

APPEL A PROJETS 2007 DE LA VILLE DE PARIS

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR PARIS



Projet **EPICEA**

Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à
l'Echelle de l'Agglomération parisienne



*Rapport sur le volet 1
Evolution du climat urbain de Paris dans la perspective du
changement climatique*



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

Table des Matières

1	Introduction	2
2	Système de modélisation des surfaces continentales	8
2.1	Description du système SURFEX	8
2.2	Application à l'agglomération parisienne	9
3	Forçages climatiques	11
3.1	Jeu de données historique de référence	11
3.2	Scénarios climatiques	11
3.2.1	Présentation du modèle de climat et des scénarios	11
3.2.2	Méthodes de descente d'échelle	12
3.2.3	Adaptation à la problématique urbaine	14
4	Evaluation du modèle en climat présent	17
5	Evolution de la température sur la région parisienne	18
5.1	Analyse par classe d'urbanisation	18
5.2	Tendances générales	18
5.3	Températures hivernales	22
5.4	Températures estivales	27
5.5	Ilots de chaleurs urbains	33
6	Consommation énergétique et confort thermique intérieur	38
6.1	Degrés jours unifiés de chauffe et de refroidissement	38
6.2	Températures dans les bâtiments en été	42
7	Conclusions	43
8	Références	44

1 Introduction

Les villes sont au cœur des problématiques liées au changement climatique. D'une part, elles contribuent au réchauffement global déjà observé (IPCC 2007) puisqu'elles concentrent la majorité des activités humaines à l'origine de fortes émissions de gaz à effet de serre (Figure 1). D'autre part, on s'attend à ce que les tendances globales de réchauffement soient accentuées au niveau des villes en raison des processus urbains spécifiques tels que l'îlot de chaleur urbain (ICU). L'analyse de longues séries d'observation pour des stations situées dans des environnements urbanisés a déjà mis en évidence la présence d'un signal sur les températures lié à l'ICU. Ce signal se superpose à la tendance de grande échelle, renforçant ainsi localement l'effet du réchauffement global (Jones et al. 1990, Wilby 2003, Gaffin et al. 2008, Fujibe 2010). Dans les décennies futures, les interactions complexes entre le changement climatique à l'échelle régionale et l'évolution des villes elles-mêmes (associant les processus d'étalement urbain, d'accroissement démographique et de modification des modes de vie) mènera probablement à une modification significative du climat urbain. Les conséquences peuvent être nombreuses et variées (Rosenzweig and Solecki 2001), en termes de gestion des infrastructures, ressources en eau, pollution, confort bioclimatique et santé publique, demande énergétique, etc.

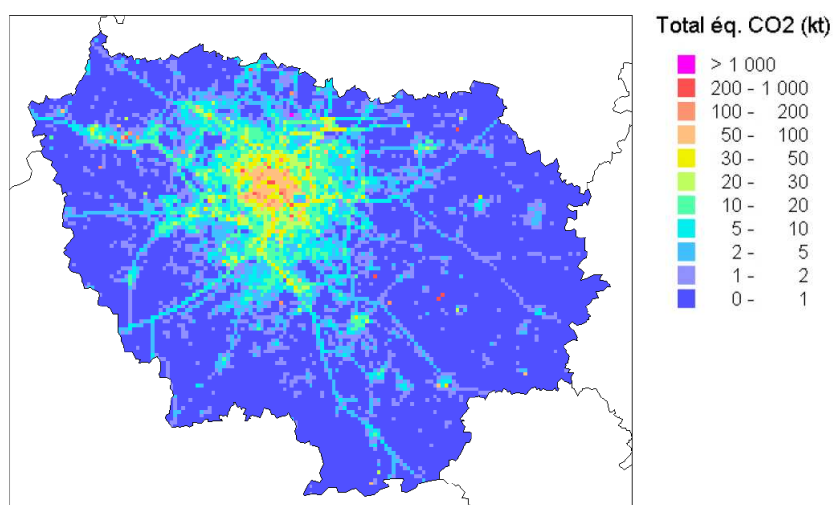


Figure 1 - Analyse des principaux gaz à effet de serre en Ile-de-France pour l'année 2005 (Source : AIRPARIF).

Il est très difficile de prendre en compte les multiples processus qui entrent en jeu dans l'étude de l'impact du changement climatique à l'échelle de la ville. Récemment, des projections du climat urbain futur ont été produites pour l'analyse de certaines problématiques telles que l'occurrence d'événements chauds (Garcia Cueto et al. 2010, Früh et al. 2010), les ICUs (Wilby 2003), la pollution de l'air (Athanasidou et al. 2010), l'hydrologie urbaine (O'Hara and Georgakakos 2008), la consommation énergétique (Amato et al. 2005, Franco and Sanstad 2008), ou les impacts économiques (Hallegatte et al. 2007). La plupart de ces études réalisent des projections climatiques à l'échelle locale à partir de méthodes statistiques de descente d'échelle appliquées à des sorties de modèles globaux de climat (MGC), et évaluent

les impacts de façon assez simple sans modélisation explicite de la ville. Früh et al. (2010) propose une méthode plus sophistiquée qui projette tout d'abord le climat global à l'échelle régionale selon des techniques dynamique et statistique, puis simule le climat urbain grâce à la paramétrisation spécifique MUKLIMO_3. Notre étude se base sur une approche similaire qui vise à simuler le climat urbain de Paris à l'horizon de la fin du 21^{ème} siècle avec le modèle de canopée urbaine Town Energy Balance (TEB, Masson 2000) par des intégrations numériques sur de longues périodes de temps.

Certains travaux ont déjà étudié le changement climatique à l'échelle de l'Europe, mais également en France métropolitaine, soit à partir d'observations (Moisselin et al. 2002, Moisselin et Dubuisson 2006), soit de projections climatiques (Déqué et al. 2005, Martin and Etchevers 2006, Boé et al. 2006). Les études menées par la Direction de la Climatologie de Météo-France montrent déjà une hausse des températures moyennes sur la France au cours du 20^{ème} siècle, sensiblement plus marquée que celle établie par le GIEC au niveau planétaire (Moisselin et al. 2002), avec des différences régionales significatives maximales. En outre, sur la même période, l'augmentation de la variabilité des températures maximales estivales renforce le risque de canicule, et il apparaît que les sécheresses deviennent plus fréquentes et plus intenses (Moisselin et Dubuisson 2006). En climat futur, les études portent essentiellement sur la fréquence des événements de vent violent, les températures et les précipitations (Déqué 2007, Planton et al. 2008). Les principaux résultats indiquent un impact négligeable sur les vents forts, une tendance au réchauffement observée sur les températures minimales et maximales, et une augmentation substantielle des vagues de chaleur.

Une étude a récemment été menée sur la région Ile-de-France dans le cadre de l'élaboration de son Plan Climat (Koukou-Arnaud et Desplat, 2010).

En terme d'évolution des températures, elle montre :

- une hausse de 2 à 3 °C des températures minimales hivernales sur Paris et la Petite Couronne entre le climat actuel (1971-2000) et celui de la fin du 21^{ème} siècle (horizon 2080 : climat moyen calculé sur 2066-2095). Un îlot de sur Paris et la Petite Couronne est bien visible en climat présent et en climat futur (Figure 2) ;
- une hausse de 4 à 5 °C des températures maximales estivales sur Paris et la Petite Couronne entre le climat actuel et celui de la fin du 21^{ème} siècle (Figure 3) ;
- l'analyse des alertes canicule (nombre de jours avec mise en vigilance orange canicule) sur la période actuelle permet de repérer les grosses vagues de chaleur des étés 1976, 2003 et 2006 ainsi qu'une tendance à la hausse. Sur le 21^{ème} siècle, on a un signal exponentiel et une fréquence et intensité de ces épisodes caniculaires en forte hausse, plus particulièrement durant la seconde moitié du 21^{ème} siècle (Figure 9).

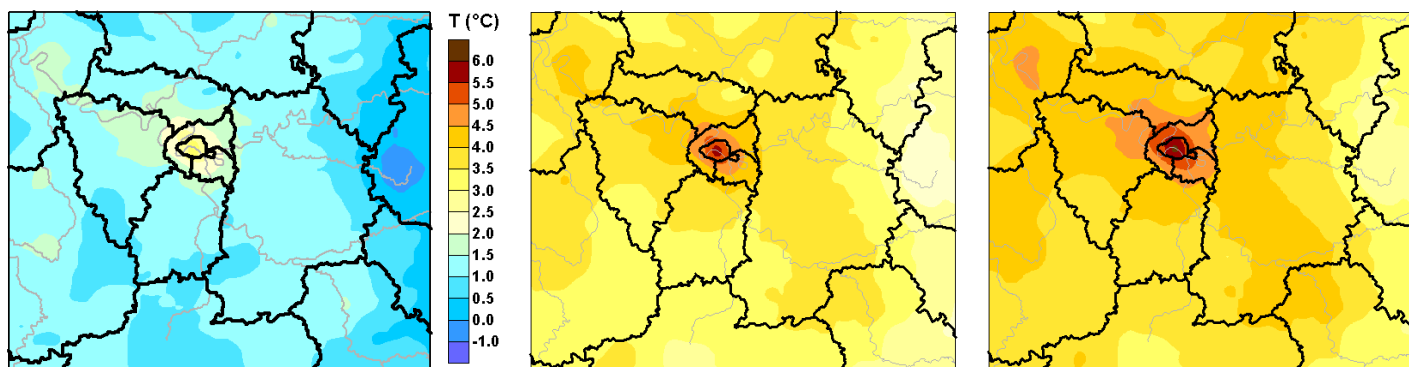


Figure 2 – Températures minimales moyennes en hiver (décembre-janvier-février) sur l’Ile-de-France observée sur la période de référence 1971-2000 à gauche et projetée par le modèle ARPEGE-Climat à l’horizon 2080 selon les scénarios A1B au centre et A2 à droite (copyright Météo-France 2010).

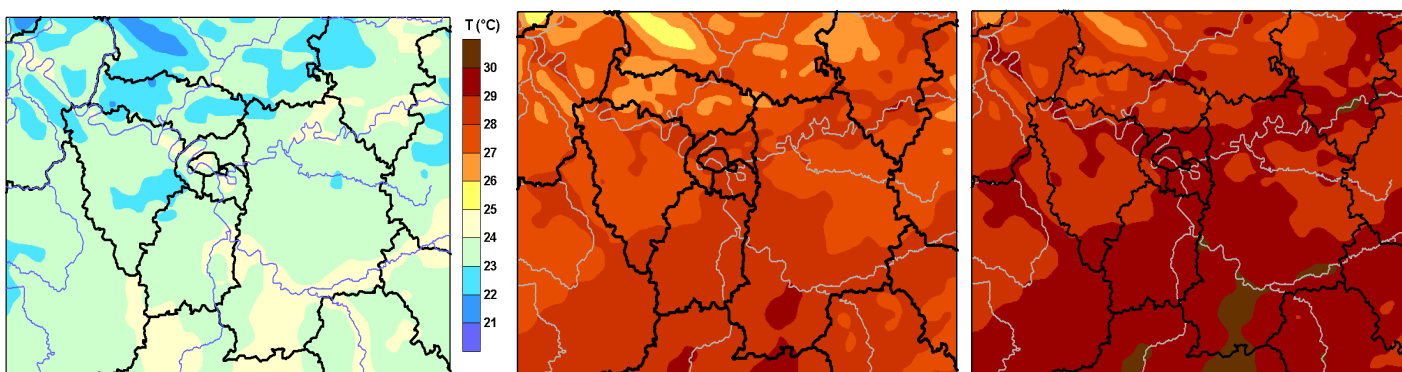


Figure 3 – Températures maximales moyennes en été (juin-juillet-août) sur l’Ile-de-France observée sur la période de référence 1971-2000 à gauche et projetée par le modèle ARPEGE-Climat à l’horizon 2080 selon les scénarios A1B au centre et A2 à droite (copyright Météo-France 2010).

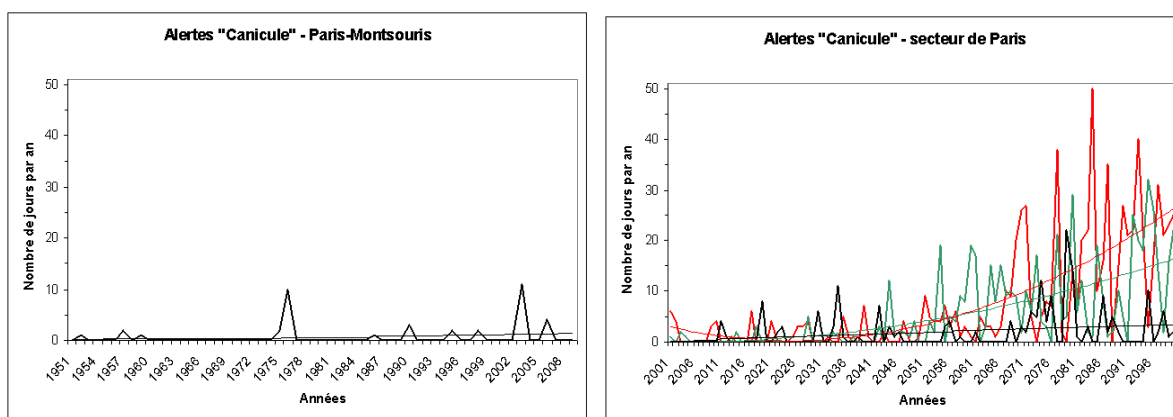


Figure 4 – Nombre de jours par an pour lesquels les seuils de vigilance orange « canicule » sont franchis, observé sur la station de Paris-Montsouris sur la période 1951-2009 à gauche et projeté sur le secteur de Paris par le modèle ARPEGE-Climat sur la période 2001-2100, selon les scénarios A2 en rouge, A1B en vert et B1 en noir (copyright Météo-France 2010).

En terme d'évolution des précipitations, cette étude montre une baisse généralisée des pluies en été, plus marquée à la fin du 21^{ème} siècle (Figure 5), mais peu de modifications sur les pluies en hiver (Figure 6).

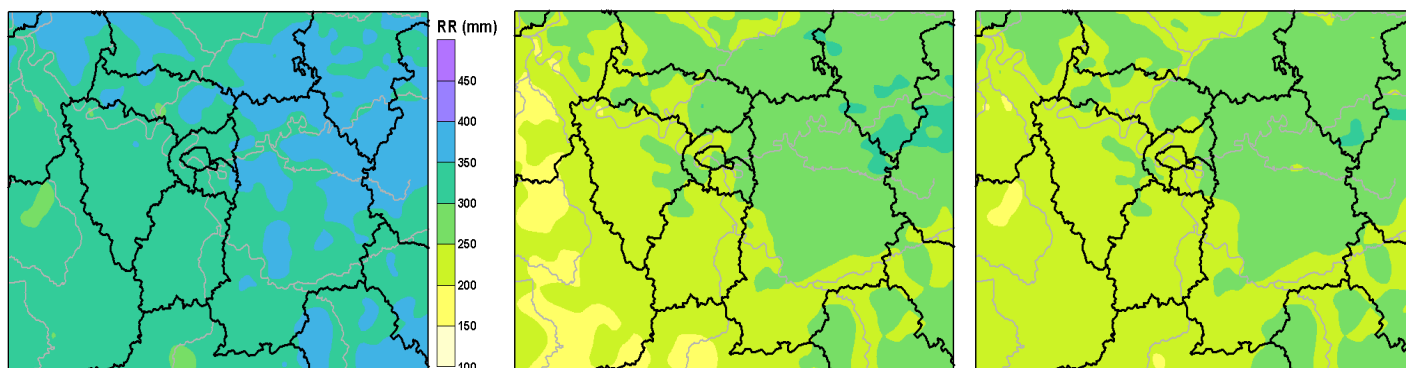


Figure 5 – Cumul estival de précipitations moyennes quotidiennes (avril à septembre) sur l'Ile-de-France observé sur la période de référence 1971-2000 à gauche et projeté par le modèle ARPEGE-Climat à l'horizon 2080 selon les scénarios A1B au centre et A2 à droite (copyright Météo-France 2010).

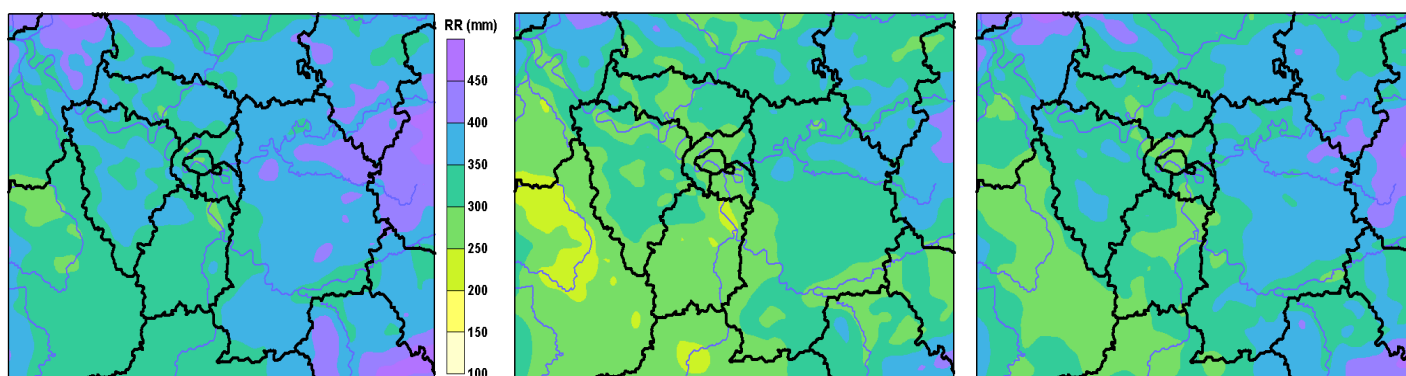


Figure 6– Cumul hivernal de précipitations moyennes quotidiennes (octobre à mars) sur l'Ile-de-France observé sur la période de référence 1971-2000 à gauche et projeté par le modèle ARPEGE-Climat à l'horizon 2080 selon les scénarios A1B au centre et A2 à droite (copyright Météo-France 2010).

Actuellement, il n'existe pas d'étude portant sur l'évolution du climat local des villes françaises. On peut toutefois citer les travaux de Hallegatte et al. (2007) qui prévoient, à partir de l'analyse de projections climatiques régionales et par analogues climatiques, que Paris aurait un climat à l'horizon 2100 équivalent au climat actuel de Cordoue suivant le scénario A2 (Figure 7).

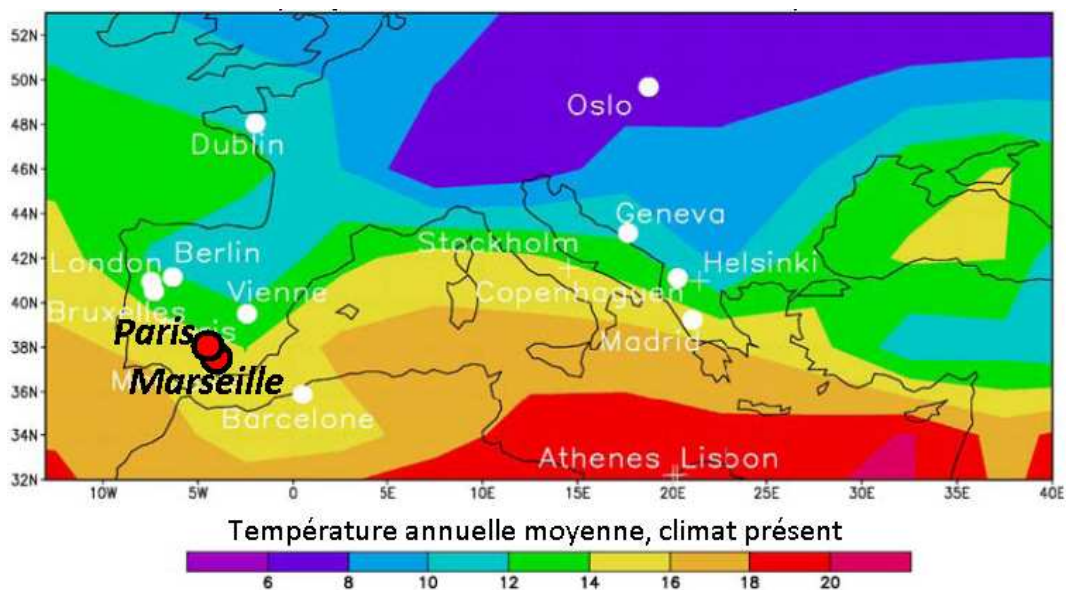


Figure 7 – Projection du climat futur des grandes métropoles européennes selon le modèle de climat régional HadRM3H suivant le scénario A2 (d'après Hallegatte et al. 2007)

Enfin, il est connu que la région parisienne peut être le siège de forts ICU de l'ordre de 8 à 10°C en période nocturne (Lemonsu and Masson 2002). De telles différences de températures ont notamment été observées lors de la canicule 2003 (Figure 8). On s'attend donc à ce que l'effet additionnel de l'îlot de chaleur accentue le stress thermique déjà ressenti par les habitants lors d'épisodes de vagues de chaleur, ce qui peut être particulièrement néfaste la nuit lorsque l'organisme est en période de récupération.

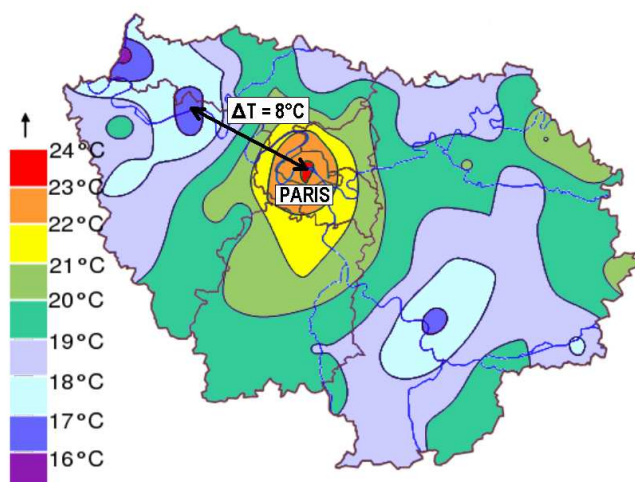


Figure 8 – Températures minimales moyennes observées sur la région Île-de-France durant la canicule 2003.

Ce rapport se concentre sur le premier volet du projet EPICEA (Desplat et al. 2009). Des simulations numériques de plusieurs dizaines d'années en continu ont été réalisées sur la région parisienne. Elles utilisent un système de modélisation des surfaces continentales qui intègre un modèle urbain spécifique permettant de simuler le climat urbain à l'échelle de la ville et des quartiers. Le système est forcé par des conditions météorologiques basées sur des

réanalyses en climat présent (1971-2006) et des projections climatiques (2072-2098) fournies par des MGCs. Cette étude vise à quantifier l'impact du changement climatique sur le climat de Paris, principalement les températures de l'air dans la ville (ressenties par les habitants) et les alentours.

2 Système de modélisation des surfaces continentales

2.1 Description du système SURFEX

Afin de pouvoir modéliser le climat urbain sur de longues périodes de temps (plusieurs dizaines d'années en continu), et compte tenu des contraintes numériques de temps de calcul, les simulations sont ici réalisées avec le système de modélisation des surfaces continentales SURFEX (Salgado and Le Moigne 2010) utilisé en mode forcé. Le principe des simulations en mode forcé est de fournir à SURFEX les conditions atmosphériques (rayonnement, précipitation, température, humidité, vent...) à un niveau d'altitude donné sans activer de modèle météorologique complet qui a l'avantage de représenter de façon réaliste l'ensemble des processus de l'atmosphère mais qui est très coûteux en temps de calcul (Figure 9).

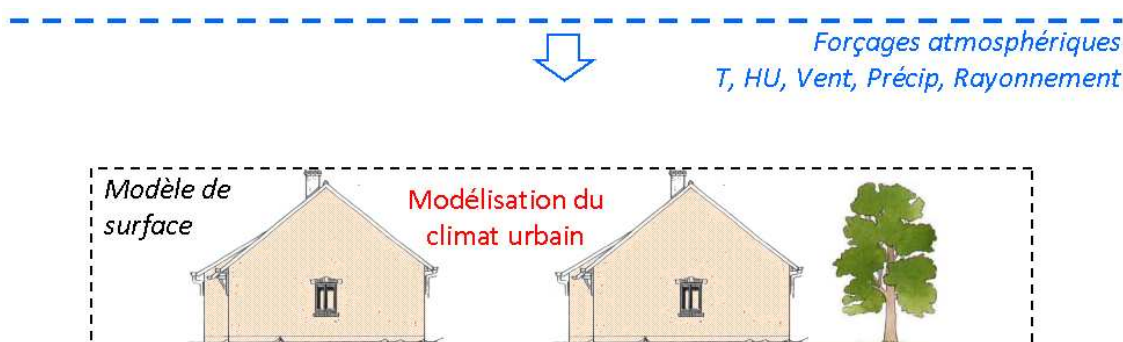


Figure 9 - Schématisation du système de modélisation SURFEX utilisé en mode forcé sur un quartier résidentiel et intégrant la représentation des villes et de la végétation.

SURFEX est un système de modélisation des surfaces continentales qui a été développé à Météo-France. Il est dit externalisé, i.e. qu'il peut tourner dans cette configuration forcée, indépendamment du modèle météorologique. Il décrit la surface comme une mosaïque composée de 4 principaux types de couverts :

- (1) les mers et océans,
- (2) les lacs et rivières,
- (3) les sols naturels et la végétation,
- (4) les villes (surfaces minéralisées).

A chaque point de grille du domaine de simulation sont associées des fractions de couverture spatiale pour chacun de ces types. Comme les mécanismes physiques qui régissent le fonctionnement de ces types de couverts sont différents (par ex, un lac ne se comporte pas comme une forêt), chaque type possède sa propre paramétrisation de surface pour calculer les échanges hydriques, énergétiques et turbulents entre le couvert considéré et l'atmosphère. En particulier, le modèle Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA, Noilhan and Planton 1989) est appliqué aux couverts naturels, et le modèle de canopée urbaine Town Energy Balance (TEB, Masson 2000) est appliqué aux surfaces minéralisées (Figure 9). Une fois les

échanges calculés indépendamment pour chaque type de surface, ils sont agrégés à l'échelle de la maille du domaine en fonction des fractions de couverture associées.

2.2 Application à l'agglomération parisienne

Pour notre cas d'étude, le système est appliqué sur un domaine spatial de 48 km x 48 km avec une résolution horizontale de 1 km (Figure 10a). Le domaine est centré sur Paris et couvre une région qui va bien au-delà des zones urbanisées de l'agglomération parisienne afin d'étudier également ce qui se passe dans la campagne et les zones cultivées environnantes.

Les types d'occupation des sols de la zone d'étude sont caractérisés par la classification CORINE Land Cover (Heymann et al. 1993) disponible à 1 km de résolution. 19 classes d'occupation des sols sont présentes dans le domaine (Figure 10b) dont 9 classes pour les couverts urbains. Parmi ces 9 classes, 3 sont prépondérantes : la classe « urbain dense » qui caractérise Paris *Intra Muros* et la classe « résidentiel » qui décrit les zones pavillonnaires et périurbaines autour de Paris. Les principaux types de couverts naturels sont composés de cultures et de forêts. La base de données ECOCLIMAP (Masson et al. 2003) fournit les tables de correspondance définissant les paramètres descriptifs associés à chacune des classes d'occupation des sols de CORINE Land Cover. Ces paramètres sont utilisés pour initialiser les modèles numériques. En outre, une analyse plus détaillée des caractéristiques urbaines de Paris *Intra Muros* a été réalisée dans le cadre de la thèse de Morgane Colombert (2008) et a permis de définir de façon plus proche des caractéristiques réelles de Paris la classe « urbain dense » (Table 1).

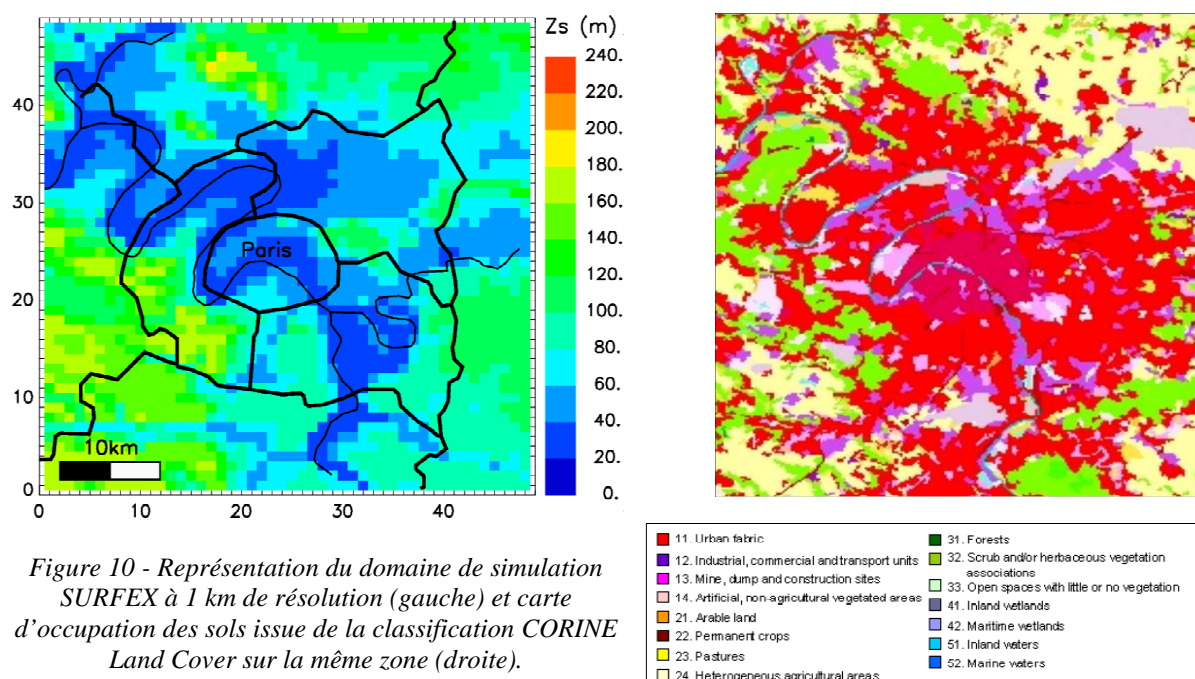


Figure 10 - Représentation du domaine de simulation SURFEX à 1 km de résolution (gauche) et carte d'occupation des sols issue de la classification CORINE Land Cover sur la même zone (droite).

Pour les simulations en mode forcé, un jeu de forçages atmosphériques doit être fourni à SURFEX, incluant le rayonnement incident courtes et grandes longueurs d'onde, la pression atmosphérique, les précipitations liquides et solides, de même que la température et l'humidité de l'air et la vitesse du vent à un niveau d'altitude prescrit par l'utilisateur. Ici, les forçages atmosphériques sont construits pour deux périodes d'étude, en climats présent et futur, à partir de réanalyses et à partir de scénarios climatiques auxquels a été appliquée une méthode de descente d'échelle et de correction (Section 3.2.2).

Table 1 - Caractérisation des paramètres descriptifs de la classe « urbain dense » issue de CORINE Land Cover, à partir d'une analyse spécifique de Paris Intra Muros (d'après Colombert 2008).

Paramètre	Unité	Paris Intra Muros
Occupation des sols		
Fraction de surfaces minérales	-	0.80
Fraction de couverts naturels	-	0.17
Fraction d'eau	-	0.03
Paramètres géométriques		
Fraction de bâtiments	-	0.5
Densité de murs	-	2.0
Hauteur moyenne des bâtiments	m	30.
Propriétés des matériaux des toits (3 couches : Zinc + Bois + Isolant)		
Albédo	-	0.60
Emissivité	-	0.10
Capacité thermique	$J m^{-3} K^{-1}$	2.74/1.12/0.10 E+6
Conductivité thermique	$W m^{-1} K^{-1}$	110./0.18/0.04
Epaisseur des couches de matériaux	m	0.0007/0.02/0.10
Propriétés des matériaux des routes (3 couches : Béton bitumineux + Béton bitumineux + Sol sec)		
Albédo	-	0.10
Emissivité	-	0.94
Capacité thermique	$J m^{-3} K^{-1}$	2.00/2.00/1.28 E+6
Conductivité thermique	$W m^{-1} K^{-1}$	2.00/1.35/0.25
Epaisseur des couches de matériaux	m	0.16/0.25/1.00
Propriétés des matériaux des murs (3 couches : Béton + Béton + Béton)		
Albédo	-	0.40
Emissivité	-	0.90
Capacité thermique	$J m^{-3} K^{-1}$	2.00/2.00/2.00 E+6
Conductivité thermique	$W m^{-1} K^{-1}$	1.35/1.35/1.35
Epaisseur des couches de matériaux	m	0.02/0.20/0.05
Rejets liés aux activités anthropiques		
Flux de chaleur lié au trafic	$W m^{-2}$	73
Flux d'humidité lié au trafic	$W m^{-2}$	3
Flux de chaleur lié aux industries	$W m^{-2}$	0
Flux d'humidité lié aux industries	$W m^{-2}$	0

3 Forçages climatiques

3.1 Jeu de données historique de référence

Une base de données atmosphériques historique de référence est disponible sur la France entière pour la période 1958-2008, avec une résolution spatiale de 8 km (grille régulière, cf. Figure 11) et un pas de temps horaire. Ces réanalyses ont été produites avec le système SAFRAN (Durand et al. 1993, 1999) en combinant des archives de réanalyses globales issues du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) et l'ensemble des observations des stations de surface disponibles dans la base de données climatiques de Météo-France. Ce système est aujourd'hui exploité de façon opérationnelle à Météo-France et utilisé pour diverses applications (Quintana-Seguí et al. 2008, Vidal et al. 2009). En particulier, il permet d'appliquer des techniques de correction et de descente d'échelle spatiale sur des projections climatiques qui seront détaillées plus loin.

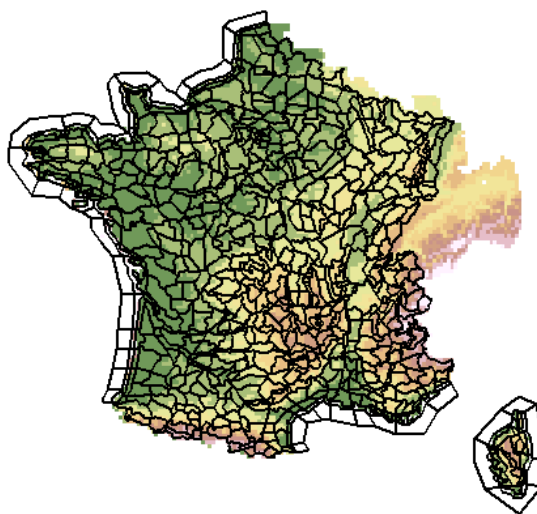


Figure 11 - Représentation de la grille SAFRAN couvrant la France (carte de topographie) à laquelle sont superposées les zones climatiques homogènes.

3.2 Scénarios climatiques

3.2.1 Présentation du modèle de climat et des scénarios

Dans le cadre de cette étude, nous avons pu obtenir les scénarios climatiques issus du projet de recherche RexHySS (Ducharne et al. 2009). Les projections climatiques ont été produites à partir du modèle global de climat de Météo-France ARPEGE-Climat à résolution variable (Gibelin and Déqué 2003), i.e. avec un maillage horizontal plus fin sur la zone d'intérêt couvrant l'Europe de l'ouest (environ 50 km de résolution spatiale sur la France).

Le modèle de climat a tourné selon deux scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre, A1B et A2, proposés par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans le cadre du rapport spécial sur les scénarios d'émission (IPCC 2000) :

- Le scénario A1B décrit une évolution du monde caractérisée par une croissance économique très rapide, une population mondiale qui augmente jusqu'à la moitié du 21^{ème} siècle puis décline, et une introduction rapide de technologies nouvelles plus efficaces associées à un bon équilibre entre sources d'énergie fossiles et non fossiles.

- Le scénario A2, plus pessimiste, décrit quant à lui une évolution vers un monde très hétérogène favorisant l'autosuffisance et la préservation des identités locales, associée à une augmentation continue de la population mondiale.

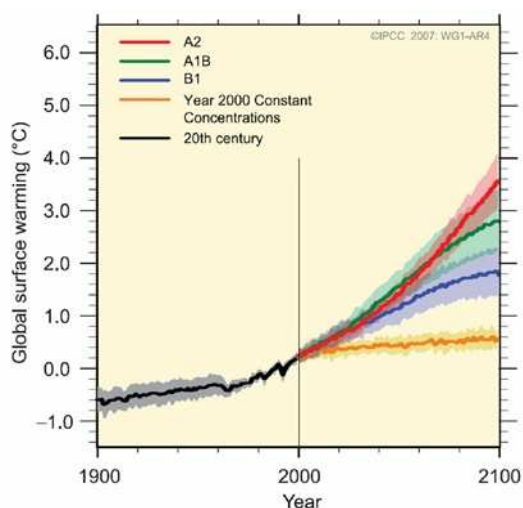


Figure 12 - Projection des tendances de réchauffement global sous différents scénarios d'émission de GES.

Ces scénarios d'émission ont un impact direct sur l'évolution de la température en surface à l'échelle globale et les tendances de réchauffement global. Le scénario A1B est associé à une augmentation très rapide des température dès le début du 21^{ème} siècle (Figure 12), puis un fléchissement vers 2070 qui correspond à une diminution des émissions en réponse au déclin de la population mondiale et à l'amélioration des technologies. Selon le scénario A2, le réchauffement global est moins fort que pour A1B au cours de la première moitié du siècle, mais s'accélère pour atteindre des tendances très élevées en 2100.

3.2.2 Méthodes de descente d'échelle

Notre étude visant à analyser l'évolution du climat de Paris à l'horizon de la fin du 21^{ème} siècle fait partie de ce qu'on appelle les *études d'impacts*. Il s'agit d'étudier l'effet du changement climatique sur un système donné en s'appuyant sur un modèle d'impact qui simule finement le fonctionnement du système en réponse à un forçage météorologique (rayonnement, précipitation, température, humidité, vent...). Dans notre cas, le système étudié est la ville de Paris, et le modèle d'impact utilisé est le modèle de ville TEB qui permet de simuler le climat urbain à des échelles hectométriques à kilométriques.

Pour réaliser une étude d'impacts, il est nécessaire de disposer de projections caractérisant l'évolution, sous l'effet du changement climatique global, des conditions météorologiques qui s'appliquent au système. Ces conditions météorologiques doivent être disponibles aux échelles spatiales et temporelles compatibles avec le modèle d'impact.

Le climat peut varier à des échelles spatiales très locales, en fonction notamment des caractéristiques physiographiques, à savoir l'usage des sols, la topographie, les contrastes terre-mer... Un modèle d'impact tel que le modèle de ville TEB simule des processus de fine échelle qui peuvent être particulièrement sensibles à cette variabilité locale du climat. Or les modèles globaux ou régionaux de climat ont des résolutions spatiales beaucoup trop basses (25-250 km) pour représenter cette variabilité, et ne peuvent donc pas être appliqués directement comme forçages. Pour palier ce problème, on passe par une étape intermédiaire

dite de *descente d'échelle* permettant de générer des forçages météorologiques à partir des sorties de modèles de climat à des résolutions spatiales et temporelles adéquates.

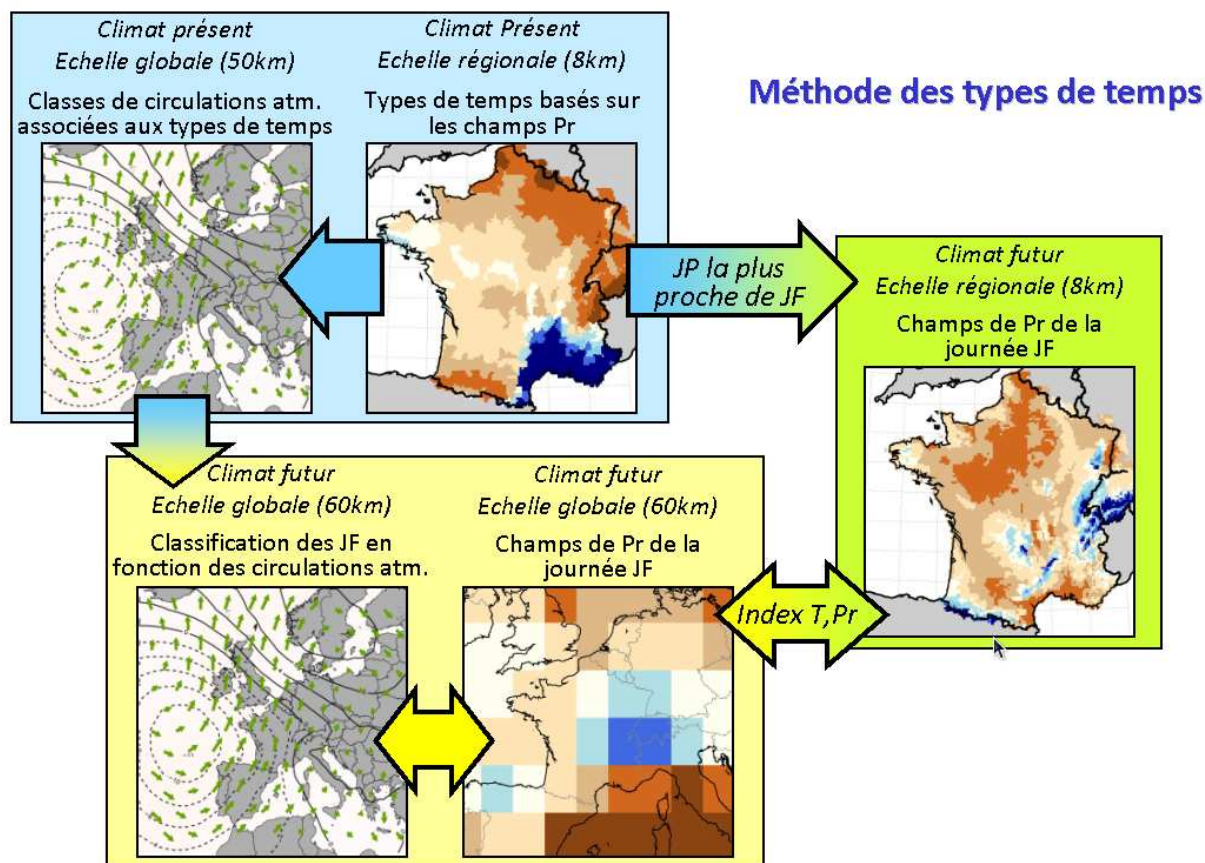


Figure 13 - Schématisation des différentes étapes de la méthode de descente d'échelle statistique par type de temps (d'après Boé et al. 2006).

Deux techniques différentes de descente d'échelle ont été appliquées dans le cadre du projet RExHySS. La première est une méthode de descente d'échelle statistique multivariée basée sur les types de temps développée par Boé et al. (2006) et décrite en Figure 13. A partir de l'analyse des champs de cumuls journaliers de précipitation sur la France issus des réanalyses SAFRAN à 8 km de résolution horizontale, toutes les journées du climat présent sont classées selon différents types de temps. Ces types de temps sont supposés discriminants pour les précipitations en France, sachant que le projet RExHySS s'intéresse aux ressources en eau et aux extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. A chaque type de temps est associé un champ de pression au niveau de la mer fournit par les réanalyses du CEPMMT (à une résolution équivalente à celle du modèle de climat), qui traduit la circulation atmosphérique de grande échelle caractéristique du type de temps observé localement. Pour chaque journée du climat futur, connaissant le champ de pression au niveau de la mer modélisé par le modèle ARPEGE-Climat, on détermine le régime de temps associé et on sélectionne de façon aléatoire une journée analogue en climat présent correspondant à ce régime de temps. Une anomalie de température (température à 2 mètres au dessus du sol,

moyennée sur la France) est ajoutée au champ de température afin de traduire la tendance du réchauffement global.

La deuxième approche associe une descente d'échelle dynamique à une méthode de correction dite quantile-quantile (qq) (Déqué 2007) afin de réduire les erreurs systématiques du modèle de climat (Figure 14). Les variables simulées sont ajustées selon une fonction de correction calculée à partir du tracé des quantiles de températures modélisées vs les quantiles de températures observées, sur la même période de temps en climat actuel. En supposant la stationnarité des erreurs du modèle avec le temps, les mêmes fonctions de correction sont appliquées pour ajuster les résultats des MCG dans le climat futur. L'utilisation des réanalyses SAFRAN comme données de référence pour déterminer les fonctions de correction en chaque point de la grille SAFRAN permet par la même occasion de réaliser une descente d'échelle spatiale depuis les projections d'ARPEGE-Climat à 50 km sur la grille SAFRAN à 8 km de résolution.

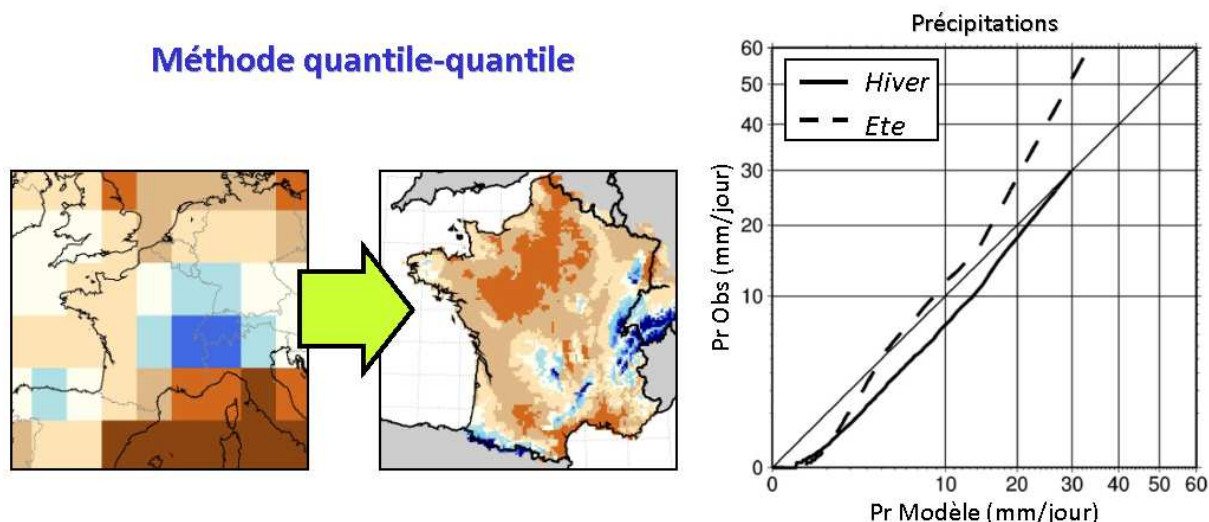


Figure 14 - Schématisation de la méthode de descente d'échelle associée à une correction quantile-quantile sur le domaine SAFRAN. A droite, exemple de tracé quantile-quantile pour les cumuls journaliers de précipitation sur la France en été et en hiver (d'après Déqué 2007)

3.2.3 Adaptation à la problématique urbaine

Afin d'appliquer les forçages atmosphériques décrits précédemment à l'étude du climat urbain de la région parisienne, deux adaptations principales sont apportées, d'une part sur la hauteur des forçages, et d'autre part sur la résolution horizontale.

(i) Hauteur des forçages

Les champs de forçage sont initialement disponibles à 2 m au-dessus du niveau du sol pour la température et l'humidité de l'air, et 10 m pour le vent (car ils sont reconstitués à partir des

observations collectées par les stations météorologiques opérationnelles de Météo-France). Cette hauteur de forçage n'est pas adaptée au milieu urbain puisque dans le centre-ville de Paris, la hauteur moyenne des bâtiments est de 30 m environ (Colombert 2008). Il est donc nécessaire de construire, pour notre étude, un nouveau jeu de forçages correspondant à un niveau d'altitude plus élevé. On choisit typiquement 2 fois la hauteur de bâtiments, à savoir 60 m au-dessus du sol, afin que les forçages soient définis au-dessus de la sous-couche rugueuse et qu'ils soient ainsi moins influencés par la surface.

Afin de « remonter » les forçages de température, d'humidité et de vent au niveau souhaité, nous appliquons une méthode simple de correction par itérations successives, basée sur des simulations réalisées avec le système SURFEX à la même résolution horizontale de 8 km que les réanalyses SAFRAN.

Pour l'explication de la méthodologie, on utilise par la suite les notations suivantes :

- V_{Frc} la variable de forçage fournie à SURFEX et appliquée à 60 m au-dessus du sol
- V_{Obs} la variable fournie par SAFRAN près de la surface (2 m pour la température et l'humidité et 10 m pour le vent), que l'on considère être la « vérité »
- V_{Mod} la variable simulée près de la surface par SURFEX (2 m pour la température et l'humidité et 10 m pour le vent)
- V_{Err} l'erreur du modèle, i.e., la différence entre la variable modélisée et observée

Ainsi, la première itération est effectuée en appliquant directement le forçage issu de SAFRAN à 60 m au-dessus du sol. Par conséquent, dans ce cas :

$$V_{\text{Frc}}(1) = V_{\text{Obs}}$$

On en déduit l'erreur du modèle en tout point de grille du domaine de simulation :

$$V_{\text{Err}}(1) = V_{\text{Sfx}}(1) - V_{\text{Obs}}$$

Notons que les résultats du modèle V_{Sfx} ne prennent en compte que les fractions de maille avec de la végétation (modélisée par ISBA) sans tenir compte de l'effet urbain, afin d'éviter une surestimation des biais provenant de la comparaison avec les réanalyses SAFRAN qui sont principalement basées sur les stations météorologiques situées en milieu rural.

En supposant que les erreurs sont constantes sur toute la couche d'atmosphère entre la surface et 60 m, on corrige le forçage $V_{\text{Frc}}(1)$ appliqué à la première itération en fonction de l'erreur $V_{\text{Err}}(1)$ calculée en surface :

$$V_{\text{Frc}}(2) = V_{\text{Frc}}(1) - V_{\text{Err}}(1)$$

Ce forçage est appliqué pour une deuxième itération, et ainsi de suite jusqu'à obtenir une erreur tendant vers 0. Cette méthode de correction est appliquée sur la base de trois itérations car on constate qu'au delà, l'erreur du modèle devient très faible et les améliorations apportées par des itérations supplémentaires sont négligeables (non représenté).

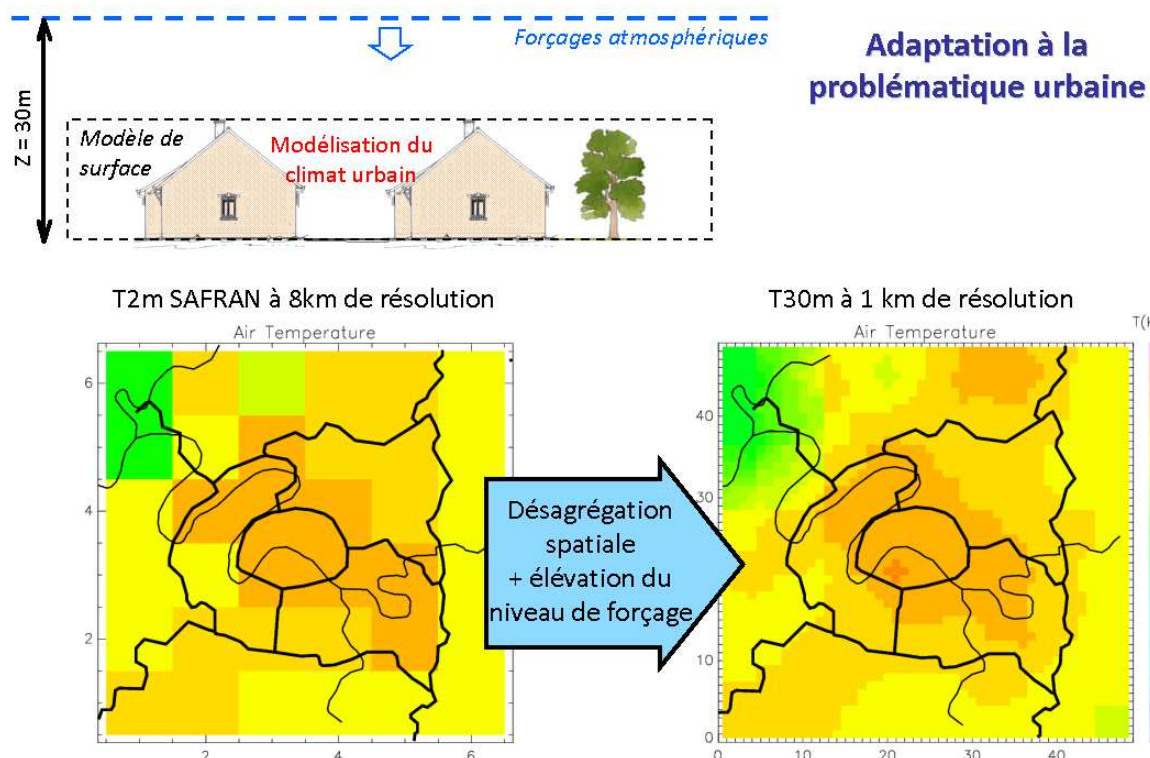


Figure 15 - Exemple d'adaptation d'un champ de forçage de température de l'air à 2 m issus de SAFRAN sur le domaine de simulation : (1) élévation du niveau de forçage de 2 m à 60 m au-dessus du sol, et (2) désagrégation spatiale de 8 km à 1 km de résolution.

(ii) Résolution horizontale

La deuxième adaptation consiste à augmenter la résolution spatiale des forçages. En effet, les simulations finales SURFEX sont effectuées à une plus haute résolution (1 km) que celle des réanalyses SAFRAN et des scénarios climatiques, dans le but de décrire l'agglomération avec suffisamment de précision et notamment de pouvoir distinguer les différents paysages urbains qui sont définis dans le domaine par la classification CORINE Land Cover (Figure 10b). Ainsi, les forçages atmosphériques à 8 km sont simplement re-projetés sur la grille de 1 km en appliquant une interpolation bilinéaire (Figure 15).

4 Evaluation du modèle en climat présent

Les simulations SURFEX sont conduites à partir des forçages atmosphériques construits à 60 m au-dessus du sol et désagrégés à 1 km de résolution horizontale. Elles sont réalisées en continu pour la période de contrôle en climat présent, du 1^{er} août 1970 au 30 juillet 2007. Les champs de sortie à 1 km de résolution sont les minima, maxima et moyennes journalières de la température de l'air à 2 m, notés $T2m_{MIN}$, $T2m_{MAX}$, $T2m_{AVG}$, respectivement ; ils sont calculés indépendamment par type de couverts - en sortie de TEB pour les surfaces minéralisées et en sortie de ISBA pour les couverts naturels - et agrégés à l'échelle de la maille. Les températures instantanées sont également stockées au pas de temps de 6 heures.

Les températures à 2 m simulées par SURFEX (ISBA) pour la fraction de maille couverte de végétation sont comparées aux réanalyses SAFRAN selon un tracé quantile-quantile (Figure 16). La comparaison est faite pour la période de contrôle et pour tout le domaine de simulation en agrégeant les sorties de SURFEX à la même résolution que les réanalyses SAFRAN, et ce pour les deux méthodes de descente d'échelle.

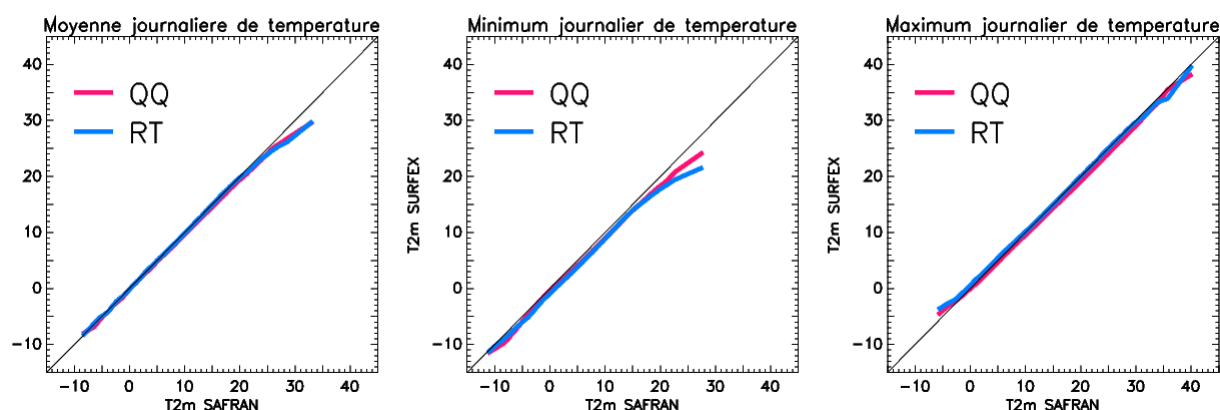


Figure 16 - Tracés quantile-quantile des sorties du modèle par rapport aux observations pour les moyennes, minima et maxima journaliers de température de l'air à 2 m agrégés sur la grille SAFRAN à 8 km, pour la période de contrôle 1970-2007.

Le modèle se compare relativement bien aux observations pour $T2m_{MIN}$, $T2m_{MAX}$, $T2m_{AVG}$. Une surestimation est toutefois observée sur les extrêmes chauds pour les moyennes et les minima journaliers ; ces derniers sont plus fortement surestimés par les simulations réalisées à partir des forçages issus de la méthode de descente d'échelle basée sur les régimes de temps. Les extrêmes froids sont quant à eux bien simulés.

5 Evolution de la température sur la région parisienne

5.1 Analyse par classe d'urbanisation

Pour faciliter l'analyse des résultats et évaluer l'impact de l'urbanisation sur les tendances de températures, les valeurs journalières minimales, maximales et moyennes des températures de l'air à 2 m sont moyennées spatialement selon trois grandes classes de couverts correspondant à des degrés différents d'urbanisation : la classe *Urbaine* essentiellement composée de surfaces minéralisées, la classe *Périurbaine* caractérisée par un environnement résidentiel qui inclut des surfaces minéralisées et des couverts naturels en proportions comparables, et la classe *Rurale* uniquement composée de couverts naturels. Ces grandes classes sont simplement identifiées à l'aide des principales classes CORINE Land Cover du domaine (Figure 10b). Notons que les points de grille pour lesquels l'occupation du sol se traduit par un mélange de ces grandes classes ne sont pas pris en compte pour le moyennage spatial (Figure 17).

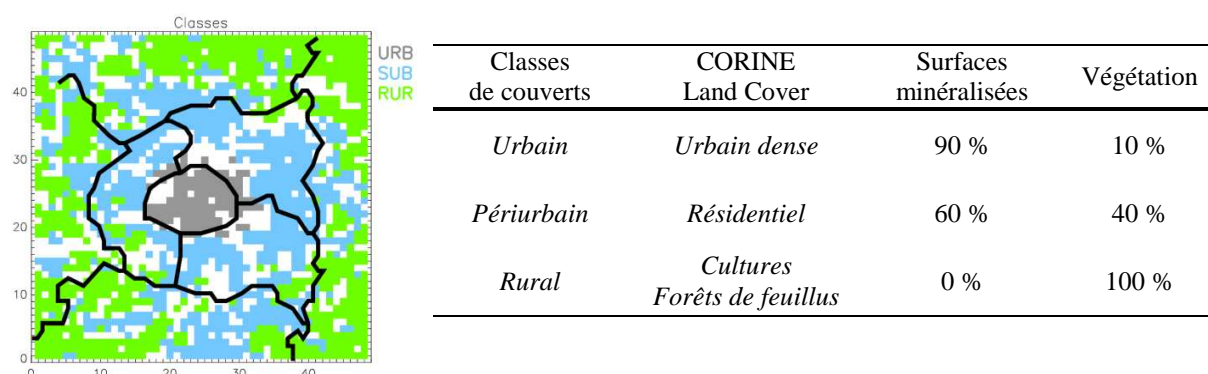


Figure 17 - Représentation spatiale (gauche) et description des 3 classes d'urbanisation définies à partir de CORINE Land Cover (droite). Les zones blanches sur la carte de gauche représentent les points de grille où les classes d'urbanisation sont mélangées.

5.2 Tendances générales

La Figure 18 présente l'évolution temporelle de la moyenne annuelle des minima et maxima journaliers de température à 2 m dans les zones urbaines, périurbaines et rurales, et ce pour le climat actuel (simulation de contrôle) et le climat futur en fonction des deux scénarios A1B et A2. Les résultats sont également résumés dans la Table 2 selon des moyennes temporelles sur différentes périodes de temps : en climat présent, sur la période complète (1971-2006), et des sous-périodes de 15 ans (1971-1985, 1982-1996, 1992-2006), ainsi qu'en climat futur sur la période complète (2072-2098), et des sous-périodes de 15 ans (2072-2086, 2084-2098). Notons que pour la période correspondant au climat présent, les années 1970 et 2007 ne sont

pas prises en compte car elles sont incomplètes (cf Section 4). Il en est de même pour les années 2071 et 2099 pour la période future.

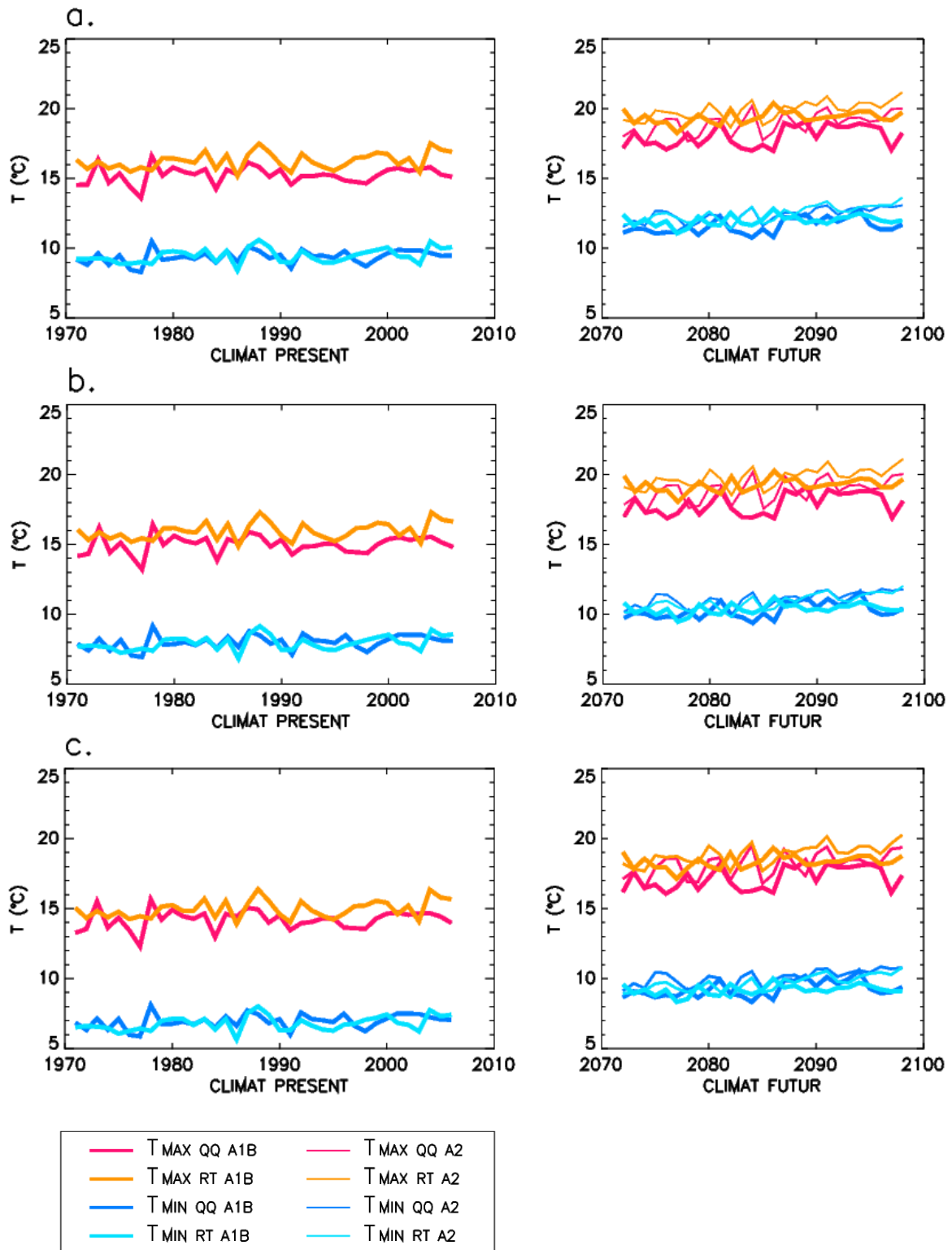


Figure 18 - Evolution des moyennes annuelles de minima et maxima journaliers de température de l'air à 2 m simulées en zones (a) urbaines, (b) périurbaines et (c) rurales en climats présent (gauche) et futur (droite) selon les 2 méthodes de descente d'échelle et les 2 scénarios A1B et A2.

La comparaison par classe de couverts indique que la température de l'air dans les zones urbaines est systématiquement plus chaude que dans les zones périurbaines et rurales en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU). Comme on peut s'y attendre, cette différence est plus importante pour $T_{2m_{MIN}}$, i.e. en période nocturne lorsque l'ICU est le plus intense. En moyenne sur la période actuelle, l'ICU atteint $2.55^{\circ}C$ pendant la nuit contre $1.17^{\circ}C$ seulement en journée. Les projections climatiques indiquent une légère diminution des intensités des ICU diurnes dans le futur d'environ $-0.25^{\circ}C$, alors que les ICU nocturnes n'évoluent pas en moyenne annuelle. Les ICU saisonniers seront analysés plus en détail en Section 5.5.

Conformément à la tendance de réchauffement global, les températures simulées dans le climat futur sont significativement plus élevées que dans le climat actuel, plus particulièrement pour le scénario le plus pessimiste (A2) associé à des émissions de gaz à effet de serre plus fortes. Pour les deux scénarios, l'augmentation des températures est sensiblement plus forte dans les zones rurales que dans les zones périurbaines et urbaines pour $T_{2m_{MAX}}$ (Table 2). La plus forte augmentation de température est obtenue avec le scénario A2 ; elle atteint $+3.92^{\circ}C$ à la campagne contre $+3.64^{\circ}C$ à Paris. Ces tendances sont principalement influencées par les conditions estivales qui seront discutées plus en détail dans la Section 5.4. Pour $T_{2m_{MIN}}$, les tendances au réchauffement sont tout à fait comparables quelque soit le type d'environnement, de l'ordre de $+2.35^{\circ}C$ et $+3.00^{\circ}C$, respectivement selon les scénarios A1B et A2.

Table 2 - Statistiques sur les valeurs moyennes annuelles des minima et maxima journaliers de températures de l'air à 2 m (en °C) calculées pour les différentes zones et les différentes périodes de temps.

		Urbain		Périurbain		Rural		
		T_{MIN}	T_{MAX}	T_{MIN}	T_{MAX}	T_{MIN}	T_{MAX}	
Présent	(1971-2006)	9.43	15.76	7.98	15.47	6.88	14.59	
	(1971-1985)	9.29	15.63	7.83	15.35	6.72	14.46	
	(1982-1996)	9.45	15.75	8.00	15.46	6.90	14.57	
	(1992-2006)	9.55	15.85	8.11	15.56	7.02	14.67	
Futur	A1B	(2072-2098)	11.79	18.70	10.33	18.58	9.22	17.76
		(2072-2086)	11.59	18.43	10.12	18.29	9.00	17.47
		(2084-2098)	11.95	18.91	10.50	18.81	9.40	18.00
	A2	(2072-2098)	12.43	19.40	10.99	19.31	9.88	18.51
		(2072-2086)	12.09	19.03	10.63	18.93	9.53	18.12
		(2084-2098)	12.74	19.73	11.30	19.65	10.19	18.85
Futur - Présent	A1B	+2.36	+2.94	+2.35	+3.11	+2.34	+3.17	
	A2	+3.00	+3.64	+3.01	+3.84	+3.00	+3.92	

Enfin, une tendance intrinsèque d'augmentation de température peut être notée au cours des périodes actuelle et future. Les tendances au réchauffement de l'ordre de $+0.16$ et $+0.14^{\circ}C$ par décennie sont évaluées sur le climat actuel pour $T_{2m_{MIN}}$ et $T_{2m_{MAX}}$, respectivement. Ces tendances s'intensifient dans le futur, plus particulièrement pour la température maximale ;

elles atteignent ainsi en moyenne +0.24 et +0.32°C / décennie pour T2m_{MIN} et T2m_{MAX}, respectivement, selon le scénario A1B, et +0.50 et +0.56°C / décennie selon le scénario A2. En outre, l'analyse par sous-périodes de 15 ans indique une accélération du réchauffement après 2085 (Table 2).

5.3 Températures hivernales

Les résultats obtenus pour les températures hivernales sont résumés dans la Table 3 et les évolutions temporelles sont présentées en Figure 19. Une augmentation systématique de la température de l'air entre les climats actuel et futur est observée, plus importante pour T2m_{MAX} que pour T2m_{MIN} (en moyenne +2.50 vs +2.34°C). La comparaison des températures pour les trois classes de couverts indique que les tendances augmentent légèrement lorsque le degré d'urbanisation diminue, et cela est plus particulièrement remarquable pour T2m_{MAX}.

Table 3 - Statistiques sur les valeurs moyennes hivernales des minima et maxima journaliers de températures de l'air à 2 m(en °C) calculées pour les différentes zones et les différentes périodes de temps.

		Urbain		Périurbain		Rural		
		T _{MIN}	T _{MAX}	T _{MIN}	T _{MAX}	T _{MIN}	T _{MAX}	
Présent	(1971-2006)	3.46	8.13	2.12	7.42	1.27	6.62	
	(1971-1985)	3.13	7.82	1.78	7.11	0.93	6.32	
	(1982-1996)	3.62	8.32	2.28	7.61	1.44	6.82	
	(1992-2006)	3.59	8.23	2.25	7.51	1.41	6.71	
Futur	A1B	(2072-2098)	5.54	10.36	4.22	9.72	3.39	8.94
		(2072-2086)	5.32	10.17	3.98	9.52	3.15	8.75
		(2084-2098)	5.77	10.61	4.48	9.97	3.66	9.19
	A2	(2072-2098)	6.02	10.81	4.71	10.16	3.87	9.37
		(2072-2086)	5.66	10.46	4.33	9.80	3.49	9.03
		(2084-2098)	6.29	11.07	5.01	10.42	4.16	9.61
Futur - Présent	A1B	+2.08	+2.23	+2.20	+2.30	+2.12	+2.32	
	A2	+2.56	+2.68	+2.59	+2.74	+2.60	+2.75	

L'impact du changement climatique peut aussi être évalué par des indicateurs normalisés qui sont aujourd'hui largement utilisés (Klein Tank et Können 2003, Alexander et al. 2006, Klein Tank et Zwiers 2009, Van den Besselaar et al. 2009). Les indicateurs climatiques pour les températures hivernales sont listés ci-contre.

Indice	Condition
Jours froids	T2m _{MIN} ≤ -5°C
Jours très froids	T2m _{MIN} ≤ -10°C
Jours de gel	T2m _{MIN} ≤ 0°C
Jours sans dégel	T2m _{MAX} ≤ 0°C

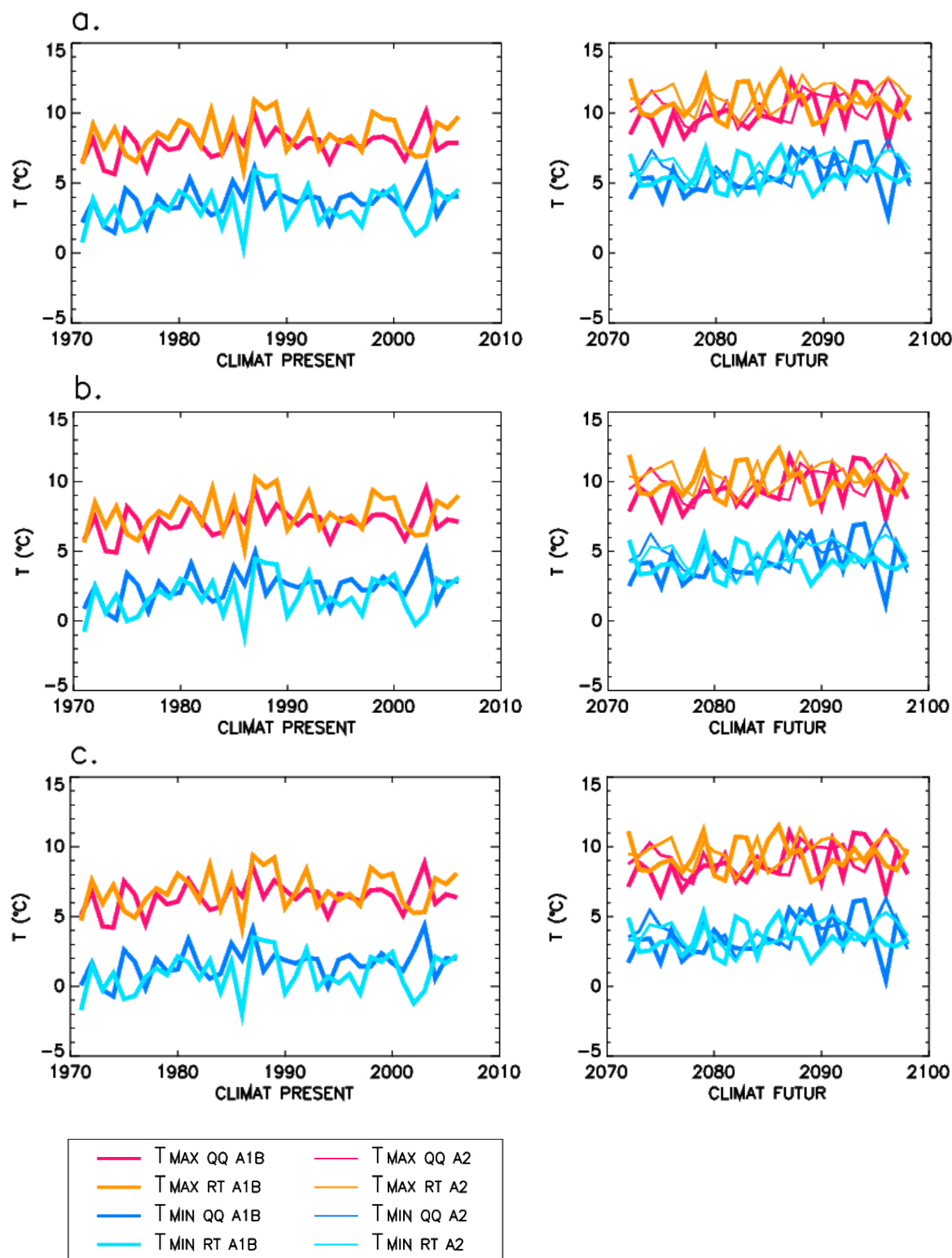


Figure 19 - Evolution des moyennes hivernales de minima et maxima journaliers de température de l'air à 2 m simulées en zones (a) urbaines, (b) périurbaines et (c) rurales en climats présent (gauche) et futur (droite) selon les 2 méthodes de descente d'échelle et les 2 scénarios A1B et A2.

Les valeurs de ces indices de froid – présentées en Table 4 et en Figure 20 - diminuent de manière significative dans le futur, conformément à la tendance générale présentée par Déqué (2007) qui constate que le nombre de jours de froid en France devient négligeable à la fin de ce siècle. Dans les zones rurales, on passe de plus de 5 jours froids par an, en moyenne, en climat présent à environ 1 jour par an dans le futur. De la même manière, le nombre de jours très froids qui est déjà très faible climat présent devient nul en climat futur. Le nombre de jours de gel reste important (environ 16-19 jours par an selon le scénario), mais diminue de 50-60% en comparaison avec le climat actuel. Enfin, le nombre de jours sans dégel diminue de 6 à environ 1 ou 2 jours par an selon le scénario.

Les distributions des nombres de jours obtenus pour chaque indice sont similaires selon le degré d'urbanisation : les indices froids sont plus importants dans les zones rurales que dans les zones urbaines et périurbaines en climats présent et futur. Les situations de jours froids simulées dans les zones urbaines deviennent extrêmement rares avec une période de retour d'au moins 10 ans. Il en est de même pour les jours de gel et sans dégel qui sont environ 3.7 et 5.8 fois moins nombreux en milieu urbain qu'en milieu rural, respectivement, dans le climat futur. Ces différences dans les indices calculés pour les zones urbaines et rurales sont également observés en climat présent mais ils sont plus marqués à la fin du 21^{ème} siècle. Cela nous informe d'une part sur l'occurrence d'hivers plus doux dans le futur avec moins d'extrêmes froids qu'en climat présent, et d'autre part sur la conservation des ICUs hivernaux dans les deux scénarios.

Table 4 - Nombre de jours froids, très froids, avec gel, sans dégel, en moyenne annuelle, par classes de couvert en climats présent et futur.

		Urbain		Périurbain		Rural	
		QQ	RT	QQ	RT	QQ	RT
<i>Jours froids : $T_{MAX} < -5^{\circ}C$</i>							
Présent		1.6	1.8	3.4	4.2	4.8	6.1
Futur	A1B	0.1	0.0	0.6	0.4	0.9	1.1
	A2	0.1	0.0	0.7	0.2	1.2	0.6
<i>Jours très froids : $T_{MAX} < -10^{\circ}C$</i>							
Présent		0.4	0.3	0.7	0.5	0.9	0.7
Futur	A1B	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
	A2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Jours avec gel : $T_{MIN} < 0^{\circ}C$</i>							
Présent		14.1	16.9	27.0	31.8	38.5	43.9
Futur	A1B	5.7	4.8	13.5	12.5	19.8	18.5
	A2	4.7	3.6	10.7	9.9	16.2	15.0
<i>Jours sans dégel : $T_{MAX} < 0^{\circ}C$</i>							
Présent		2.6	2.2	4.6	3.6	6.6	5.2
Futur	A1B	0.3	0.0	0.8	0.4	1.7	0.8
	A2	0.5	0.1	1.2	0.3	2.0	0.6

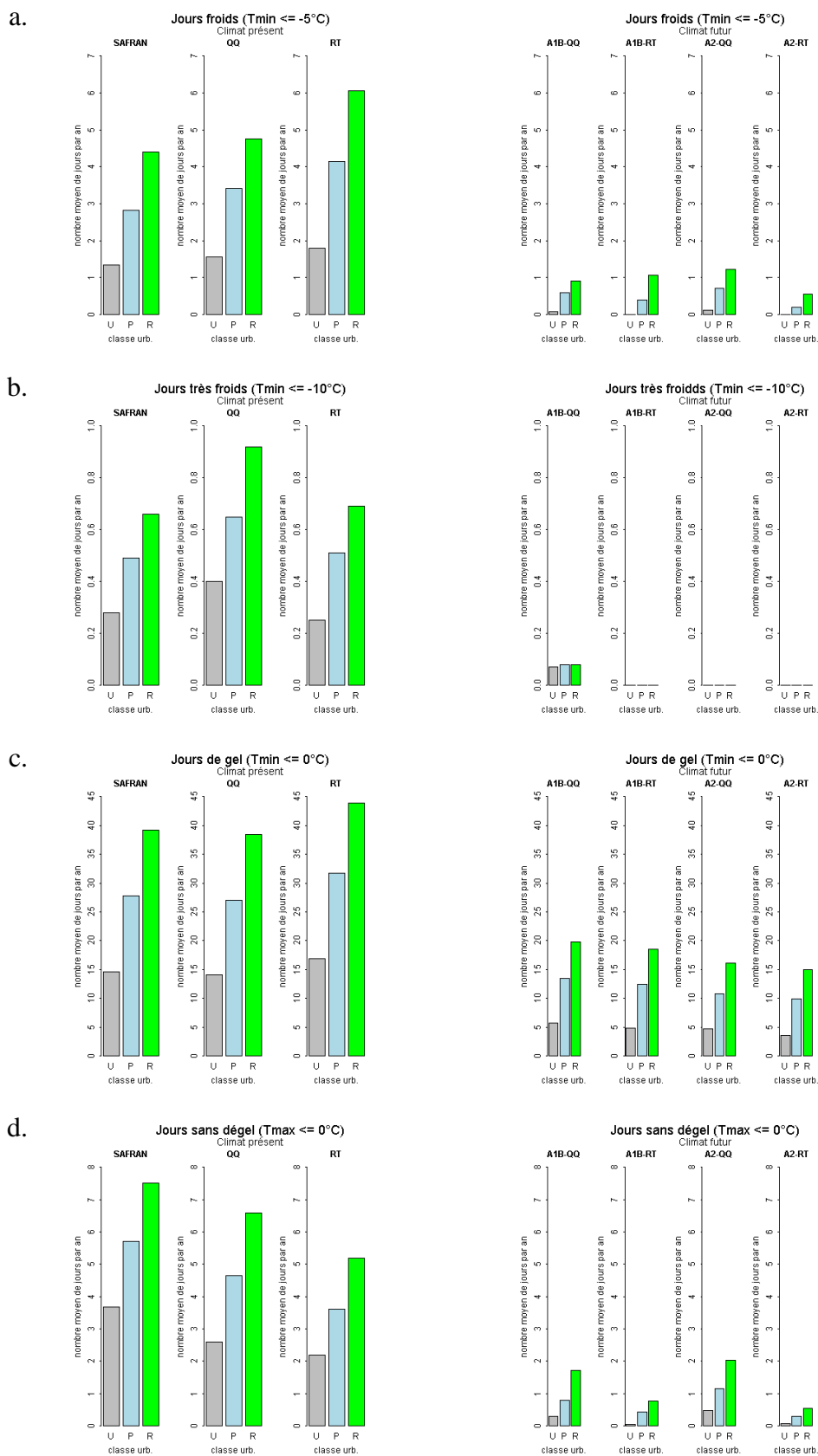


Figure 20 – Nombre de jours froids, très froids, de gel, et sans dégel, en moyenne annuelle, par classes de couvert en climats présent (gauche) et futur (droite) pour les 2 méthodes de descente d'échelle et les 2 scénarios.

Des indices supplémentaires concernant les mises en alerte de températures basses et extrêmement basses émis par Météo-France (vigilance froid / vigilance grand froid) sont déterminés. Leur calcul est basé sur des seuils inférieurs appliqués sur les indices minimum et maximum de refroidissement éolien :

Indice	Condition
<i>Jours avec mise en alerte de vigilance froid</i>	$WC_{MIN} \leq -10^{\circ}C \ \& \ WC_{MAX} \leq 0^{\circ}C$
<i>Jours avec mise en alerte de vigilance grand froid</i>	$WC_{MIN} \leq -18^{\circ}C \ \& \ WC_{MAX} \leq 0^{\circ}C$

Avec l'indice minimum (ou maximum) de refroidissement éolien (Wind Chill, WC) s'exprimant selon :

$$WC = 13.12 + 0.6215 T - 11.37 U^{0.16} + 0.3965 T U^{0.16}$$

T étant la température journalière minimale (ou maximale) à 2 m, et U la vitesse du vent à 10 m en $km \ h^{-1}$ (Osczevski and Bluestein 2005).

En climat présent, on dénombre très peu de cas d'alerte : en moyenne 1, 2 et 3 jours d'alerte correspondant à des situations de basses températures en zones urbaines, périurbaines et rurales, respectivement (résultats non présentés ici). En climat futur, ces cas d'alerte diminuent à moins de 1 jour par an quel que soit le type d'environnement et le scénario. Quant aux avertissements de températures extrêmement basses, ils ne dépassent pas 1 jour par an en climat présent pour tous les types de couverts, et disparaissent dans le futur.

5.4 Températures estivales

Les résultats obtenus pour les températures estivales sont résumés dans la Table 5 et les évolutions temporelles sont présentées en Figure 21. L'augmentation de la température de l'air est plus importante pendant l'été (Table 5) que pendant l'hiver. En moyenne, $T_{2m_{MIN}}$ et $T_{2m_{MAX}}$ augmentent respectivement de +3.2 et +5.0°C dans les zones rurales entre les climats présent et futur. La tendance est moins marquée dans les zones urbanisées, plus particulièrement durant la journée (+3.2 et +4.5°C pour la nuit et le jour, respectivement).

Table 5 - Statistiques sur les valeurs moyennes estivales des minima et maxima journaliers de températures de l'air à 2 m (en °C) calculées pour les différentes zones et les différentes périodes de temps.

		Urbain		Périurbain		Rural		
		T_{MIN}	T_{MAX}	T_{MIN}	T_{MAX}	T_{MIN}	T_{MAX}	
Présent	(1971-2006)	15.96	23.55	14.54	23.70	13.25	22.73	
	(1971-1985)	15.82	23.39	14.39	23.52	13.09	22.55	
	(1982-1996)	15.90	23.45	14.48	23.58	13.19	22.61	
	(1992-2006)	16.14	23.72	14.73	23.87	13.46	22.91	
Futur	A1B	(2072-2098)	18.77	27.50	17.34	27.93	16.06	27.16
		(2072-2086)	18.54	27.09	17.10	27.47	15.82	26.68
		(2084-2098)	18.92	27.78	17.50	28.23	16.23	27.48
	A2	(2072-2098)	19.55	28.50	18.14	28.97	16.88	28.23
		(2072-2086)	19.07	28.87	17.66	28.32	16.39	27.56
		(2084-2098)	20.11	29.13	18.70	29.63	17.43	28.92
Futur - Présent	A1B	+2.81	+3.95	+2.80	+4.23	+2.81	+4.43	
	A2	+3.59	+4.95	+3.60	+5.27	+3.63	+5.50	

La diminution des contenus en eau des sols naturels conduisant à un assèchement important pendant l'été explique les fortes températures de l'air simulées dans les zones rurales et périurbaines. Cet assèchement s'accompagne d'une forte augmentation de la température des sols et d'une diminution de l'évaporation, e.g., pour la méthode quantile-quantile, la température de surface simulée par ISBA augmente de +4.5°C (+5.8°C) et l'évaporation diminue de -28% (-37%) pour le scénario A1B (A2) (Figure 22).

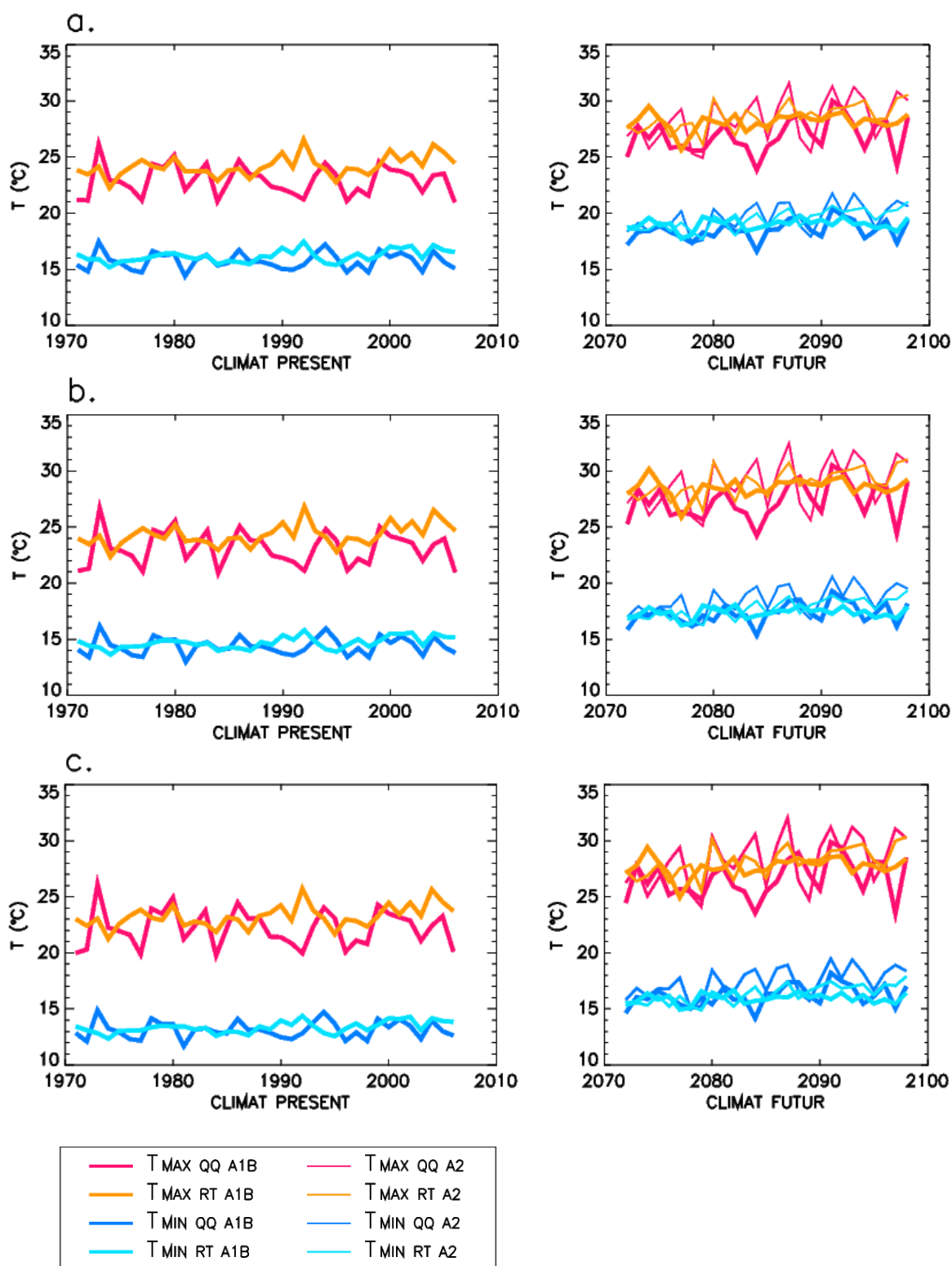


Figure 21 - Evolution des moyennes estivales de minima et maxima journaliers de température de l'air à 2 m simulées en zones (a) urbaines, (b) périurbaines et (c) rurales en climats présent (gauche) et futur (droite) selon les 2 méthodes de descente d'échelle et les 2 scénarios A1B et A2.

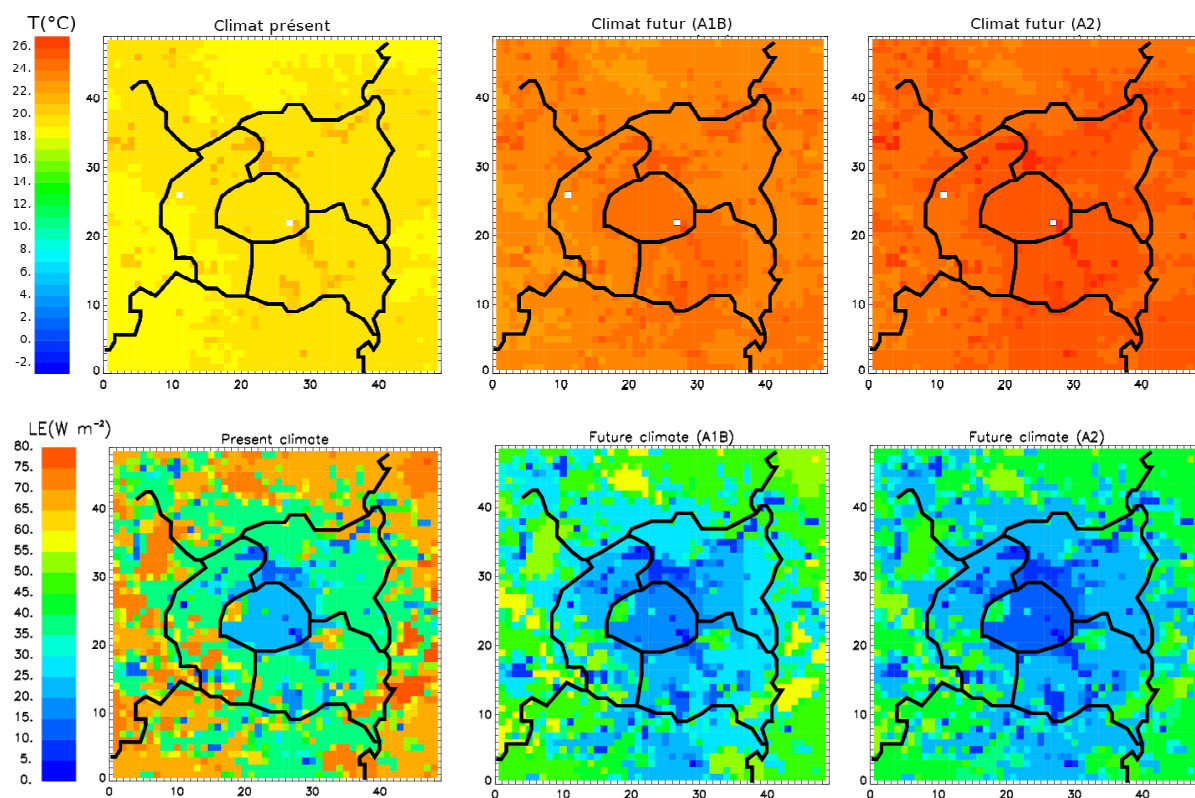


Figure 22 – En haut : champ de température de surface simulé par ISBA en climat présent (gauche) et en climat futur selon les scénarios A1B (centre) et A2 (droite). En bas : idem pour le champ de flux de chaleur latente simulé par TEB-ISBA (i.e. le flux de chaleur dû à l'évaporation de l'eau disponible en surface ou ans le sol).

Les indices climatiques de température pour les situations estivales sont les suivants :

Indice	Condition
<i>Jours chauds</i>	$T2m_{MAX} \geq 25^{\circ}C$
<i>Jours très chauds</i>	$T2m_{MAX} \geq 30^{\circ}C$
<i>Jours très très chauds</i>	$T2m_{MAX} \geq 35^{\circ}C$
<i>Nuits tropicales</i>	$T2m_{MIN} \geq 20^{\circ}C$
<i>Jours avec mise en alerte orange pour la canicule</i>	$IBMn \geq 21^{\circ}C$ & $IBMx \geq 31^{\circ}C$

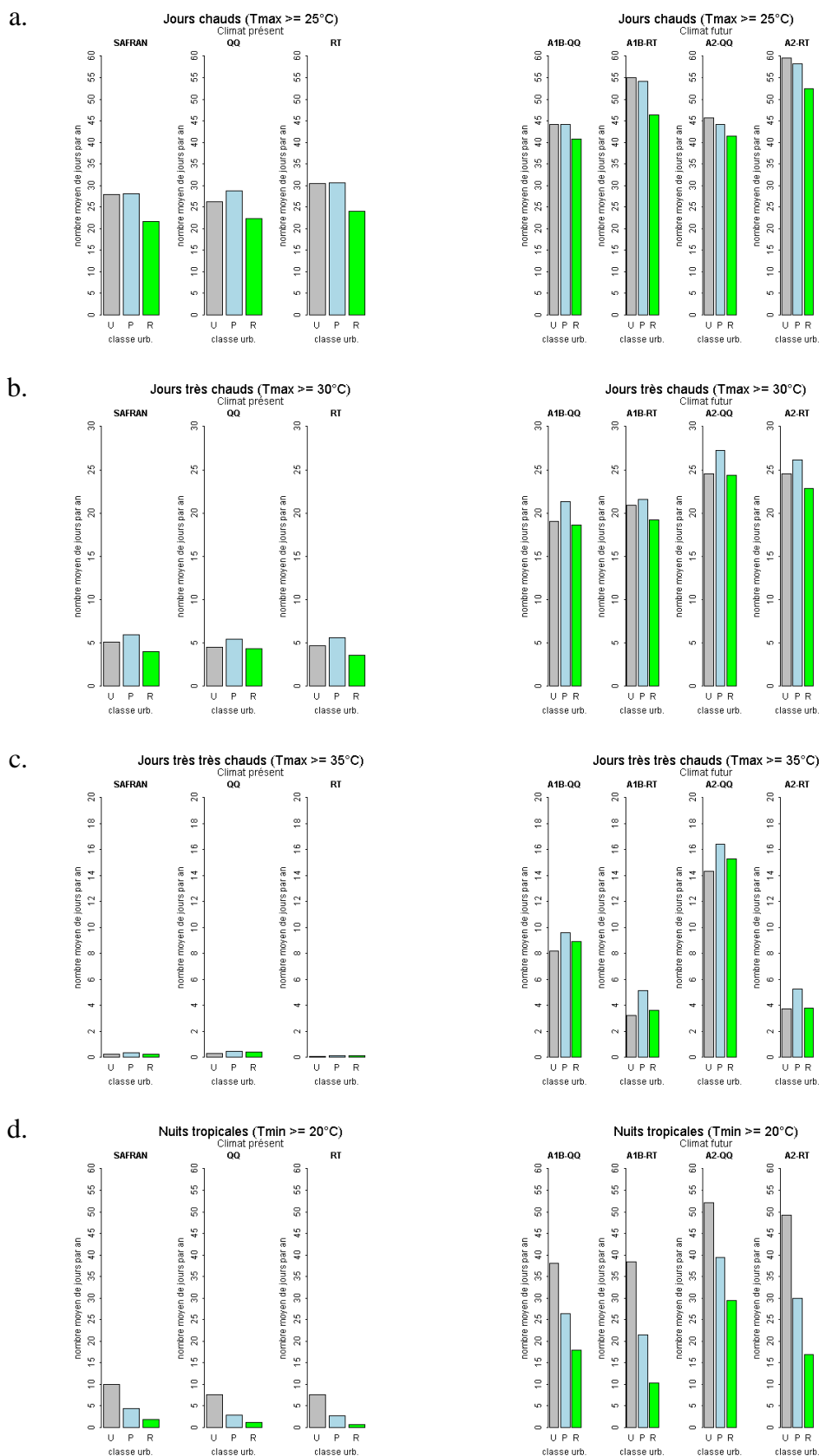


Figure 23 - Nombres de jours chauds, très chauds, très très chauds et nombre de nuits tropicales, en moyenne annuelle, par classes de couvert en climats présent (gauche) et futur (droite).

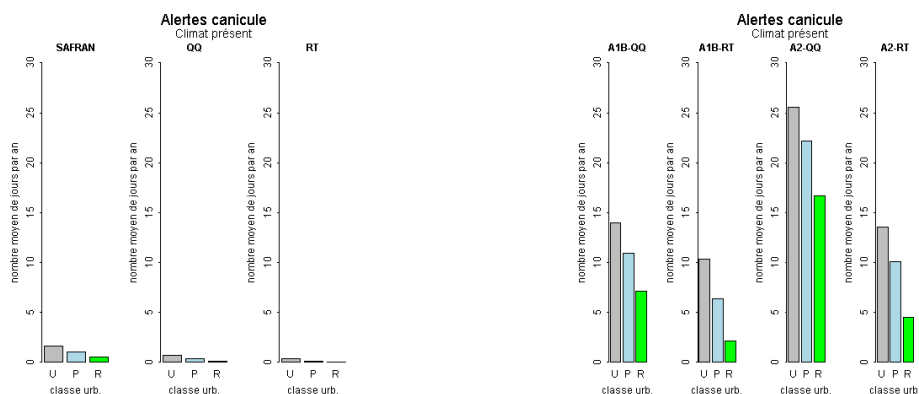


Figure 24 - Nombres de jours de mise en alerte orange pour la canicule, en moyenne annuelle, par classes de couvert en climats présent (gauche) et futur (droite).

La mise en alerte orange pour la canicule est basée sur les indices biométéorologiques IBM qui sont calculés selon une moyenne temporelle sur 3 jours consécutifs (J, J+1, J+2) des températures minimales et maximales, la période de 3 jours étant considérée comme la durée minimale d'une vague de chaleur :

$$IBM_n = \frac{T_{MIN}(J) + T_{MIN}(J+1) + T_{MIN}(J+2)}{3} \quad (\text{idem pour } IBM_x \text{ en fonction de } T_{MAX})$$

Météo-France déclenche une alerte orange pour la canicule lorsque les deux seuils minimum et maximum sur les indices biométéorologiques (21 et 31°C pour la région de Paris, respectivement) sont dépassés simultanément.

Comme attendu, les journées chaudes sont plus fréquentes en climat futur (Table 6 et Figure 23) compte tenu de l'augmentation des températures en été. Pour les jours chauds, on constate que les deux scénarios prévoient des tendances très comparables (Figure 23a). En climat présent, on dénombre en moyenne 28 jours par an dans les zones urbaines, 30 dans les zones périurbaines et 23 dans les zones rurales. En climat futur, la fréquence d'occurrence augmente à 50 (53) jours par an dans les zones urbaines, 49 (51) dans les zones périurbaines, et 44 (47) dans les zones rurales selon le scénario A1B (A2).

Quant aux cas de jours très chauds et très très chauds, ils deviennent relativement habituels en climat futur alors qu'ils sont très rares en climat présent. Ils sont en outre systématiquement plus fréquents dans le scénario A2, plus pessimiste que le scénario A1B en termes d'émissions (Figure 23b,c). Ainsi, le nombre moyen de jours très chauds par an ne dépasse pas 5 en climat présent, pour atteindre en climat futur 20 (25) dans les zones urbaines, 21 (27) dans les zones périurbaines et 19 (24) dans les zones rurales selon le scénario A1B (A2). Proche de zéro en climat présent, le nombre moyen de jours très très chauds par an atteint 6 (9) dans les zones urbaines et rurales et 7 (11) dans les zones périurbaines selon le scénario A1B (A2).

Il est intéressant de souligner que ces trois indices d'été augmentent de façon beaucoup plus importante dans les zones rurales que dans les zones urbanisées en raison de l'assèchement des sols naturels. En outre, il est possible que le potentiel de réchauffement dans les zones urbaines soit limité, en raison des températures déjà très élevées qui sont observées en climat présent. Enfin, il apparaît selon les deux scénarios (Figure 23b,c) que le nombre de jours très chauds et très très chauds atteint des valeurs maximales dans les zones périurbaines. Dans ces quartiers composés de surfaces minéralisées et de couverts naturels, le réchauffement semble accentué par un effet cumulé de l'urbanisation et de l'assèchement des sols.

Table 6 - Nombre de jours chauds, très chauds, très très chauds, de nuits tropicales et d'alertes canicule, en moyenne annuelle, par classes de couvert en climats présent et futur.

		Urbain		Périurbain		Rural	
		QQ	RT	QQ	RT	QQ	RT
<i>Jours chauds : $T_{MAX} \geq 25^{\circ}C$</i>							
Présent		26.2	30.5	28.7	30.7	22.4	24.0
Futur	A1B	44.1	55.0	44.1	54.1	40.7	46.3
	A2	45.7	59.6	44.1	58.3	41.5	52.5
<i>Jours très chauds : $T_{MAX} \geq 30^{\circ}C$</i>							
Présent		4.5	4.7	5.4	5.6	4.3	3.5
Futur	A1B	19.0	20.9	21.3	21.6	18.6	19.2
	A2	24.5	24.5	27.2	26.2	24.4	22.9
<i>Jours très très chauds : $T_{MAX} \geq 35^{\circ}C$</i>							
Présent		0.3	0.1	0.5	0.1	0.4	0.1
Futur	A1B	8.2	3.2	9.6	5.1	8.9	3.6
	A2	14.3	3.7	16.4	5.3	15.3	3.4
<i>Nuits tropicales : $T_{MIN} \geq 20^{\circ}C$</i>							
Présent		7.6	7.6	2.9	2.8	0.7	0.7
Futur	A1B	38.0	38.5	26.4	21.4	17.9	10.3
	A2	52.1	49.3	39.4	29.9	29.4	17.0
<i>Jours d'alerte canicule : $IBMn \geq 21^{\circ}C$ & $IBMx \geq 31^{\circ}C$</i>							
Présent		0.7	0.4	0.3	0.1	0.1	0.0
Futur	A1B	14.0	10.4	11.0	6.4	7.1	2.2
	A2	25.5	13.5	22.1	10.0	16.6	4.5

Le nombre de nuits tropicales par an augmente (Figure 23d). En climat présent comme en climat futur, les nuit tropicales sont beaucoup plus fréquentes dans les zones urbaines du fait de l'ICU nocturne. On passe de 8 nuits tropicales par an dans le climat actuel à 38 (51) en climat futur selon le scénario A1B (A2). Bien que plus faibles en nombre, l'occurrence de nuits tropicales augmente également de façon très significative dans les zones périurbaines, de 3 à 24 (35), et dans les zones rurales, de moins de 1 à 14 (23).

Enfin, on constate une très nette augmentation du nombre de jours de mise en alerte orange pour la canicule en climat futur (Figure 24). En climat présent, on dénombre en moyenne moins de 1 jour d'alerte par an dans les zones urbaines, périurbaines et rurales. En climat futur, on passe à 12 (20) dans les zones urbaines, 9 (16) dans les zones périurbaines, et 5 (11) jours dans les zones rurales, selon le scénario A1B (A2). Comme pour les nuits tropicales, les avertissements de vague de chaleur sont plus nombreux dans les zones urbaines que dans les zones périurbaines et rurales, ce qui montre que le seuil en vigueur sur IBMn (directement relié aux minima journaliers de température) est le critère prépondérant dans le déclenchement des alertes.

5.5 Ilots de chaleurs urbains

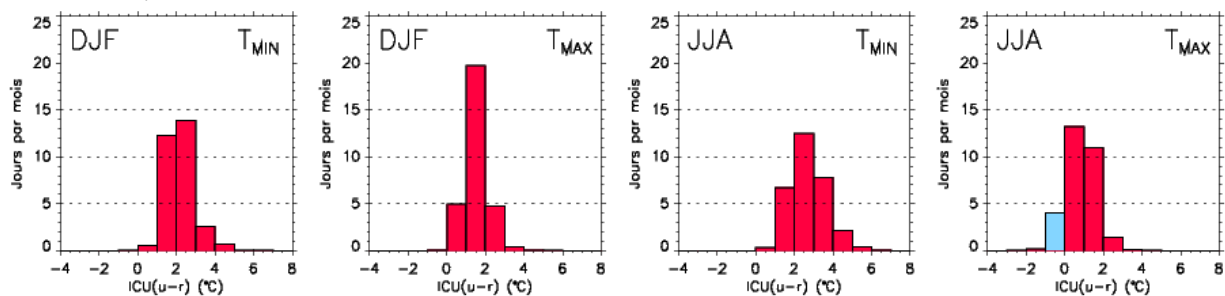
La distribution des ICUs par classes d'intensité est présentée en Figure 25. Les ICUs sont calculés comme la différence de température entre les zones urbaines et rurales en utilisant les minima et maxima journaliers des températures de l'air à 2 m simulées par le modèle et moyennées par classe de couverts et par saison. Pour cette analyse, la distribution de ICUs regroupe les résultats obtenus à partir des deux méthodes de descente d'échelle et des scénarios A2 et A1B.

En climat actuel, les ICUs sont toujours positifs durant l'hiver (DJF : décembre-janvier-février) avec des intensités variant de 0 à 5°C pour $T2m_{MIN}$ et de 0 à 4°C pour $T2m_{MAX}$. Les mêmes gammes d'intensités sont détectées en climat futur. La distribution est assez semblable à celle du climat présent pour les ICUs nocturnes. Elle est légèrement différente pour les ICUs diurnes. Dans ce cas, la fréquence des ICUs supérieurs à 1°C diminue de 4% au bénéfice de très faibles ICUs.

En été (JJA : juin-juillet_août), et en climat actuel, les ICUs varient de 0 à 6°C pour $T2m_{MIN}$ et de -1 à 3°C pour $T2m_{MAX}$. La distribution des ICUs nocturnes varie peu dans le futur même si une légère diminution des fortes intensités d'ICUs est notée : 76% de ICUs nocturnes atteignent au moins 2°C en climat présent, contre 74% en climat futur. Des différences significatives sont par contre observées sur les ICUs de jour. On constate que 86% des ICUs sont positifs en climat présent contre 63% seulement en climat futur. Des cas d'ICUs froids atteignant -2°C apparaissent. Ces résultats sont directement liés aux fortes températures simulées dans les zones rurales en corrélation avec l'assèchement des sols naturels (voir Section 5.4).

Les ICUs ont également été calculés pour les zones périurbaines, i.e., à partir des différences de températures entre les zones périurbaines et rurales. Leurs distributions en climats présent et futur tout à fait comparables en hiver (Figure 26). Les intensités des ICUs sont assez faibles, avec des valeurs majoritairement comprises entre 0 et 1°C et quelques situations d'ICUs de 1-2°C. En été, les ICUs nocturnes ont des distributions qui n'évoluent pas dans le futur. Par contre, on note un affaiblissement significatif des ICUs en journée : 43% des ICUs sont de l'ordre de 1-2°C en climat présent contre 23% seulement en climat futur. Là encore, ces tendances sont liées au réchauffement important des zones rurales dans les projections climatiques.

a. Climat present



b. Climat futur

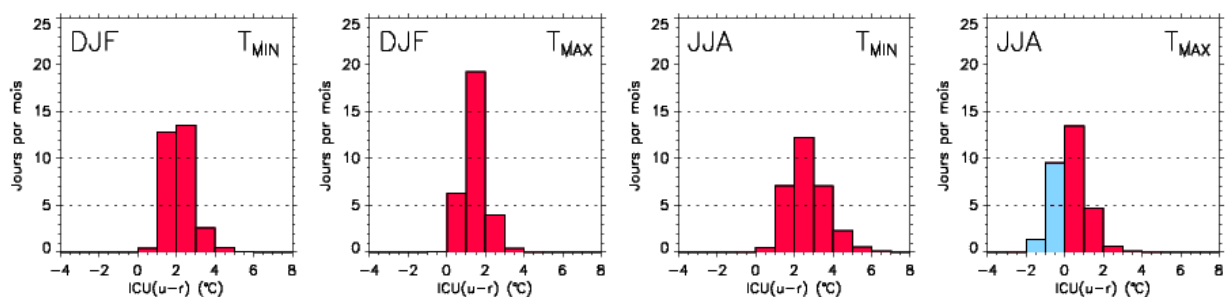
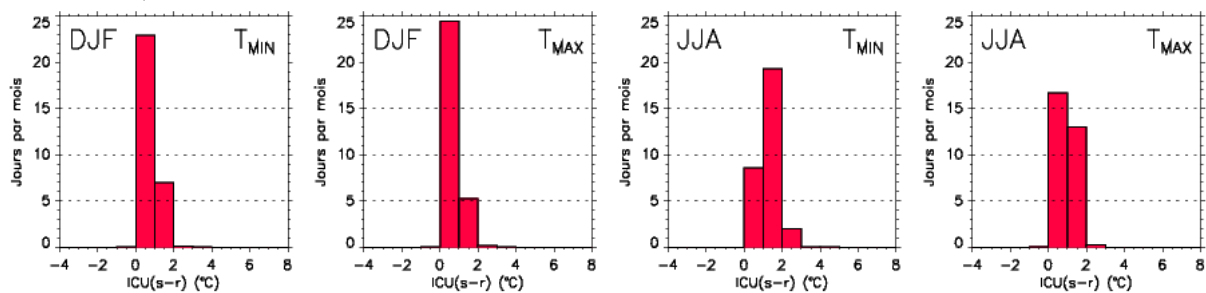


Figure 25 - Distribution des ICUs calculés pour les zones urbaines en climats présent et futur, en intégrant les 2 méthodes de descente d'échelle et les 2 scénarios A1B et A2.

a. Climat present



b. Climat futur

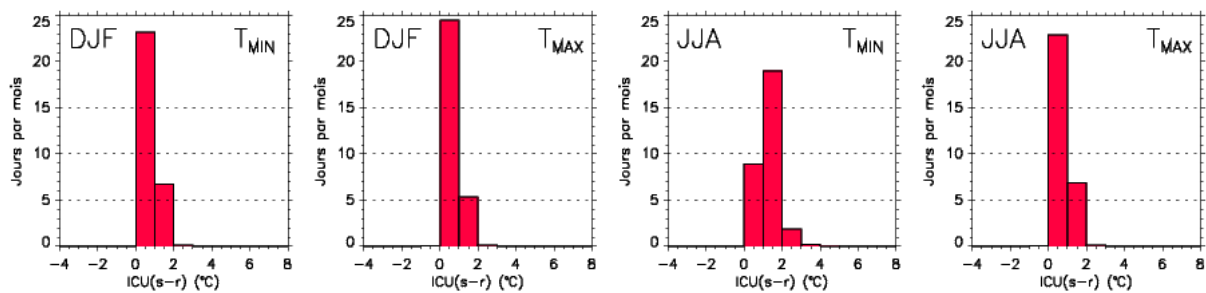


Figure 26 - Distribution des ICUs calculés pour les zones périurbaines en climats présent et futur, en intégrant les 2 méthodes de descente d'échelle et les 2 scénarios A1B et A2.

La structure spatiale de l'ICU sur la région de Paris est également analysée en calculant l'anomalie de température entre le minimum (maximum) journalier de température de l'air à 2 m simulé par le modèle en chaque point de la grille du domaine et le minimum (maximum) journalier de température de l'air à 2 m moyenné pour toutes les zones rurales :

$$\Delta T_{\text{MIN}}(i) = T_{\text{MIN}}(i) - \frac{\sum \text{Trur}_{\text{MIN}}}{n} \quad (\text{idem pour } \Delta T_{\text{MAX}})$$

Avec T la température de l'air en chaque point de grille d'indice i (quelque soit le type de couvert), et Trur la température de l'air dans les zones rurales.

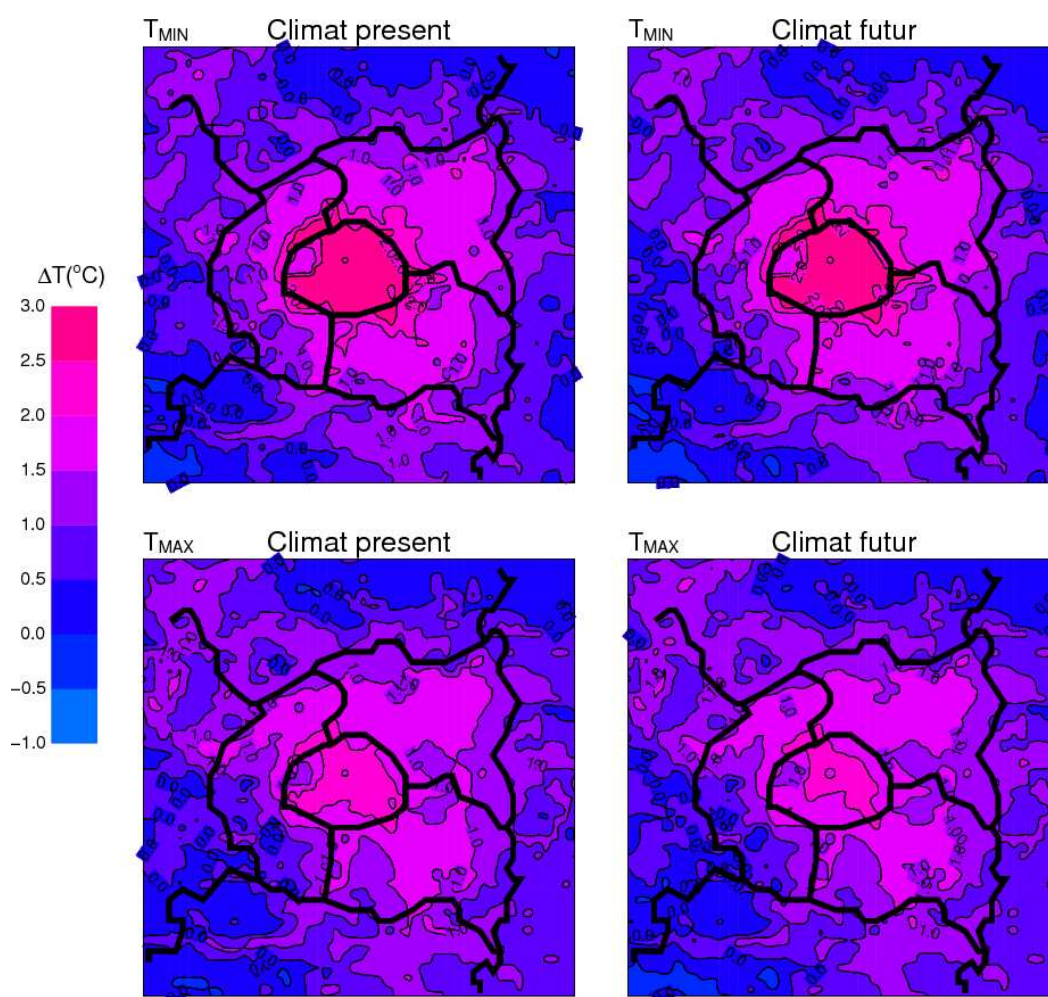


Figure 27 - Distribution spatiale des anomalies hivernales de température entre les minima (maxima) journaliers de température de l'air à 2 m simulés par le modèle en chaque point de la grille du domaine et les minima (maxima) journaliers de température de l'air à 2 m moyennés pour toutes les zones rurales.

En hiver, les ICUs ont une structure concentrique, les maxima étant observés sur Paris *intra muros* (Figure 27). Les ICUs nocturnes sont quasiment identiques en climats présent et futur alors qu'on note un léger affaiblissement des ICUs diurnes dans le futur. L'organisation spatiale quant à elle reste la même, directement corrélée aux fractions de surfaces minéralisées.

En été, les ICUs nocturnes sont très légèrement plus faibles à la fin du 21^{ème} siècle, et présentent des structures spatiales identiques en climats présent et futur avec une intensité maximale dans Paris et une diminution progressive dans les zones périurbaines périphériques (Figure 28). En journée, on note une évolution de la forme de l'ICU : les plus fortes anomalies de température sont localisées sur une grande partie de la banlieue et non pas dans Paris *intra muros*. En climat futur, un refroidissement est observé sur le centre de Paris et une partie des quartiers périurbains, ce qui est en conformité avec les tendances présentées en Section 5.4.

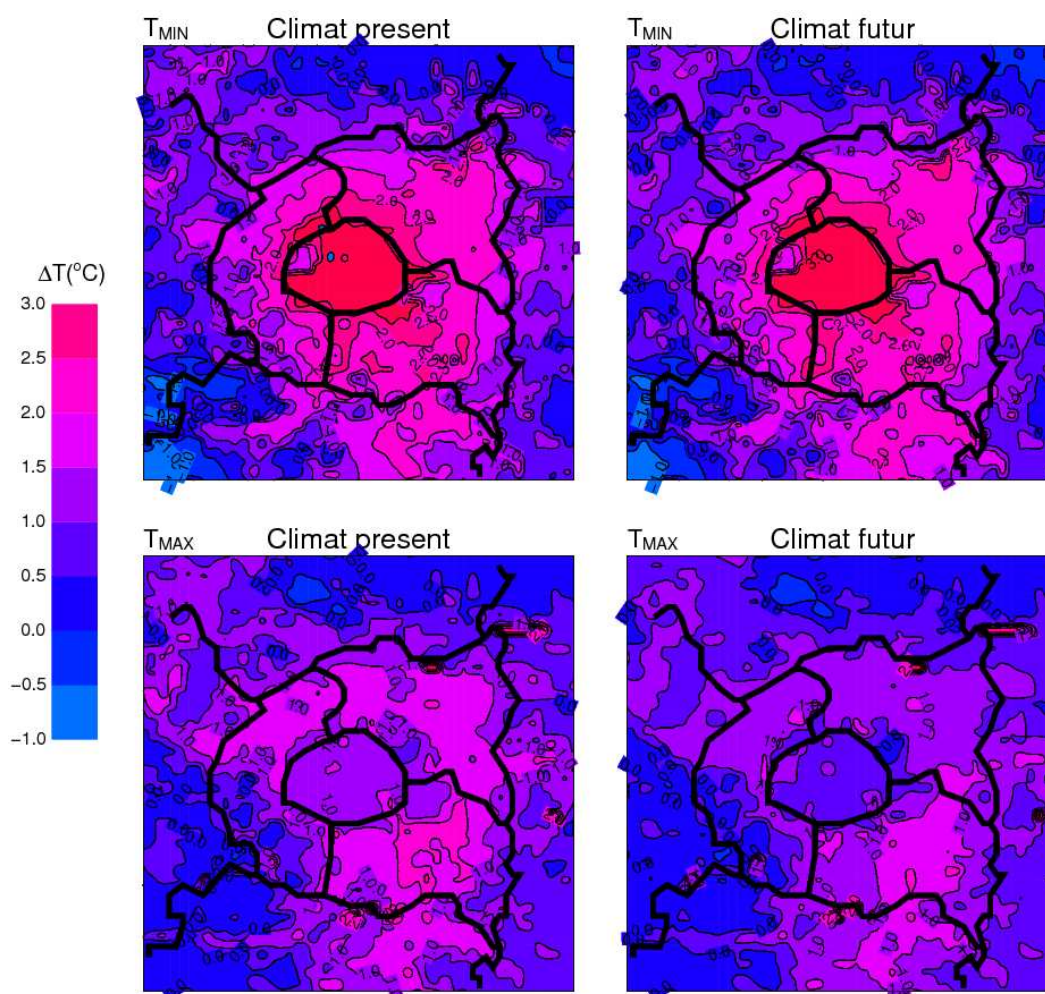


Figure 28 - Distribution spatiale des anomalies estivales de température entre les minima (maxima) journaliers de température de l'air à 2 m simulés par le modèle en chaque point de la grille du domaine et les minima (maxima) journaliers de température de l'air à 2 m moyennés pour toutes les zones rurales.

6 Consommation énergétique et confort thermique intérieur

6.1 Degrés jours unifiés de chauffe et de refroidissement

Le changement climatique pourrait avoir un fort impact sur la consommation d'énergie des villes dans le futur. Une façon simple d'évaluer cet impact est de calculer les degrés-jours unifiés (DJU) de chauffe et de refroidissement au cours des périodes de climats présent et futur. Les degrés-jours s'expriment sous la forme :

$$DJU_c = \sum (T_{air} - T_{consigneMIN})$$

$$DJU_r = \sum (T_{consigneMAX} - T_{air})$$

où T_{air} est la moyenne journalière de la température de l'air à l'extérieur (ici la température de l'air à 2 m). $T_{consigne}$, une température standard. Elle correspond à une température minimum de consigne en hiver en deça de laquelle on considère qu'il est nécessaire de chauffer les logements pour maintenir un confort suffisant, et à une température maximale de consigne en été au delà de laquelle les systèmes de climatisation sont mis en route. Selon les normes françaises (Porcher 1993), $T_{consigneMIN}$ et $T_{consigneMAX}$ sont fixés, respectivement à 18 et 24°C.

Table 7 - Moyennes annuelles des degrés jours unifiés de chauffe et de refroidissement observés (pour la station Paris-Montsouris) et simulés pour les zones urbaines et périurbaines et les différentes périodes de temps

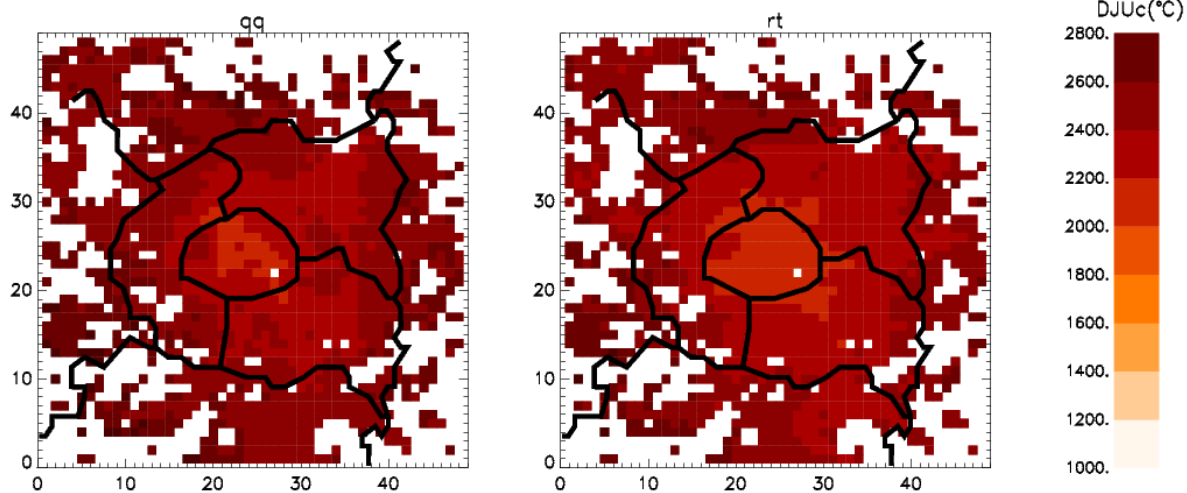
		Urbain		Périurbain	
		DJUc	DJU _r	DJUc	DJU _r
Obs	(1971-2006)	2352	17	-	-
Présent	(1971-2006)	2216	19	2480	13
Futur	A1B (2072-2098)	1586	122	1808	104
	A2 (2072-2098)	1468	178	1681	154
Futur - Présent	A1B	-630	+105	-672	+91
	A2	-748	+161	-799	+141

Dans cette étude, les DJU annuels sont calculés en climats présent et futur (en moyenne sur 1971-2006 et 2072-2098, respectivement) et présentés dans la Table 7. Ils sont tout d'abord comparés, pour la période de contrôle, aux DJU calculés en utilisant la série chronologique de température de l'air à 2 m enregistrée par la station météorologique opérationnelle de Paris-Montsouris. Les DJU de chauffe et de refroidissement calculés à partir des observations et moyennés sur la période 1971-2006 sont respectivement de 2352 et 17°C / an. Ces résultats mettent en évidence des besoins importants en chauffage pendant l'hiver en climat actuel, alors que les besoins en climatisation restent comparativement assez faibles. Les ordres de

grandeurs des valeurs simulées de DJU_c et DJU_r , qui atteignent 2216 et 19 °C / an sont en bon accord avec les valeurs observées. On remarque toutefois que les DJU de chauffe calculés pour la station de Paris-Montsouris sont légèrement supérieurs à ceux obtenus pour le modèle, et inversement que les DJU de refroidissement sont légèrement plus faibles. Ce constat est logique puisque la station est située dans un parc urbain, i.e. dans un environnement sensiblement plus frais que les zones urbaines simulées par le modèle.

En raison de l'augmentation de la température en hiver en climat futur, on prévoit une diminution des DJU de chauffe d'environ 30%, de 2330 à 1622°C / an dans les zones urbaines et de 2493 à 1838°C / an dans les zones suburbaines où les besoins en chauffage sont un peu plus élevés. Inversement, les DJU de refroidissement augmentent considérablement en proportion, bien que l'ordre de grandeur reste beaucoup plus faible que celui des DJU de chauffe. Par exemple, on observe un accroissement de 153°C / an des DJU de refroidissement dans les zones urbaines contre une diminution de -708°C / an des DJU de chauffe. En conséquence, le modèle simule une diminution moyenne des DJU de -555 et de -512°C / an dans les zones urbaines et périurbaines, avec des différences entre les scénarios A1B et A2 n'excédant pas $\pm 7\%$.

a. Climat présent



b. Climat futur

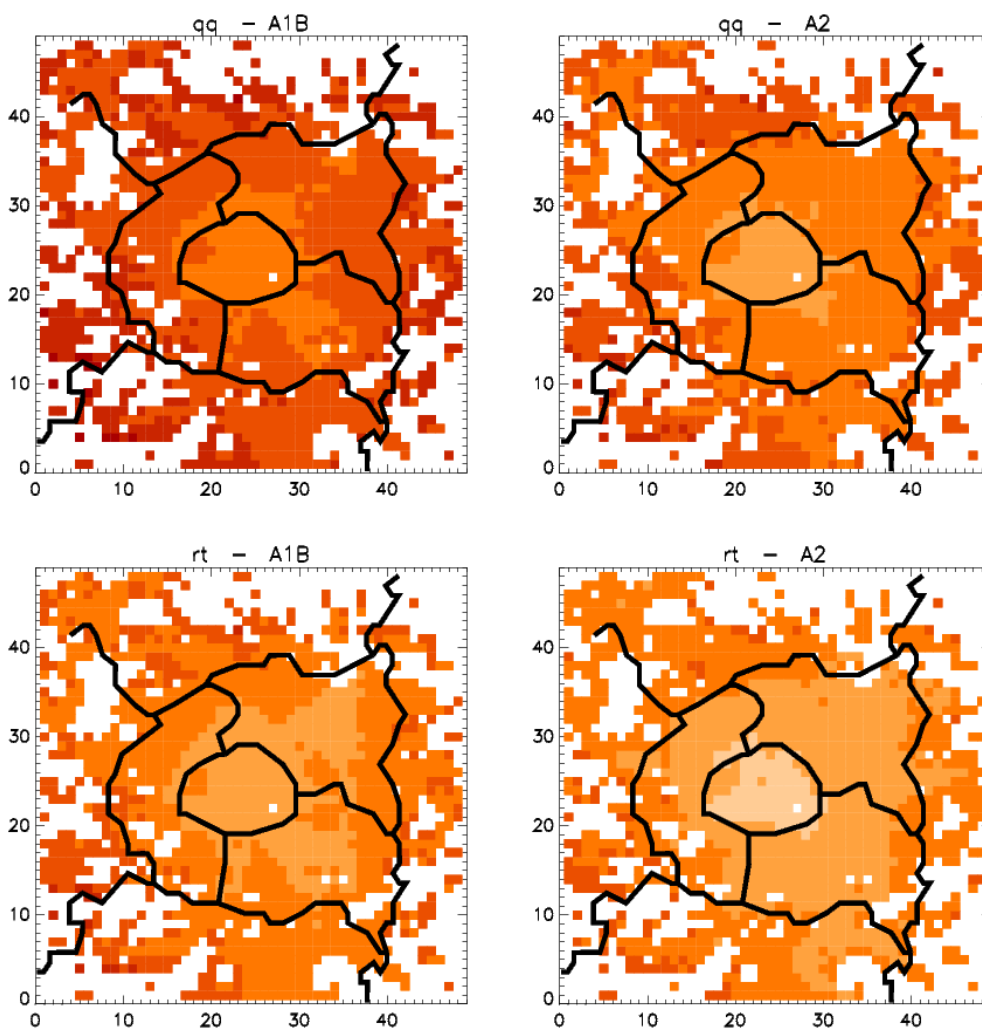
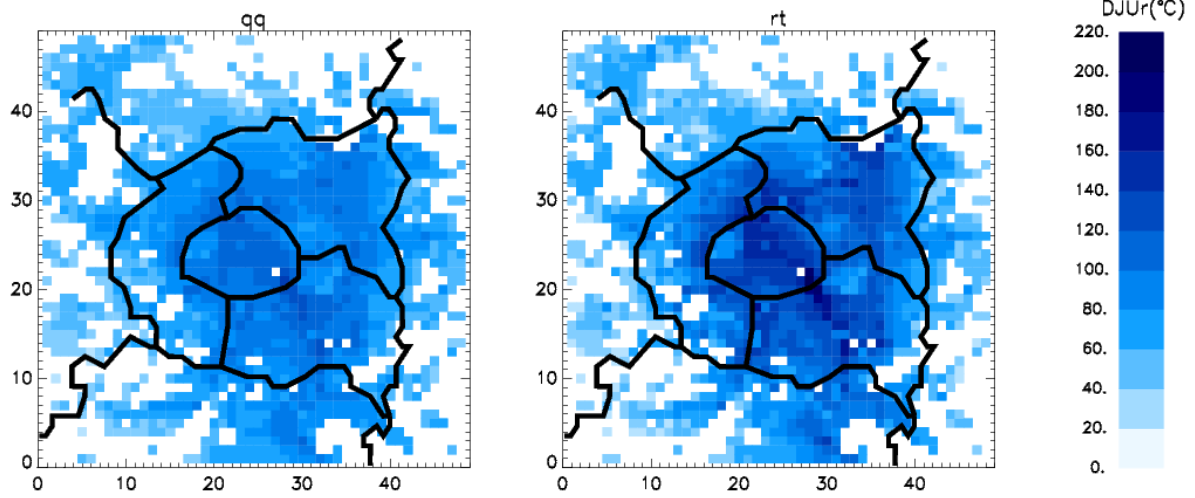


Figure 29 - Représentation spatialisée des degrés jours unifiés de chauffe en climats (a) présent et (b) futur pour les 2 méthodes de descente d'échelle et les 2 scénarios A1B et A2.

a. Climat présent



b. Climat futur

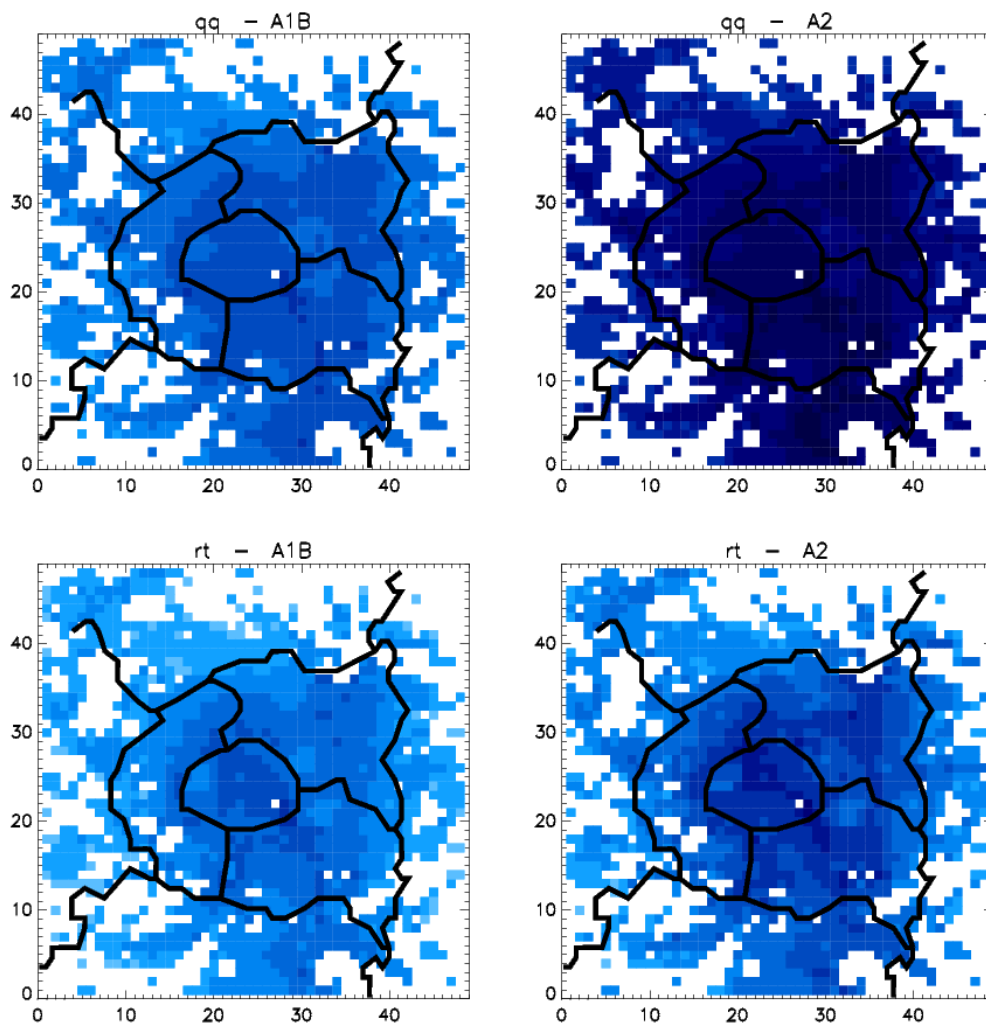


Figure 30 - Représentation spatialisée des degrés jours unifiés de refroidissement en climats (a) présent et (b) futur pour les 2 méthodes de descente d'échelle et les 2 scénarios A1B et A2.

6.2 Températures dans les bâtiments en été

Le modèle urbain TEB simule d'une manière simple le microclimat à l'intérieur des bâtiments en calculant la température intérieure $T_{i_{bât}}$. Cette température suit une équation d'évolution fonction de la température intérieure au pas de temps précédent et de la moyenne des températures de surface du plafond intérieur, du mur, et du toit (Masson et al. 2002). Les systèmes de climatisation ne sont pas paramétrés dans la version actuelle du modèle, ainsi $T_{i_{bât}}$ évolue librement pendant l'été.

Il est important de souligner que la description du bâtiment dans TEB n'est pas très sophistiquée (voir Masson 2000), en particulier, TEB considère un volume d'air unique à l'intérieur du bâtiment (pas de bâtiment à plusieurs étages) et ne traite pas les fenêtres dans les calculs radiatifs. Cependant, la température intérieure simulée par TEB a déjà été comparée à des observations (Lemonsu et al. 2004) et a montré un comportement assez réaliste en dépit d'une sous-estimation. Dans notre étude, il peut être un indicateur intéressant en vue de quantifier à l'échelle de la ville les effets du réchauffement climatique sur le confort thermique des habitants dans les bâtiments pendant l'été.

Table 8 - Statistiques sur les valeurs moyennes estivales des minima et maxima journaliers de températures internes des bâtiments calculées pour les zones urbaines et périurbaines et les différentes périodes de temps.

		Urbain		Périurbain	
		T_{MIN}	T_{MAX}	T_{MIN}	T_{MAX}
Présent	(1971-2006)	20.53	21.13	19.98	20.34
Futur	A1B (2072-2098)	22.66	23.43	21.29	21.73
	A2 (2072-2098)	23.25	24.03	21.63	22.07
Futur - Présent	A1B	+2.13	+2.30	+1.31	+1.39
	A2	+2.72	+2.90	+1.65	+1.73

Dans le climat actuel, la simulation indique que le minimum et le maximum journaliers de $T_{i_{bât}}$ varient en moyenne autour de 20-21°C dans les zones urbaines et périurbaines (Table 8). En climat futur, $T_{i_{bât}}$ augmente significativement avec une tendance plus forte sur les maxima journaliers de température, conformément aux tendances sur les températures extérieures. Bien que les minima journaliers de température augmentent moins, ils atteignent des valeurs très élevées en moyenne (22.66 et 23.25°C pour les scénarios A2 et A1B, respectivement, dans les zones urbaines) ce qui peut conduire à la multiplication de situations de stress thermique pour les habitants.

7 Conclusions

L'impact du changement climatique sur le climat de Paris et sa région à l'horizon 2100 est analysé à partir d'intégrations numériques réalisées sur de longues périodes de temps. Grâce à l'utilisation d'un système de modélisation de surface à 1 km de résolution spatiale, intégrant une paramétrisation urbaine spécifique, l'accent est mis sur l'étude des interactions entre les effets locaux du changement global et les processus urbains tels que l'îlot de chaleur.

En hiver, la température augmente de manière significative en climat futur d'environ +2.0 et +2.4°C pour les minima et maxima journaliers de température, respectivement entre 1971-2006 et 2072-2098. Cette tendance est particulièrement marquée dans les zones les plus urbanisées, où le nombre de jours froids (température minimale inférieure à -5°C) devient nul, ainsi que le nombre de jours sans dégel (température maximale inférieure à 0°C).

En été, l'évolution de la température est plus importante qu'en hiver (+3.5 et +5.0°C pour les températures minimales et maximales journalières). Contrairement aux résultats attendus, la tendance au réchauffement est plus marquée dans les zones rurales que dans les zones urbanisées en raison du fort assèchement des sols naturels. Par conséquent, on note une diminution substantielle des forts ICUs (supérieurs à 2°C), et l'apparition de nombreux cas d'ICUs négatifs en journée. On peut également souligner que les extrêmes de température sont les plus importants dans les zones périurbaines où les effets de l'urbanisation partielle et la sécheresse du sol se cumulent.

Enfin, la question de la demande énergétique est abordée à travers l'analyse des degrés jours unifiés de chauffe et de refroidissement. La comparaison de ces degrés jours calculés en climats présent et futur indique une diminution de 30% des besoins en chauffage durant l'hiver, et inversement une augmentation des besoins en climatisation pour maintenir le confort thermique en été. Les ordres de grandeur montrent, cependant, que l'augmentation des degrés jours unifiés de refroidissement reste inférieure à la diminution des degrés jours unifiés de chauffe, même si cela dépend fortement du choix des températures de consigne utilisées pour les calculs.

Ce travail propose une méthodologie originale pour analyser l'impact du changement climatique global sur le climat de Paris et de sa région. Plus particulièrement, l'intégration d'un modèle de canopée urbaine spécifique (TEB) permet d'étudier le micro-climat qui est perçu par les habitants au niveau des rues. Les résultats des projections climatiques locales affichent des tendances cohérentes quels que soient les scénarios d'émission (A1B ou A2). Cependant, nous envisageons dans nos recherches futures d'étudier un plus grand ensemble de projections climatiques fournies par différents modèles du climat globaux et/ou régionaux, afin de quantifier plus précisément les erreurs de modélisation et la dispersion des résultats. Par ailleurs, nous développons actuellement une technique de descente d'échelle, plus appropriée à la problématique urbaine, qui vise à reconstruire des forçages atmosphériques intégrant une signature réaliste de l'îlot de chaleur urbain (dont l'influence peut s'étendre sur les premières centaines de mètres de l'atmosphère).

8 Références

- Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Ambenje, P., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., and Griffiths, G., Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *J. Geophys. Res.*, **111**, D05109, DOI: 10.1029/2005JD006290 (2006).
- Amato, A.D., Ruth, M., Kirshen, P., and Horwitz, J., Regional energy demand responses to climate change: methodology and application to the Commonwealth of Massachusetts, *Clim. Change*, **71**(1-2), 175-201 (2005).
- Athanassiadou, M., Baker, J., Carruthers, D., Collins, W., Girnary, S., Hassell, D., Hort, M., Johnson, C., Johnson, K., Jones, R., Thomson, D., Trought, N., and Witham, C., An assessment of the impact of climate change on air quality at two UK sites, *Atm. Environ.*, **44**, 1877-1886 (2010).
- Boé, J., Terray, L., Habets, F., and Martin, E., A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *J. Geophys. Res.*, **111**, D23106 (2006).
- Colombert, M., Contribution to the analysis of various means to take into account urban climate in urban planning, *PhD Thesis*, Université Paris-Est, 538 pp (2008).
- Déqué, M., and Coauthors, Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitations, *IMFEX Final Report*, (2005).
Disponible sur <http://medias.obsnip.fr/gicc/docgicc/public/projets/apr02/projet4/final-4-02.doc>
- Déqué, M., Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values, *Global and Planetary Change*, **57**(1-2), 16-26 (2007).
- Desplat, J., Salagnac, J.-L., Kounkou-Arnaud, R., Lemonsu, A., Colombert, M., Lauffenburger, M., and Masson, V., EPICEA project [2008-2010]: multidisciplinary study of the impacts of climate change on the scale of Paris, *7th International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japan (2009).
- Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S., and Rieu, J., Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, *Rapport final du projet RExHySS*, Programme GICC, 62 pp (2009).
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., and Martin, E., A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Annals of Glaciology*, **18**, 65-71 (1993).
- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Merindol, L., and Martin, E., A computer-based system simulating snowpack structure as a tool for regional avalanche forecasting, *Journal of Glaciology*, **45**, 469-484 (1999).
- Franco, G., and Sanstad, A.H., Climate change and electricity demand in California, *Clim. Change*, **87**, 139-151 (2008).

- Früh, B., Becker, P., Deutschlander, T., Hessel, J.-D., Kossmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H., and Wienert, U, Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections, *J. of Appl. Meteorol. And Climatol.*, Early online release (2010).
- Fujibe, F., Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring, *Int. J. of Climate*, Early view (2010).
- Gaffin, S.R., Rosenzweig, C., Khanbilvardi, R., Parshall, L., Mahani, S., Glickman, H., Goldberg, R., Blake, R., Slosberg, R.B., and Hillel, D., Variations in New York City's urban heat island strength over time and space, *Theor. Appl. Climatol.*, **94**, 1-11 (2008).
- García Cueto, R.O., Tejada Martínez, A., and Jáuregui Ostos, E., Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of Mexico: current trends and in climate change scenarios, *Int J Biometeorol.*, **54**(4), 335-345 (2010).
- Gibelin, A.L. and Déqué, M., Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model, *Clim. Dynamics*, **20**, 327-339 (2003).
- Hallegatte, S., Hourcade, J.-C., and Ambrosi, P., Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas, *Clim. Change*, **82**(1), 47-60 (2007).
- Heymann, Y., and Coauthors, CORINE land cover: Technical guide. Environment, nuclear safety and civil protection series, *Commission of the European Communities*, Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg. 144 pp (1993).
- IPCC, Climate Change 2007: Synthesis report, Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.) IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp (2007).
- IPCC: Special report on emissions scenarios, Cambridge University Press, UK., 570 pp (2000).
- Jones, P.D., Groisman, P.Y.A., Coughlan, M., Plummer, N., Wang, W.-C., and Karl, T.R., Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land, *Nature*, **347**, 169-172 (1990).
- Klein Tank, A.M.G. and Können G.P., Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99, *Journal of Climate*, **16**, 3665-3680 (2003).
- Klein Tank, A.M.G. and Zwiers, F.W., Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, WMO/TD-No. 1500, 56 pp (2009).
- Koukou-Arnaud, R., and Desplat, J., Contribution à l'élaboration du Livre Vert pour le Plan Climat du Conseil Régional Ile-de-France, Rapport d'étude de Météo-France, 78 pp (2010).
Disponible sur
http://www.iledefrance.fr/fileadmin/contrib_folder/Brochures/Livre_Vert_Annexes.zip
- Lemonsu, A., Grimmond, C.S.B., and Masson, V., Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille, *J. Appl. Meteorol.*, **43**, 312-327 (2004).
- Lemonsu, A., and Masson, V., Simulation of a summer urban breeze over Paris, *Bound.-Layer Meteorol.*, **104**, 463-490 (2002).

- Martin E., and Etchevers, P., Impact of climatic changes on snow cover and snow hydrology in the French Alps, *Advances in Global Change Research*, **23**, 235-242 (2006).
- Masson, V., A Physically-Based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models, *Bound.-Layer Meteor.*, **94**, 357-397 (2000).
- Masson, V., Grimmond, C.S.B., and Oke, T.R., Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities, *J. Appl. Meteorol.*, **41**, 1011-1026 (2002).
- Masson, V., Champeaux, J.-L., Chauvin, F., Meriguet, C., and Lacaze, R., A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models, *J. Climate*, **16**, 9, 1261-1282 (2003).
- Moisselin, J.-M., and Dubuisson, B., Evolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XX^{ème} siècle en France, *La Météorologie*, **54**, 33-42 (2006).
- Moisselin, J.-M., Schneider, M., Canellas, C., and Mestre, O., Les changements climatiques en France au XX^{ème} siècle, *La Météorologie*, **38**, 45-56 (2002).
- Noilhan, J. and Planton, S., A Simple parameterization of land surface processes for meteorological models, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549 (1989).
- O'Hara, J.K., and Georgakakos, K.P., Quantifying the urban water supply impacts of climate change, *Water Resources Management*, **22**(10), 1477-1497 (2008).
- Osczevski, R.J., and Bluestein, M., The new wind chill equivalent temperature charts, Report No: DRDCTORONTO-SL-2004-096, DRDC, Toronto, 6 pp (2005).
- Planton, S., Déqué, M., Chauvin, F., and Terray, L., Expected impacts of climate change on extreme climate events, *C. R. Geoscience*, **340**, 564574 (2008).
- Porcher, G., Cours de climatisation: bases du calcul des installations de climatisation, Les Editions parisiennes, 317 pp (1993).
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., and Morel, S., Analysis of near surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France, *J. Appl. Meteorol. and Climatol.*, **47**, 92-107, DOI:10.1175/2007JAMC1636.1 (2008).
- Salgado, R., and Le Moigne, P., Coupling of the FLake model to the Surfex externalized surface model, *Boreal Env. Res.*, **15**, 231244 (2010).
- Rosenzweig, C., and Solecki, W.D., Climate change and a global city - Learning from New York, *Environment*, **43**(3), 2-12 (2001).
- Van den Besselaar, E.J.M., Klein Tank, A.M.G., Van der Schrier, G., Influence of circulation types on temperature extremes in Europe, *Theor. Appl. Climatol.*, **99**, 431-439, DOI:10.1007/s00704-009-0153-6 (2009).
- Vidal, J.P, Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M., and Soubeyroux, J.M., A 50-year high resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system, *Int. J. Climatology*, DOI:10.1002/joc.2003 (2008).

Wilby, R.L., Past and projected trends in London's urban heat island, *Weather*, **58**(7), 251-260 (2003).