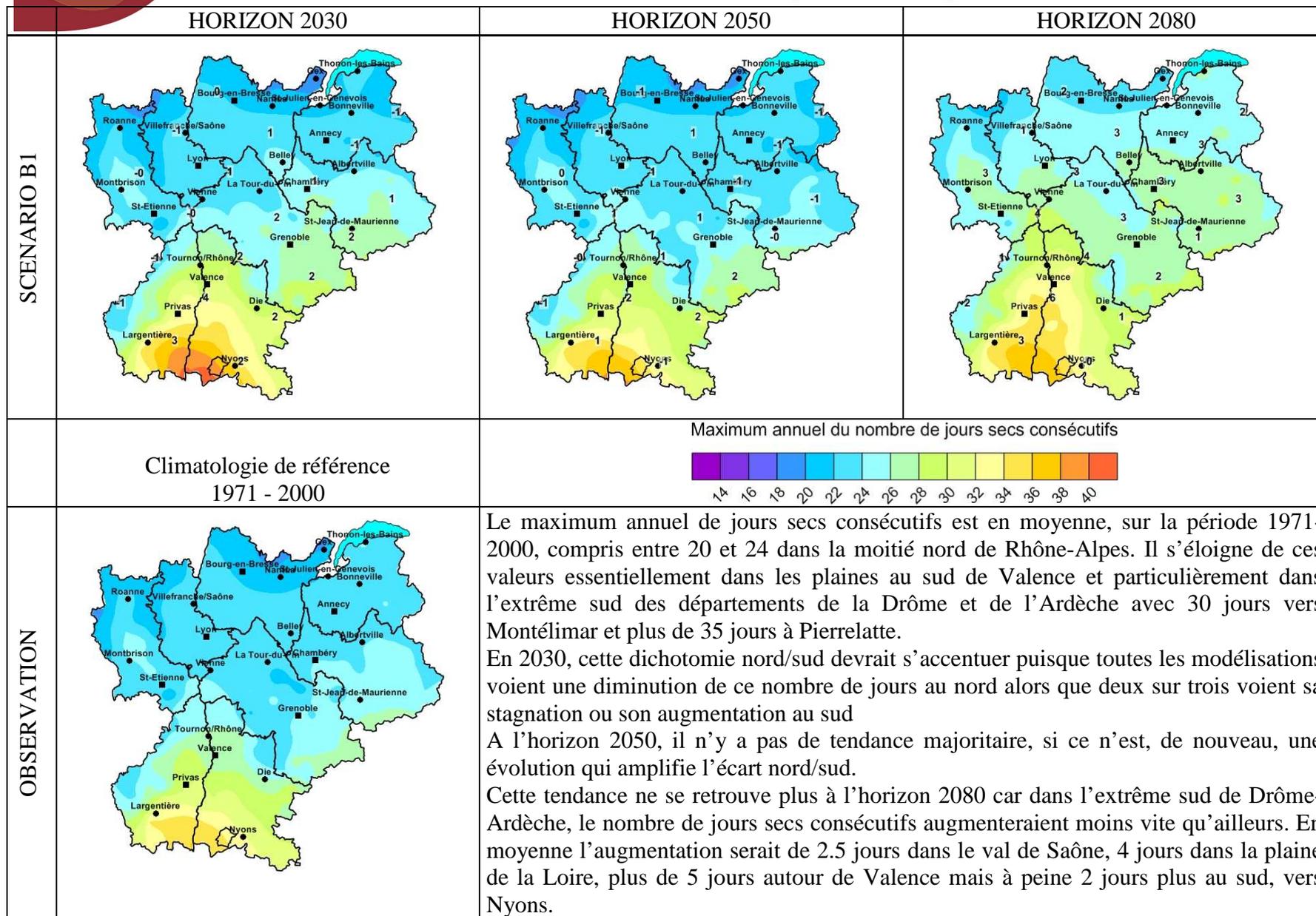


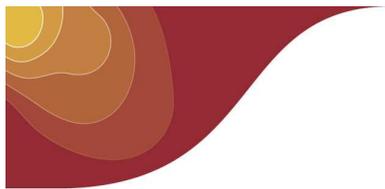
	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO BI			
	Climatologie de référence 1971 - 2000		<p>Nombre de jours de gel au printemps</p> <p>Valeurs pointées exprimées en %</p>
OBSERVATION		<p>Dès l'horizon 2030, le nombre de jours de gel au printemps baisserait de 30 à 60% dans la vallée du Rhône jusqu'à Valence, de 25 à 50% dans les plaines situées plus au nord. Cette tendance se poursuit jusqu'à la fin du siècle avec à l'horizon 2080, selon les scénarios, une diminution comprise entre 50 et 80% dans la vallée du Rhône jusqu'à Valence. Ceci se traduit par exemple dans les plaines favorisées de la Drôme, celles où le nombre de jours de gel annuel est actuellement inférieur à 3, à un risque de gel limité à une année sur deux dans le scénario le plus chaud.</p> <p>A cette échéance, le Val de Saône, les plaines de l'Ain ainsi que les vallées alpines qui encadrent la Chartreuse perdraient entre 55 et 70% de jours de gel. C'est un peu moins que dans l'agglomération lyonnaise et le nord Isère, mais plus que dans les plaines de la Loire.</p>	



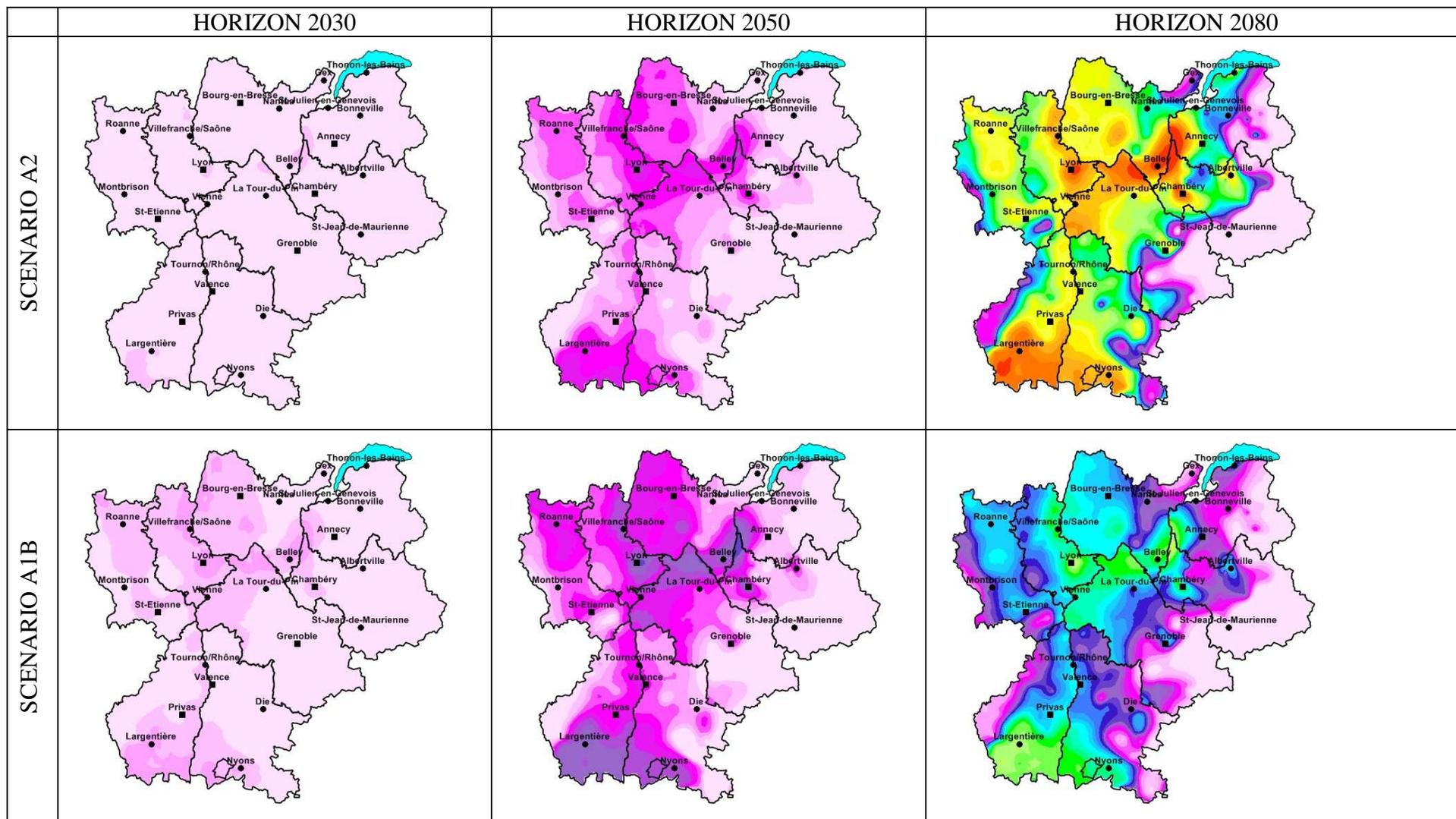
SECHERESSE

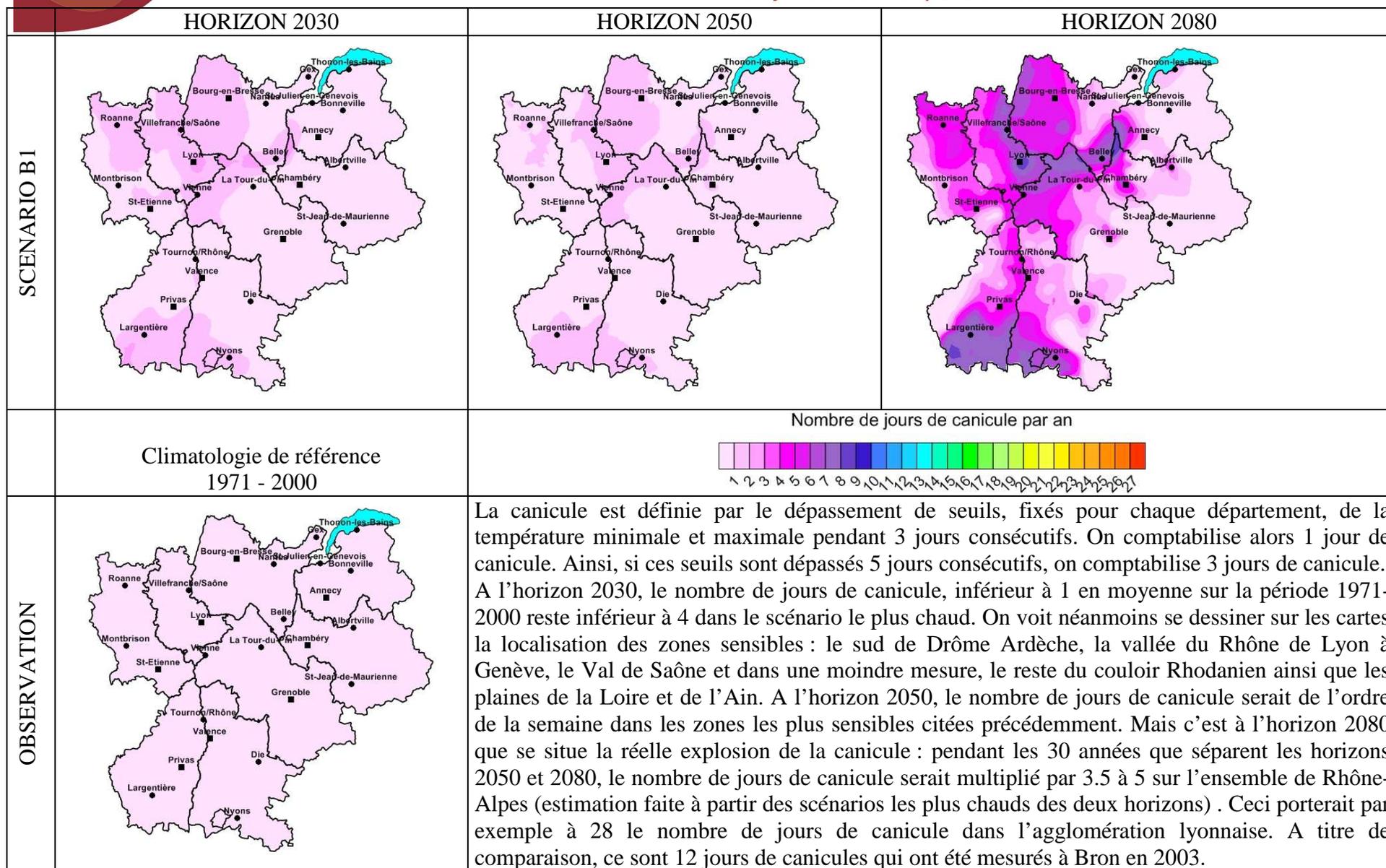


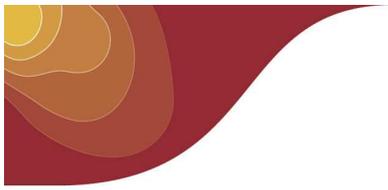


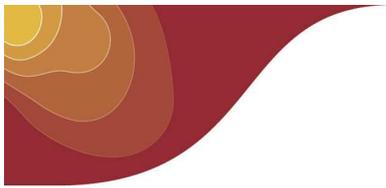


CANICULE



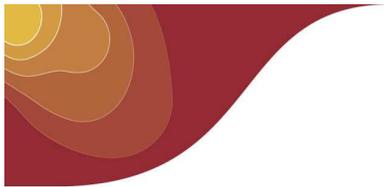




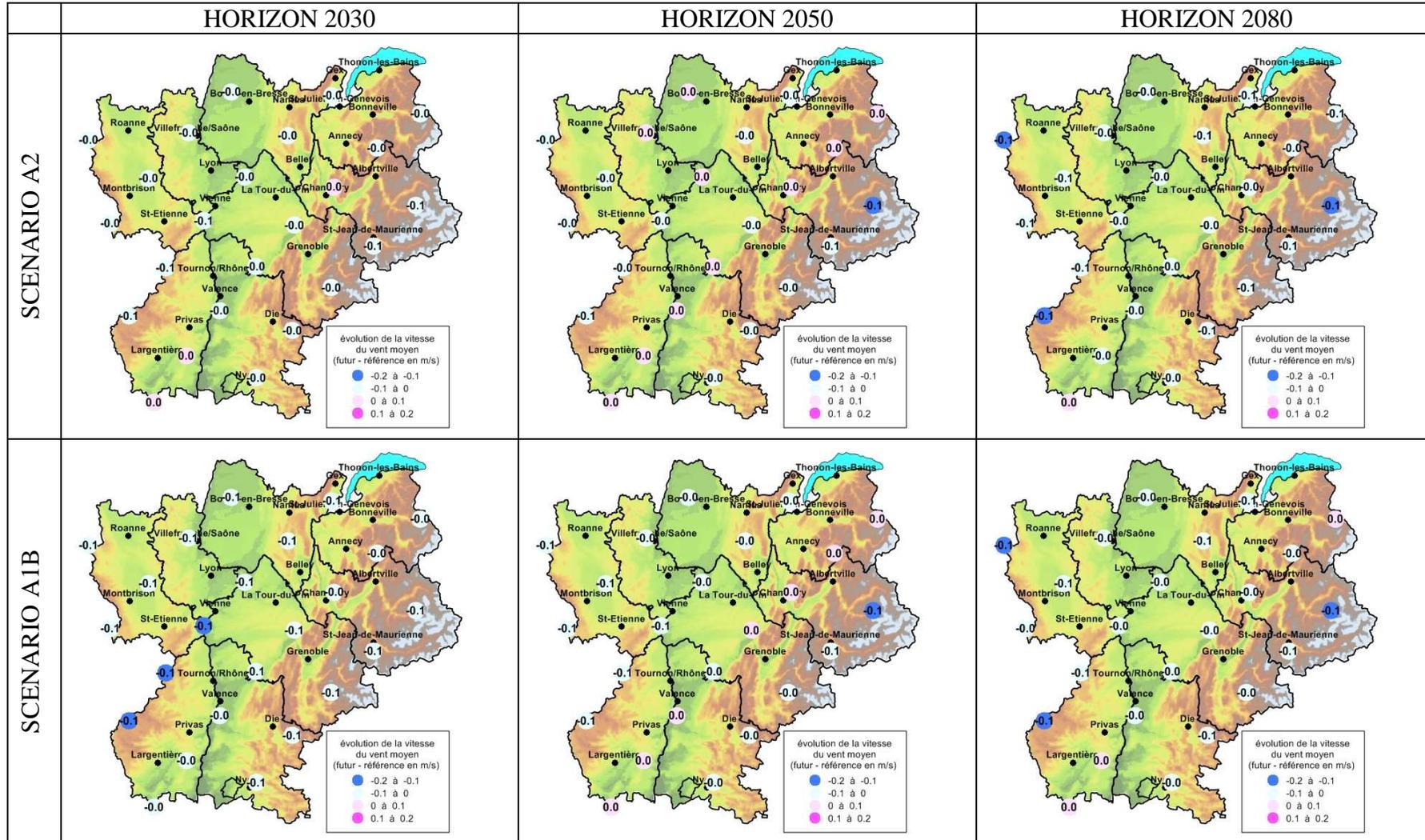


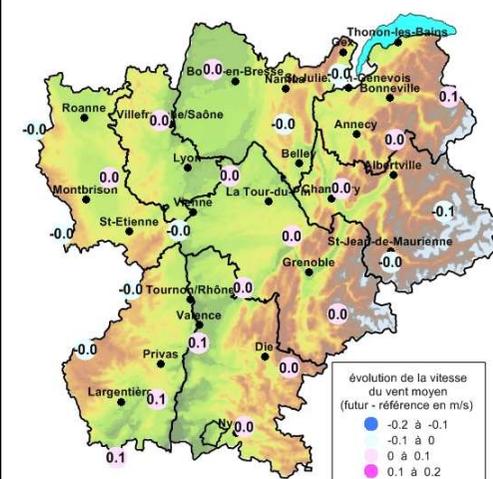
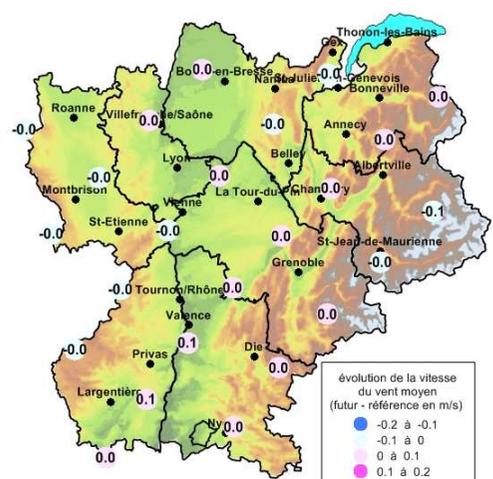
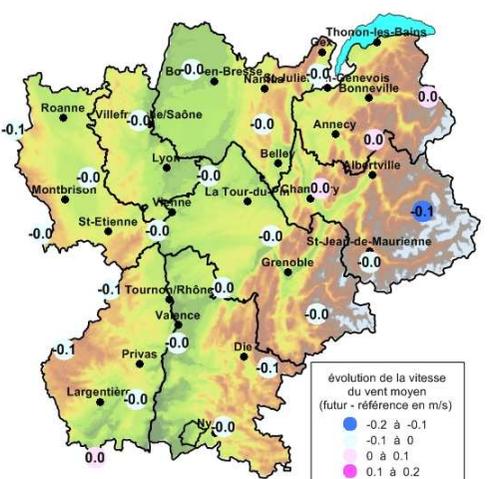
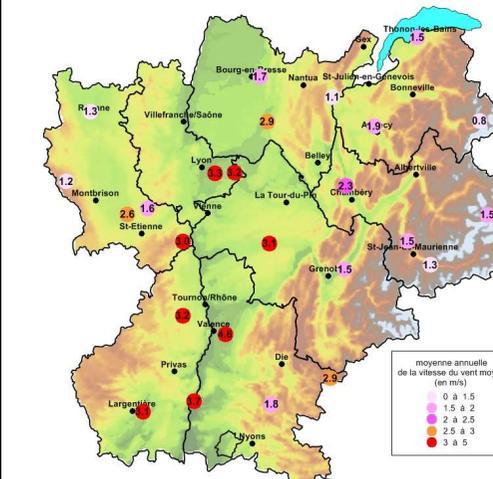
B. Evolution du vent moyen

Nous présentons dans ce chapitre, le résultat sur l'évolution de la vitesse du vent moyen déterminée à partir des données Arpège-Climat corrigées par la méthode quantile-quantile (voir page 11). Rappelons qu'aucun changement d'échelle n'a été tenté dans cette étude sur ce paramètre, étant donnée sa très grande variabilité spatiale du paramètre vent.



VITESSE DU VENT MOYEN A 10 METRES



	HORIZON 2030	HORIZON 2050	HORIZON 2080
SCENARIO B1	 <p>évolution de la vitesse du vent moyen (futur - référence en m/s)</p> <ul style="list-style-type: none"> -0.2 à -0.1 -0.1 à 0 0 à 0.1 0.1 à 0.2 	 <p>évolution de la vitesse du vent moyen (futur - référence en m/s)</p> <ul style="list-style-type: none"> -0.2 à -0.1 -0.1 à 0 0 à 0.1 0.1 à 0.2 	 <p>évolution de la vitesse du vent moyen (futur - référence en m/s)</p> <ul style="list-style-type: none"> -0.2 à -0.1 -0.1 à 0 0 à 0.1 0.1 à 0.2
	Climatologie de référence 1971 - 2000	<p>La climatologie des observations montrent les zones favorables aux sources d'énergie éolienne : ce sont toutes les zones de plaine situées de la vallée du Rhône aux plaines de l'Ain.</p> <p>Quel que soit le scénario et l'horizon choisi, aucune variation de la vitesse moyenne du vent n'est supérieure à 1 m/s dans ces zones. De même quelque soit le scénario, à l'horizon 2080, seul l'extrême sud possède une légère tendance à l'augmentation, le reste des plaines montrant une baisse, très faible également, de la vitesse moyenne du vent.</p> <p>Au contraire, à l'horizon 2050, c'est l'ensemble des zones de plaine qui sont concernées par une légère augmentation de la vitesse du vent, tandis que pour l'horizon le plus proche, seul le scénario B1 anticipe déjà cette augmentation.</p>	
OBSERVATION	 <p>moyenne annuelle de la vitesse du vent moyen (en m/s)</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 à 1.5 1.5 à 2 2 à 2.5 2.5 à 3 3 à 5 		

En résumé, il n'y a pas de changement très visible jusqu'à la fin du siècle, la très grande majorité des variations restant inférieures en valeurs absolue à 0.1m/s. la tendance est toutefois à la baisse de la vitesse du vent.

On notera que ces résultats sont conformes aux résultats de la thèse de Julien Najac : « impact du changement climatique sur le potentiel éolien en France : une étude de régionalisation », novembre 2008. Il compare les résultats, sur la France, de plusieurs modèles climatiques et de plusieurs méthodes de descente d'échelle. Voici un extrait où il résume les changements moyens à horizon 2050 pour le scénario A1B :

De novembre à avril, toutes les projections présentent une augmentation de la vitesse moyenne du vent dans le nord de la France avec une augmentation des flux de sud-ouest, et une diminution de la vitesse moyenne du vent dans le sud avec une diminution des flux de nord. Cependant, des différences apparaissent au niveau de la position de ces structures spatiales. Certaines présentent une diminution de la vitesse du vent sur le pourtour méditerranéen, la zone d'augmentation commençant au nord du Massif central. Certaines projections présentent également une diminution de la vitesse du vent dans le sud-est de la France, mais la zone d'augmentation est repoussée beaucoup plus au nord, le centre de la France présentant une nette diminution de la vitesse du vent. Avec les modèles à résolution de l'ordre de 200 km, résolution trop grossière pour reproduire les effets du relief, la diminution de la vitesse du vent est évidemment sous-estimée dans le sud-est de la France. Ainsi, la nette diminution de la vitesse du vent dans la vallée du Rhône obtenue avec toutes les méthodes de désagrégation n'est pas reproduite avec ces modèles. (...)

De mai à octobre, toutes les projections présentent une diminution de la vitesse du vent sur toute la France avec une augmentation des flux de nord. Cependant, l'amplitude de ces changements varie. Certaines projections présentent également une augmentation très locale de la vitesse du vent dans la vallée du Rhône. Enfin, quelque soit le saison, les changements relatifs moyens multi-modèles de la vitesse du vent à 10 m restent faibles (inférieurs à 6%).

C. l'évolution des DJU à l'horizon 2030

On s'intéresse à la fois aux DJU du climaticien et aux DJU du chauffagiste (voir page7). Le passage de la résolution du modèle à la résolution du km étudiée ici est réalisée par la méthode des deltas (voir page12) en utilisant la climatologie des DJU présentée page 7.

On présente deux types de résultats :

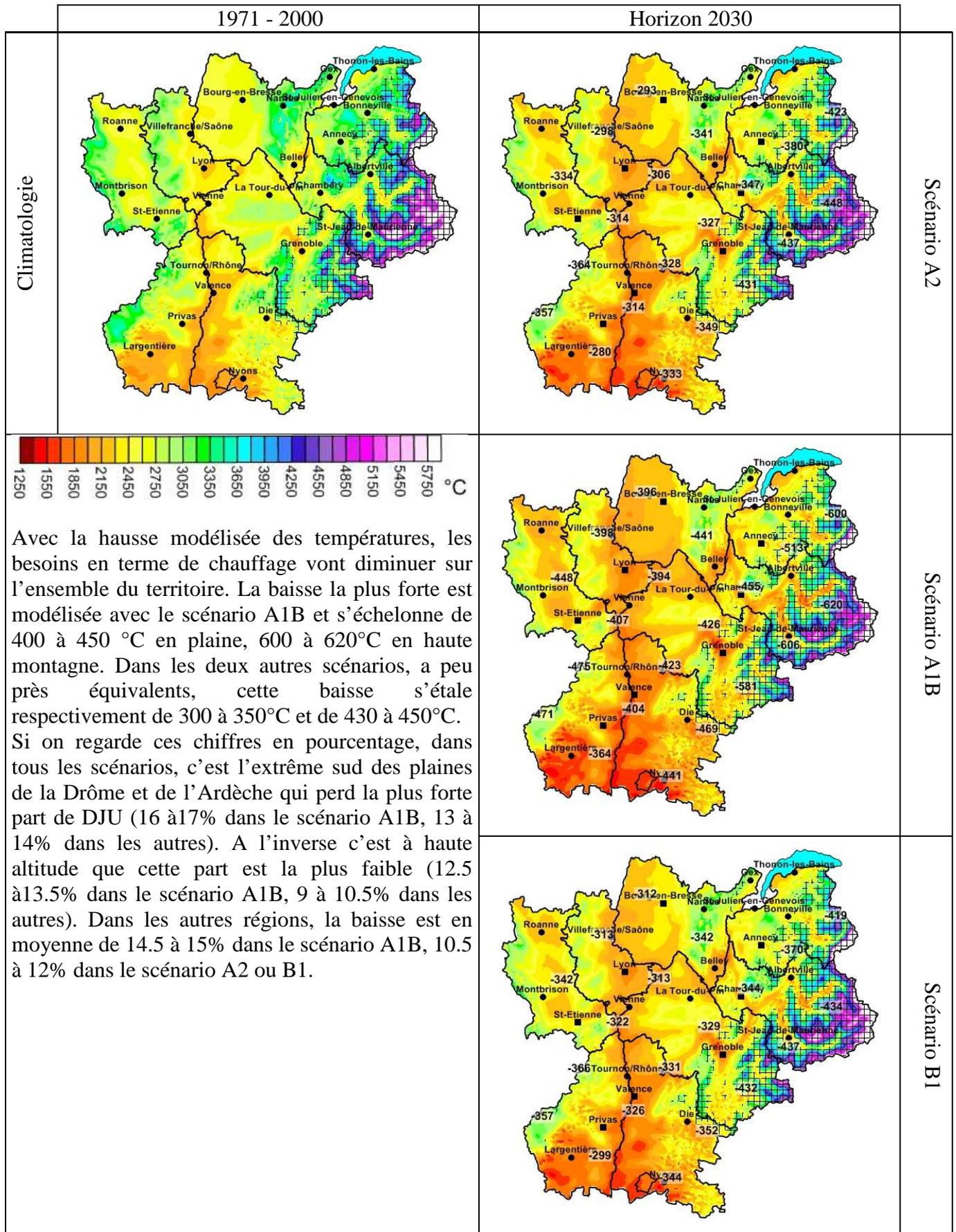
- des cartes qui prennent la même forme que les cartes utilisées pour les indicateurs climatiques et
- des statistiques autour de quelques points de mesure particuliers. Ces statistiques sont calculées sur des boîtes de 50 km² environ centrées sur les stations de mesures. On notera que pour la station du Crêt de l'Oeillon, la station est située sur un sommet à une altitude de 1370 m alors que les deux autres stations d'altitude (Val d'Isère et Chamonix) sont au contraire situées dans la vallée. L'altitude de ces deux dernières stations dégradent très fortement la qualité et la confiance associées aux résultats. Il ne faut donc pas pour ces stations s'attacher au caractère quantitatif des valeurs fournies mais considérer uniquement l'évolution par rapport aux valeurs actuelles.

Le tableau qui suit donne quelques indications sur le relief présent dans les boîtes centrées sur les stations.

station		Altitude dans la boîte				
Nom	altitude	quantile 10%	moyenne	médiane	écart type	quantile 90%
Bron	198	194,8	200,0	201,0	5,0	204,4
Le versoud	220	220,6	262,4	226,0	109,2	305,0
Le crêt de l'Oeillon	1370	1020,0	1137,9	1128,0	107,9	1256,8
Val d'Isère	1850	1863,8	2070,4	1964,0	211,4	2260,6
Chamonix	1042	1036,8	1207,7	1083,0	234,3	1451,4
Andrézieux-Bouthéon	400	394,4	405,8	404,0	10,5	418,4
Valence-Chabeuil	160	155,0	165,6	164,0	8,9	177,0

1. Les DJU du chauffagiste (seuil 18°C en plaine, 16°C en montagne)

Cartographie.

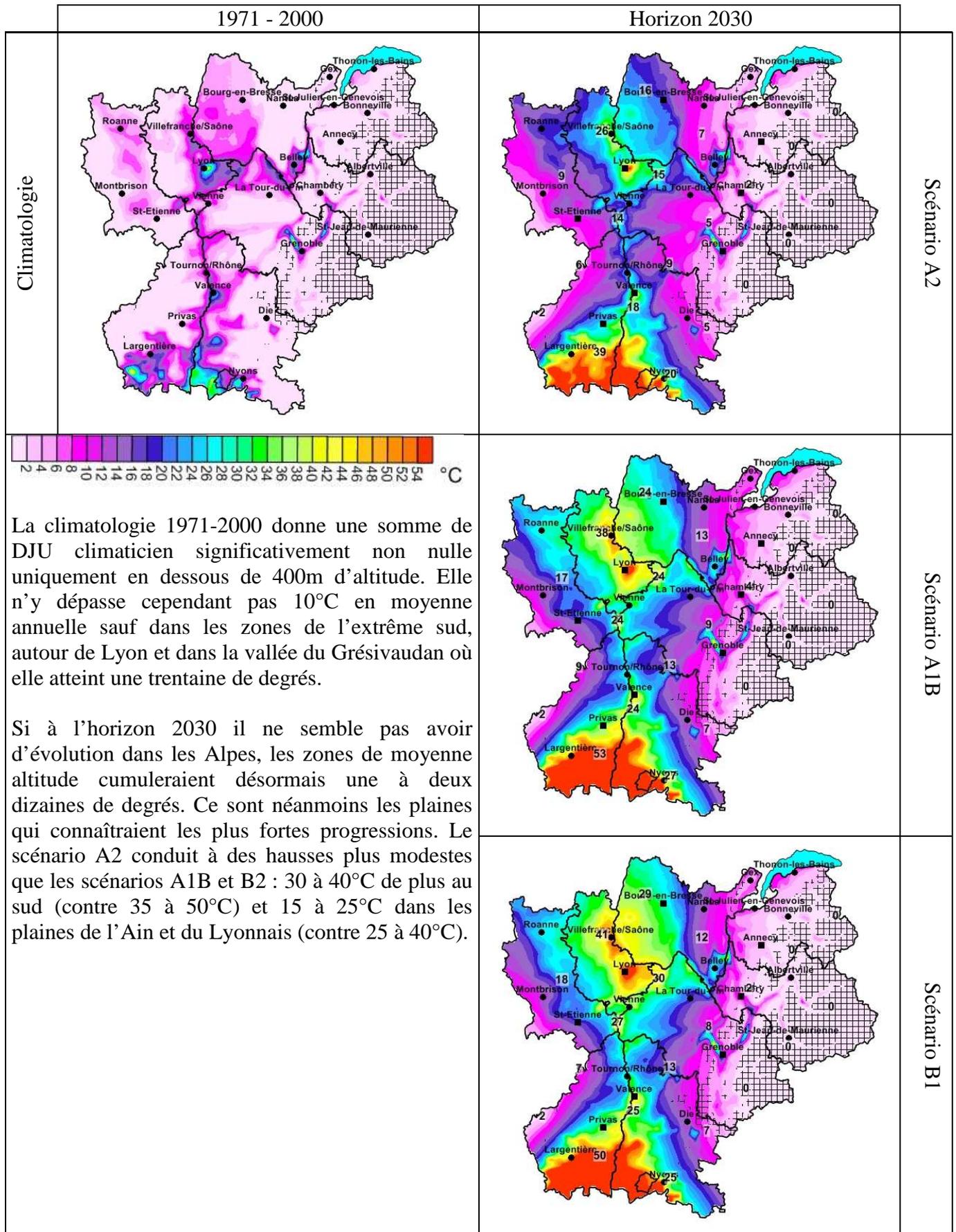


Statistiques par station.

scénario	station	quantile 10%	moyenne	médiane	écart type	quantile 90%
actuel	Bron	2227	2318	2332	60	2381
	Le versoud	2424	2662	2596	228	2984
	Le crêt de l'Oeillon	2944	3234	3269	201	3473
	Val d'Isère	4698	5041	4963	321	5504
	Chamonix	3326	3949	3699	695	4944
	Andrézieux-Bouthéon	2523	2580	2572	51	2651
	Valence-Chabeuil	2157	2194	2188	34	2246
A2	Bron	1922	2013	2026	60	2075
	Le versoud	2030	2266	2197	224	2579
	Le crêt de l'Oeillon	2656	2936	2959	196	3179
	Val d'Isère	4236	4579	4502	320	5041
	Chamonix	2898	3521	3273	694	4513
	Andrézieux-Bouthéon	2185	2243	2234	52	2316
	Valence-Chabeuil	1837	1872	1866	32	1921
A1B	Bron	1830	1921	1934	60	1984
	Le versoud	1900	2133	2065	222	2443
	Le crêt de l'Oeillon	2570	2845	2862	194	3083
	Val d'Isère	4059	4403	4325	320	4864
	Chamonix	2724	3348	3101	694	4339
	Andrézieux-Bouthéon	2073	2133	2123	53	2206
	Valence-Chabeuil	1744	1778	1772	32	1826
B1	Bron	1912	2004	2017	60	2067
	Le versoud	2027	2262	2193	224	2575
	Le crêt de l'Oeillon	2652	2931	2953	196	3173
	Val d'Isère	4248	4592	4514	320	5054
	Chamonix	2905	3528	3280	694	4521
	Andrézieux-Bouthéon	2179	2237	2228	52	2309
	Valence-Chabeuil	1826	1862	1856	33	1912

2. Les DJU du climaticien (seuil 25°C)

Cartographie.



Statistiques par station.

scénario	station	quantile 10%	moyenne	médiane	écart type	quantile 90%
actuel	Bron	15	19	18	5	27
	Le versoud	0	5	5	4	10
	Le crêt de l'Oeillon	0	0	0	0	0
	Val d'Isère	0	0	0	0	0
	Chamonix	0	0	0	0	0
	Andrézieux-Bouthéon	5	6	6	1	7
	Valence-Chabeuil	11	15	15	3	18
A2	Bron	31	37	35	6	45
	Le versoud	2	7	7	4	12
	Le crêt de l'Oeillon	11	11	12	0	12
	Val d'Isère	0	0	0	0	0
	Chamonix	0	0	0	0	0
	Andrézieux-Bouthéon	13	14	14	1	15
	Valence-Chabeuil	25	29	29	3	33
A1B	Bron	41	47	45	6	55
	Le versoud	3	9	9	4	14
	Le crêt de l'Oeillon	18	19	19	1	20
	Val d'Isère	0	0	0	0	0
	Chamonix	0	0	0	0	0
	Andrézieux-Bouthéon	20	21	21	1	21
	Valence-Chabeuil	30	35	34	3	39
B1	Bron	47	52	50	6	60
	Le versoud	2	8	8	4	13
	Le crêt de l'Oeillon	20	22	21	1	23
	Val d'Isère	0	0	0	0	0
	Chamonix	0	0	0	0	0
	Andrézieux-Bouthéon	21	22	22	1	22
	Valence-Chabeuil	31	36	36	3	40

D. Recherche de saisons représentatives

Nous recherchons parmi les hivers 2000 à 2009, lequel serait représentatif d'un hiver moyen à horizon 2030 en terme de conditions favorables à l'apparition de pic de particules. Ces conditions sont la concomitance de températures froides et de vent faible.

Nous recherchons également parmi les étés 2000 à 2009, lequel serait représentatif d'un été moyen à horizon 2030 en terme de conditions favorables à l'apparition de pic d'ozone. Ces conditions sont la concomitance de fortes températures et de vent faible.

La comparaison se fait entre les données mesurées à Bron entre 2000 et 2009 et des données moyennes issues de la simulation climatique entre 2016 et 2045 pour chacun des scénarios A2, A1B et B1.

Les AASQA avait préconisé les critères suivants :

Une journée est qualifiée de froide si sa température minimale est inférieure à 0°C

Une journée est qualifiée de forte si sa température maximale est supérieure à 30°C

Le vent d'une journée est qualifié de faible si la moyenne quotidienne du vent moyen est inférieur à 1m/s

Les critères préconisés pour la température ont été appliqués.

Par contre, il n'a pas été possible d'utiliser le critère sur le vent pour filtrer les mesures estivales de Bron. En effet, une variation diurne qui accélère la vitesse du vent aux moments chauds de la journée, bien que faible à Bron, suffit pour que le seuil de 1m/s soit toujours dépassé par le vent moyen quotidien l'été. **C'est donc le seuil de 2.6 m/s qui a été utilisé en été.** Sa valeur a été ajustée pour que le nombre moyen annuel de conditions favorables à l'apparition de pic d'ozone soit à peu près équivalent et dans les simulations et dans les observations.

L'application de ces critères de sélection nous permet d'isoler **environ 5 occurrences de conditions favorables par hiver et 6 par été.** Pris seul, le nombre d'occurrences annuelles n'est pas assez sélectif pour déterminer une saison représentative. Nous ajoutons donc à ce critère la durée des épisodes sélectionnés. Nous aboutissons alors à la répartition suivante

Conditions favorables l'été

Année scénario	Nombre d'épisodes de durée						Nb total de jours
	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	6 jours	
2009	4	3	0	0			10
2008	5	0	0	0			5
2007	2	0	0	0			2
2006	2	2	1	0			9
2005	5	2	0	0			9
2004	5	0	0	0			5
2003	5	2	0	1			13
2002	3	0	0	0			3
2001	2	2	1	0			9
2000	1	0	1	1			8
b1	3,87	0,87	0,20	0,00	0,03		6,4
a2	3,27	0,53	0,10	0,07	0,03		5,1
a1b	3,77	0,80	0,27	0,03	0,07	0,03	6,8

Il n'a pas été possible d'établir une méthode s'appuyant sur des outils mathématiques, par exemple un calcul de distance, pour la sélection de l'année représentative. **Le choix de l'été 2001** est l'aboutissement d'une suite de constatations :

- on écarte 2003 et 2009 qui ont trop d'événements
- on écarte 2002 et 2007 qui n'en ont pas assez
- on écarte 2004 et 2008 avec peu d'événements et aucun consécutif
- on constate que 2001 et 2006 sont similaires en terme d'événements et on ne conserve que 2001 qui a une température moyenne des événements plus proche de celle de la modélisation
- on écarte 2000 qui donne trop de poids aux événements consécutifs
- entre 2005 et 2001, on choisit 2001 qui
 - o a une distribution plus proche de celle modélisée en 2016-2045 :
 - o fait apparaître des périodes consécutives supérieures à 2 jours
 - o conserve malgré tout une tempe moyenne des événements de 32,2 (contre 32,7 pour 2005) plus proche de celle modélisée (moins de 32°C quelque soit le scénario)

Conditions favorables l'hiver

Année scénario	Nombre d'épisodes de durée							Nb total de jours
	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	6 jours	7 jours	
2009	2	0	0	0	1	0	0	7
2008	5	0	1	0	0	0	1	15
2007	2	1	1	0	0	0	0	7
2006	1	2	0	0	0	0	0	5
2005	4	1	0	0	0	0	0	6
2004	2	2	0	0	0	0	0	6
2003	3	0	0	0	0	0	0	3
2002	1	0	0	1	0	0	0	5
2001	2	0	0	0	0	0	0	2
2000	2	0	0	0	0	0	0	2
b1	2,27	0,57	0,20	0,00	0,03	0,00	0,00	4,2
a2	2,53	0,63	0,30	0,10	0,03	0,00	0,00	5,3
a1b	3,03	0,60	0,17	0,00	0,07	0,00	0,00	5,1

Le choix de l'hiver 2005 comme hiver représentatif est le résultat du raisonnement suivant :

- on écarte 2008 qui a trop d'événements
- on écarte 2000, 2001 et 2003 qui n'en ont pas assez
- on écarte 2002 et 2009 dont la distribution atypique favorise des périodes longues
- on écarte 2004 et 2006 qui défavorisent les périodes de 1 jour
- En choisissant 2005 au détriment de 2007, on favorise le ratio 1j/2j au détriment des périodes longues

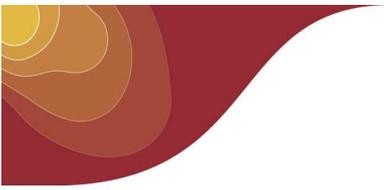
V. Conclusions

L'étude de l'évolution du climat en Rhône-Alpes au cours du XXI^{ème} siècle a été conduite à partir des simulations du modèle climatique Arpège-Climat. Pour tenir compte des incertitudes liées aux évolutions de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, les simulations ont porté sur 3 des scénarios d'évolution des gaz à effet de serre établis par le GIEC.

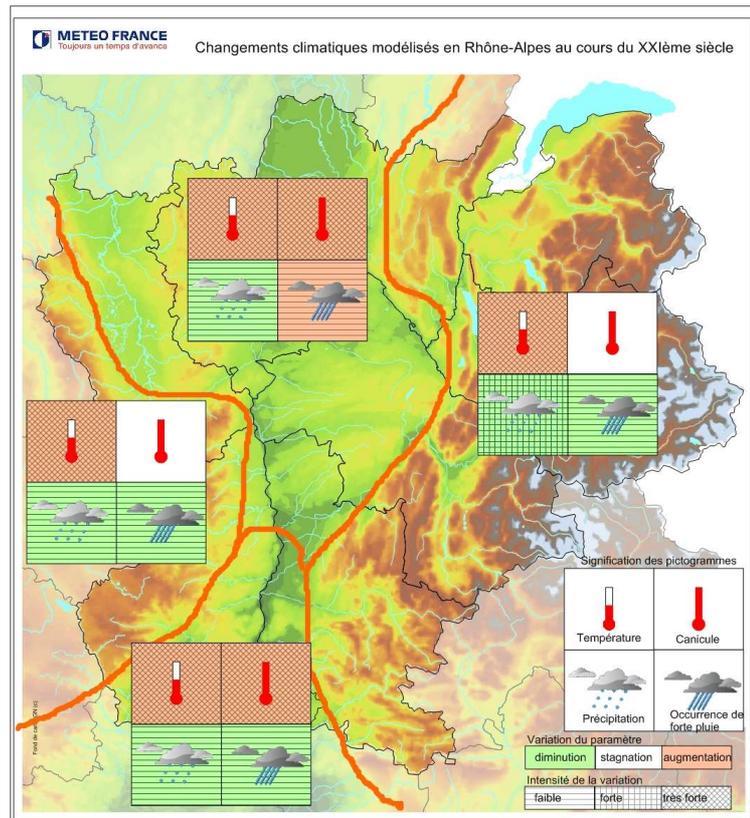
Les évolutions qui sont alors rapportées, pour les indicateurs climatiques, le vent moyen et les DJU, le sont toujours en terme de fourchettes. Il faut garder à l'esprit la présence d'autres incertitudes qui s'ajoutent à la première : celle liée au modèle climatique utilisé et celle liée à la méthode de changement de résolution pour la cartographie.

Parmi les évolutions constatées, certaines sont plus marquées que d'autres. On retiendra par exemple :

- **la forte hausse des températures minimales l'été**, modélisée dans sa fourchette haute jusqu'à 6.5°C en moyenne pour la fin du siècle
- **la baisse conséquente du nombre de jours de gel printanier** qui pourrait conduire à ne voir apparaître ce phénomène en moyenne qu'une année sur deux dans les plaines drômoises à l'horizon 2080
- l'augmentation des températures maximales, de 4 à 8°C sur le siècle pour le sud de la Drôme et de l'Ardèche
- conséquence de la hausse des températures, **l'explosion des situations caniculaires dans la seconde moitié du siècle en cours**
- tendance à la baisse du cumul de précipitation annuel qui cache néanmoins quelques disparités saisonnières comme la **très forte diminution des pluies estivales en plaine à l'horizon 2080** avec une diminution envisagée du cumul de 25 à 40% mais une légère hausse dans le sud des Alpes à l'horizon 2030
- le nombre de jours consécutifs de sécheresse augmenterait de façon généralisée seulement en fin de siècle. D'ici là, il se stabiliserait ou diminuerait légèrement au nord de la région mais augmenterait au sud



La carte ci-contre résume les changements attendus en Rhône-Alpes d'ici la fin du siècle en ce qui concerne les précipitations annuelles, les fortes précipitations, la température moyenne et la canicule



Les modélisations utilisées dans cette étude datent du dernier rapport du GIEC en 2007 et d'autres résultats, issus de modèles toujours plus complexes, à résolutions plus fines seront disponibles pour le prochain rapport en 2013. Bien qu'encore incomplets, les résultats de la nouvelle version d'Arpège-Climat semblent confirmer et amplifier les évolutions constatées dans notre étude.