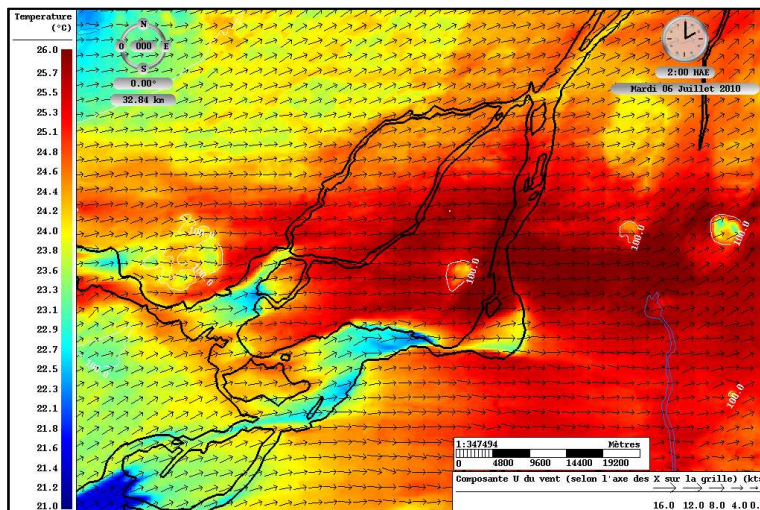


Rapport de fin de projet:

## **Influence des aménagements du tissu urbain sur la micro-météorologie et le confort thermique**

Sylvie Leroyer, Stéphane Bélair, Nasim Alavi, Rodrigo Munoz-Alpizar, Oumarou Nikiema,  
Ivana Popadic

Division de la recherche en météorologie, Environnement et changement climatique Canada,  
Dorval, QC, Canada



Préparé pour:

Institut national de la santé publique du Québec (INSPQ)

Septembre 2019

## Table des matières

|   |     |
|---|-----|
| 1. Introduction.....  | 3   |
| 2. Outils de modélisation .....                                     | 5   |
| 3. Configurations expérimentales .....                              | 9   |
| 4. Études de cas et intégration contrôle .....                      | 14  |
| 5. Mesures d'atténuation.....                                       | 20  |
| 6. Évaluation des mesures d'atténuation sur Montréal .....          | 27  |
| a) Mesures reliées aux propriétés thermiques et radiatives .....    | 27  |
| b) Mesures reliées à la végétation et à l'humidité des sols .....   | 34  |
| c) Mesures reliées à la diminution des flux anthropiques.....       | 38  |
| d) Combinaison de Mesures.....                                      | 39  |
| 7. Impact des mesures sur les catégories de confort thermique ..... | 40  |
| 8. Conclusions de l'étude sur Montréal .....                        | 42  |
| 9. Méthode transposée à une autre ville canadienne : Toronto.....   | 43  |
| 7. Conclusions générales et prochaines étapes .....                 | 49  |
| REFERENCES .....  | 50  |
| Appendice A. Résultats pour la ville de Montréal.....               | 54  |
| A.1) Modifications pour les scénarios .....                         | 54  |
| A.2) Présentation des résultats.....                                | 57  |
| A.3) Bilan des résultats (Tableaux récapitulatifs).....             | 108 |
| Appendice B. Résultats pour la ville de Toronto .....               | 112 |
| B.1) Modifications pour les scénarios .....                         | 112 |
| B.2) Présentation des résultats .....                               | 115 |
| B.3) Bilan des résultats (Tableaux récapitulatifs).....             | 141 |



## 1. Introduction

Avec l'urbanisation croissante partout dans le monde (aussi observée au Québec et au Canada) et avec le réchauffement graduel associé aux changements climatiques, un grand intérêt existe actuellement concernant le rôle et l'impact que peuvent avoir les villes sur les conditions météorologiques, sur le confort thermique de ses habitants, de même que sur d'autres aspects reliés à la santé (e.g., qualité de l'air). Par ses caractéristiques géométriques, thermiques, et radiatives qui diffèrent de manière substantielle de celles de leur voisinage, les villes et leur tissu urbain ont été étudiés depuis plusieurs décennies afin de bien comprendre les effets d'îlots de chaleur ou plus spécifiquement la distribution spatiale de la température.

Étant donné le grand étalement des zones urbaines et leur grande hétérogénéité, il est difficile de documenter, d'analyser, et de prévoir la distribution spatiale de la température dans les villes. Il y a par exemple très peu de réseaux d'observations de surface en milieu urbain avec une résolution horizontale suffisante permettant de représenter de manière satisfaisante l'état actuel ou passé de la température près de la surface, incluant tous ses détails à l'échelle des quartiers.

L'imagerie satellitaire infrarouge a récemment été utilisée avec un certain succès (et couverture médiatique) pour cartographier la température de surface de plusieurs grandes villes, incluant Montréal. L'information fournie par cette approche, bien qu'intéressante, possède cependant certaines limitations importantes. Par exemple, les satellites tel que MODIS (pour «Medium Resolution Imaging Spectroradiometer») et AVHRR (pour «Advanced Very High Resolution Radiometer») ont une période de revisite de 12 ou 24 heures, limitant ainsi l'échantillonnage temporel disponible. De plus ces instruments satellitaires ne fournissent aucune information utile sous des conditions nuageuses (en ce qui concerne la chaleur en milieu urbain). Puis finalement, il est important de mentionner le fait que la variable d'état qui est déterminée par ces mesures représente la température de la surface du tissu urbain (i.e., végétation, routes, murs, toits), température qui n'est pas la même que celle de l'air ressentie par les humains, qui est quant à elle influencée de manière complexe par des échanges turbulents dans la couche de surface et la couche limite urbaine. Par exemple, ces estimés satellitaires n'incluent aucune information sur l'humidité de l'air, le rayonnement solaire, et le vent près de la surface, qui sont tous des facteurs complémentaires jouant des rôles importants sur le confort humain en milieu urbain.

Dans ce projet, une image plus complète de l'impact des caractéristiques du tissu urbain sur le confort thermique est accomplie à l'aide du système d'analyse et de prévision environnementale

d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Ce système combine de manière sophistiquée de l'information provenant d'observations atmosphériques, satellitaires, et de surface, à de l'information générée par le système de prévision numérique environnementale. Avec leur représentation complexe de la surface (naturelle et urbaine), de la couche limite terrestre avec ses effets de mélange, et des conditions atmosphériques avec tous ses processus physiques incluant les nuages, précipitation, et rayonnement, ce système numérique permet d'analyser l'état actuel et de prévoir l'état futur de l'environnement urbain avec un certain réalisme.

En mode prévision, l'horizon temporel est de l'ordre de quelques jours pour une approche tri-dimensionnelle complète, et de l'ordre de quelques semaines ou mois quand seulement la composante bi-dimensionnelle de la surface est intégrée à haute résolution (maille kilométrique ou plus petite) et couplée avec des systèmes atmosphériques à plus basse résolution (déterministe ou ensembliste). Cette approche scientifique qui utilise de manière optimale les différentes sources d'observations et les outils de modélisation sert à représenter plus adéquatement l'évolution temporelle et spatiale des effets des aménagements du tissu urbain sur la micro-météorologie et le confort thermique, permettant une utilisation plus intéressante pour des applications dans le domaine de la santé.

Le but principal de cette étude est de quantifier la sensibilité du confort thermique des humains aux caractéristiques de l'environnement urbain telles que sa géométrie, sa composition (édifices, rues, et parcs), les propriétés thermiques et radiatives de ses composantes, et la présence de végétation. La sensibilité du confort thermique humain est quantifiée principalement par la température, l'indice humidex, la température au thermomètre à globe humide aussi appelé le «Wet-Bulb Globe Température» (WBGT), et l'indice universel du climat thermique aussi appelé le «Universal Thermal Climate Index » (UTCI). L'étude fournit une évaluation de l'impact de plusieurs mesures possibles pour atténuer l'inconfort humain relié à des événements de chaleur intense à l'échelle locale (quartier) et à l'échelle d'une ville entière. La méthodologie est tout d'abord utilisée pour des tests sur la ville de Montréal. La méthode est ensuite généralisée afin d'être transposée à d'autres villes canadiennes et d'autres périodes. Un exemple est donné avec la ville de Toronto.

## 2. Outils de modélisation

Le système canadien de modélisation en milieux urbains a été développé à ECCC pour simuler et prévoir numériquement les processus de surface et l'évolution de la couche limite sur les villes. Ce système est basé sur le modèle atmosphérique GEM (pour “Global Environmental Multiscale”, voir Côté et al. 1998 et Zadra et al. 2008) utilisé avec une configuration à aire limitée.

Le modèle GEM intègre les équations dynamiques du mouvement de manière entièrement implicite sur une grille de calcul latitude-longitude, avec un schème semi-lagrangien pour les processus d'advection (Côté et al. 1998, Girard et al. 2014). En plus de représenter tous les processus physiques nécessaires à la modélisation atmosphérique (incluant le rayonnement atmosphérique, la rugosité associée aux ondes de gravité, le mélange relié à la turbulence atmosphérique, les nuages convectifs, et la microphysique des nuages), le modèle GEM considère de manière complexe plusieurs types de surface et leurs échanges turbulents avec l'atmosphère.

Les différents types de surfaces représentés par GEM incluent les surfaces naturelles (sols et végétation), les lacs, les glaciers, les océans, la glace marine, et les surfaces urbaines (artificielles). Les surfaces naturelles sont modélisées aux opérations de ECCC avec le schéma ISBA (pour “Interactions between Surface, Biosphere, and Atmosphere”, voir Noilhan et Planton 1989, et Bélair et al. 2003a, 2003b). Un schéma plus récent est SVS (pour “Soil, Vegetation, and Snow”), qui simule de manière plus complexe l'évolution de la température dans le sol de même que les effets de la végétation sur les échanges turbulents avec l'atmosphère (voir Alavi et al. 2016, et Husain et al. 2016). Les surfaces urbaines sont considérées par le schéma TEB (pour “Town Energy Balance”, voir Masson 2000), tandis que dans cette étude les surfaces naturelles sont modélisées avec le schéma ISBA (en non pas SVS).

Dans le modèle GEM, le couplage entre la surface et l'atmosphère est dans les deux sens (“two-way”, ou “en ligne”), avec la surface et l'atmosphère interagissant entre elles à chaque pas de temps. Dans ce cas les forçages atmosphériques fournis à la surface changent à chaque pas de temps suivant l'évolution dynamique prescrite par GEM; de la même manière les flux turbulents de chaleur, d'humidité, et de quantité de mouvement sont fournis à l'atmosphère à chaque pas de temps, et utilisés comme condition limite inférieure à la diffusion verticale dans GEM.

Les processus physiques sur les surfaces urbaines sont représentés dans TEB par une couche unique qui interagit avec l'atmosphère de GEM. La Figure 1 présente un diagramme qui décrit le modèle de canyon urbain qui est considéré dans TEB, avec une évolution pronostique des températures pour les routes, les toits, et les murs. Des bilans radiatifs sont évalués séparément pour les trois types de surfaces en considérant les effets d'ombrage reliés à la géométrie du canyon urbain. Les flux turbulents entre l'atmosphère et la combinaison toits plus canyons constituent la condition limite inférieure à la diffusion verticale du modèle GEM, et représente en fait la contribution des surfaces urbaines à l'évolution de la couche limite atmosphérique.

**Figure 1.** Diagramme décrivant le schéma TEB. Image adaptée de Masson (2000).

similaire la performance du modèle GEM urbain (avec TEB) sur d'autres villes, notamment Vancouver (Leroyer et al. 2014), et Toronto avec l'évaluation des indicateurs de confort thermique dans le cadre des Jeux panaméricains de 2015 (Leroyer et al. 2018).

Aussi d'intérêt pour l'étude actuelle, les travaux de Leroyer et al. (2011) ont montré qu'une version simplifiée du système urbain, bidimensionnelle, moins coûteuse en temps de calcul, a pu être utilisée pour simuler les processus urbains sur Montréal pour une saison estivale entière. Les conclusions positives obtenues lors de ces études confirment la capacité de l'outil GEM-TEB à simuler de manière relativement précise l'effet du tissu urbain sur la météorologie dans le contexte de chaleur estivale, ainsi que les effets dynamiques sur la couche limite atmosphérique et le développement de brise de lac (souvent observée sur Toronto).

À titre de comparaison entre les systèmes de modélisation de l'environnement urbain existants, GEM-TEB peut être classé dans la catégorie de complexité moyenne. Bien que peu d'études documentent la performance de TEB relative à d'autres modèles, les résultats d'une campagne internationale d'intercomparaison de différents modèles, dont TEB, sont présentés par Best et Grimmond (2015). Une des principales conclusions de cette étude est que la prévision en milieu urbain n'est pas systématiquement améliorée en ajoutant de la complexité, dès lors que les principaux processus physiques soient représentés basés sur une spécification réaliste des caractéristiques de l'environnement urbain.

En complément aux simulations habituelles de GEM, en mode tridimensionnelle, des simulations bidimensionnelles ont été produites avec le Système de Prévision de Surface (SPS, ou GEM-Surf dans la littérature). Avec SPS, la surface évolue de manière entièrement pronostique basée sur la même physique de surface que dans GEM, avec ISBA, SVS, et TEB. Mais l'interaction est à sens unique ("one-way", ou "hors-ligne"), avec les forçages atmosphériques prescrits par des simulations GEM déjà existantes, ou des analyses ou observations de surface. Aussi, les flux turbulents calculés par les différents schémas de surface n'ont pas d'impact dans l'atmosphère étant donné que la composante atmosphérique de GEM n'est pas utilisée.

L'avantage principal de cette approche est son coût informatique relativement peu élevé, qui permet l'intégration numérique sur de grands domaines avec des mailles assez fines (e.g., 100 m de résolution). La qualité des prévisions générées avec ce genre de raffinement a été démontrée dans

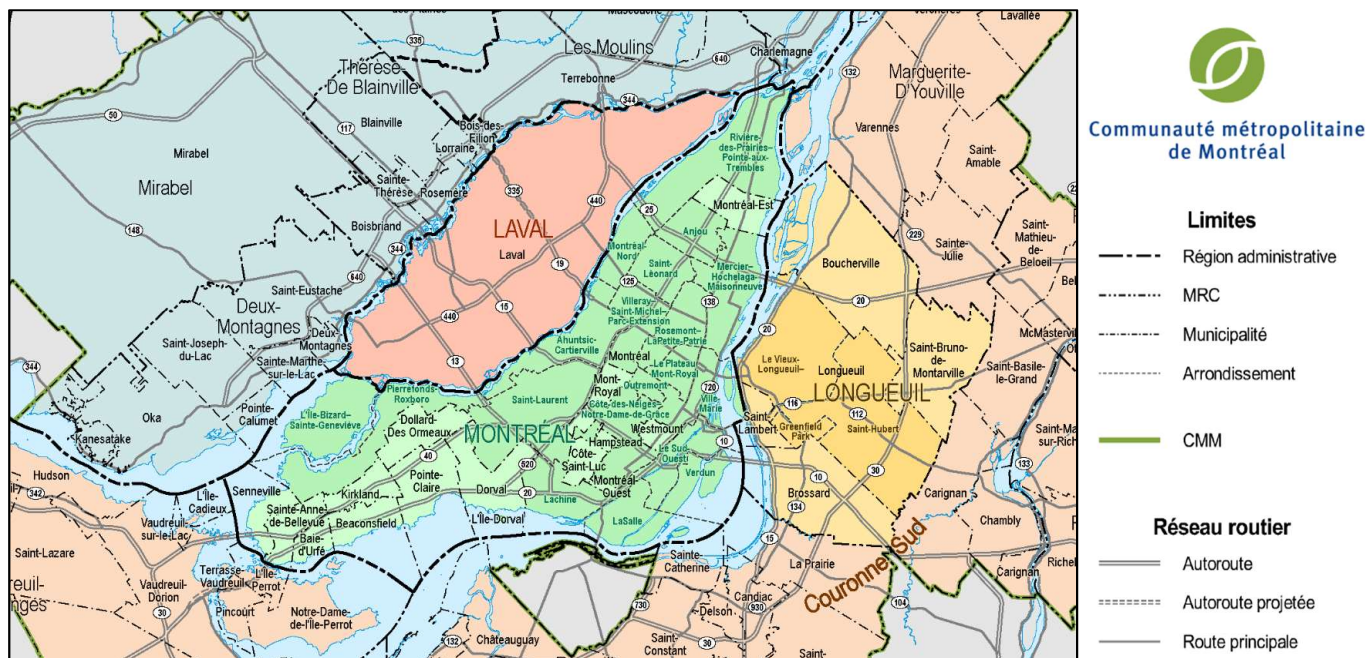
plusieurs études, incluant entre autres Leroyer et al. (2011) sur Montréal, et Bernier et al. (2011, 2012) sur la Colombie Britannique dans le contexte des Jeux olympiques d'hiver de 2010.

Il est important de réaliser que dans la littérature, les études d'impact d'aménagement urbain sur la chaleur sont réalisées selon des configurations expérimentales variées (taille des mailles, bi ou tridimensionnel, représentation des villes). L'utilisation de la configuration tridimensionnelle qui prend en compte toutes les interactions surface-atmosphère, ainsi que la haute résolution qui détaille la structure de la canopée urbaine semblent être les plus pertinentes pour l'étude de vagues de chaleur de courte durée. Des intercomparaisons entre les configurations 2D et 3D devraient néanmoins être menées à l'avenir afin de consolider les recommandations expérimentales.

### 3. Configurations expérimentales

Les expériences numériques sont mises en place suivant des protocoles récents en prévision numérique du temps en milieu urbain à ECCC. Le détail dans la description des surfaces urbaines revêt une grande importance dans ce projet. La configuration pour spécifier l'initialisation et la météorologie à plus grande échelle peuvent néanmoins varier selon la période et l'endroit étudiés.

La première partie de cette étude porte sur la région métropolitaine de Montréal, qui est présentée à la Figure 2.

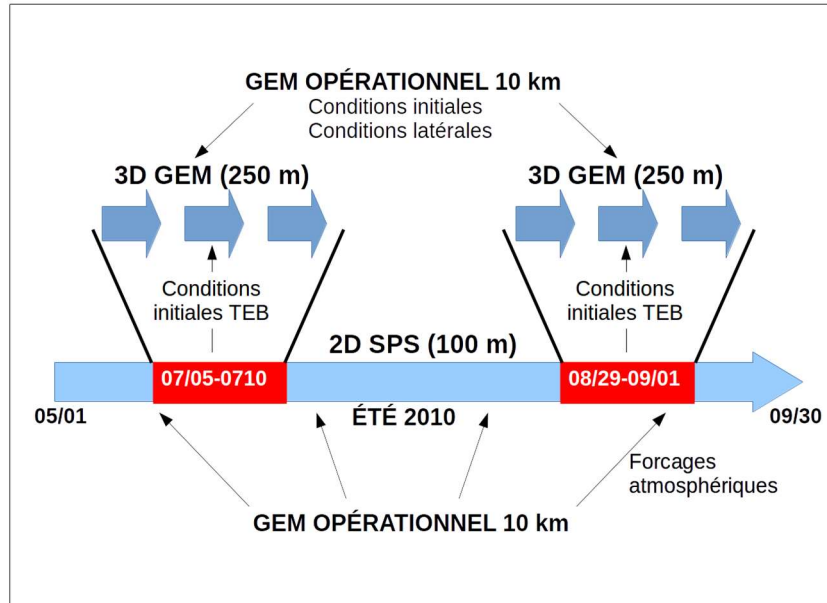


**Figure 2.** Carte d'une partie de la région métropolitaine de Montréal issue de la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM). L'île de Montréal et l'île Blizzard sont au centre de la carte en vert, incluant la ville de Montréal (en vert foncé) et les autres municipalités de l'île (en vert clair), avec le centre-ville qui occupe l'arrondissement Ville-Marie. La ville de Laval en rouge foncé est située sur l'île juste au nord de Montréal. Les régions administratives de la couronne nord sont en bleu, tandis que celles de la couronne sud de Montréal sont en jaune pour la MRC de Longueuil et en rouge clair pour les autres municipalités.

Dans la première phase de ce projet, le système bidimensionnel a tout d'abord été intégré sur une saison estivale entière pour l'année 2010, avec une maille de 250 m. Tel que présentés dans le diagramme de la Figure 3, les forçages atmosphériques pour cette intégration continue sont fournis par des prévisions à courte-échéance du système déterministe de prévision régionale opérationnel à ECCC. Cette intégration fournit une première évaluation statistique de l'impact des surfaces



urbaines sur les différents épisodes de chaleur intense ressenties durant cet été particulier. Ces résultats 2D servent de référence pour la variabilité spatiale des températures de l'air près de la surface.



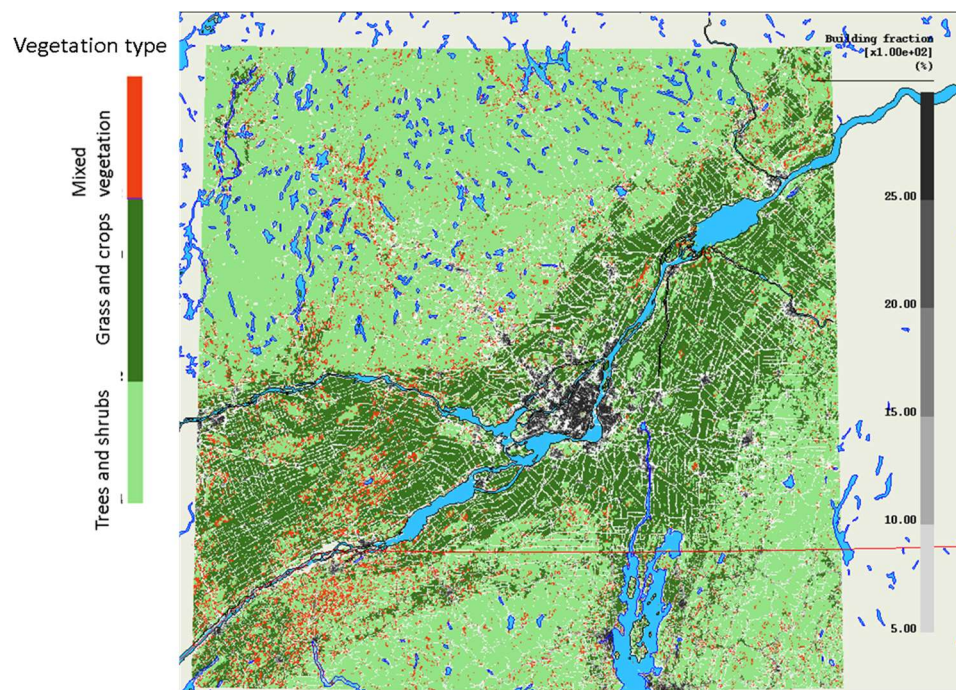
**Figure 3.** Diagramme décrivant les intégrations 2D et 3D qui ont été effectuées sur la ville de Montréal pour l'été 2010.

Pour obtenir une solution plus précise de l'effet des diverses mesures d'atténuation, des intégrations tridimensionnelles sont faites avec GEM, avec une maille de 250 m, sur les périodes de chaleur intense observées durant l'été 2010. Les conditions initiales et l'information nécessaire pour piloter aux frontières latérales les intégrations 3D sont fournies par le système de prévision régionale déterministe qui était opérationnel à l'époque au Service Météorologique du Canada (SMC). Des intégrations de 6 jours ont été faites pour deux vagues de chaleur, qui sont décrites dans la prochaine section.

Les deux domaines d'intégration, avec des mailles de 250 m sont présentés aux Figures 4 et 5. Les données orographiques sont obtenues à partir de la base de données CDED (pour "Canadian Digital Elevation Data-50'") et la mission radar de la navette spatiale de la NASA (pour "National Aeronautics and Space Administration" des États-Unis d'Amérique). Les caractéristiques des surfaces naturelles, couvertes de végétation, sont spécifiées avec la base de données de couverts pour les régions agricoles du Canada provenant du département d'Agriculture et Agroalimentaire

Canada (AAC). La couverture fractionnaire de surfaces d'eau libre est aussi spécifiée à partir de cette base de données.

Les nombreuses caractéristiques qui doivent être spécifiées pour les surfaces urbaines, incluant la couverture fractionnaire des rues et bâtiments, la géométrie des canyons urbains, les propriétés radiatives et thermiques des surfaces, sont déterminées à partir d'outils de Systèmes d'Information Géographique développés pour toute l'Amérique du Nord. Au Canada, elles sont initiées à partir de la base de données CanVec qui est distribuée par Ressources Naturelles Canada (RNCan) et qui inclut une centaine de couches thématiques. Une base de données de l'empreinte et de la hauteur des bâtiments est aussi intégrée pour le centre-ville de Montréal (et est disponible au Canada pour les quartiers des affaires de Toronto, Ottawa, Calgary et Winnipeg. Pour la partie américaine du domaine d'intégration de GEM (3D), de l'information semblable est obtenue à partir de la base de données NLCD (pour "National Land Cover Database", États-Unis d'Amérique) et OpenStreetMap. La description de l'hétérogénéité des surfaces obtenue avec cette méthode est relativement adaptée à la haute résolution des intégrations et à l'élaboration de scénarios. A titre de comparaison, des études similaires menées sur Montréal avec le modèle communautaire WRF utilisent une description plus simple des zones urbaines même en considérant des échelles sous-kilométriques de 333 m (e.g., Jandaghian et al 2017).

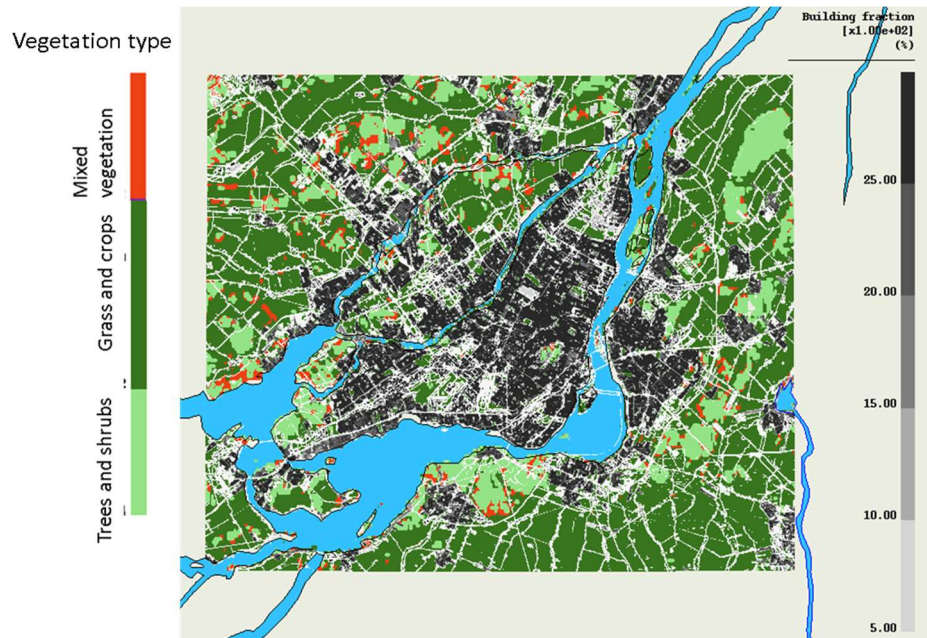


**Figure 4.** Carte montrant l'étendue du domaine d'intégration pour les simulations tridimensionnelles qui ont été produites avec GEM avec une maille de 250 m. Les tons de la

*légende à gauche décrivent l'occupation naturelle des sols (végétation). Les tons de gris de la légende à droite indiquent la fraction urbaine totale, c'est-à-dire la somme des fractions de couverture des routes et bâtiments.*

Sur la Figure 4, les cultures et la végétation basse de la vallée du Saint-Laurent sont faciles à distinguer (en vert foncé). Cette région, entourée de forêts et d'arbustes au nord-ouest et au sud-est (en vert pâle), est très peuplée, avec de nombreuses routes que même une maille de 250 m parvient à détecter. La région urbaine de Montréal est bien visible au centre de la figure, avec un certain niveau de variabilité spatiale pour la densité de routes et de bâtiments (en tons de gris).

Une carte plus détaillée de Montréal et de ses environs immédiats, sur le domaine d'intégration du système bidimensionnel SPS, est présentée à la Figure 5. Sur cette carte les principales artères routières et la fraction de couverture urbaine (routes et bâtiments) sont mieux définies spatialement. Les régions habitées sur l'île de Montréal, de même que sur l'île de Laval et sur les rives sud et nord sont facilement reconnaissables.



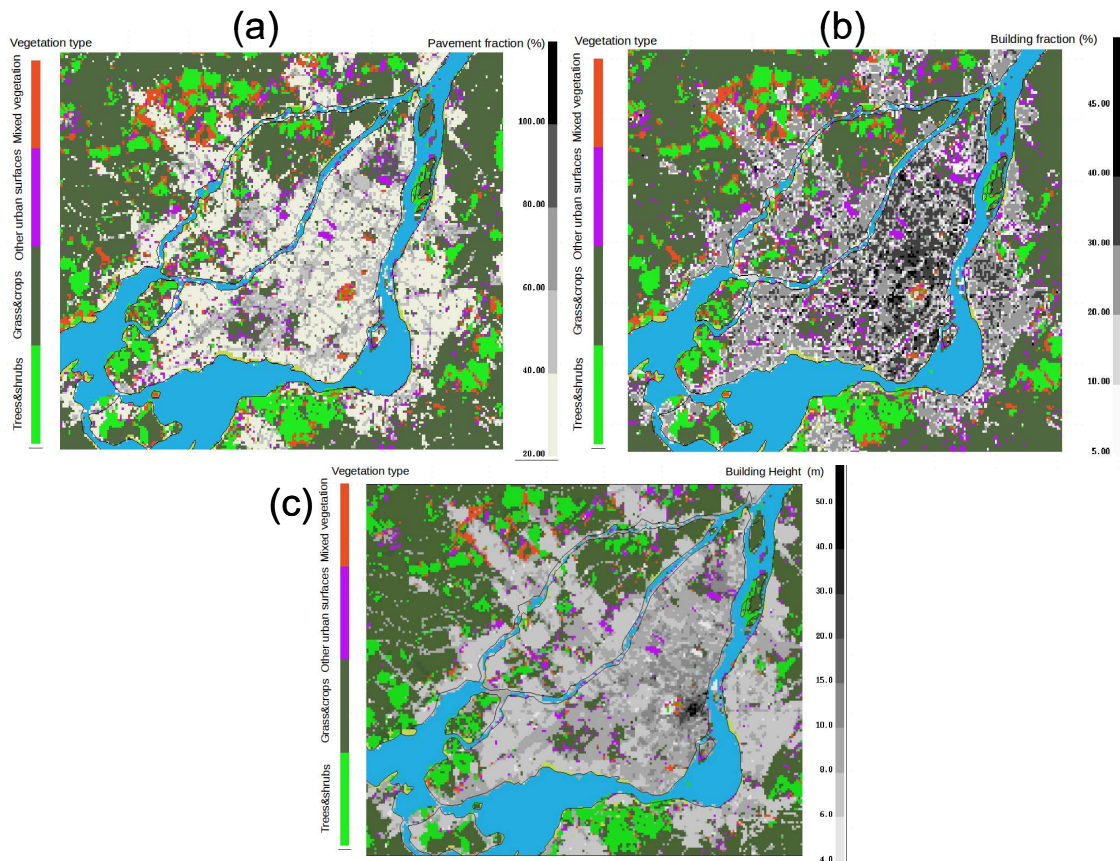
**Figure 5.** Comme la Fig. 3 mais pour le domaine d'intégration bidimensionnel de SPS, avec une maille de 100 m.

Il est à noter que l'étendue horizontale du domaine GEM 3D (Figure 4) est beaucoup plus grande que celle de SPS 2D (Figure 5). Cette grandeur de domaine est nécessaire pour les intégrations atmosphériques de manière à diminuer l'impact négatif associé aux frontières latérales du domaine d'intégration. En pratique ces frontières sont mises le plus loin possible de la région d'intérêt, dans la mesure du possible considérant le coût informatique important de ces intégrations. Cette



contrainte n'existe pas pour SPS 2D pour lequel il n'y a pas d'échanges ou transport dans l'horizontal.

Étant donné que les intégrations GEM 3D sont celles qui sont utilisées pour évaluer l'impact des différentes mesures d'atténuation, la distribution spatiale des caractéristiques urbaines de la grande région de Montréal est présentée à la Figure 6, montrant les fractions de couverture des routes, édifices, de même que la hauteur moyenne des édifices sur la portion centrale du domaine d'intégration à 250 m.



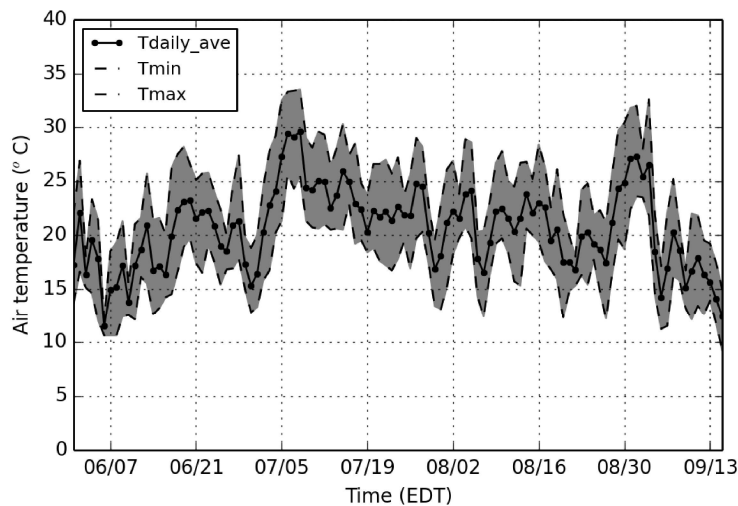
**Figure 6.** Caractéristiques des surfaces urbaines pour les intégrations tridimensionnelles de GEM. Les tons de gris sont pour les fractions de couverts associées aux a) pavés (routes, aires de stationnement, en %) et aux b) édifices (en %); pour c) la hauteur moyenne des édifices (m) est montrée. Les autres couleurs sont pour les surfaces végétalisées et non urbaines.

Selon la classification utilisée pour les tests numériques présentés dans ce rapport, la fraction de couverture de pavés telle que montrée à la Figure 6a est plus grande pour la partie centrale-est de l'île de Montréal incluant les régions industrialisées épaulant l'autoroute transcanadienne pas très

loin de l'aéroport de Dorval. D'autres endroits ont aussi de larges fractions de couverture de pavés, incluant la partie est de l'île, le centre-ville, et Laval. De la même manière, la couverture fractionnaire des édifices (Figure 6b) est aussi plus grande sur la partie centrale-est de l'île de Montréal, avec des valeurs de 30-40%. La hauteur moyenne des édifices (Figure 6c) est plus grande comme on peut s'y attendre sur le centre-ville de Montréal, avec des valeurs de l'ordre de 30-50 m. Des valeurs de 10-20 m sont utilisées pour les aires juste au nord du centre-ville, et d'environ 6-10 m pour les autres zones urbaines.

#### 4. Études de cas et intégration contrôle

Pour tester l'impact de diverses mesures d'atténuation sur la chaleur intense en milieu urbain, deux événements qui se sont produits au cours de l'été 2010 sont examinés. Une première période avec des conditions exceptionnelles sur le sud du Québec s'est produite du 5 au 9 juillet 2010. À Montréal, des températures maximales de l'ordre de 35 °C et des températures minimales au-dessus de 20 °C ont été observées pour plusieurs journées consécutives. L'humidex a atteint des valeurs de 42 à 45 le jour. Avec cette vague de chaleur, le mois de juillet 2010 a été le deuxième le plus chaud depuis 1959 (après le mois de juillet 2018).



**Figure 7.** *Séries temporelles de la température de l'air à la surface (2 m) moyennée pour 3 stations d'observations sur l'île de Montréal (Sainte-Anne de Bellevue, aéroport Pierre Elliott Trudeau, et McTavish) pour l'été 2010. La ligne pleine foncée montre la moyenne journalière pour ces 3 stations, tandis que les lignes du bas et du haut montrent les valeurs moyennes pour les températures minimales et maximales journalières. La zone ombragée indique l'étendue journalière de la température de l'air à la surface.*

Une deuxième période d'intérêt est celle du 29 août au 3 septembre 2010 (6 jours) durant laquelle une vague de chaleur tardive a été observée. Considérée comme inhabituelle dans le sud du Québec, cette vague de chaleur a eu un impact beaucoup moins grand sur la santé publique des citoyens Montréalais comparée à celle du début juillet. Dans le reste du Québec, cette période est considérée comme exceptionnelle, c'est-à-dire comme n'ayant jamais été observée pour cette période tardive de l'été.

Les deux événements de chaleur intense sont facilement repérables sur les séries temporelles de la température de l'air à la surface pour 3 stations sur l'île de Montréal (Sainte-Anne de Bellevue, aéroport Pierre Elliott Trudeau, et McTavish) montrées à la Figure 7. La température de l'air était de l'ordre de 15-25°C au début de l'été 2010, jusqu'à la première semaine de juillet quand un réchauffement soudain a mené au premier événement de chaleur intense examiné dans cette étude. Les conditions se sont ensuite améliorées et sont restées stables avec des températures confortables entre 15-30°C pour le reste du mois de juillet et pour une grande partie du mois d'août. La deuxième vague de chaleur est ensuite observée à la fin du mois d'août et début septembre, suivie immédiatement par un refroidissement abrupt.

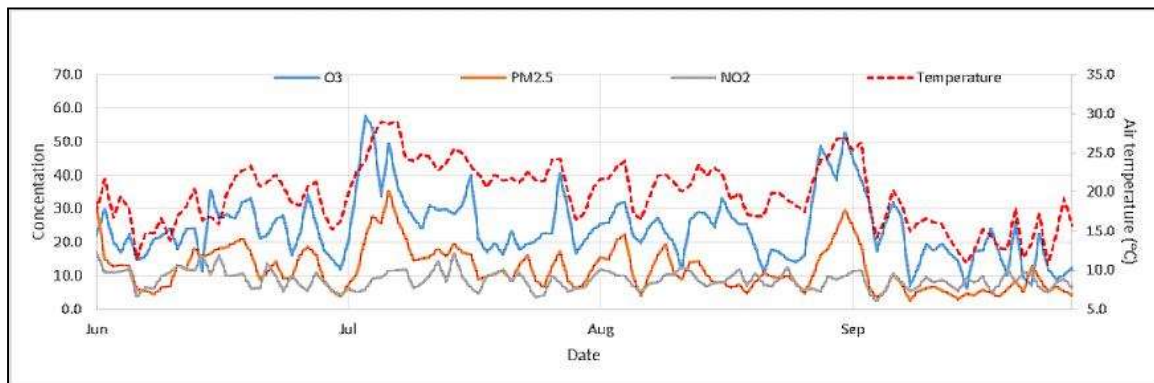


Figure 8. *Séries temporelles de la concentration (en ppb) de trois polluants atmosphériques, l'ozone (bleu), les particules fines avec un diamètre de 2,5 micron et moins (orange), et le dioxyde d'azote (gris), ainsi que la température de l'air à la surface (2 m) (tirets rouges) moyennées pour 3 stations d'observations sur l'île de Montréal pour l'été 2010.*

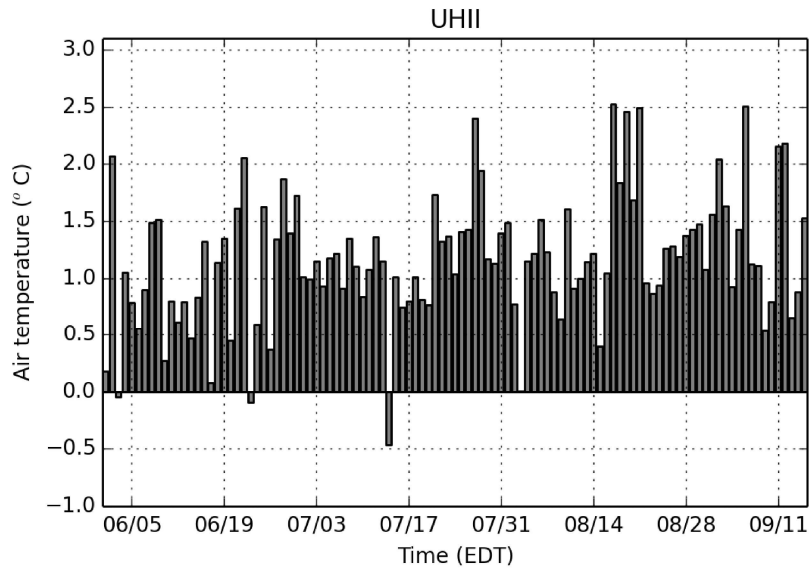
La qualité de l'air est également analysée sur la Figure 8 afin de rechercher des facteurs environnementaux susceptibles d'avoir eu un impact sur la santé publique. L'évolution des concentrations de trois polluants, l'ozone ( $O_3$ ), les particules fines de diamètre inférieur à 2,5

micromètres (PM<sub>2.5</sub>) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) moyennes quotidiennement à trois stations sur l'île de Montréal est montrée pour l'été 2010. Les vagues de chaleur identifiées sont relativement bien corrélées avec des périodes avec des valeurs plus élevées d'ozone et de PM<sub>2.5</sub> dans l'air, mais pas avec le dioxyde d'azote. En revanche, les valeurs atteintes entre les deux périodes sont similaires, autour de 50 ppv pour l'ozone et 30 ppv pour les PM<sub>2.5</sub>. Les conditions de qualité de l'air ne semblent donc pas être particulièrement différentes entre les deux épisodes.

Comme on peut s'y attendre, les événements de chaleur ont été plus intenses pour la zone urbaine de Montréal que pour les zones environnantes qui sont moins urbanisées. Pour illustrer ce fait, l'évolution temporelle de l'indice de l'îlot de chaleur urbain (*Urban Heat Island Index* UHII) pour Montréal est montrée à la Figure 9, basée sur la différence de température de l'air entre deux stations d'observations, une située dans la ville de Montréal (McTavish) et une autre à l'extérieur de la ville près de l'aéroport de Mirabel dans un environnement rural. Les observations montrent qu'effectivement la température de l'air était en moyenne plus élevée en zone urbaine, avec une certaine variabilité temporelle durant cette saison estivale. De manière générale, l'indice UHII moyen est de l'ordre de 1°C, mais peut être aussi grand que 2.5°C pour certaines journées, comme par exemple au mois d'août. On peut voir que l'indice UHII est négatif pour seulement 3 jours durant l'été 2010.

L'indice UHII est important dans le contexte de l'étude actuelle, car il fournit un estimé rapide du succès optimal qui peut être accompli par les mesures d'atténuation qui sont testées numériquement dans cette étude. Il est peu probable effectivement que ces mesures aient l'effet de rendre la température de l'air plus faible que celle des régions avoisinantes non urbaines (même si c'est possible). Il est à noter que l'indice UHII est de l'ordre de 1.0°C pour le premier événement et de 1.5°C pour le second événement. Ces valeurs sont des moyennes journalières et peuvent être plus élevées pour certaines parties de la journée. Basé sur ces chiffres, il est probable que les mesures d'atténuation décrites plus bas aient plus de succès pour le deuxième événement, à la fin août début septembre.

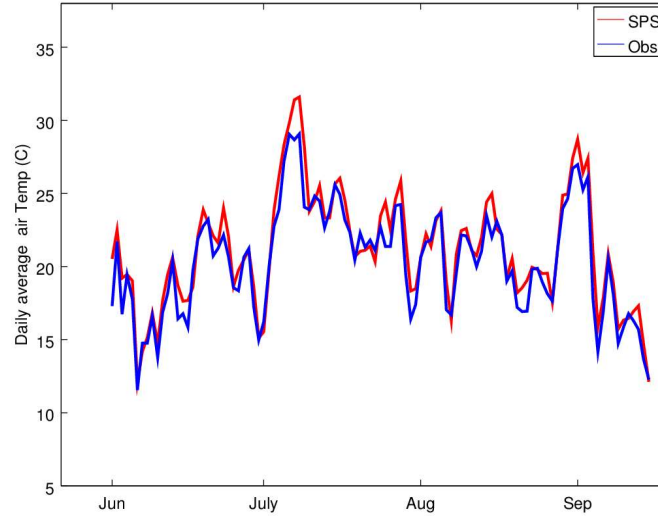




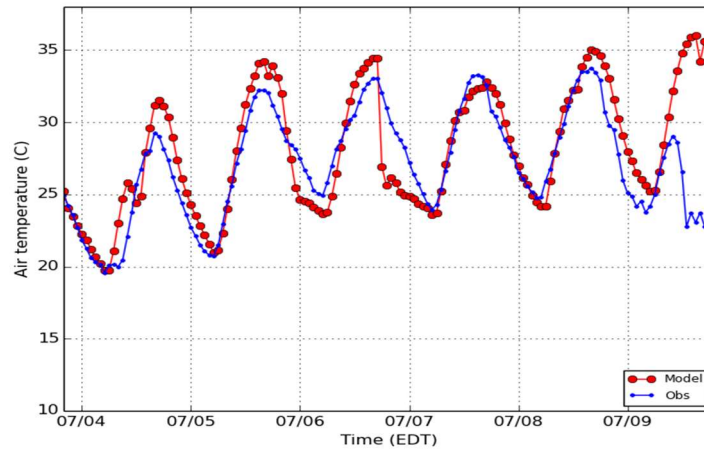
**Figure 9.** Série temporelle de la moyenne quotidienne de l'indice d'îlot de chaleur urbain (UHII pour "Urban Heat Island Index") pour Montréal durant l'été 2010. L'indice est la différence de la température de l'air à la surface (2 m) mesurée à deux stations, une en zone urbaine (McTavish) et une autre à l'extérieur de la ville (Mirabel).

Tel que montré à la Figure 10, l'intégration bidimensionnelle effectuée pour l'été 2010 complet avec le système SPS représente de manière assez précise l'évolution temporelle de la température de l'air à Montréal. Plus important encore, le système numérique est capable de simuler les événements de chaleur intense observés au début juillet et à la fin août. En moyenne sur les trois stations, la simulation par SPS est en général un peu plus chaude que ce qui a été observé. Ceci est spécialement vrai durant le premier événement pour lequel SPS semble surestimer la température de l'air par 2-3°C. Cette surestimation est moins grande pour le deuxième événement, i.e., environ 1°C. Différentes hypothèses sont à l'étude. Premièrement, la présence de polluants en quantité plus importante peut avoir pour effet de diminuer l'énergie solaire qui atteint la surface, alors que le modèle ne prend pas en compte l'impact des polluants sur la météorologie (ou plutôt de façon très simplifiée). La question de la représentativité des mesures traditionnelles en milieu urbain est aussi un enjeu. Les mesures conventionnelles d'ECCC sont en effet prises au-dessus d'une étendue de gazon, tandis que le modèle représente tous les types de couverts présents dans la maille de calcul. Par temps très chaud, les surfaces pavées peuvent devenir extrêmement chaudes ce qui contribue à l'augmentation de l'air au-dessus. Cet aspect continuera d'être analysé dans des travaux futurs. La prévision numérique est améliorée en ce qui concerne l'évolution temporelle et journalière de la température de l'air quand le modèle atmosphérique complet (tridimensionnel) est utilisé. Dans les Figures 11 et 12, les prévisions numériques pour des intégrations de 6 jours de GEM sont

comparées contre la moyenne des observations de température de l'air pour les deux événements de chaleur intense. A titre de comparaison, ces valeurs sont largement au-dessus des normales climatiques de la région qui sont respectivement de 26.9°C et de 16.1 °C pour le maximum et le minimum quotidiens en juillet et de 25.3 °C et 14.8 °C en Août sur la période 1981-2010. L'écart est plus important la nuit.

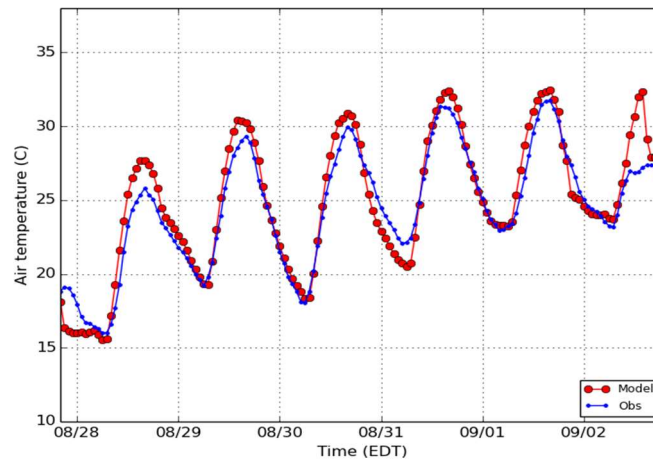


**Figure 10.** Comparaison pour l'été 2010 entre la température de l'air (2 m) observée (en bleu) et simulée par SPS bidimensionnelle à 250-m de maille (en rouge), moyennée pour 3 stations à Montréal (même stations que pour la Figure 7).



**Figure 11.** Comparaison entre la température de l'air observée (en bleu) pour 3 stations à Montréal (même stations que pour les Figures 7 et 9) avec la prévision numérique tridimensionnelle de GEM avec une maille de 250 m, pour le premier événement de chaleur intense au début juillet 2010.

Pour le premier événement (début juillet, Figure 11), on peut voir que la prévision du modèle (en rouge) surestime la température durant le jour d'environ 2°C pour les trois premières journées. La performance du modèle est meilleure pour les journées qui suivent, malgré une chute abrupte de la température le 6 juillet. Après une étude plus approfondie de cette journée, il a été déterminé que cette évolution rapide de la température de l'air est reliée à la présence de précipitations intenses et localisées sur l'île de Montréal, qui ne sont pas simultanées dans le modèle et dans les observations (bien que les radars indiquent la présence possible de cellules localisées dans la région). Il est aussi à noter que la prévision GEM ne représente pas bien la température pour la dernière journée d'intégration, qui correspond à la fin de l'événement de chaleur intense. Ceci est relié à la longue durée de l'intégration numérique du modèle tridimensionnel, qui par sa nature prédictive rend difficile la capture du changement de la situation météorologique à cette échelle sur un horizon de 6 jours. (Les simulations bidimensionnelles de SPS n'ont pas ce problème car elles sont forcées par des conditions météorologiques analysées.)

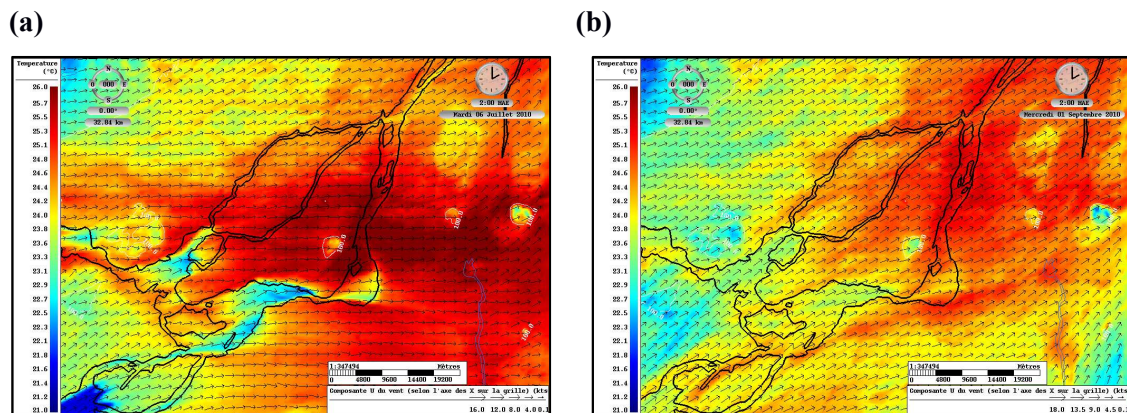


**Figure 12.** Comparaison entre la température de l'air observée (en bleu) pour 3 stations à Montréal (même stations que pour les Figures 7 et 9) avec la prévision numérique tridimensionnelle de GEM avec une maille de 250 m, pour le deuxième événement de chaleur intense à la fin août début septembre 2010.

Les résultats montrés à la Figure 12 indiquent que le deuxième événement de chaleur est encore mieux prévu par le modèle GEM 250 m. Un réchauffement graduel est observé pour cette période, bien représenté par le modèle atmosphérique. De manière similaire au cas précédent, GEM surestime la température de l'air durant le jour au début de la période, par 2°C le 28 août et par 1°C le 29 août. Cette difficulté que semble avoir le modèle à bien prévoir la température maximale au début de l'intégration pourrait aussi être reliée à l'ajustement ('spinup') des variables prédictives de TEB, un sujet qui mérite un examen plus approfondi et qui pourrait avoir des conséquences sur

la prévision opérationnelle du SMC. La prévision pour le reste de la période est excellente, sauf pour la dernière journée qui marque la fin de de l'évènement, pour la raison déjà énoncée.

La figure 13 montre des cartes choisies au cours des deux évènements de chaleur lorsque des températures dépassant 25 °C étaient encore présentes au cours de la nuit (A 0200 heure locale). L'est de l'île de Montréal est en général plus chaud que l'ouest. Pour les deux périodes, un panache de températures plus élevées se retrouve également en aval de l'île par rapport au vent dominant, qui est plutôt d'ouest en juillet et du sud-ouest en Août. La haute résolution utilisée avec la configuration 3D du modèle permet de mieux prendre en compte la complexité des situations météorologiques sur plusieurs journées. Il est à noter que la force du vent était modérée au cours des deux épisodes, avec des maximums diurnes autour de 4-6 m s<sup>-1</sup>, et des minimums nocturnes autour de 3 m s<sup>-1</sup> pour la période d'Aout et un peu moins réguliers pour la période de juillet (figures montrées dans l'annexe A).



**Figure 13.** Carte des températures (couleurs) et du vent (flèches) près de la surface la nuit lors des minimums nocturnes pour le 6 juillet (a) et le 1<sup>er</sup> septembre (b) 2010.

## 5. Mesures d'atténuation

Trois types de scénarios sont examinés dans cette étude, tels que décrits dans le Tableau 1. Une revue de littérature est également exposée à titre de comparaison bien qu'elle ne soit pas exhaustive. En effet le nombre d'études à ce sujet est en très forte augmentation depuis ces dernières années, pour lesquelles il existe une grande variation des configurations et des conditions étudiées. Les principaux leviers sur lesquels il est possible d'agir pour diminuer la chaleur sont présentés dans les prochains paragraphes.

**Tableau 1:** Les mesures d'atténuation testées.

| Scénario                                      | Modifications à la surface   | Endroit des modifications   |
|---|--|---|
| <i>a) propriétés thermiques et radiatives</i> |  |   |
| Exp_AL1                                       | Augmentation de l'albédo des toits   | 85% de l'île de Montréal  |
| Exp_AL2                                       | Augmentation de l'albédo des toits   | 95% du quartier Rosemont  |
| Exp_AL3                                       | Aug. de l'albédo des toits, murs, et routes  | 85% de l'île de Montréal  |
| Exp_AL4                                       | Aug. de l'albédo des toits, murs, et routes  | Région Métropol. Montréal   |
| Exp_AL5                                       | Changement aux propriétés radiatives (albédo et émissivité) et thermiques (capacité et conductivité thermique) des toits   | 85% de l'île de Montréal  |
| Exp_AL6                                       | Aug. de l'albédo des routes  | 85% de l'île de Montréal  |
| Exp_AL7                                       | Aug. de l'albédo des murs  | 85% de l'île de Montréal  |
| <i>b) végétation et humidité des sols</i>     |  |   |
| Exp_VG1                                       | Aug. de l'eau du sol jusqu'à atteindre la capacité au champ, qui dépend du type de sol (sable, argile, limon).   | Cultures près de Montréal   |
| Exp_VG2                                       | Ajout de végétation (herbe) dans la ville (remplacement de la moitié des surfaces imperméables par des surfaces poreuses lorsqu'elles occupent entre 20 et 50 % du point de grille | Toute l'île de Montréal   |
| Exp_VG3                                       | Même chose que b2, avec sols humides (jusqu'à $0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ d'eau du sol en ville)  | Toute l'île de Montréal   |
| Exp_VG4                                       | Même chose que b2 mais ajout de végétation haute (arbres à feuilles caduques)  | Toute l'île de Montréal   |
| Exp_VG5                                       | Même chose que b4, avec sols humides (jusqu'à $0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ d'eau du sol en ville)  | Toute l'île de Montréal   |
| <i>c) autres</i>                              |  |   |
| Exp_HF1                                       | Ajout de flux anthropiques dus au trafic routier   | Toute l'île de Montréal   |
| <i>d) combinaison de scénarios</i>            |  |   |
| Exp_VG2AL6                                    | Aug. de l'albédo des routes et ajout de végétation basse (herbe) dans la ville   | Albédo pour 85% de l'île de Montréal<br>Végétation pour toute l'île de Montréal |
| Exp_VG3AL6                                    | Aug. de l'albédo des toits, murs, et routes et ajout de végétation basse (herbe) dans la ville et irrigation   | Albédo pour 85% de l'île de Montréal<br>Végétation pour toute l'île de Montréal |

|            |  |   |
|------------|--|---|
| Exp_VG2AL3 | Aug. de l'albédo des toits, murs, et routes et ajout de végétation basse (herbe) dans la ville | Albédo pour 85% de l'île de Montréal<br>Végétation pour toute l'île de Montréal |
| Exp_VG3AL6 | Aug. de l'albédo des routes et ajout de végétation basse (herbe) dans la ville et irrigation   | Albédo pour 85% de l'île de Montréal<br>Végétation pour toute l'île de Montréal |

***a) Modifications des propriétés thermo-radiatives (Exp\_AL)***

Le premier levier est de considérer des modifications des propriétés thermiques et radiatives des matériaux utilisés pour les bâtiments (toits ou façades) et les surfaces imperméables (routes). Les surfaces urbaines avec de faibles albédos absorbent durant le jour une grande partie du rayonnement solaire incident. Selon leur conductivité et capacité thermique ces surfaces retransmettent éventuellement à l'atmosphère une portion de cette énergie par émission thermique. Ceci se produit normalement à la fin de la journée et durant la nuit, produisant l'effet d'îlot de chaleur urbain. Parmi toutes les surfaces urbaines, les toits couvrent normalement une aire d'environ 10% à 15% d'une ville (Rettner 2009). Dans cette optique, il a été montré à l'aide de modèles numériques que des toits frais ou blancs qui réfléchissent jusqu'à 80% de l'énergie solaire (comparée à 15% pour des toits normaux) peuvent diminuer la température en milieu urbain. Par exemple, Masson et al. (2013, 2014) ont montré que la rénovation d'édifices et la modification des pratiques d'isolation des maisons, combinés avec l'utilisation de couleurs plus moins foncées pour les toits, peut mener à une réduction importante des îlots de chaleur urbain, de l'ordre de 0.5 °C pour la ville de Toulouse, France. D'autre part, Krayenhoff et Voogt (2010) ont montré qu'une augmentation moyenne à l'échelle d'une ville de 0.10 pour l'albédo peut mener à une réduction de la température maximale de l'ordre de 0.3 à 1.1 °C pour une journée ensoleillée typique d'été dans une ville aux latitudes moyennes. Plus près de nous, dans une étude sur Montréal, Touchaei et al. (2016) ont examiné l'effet d'augmenter l'albédo sur l'inconfort thermique ressentie lors d'une vague de chaleur en juillet 2015. Utilisant le modèle WRF-CHEM (pour 'Weather and Research Forecast - Chemistry'), ils ont observé qu'une telle mesure peut mener à une diminution de l'ordre de 1 °C pour la température de l'air à la surface. Jandaghian et al. (2017) ont étudié avec la vague de chaleur d'Août 2009 à Montréal à l'aide d'une configuration similaire mais en utilisant plusieurs paramétrisations physiques. En moyenne, l'augmentation de l'albédo des routes, toits et murs diminuent la température de l'air de 0.2 °C avec un léger effet de diminution des précipitations. Une autre étude, celle de Taha et al. (2000), montre un impact semblable pour trois villes en



Californie, USA. En Australie, Jacobs et al. (2018) ont modélisé un ensemble de 12 vagues de Chaleur à Melbourne avec WRF (2 km) et ont trouvé que l'ajout de toits blancs ont un impact plus important le jour mais pas la nuit de l'ordre de -0.4 °C.

Le fait de rendre plus réfléchissantes les surfaces urbaines mène à des effets bénéfiques au-delà d'une diminution de la température de l'air. Certaines études comme Taha et al. (2000, 2008a,b) et Touchaei et al. (2016) ont montré une amélioration de la qualité de l'air reliée à une évolution modifiée de la couche limite atmosphérique, qui a pour rôle de mélanger verticalement les polluants atmosphériques. Un autre effet, de nature plus économique celui-là, concerne la diminution de la consommation électrique due à la climatisation, reliée à un réchauffement moins grand des édifices en lien avec un rayonnement solaire et une température de l'air moins élevés. Il faut mentionner que l'augmentation de l'albédo des surfaces urbaines n'a pas un effet égal sur toutes les villes, et pour toutes les périodes de l'année. L'impact de ce genre de modification au tissu urbain dépend comme on peut s'y attendre de la météorologie locale, la saison, la latitude, l'emplacement géographique, et du caractère spécifique des surfaces urbaines pour une ville donnée. Par exemple, les villes qui souffrent de chaleur intense malgré une couverture nuageuse importante vont moins bénéficier de mesures reliées à l'albédo de la surface. Aussi, en général, un plus grand impact est attendu pour des situations météorologiques stagnantes et dégagées - et l'inverse pour des situations avec forts vents (avec plus d'advection).

#### ***b) Augmentation de la végétation avec ou sans humidification (EXP\_VG)***

Le second levier est basé sur l'augmentation de la végétation en milieu urbain associé ou non à l'humidification des sols et de la végétation. La quantité de végétaux dans une ville peut être augmentée de plusieurs manières. De la végétation basse peut être ajoutée sur les toits pour former des toits verts; des plantes grimpantes peuvent être utilisées pour verdir les murs de certains édifices; des parcs peuvent être agrandis ou créés; des arbres peuvent être plantés dans les rues, à l'arrière d'édifices, dans les terrains vagues ou désaffectés; et les régions en périphérie des villes incluant banlieues et autres peuvent avoir leur verdure modifiée et augmentée. L'humidification des surfaces et des sols peut être obtenue par irrigation ou par recyclage des eaux de pluie. L'effet général de la végétation est principalement relié à son rôle dans le bilan énergétique en surface. La présence de végétation augmente l'évapotranspiration, ce qui diminue la température de la surface et de l'air. Par conséquent elle peut aussi avoir pour effet d'humidifier la couche limite atmosphérique ce qui peut dégrader le confort thermique si l'humidité est déjà élevée (comme en



Amérique du Nord l'été). L'humidification des sols peut être obtenue par des systèmes d'irrigation régulés dans le temps, ou en considérant le recyclage de l'eau de pluie.

En Australie où les canicules sont souvent accompagnées de sécheresse, l'air et le sol sont plutôt secs. Broadbent et al. (2018) ont évalué différents scénarios d'irrigation contrôlée et ont trouvé une diminution de la température diurne de 2.3 °C en moyenne. Un autre effet important est l'augmentation de l'ombrage (bénéfique) produite par la végétation haute. La qualité de l'air peut être améliorée par la suppression de polluants solides et gazeux. Tel que démontré par plusieurs études numériques, ces différentes mesures ne sont pas toutes égales en ce qui concerne l'atténuation de l'inconfort dû à la chaleur en milieu urbain.

Une de ces mesures, l'augmentation de la présence d'arbres dans le canyon urbain, a été démontrée par son effet sur l'évapotranspiration et par son ombrage comme ayant effectivement un impact positif sur l'atténuation de la chaleur dans les villes (e.g., Bowler et al. 2010; Loughner et al. 2012). Coutts et al. (2016) ont étudié cet impact dans la ville de Melbourne, Australie, et ont montré à l'aide de mesures une diminution de la température moyenne journalière, mais l'effet de refroidissement est local avec une grande dépendance sur le niveau de couverture des arbres, la géométrie de l'environnement urbain, et les conditions météorologiques. Ils ont aussi noté que l'effet sur la température était moins grand dans les canyons plus profonds à cause de l'effet d'ombrage des édifices plus élevés; l'impact était plus grand pour les canyons peu profonds. Il faut mentionner qu'il y a plusieurs défis reliés à l'implémentation d'une telle solution, entre autres pour la maintenance de ces arbres et la disponibilité en eau qui peut être faible. Aussi, ces arbres peuvent avoir un effet négatif sur le confort thermique des humains, à cause d'une augmentation possible de l'humidité dans les bas niveaux de l'atmosphère (Souch et Souch 1993, Zhang et al. 2013) et à cause d'une diminution de la ventilation, sous les arbres mais aussi possiblement à l'échelle de la ville reliée à l'augmentation de la rugosité de la canopée (Park et al. 2012). De plus, la température durant la nuit peut augmenter à cause d'une réduction de la "vue libre" vers le ciel ("sky view factor") et l'émission thermique associée à la présence d'arbres dans le canyon urbain (Charalampopoulos et al. 2013, Spronken-Smith and Oke 1998).

Ces études suggèrent que ces mesures d'atténuation pourraient surtout avoir un impact positif le jour, et pourraient même avoir un impact marginal (voire négatif) durant la nuit. Cependant la récente étude de Jacobs et al. (2018) indique quant à elle une diminution de la température de l'ordre de 0.7 °C la nuit et peu d'impact le jour. Une autre manière d'augmenter la présence de

végétation en milieu urbain est par l'agrandissement de parcs existants, ou par la création de nouveaux parcs. Des observations ont montré que la température de l'air dans les parcs est moins élevée comparé à l'environnement urbain avoisinant. Plus précisément, en analysant plusieurs études sur différentes villes, Bowler et al. (2010) ont évalué que cette différence de température entre les parcs et leur environnement avoisinant peut-être de l'ordre de 0.9 °C le jour et de 1.1 °C la nuit. Upmanis et al. (1998) ont montré qu'un parc de 150 ha (15,000 m<sup>2</sup>) peut avoir un effet sur la température (d'environ 3-4 °C) jusqu'à 1 km de distance dans des conditions météorologiques favorables. Comme on peut s'y attendre, l'influence de petits parcs est très probablement moins remarquable. Même si elle peut paraître éloignée spatialement, la végétation en périphérie ou à l'extérieur immédiat des villes peut aussi jouer un rôle important sur le confort thermique, même au centre de la ville.

Une approche qui est souvent mentionnée pour l'atténuation des événements de chaleur en ville est le remplacement de toits conventionnels par des toits avec végétation, i.e., les toits verts. Cette stratégie de verdissement peut sembler plus efficace pour les quartiers les plus denses. Plusieurs études ont montré une certaine efficacité des toits verts. Les méthodes numériques utilisées pour ces études sont néanmoins inégales, et récemment De Munck et al. (2018) ont conclu que les toits verts étaient une mesure moins efficace que le verdissement à la surface, même lorsqu'il est irrigué. L'impact sur la consommation d'énergie des bâtiments est en revanche avantageux. Bass et al. (2003) dans une étude numérique ont remplacé dans la ville de Toronto 50 % (une fraction considérable) des toits par des surfaces recouvertes de végétation, avec pour effet de diminuer de 0.5 °C la température en ville pour le cas sans irrigation et de 2 °C avec irrigation. Gill et al. (2007) ont aussi montré dans leur étude sur Manchester, U.K., que la température de l'air pouvait diminuer dans les régions les plus denses de la ville avec l'utilisation de toits verts. Des conclusions similaires ont été obtenues par d'autres études, sur d'autres villes, comme Rosenzweig et al. (2009) sur la ville de New York, Li et al. (2014) et Yang et al. (2015) sur Baltimore et Washington D.C. Ajouter de la végétation sur les toits a aussi pour effet d'augmenter l'efficacité énergétique des édifices. Jacquet (2011) a montré avec son étude sur Montréal que des toits verts peuvent réduire la consommation électrique associée à la climatisation des édifices en été et au chauffage en hiver. D'autres études ont montré que les toits verts avaient aussi un effet positif sur la qualité de l'air, comme les études de Taha et al. (2005), (2008a), et (2009a,b), portant sur plusieurs villes de Californie telles que Sacramento, Los Angeles, et San Diego. Les principaux désavantages des toits verts sont reliés à leurs coûts élevés. Leur coût d'installation peut être deux fois plus élevé que pour des toits conventionnels. Et ces toits requièrent un entretien plus grand. Ils doivent être arrosés, fertilisés, et

dés herbés sur une base régulière. Il faut aussi considérer le fait que les toits verts peuvent éventuellement couler, menant possiblement à des dommages structurels des bâtiments (coûteux). Du point de vue météorologique, l'ajout de végétation sur les toits peut augmenter l'humidité au niveau de la couche limite urbaine, ce qui potentiellement pourrait détériorer le confort thermique.

***c) Diminution de la chaleur liée aux activités humaines (EXP\_HF)***

Les contributions à la chaleur en milieu urbain liées aux activités anthropiques pourraient également être modulées. La production de flux anthropiques de chaleur et d'humidité par les véhicules, les climatiseurs, et l'activité industrielle peuvent empirer le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Cet effet est particulièrement grand dans les parties les plus denses des régions urbaines et varie fortement selon les régions et les saisons. La consommation électrique des foyers peut mener à une accumulation de chaleur à l'intérieur des maisons en saison estivale, surtout lorsqu'elle est combinée avec l'effet du rayonnement solaire direct ou une pauvre isolation thermique des bâtiments. Cette chaleur est ensuite rejetée vers l'environnement urbain extérieur de manière naturelle ou par climatisation, qui ajoute encore à cet effet. L'évaluation des flux anthropiques est un sujet de recherche actuel et les valeurs de la littérature devraient être considérées avec prudence. Selon l'étude de Taha et al. (1997), la contribution anthropique estivale due à la climatisation peut être responsable d'un réchauffement de l'ordre de 2 à 3°C pour certains centres urbains de la Californie du sud. Les voitures et autres véhicules motorisés contribuent aussi à l'émission de chaleur en milieu urbain. Une quantité importante de cette chaleur émise peut rester piégée à l'intérieur de certains canyons urbains mal ventilés, diminuant ainsi le confort thermique des habitants. D'autres émissions des véhicules motorisés contribuent à la pollution atmosphérique, souvent pire en milieu urbain. Elles contribuent aussi au réchauffement climatique (Watkins et al. 2007, Younger et al. 2008, et CAPE, 1995). Dans ce contexte, certains réaménagements urbains peuvent être considérés comme étant soit négatifs ou positifs. Par exemple, le remplacement d'unités unifamiliales par des habitations en rangées plus compactes ou par des tours élevées peut avoir un impact sur le relâchement de chaleur anthropique par une augmentation de la climatisation et du trafic urbain dans un quartier spécifique. Dans le même ordre d'idée, un mauvais contrôle du trafic urbain menant à des bouchons peut augmenter la contribution des véhicules à la chaleur urbaine.

***d) Combinaisons de mesures***

Ultimement, des combinaisons de mesures d'atténuation devraient être adoptées. Des études démontrent par contre que l'effet de la combinaison de mesures n'est pas toujours égal à la somme des effets des mesures individuelles (e.g., Jacobs et al. 2018). L'évaluation de combinaisons est donc très importante pour cette étude. Dans le contexte du projet Grand Paris, Masson et al. (2013) a montré à l'aide d'un modèle numérique que la combinaison de quelques mesures incluant des modifications à l'environnement naturel en périphérie de la ville (forêts, pratiques d'agriculture, surface d'eau) combinée à une augmentation de l'albédo pour certaines surfaces urbaines, a eue pour effet de diminuer de 1 à 3 °C la température de l'air sur Paris.

#### *e) Autres*

Enfin, d'autres types de mesures telles que la modification de la disposition et la taille des bâtiments dans les villes peuvent avoir des effets sur la chaleur et n'ont pas été étudiés dans le cadre de cette étude mais pourront l'être ultérieurement. Ces mesures sont largement étudiées dans les régions méditerranéennes où l'ombre des bâtiments peut être un allié important pour augmenter le confort en zone urbaine (Jihan et Tahiri, 2016).

## **6. Évaluation des mesures d'atténuation sur Montréal**

### *a) Mesures reliées aux propriétés thermiques et radiatives*

Dans l'étude actuelle, quelques scénarios pour lesquels l'albédo des surfaces bâties sont examinés, de même qu'un autre scénario pour lequel d'autres propriétés thermiques sont changées, e.g., comme la capacité et la conductivité thermique de la couche supérieure des toits. Basé sur la littérature et sur de l'information fournie par John Manville Canada Inc. pour des membranes (communication personnelle, et voir document sur site web dans la liste de références), et tel qu'indiqué au Tableau 2, les valeurs de l'albédo sont augmentées à des valeurs typiques d'environ 0.15 à 0.65 pour les toits, de 0.25 à 0.60 pour les murs, et de 0.20 à 0.45 pour les routes. Pour l'Exp\_AL5 la capacité thermique pour la première couche du toit est diminuée de  $3.0 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$  à  $1.3 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ , la conductivité thermique est diminuée de  $1.50 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  à  $0.10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  pour cette même couche, dont l'épaisseur est diminuée de 0.05 m à 0.0015 m.

**Tableau 2:** *Modifications aux propriétés thermiques et radiatives pour les expériences ‘a’.*

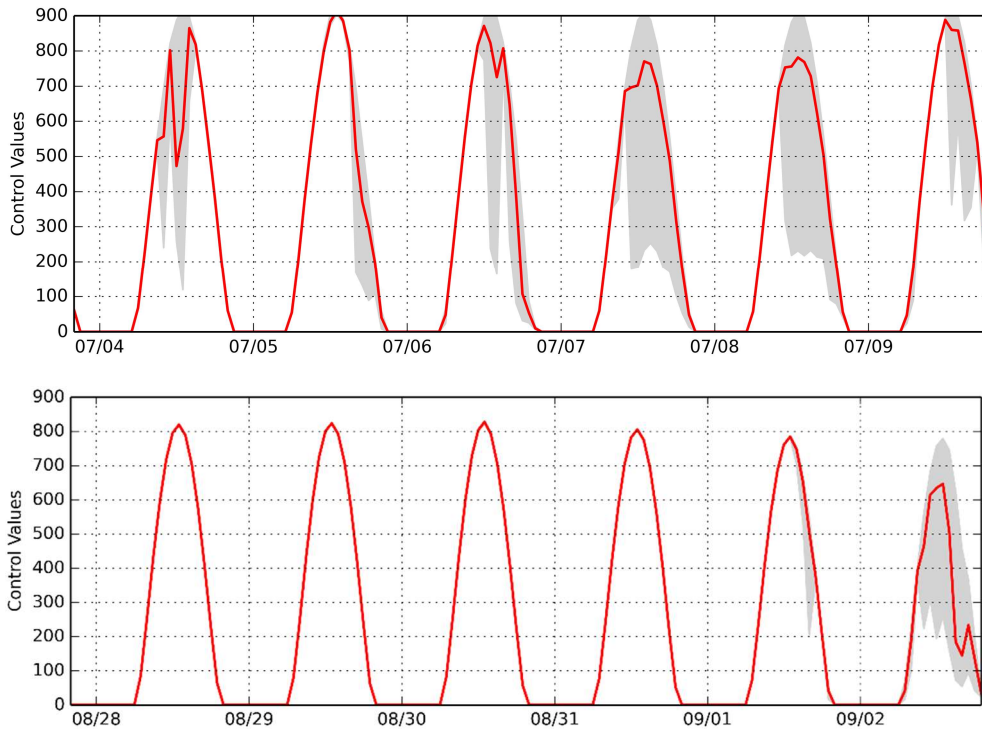
| Propriétés - Paramètres          | Unités                            | Contrôle  | Expériences ‘a’   |
|----------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| Albédo des toits                 | ---                               | 0.15  | 0.65  |
| Albédo des murs                  | ---                               | 0.25  | 0.60  |
| Albédo des rues et routes        | ---                               | 0.20  | 0.45  |
| Emissivité des toits             | ---                               | 0.90  | 0.87  |
| Capacité thermique des toits     | J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> | 3.0 x 10 <sup>6</sup><br>1.5 x 10 <sup>6</sup><br>2.9 x 10 <sup>6</sup> | 1.3 x 10 <sup>6</sup><br>1.5 x 10 <sup>6</sup><br>2.9 x 10 <sup>6</sup> |
| Conductivité thermique des toits | W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> | 1.50 ; 1.50 ; 0.04  | 0.10 ; 1.50 ; 0.04  |
| Épaisseurs des couches des toits | m                                 | 0.05 ; 0.40 ; 0.10  | 0.0015 ; 0.40 ; 0.10  |

Quand l’albédo est augmenté, les surfaces urbaines absorbent une plus petite fraction de l’énergie solaire incidente, menant ainsi à une température de surface moins élevée, moins de transferts turbulents entre la surface et l’atmosphère durant le jour, et par conséquent à une température de l’air moins élevée durant le jour. Les modifications à l’albédo ne devraient pas, a priori, avoir d’impact majeur sur l’évapotranspiration de la surface, qui peut aussi influencer le confort des citadins. Aussi, l’impact de ce type de modifications devrait être plus fort durant le jour, et non la nuit.

Une approche incrémentale est utilisée pour cette première série de tests de sensibilité, comme décrite dans le Tableau 1. Les résultats pour tous les tests sont donnés dans l’appendice A. Seulement les aspects les plus importants sont discutés dans cette section. Comme décrit à la Figure 3, ces tests ont été produits pour les journées spécifiques des deux événements de chaleur à l’aide du système de prévision tridimensionnel. Les variables sélectionnées pour représenter la chaleur et le confort sont la température, l’humidex, le WBGT et l’UTCI.

Il faut tout d’abord mentionner que l’impact des mesures d’atténuation est assez différent pour les deux événements de chaleur. L’origine de ces différences a été analysée, et comme mentionné plus tôt, la qualité de l’air, les températures atteintes ainsi que la force et la direction du vent ne sont pas fondamentalement différentes entre les deux périodes. En revanche, les différences obtenues avec les scénarios par rapport au contrôle présentent une plus grande variabilité spatiale (indiquée par les limites des 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> percentile sur les séries temporelles) en juillet qu’en août. L’analyse des résultats montre que ceci est dû à la couverture nuageuse plus importante, et à l’impact qu’elle a sur le rayonnement à la surface qui intervient dans les bilans d’énergie. La Figure 14 montre par

exemple le flux d'énergie solaire arrivant à la surface. Les courbes régulières et l'absence d'ombrage en août (jusqu'au lever du jour du 2 septembre) indiquent un ciel dégagé tandis que les courbes irrégulières et avec des ombrages indiquent un ciel plus couvert et plus hétérogène en juillet. Il est à noter que les maximums sont plus élevés en juillet (près de 900 W m<sup>-2</sup>) qu'en août (un peu plus de 800 W m<sup>-2</sup>) à cause de la position du soleil au cours des périodes étudiées.



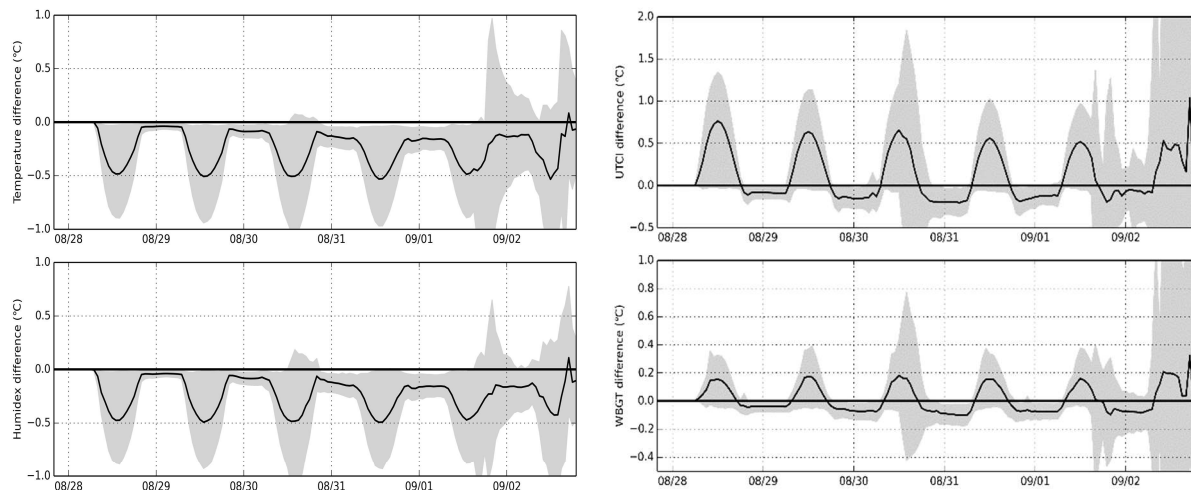
**Figure 14.** Séries temporelles pour les périodes du 4 au 9 juillet 2010 (en haut) du 28 août au 2 septembre 2010 (en bas) du flux d'énergie solaire atteignant la surface (en W m<sup>2</sup>). La ligne continue rouge représente la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5ème et 95ème percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale.

Étant donné que le signal diurne de l'impact des mesures d'atténuation est plus régulier et moins bruyant, les résultats sont tout d'abord présentés et analysés pour ce deuxième événement de chaleur intense qui bénéficie d'un ciel relativement dégagé. Un cas unique est présenté pour l'événement en juillet de manière à mettre en évidence la différence de sensibilité pour les deux événements.

La plupart des mesures sont appliquées sur l'île de Montréal dans cette étude. Cependant, l'expérience Exp\_AL4 dont les modifications concernent toute l'agglomération incluant Laval et

Longueuil permet de montrer, si on compare avec l'expérience équivalente sur l'île de Montréal AL3, l'importance de la météorologie de la région et l'utilité de considérer une configuration 3D plutôt que 2D. Les résultats montrent ainsi une amplitude des différences plus importante bien que l'essentiel de l'impact de la mesure soit similaire. De même, lorsque les modifications sont apportées sur une plus petite région, comme en considérant le quartier Rosemont pour Exp\_AL2, les amplitudes de l'impact sont davantage localisées.

Si on débute avec les expériences de type AL pour lesquelles l'albédo est augmenté de manière substantielle pour les édifices situés sur 85 % des mailles de calcul sur l'île de Montréal, en général les effets sont plus importants le jour que la nuit, ce qui rejoint les résultats de la littérature. Les effets sont en moyenne toujours négatifs pour la température et l'humidex, mais positifs le jour sur l'UTCI et le WBGT. Au cours de l'événement de chaleur à la fin de l'été 2010, la figure 14 montre l'impact de l'augmentation de l'albédo des routes (expérience AL6), qui est l'expérience avec le plus d'impact parmi les trois mesures individuelles concernant le toit, les murs, et les routes.

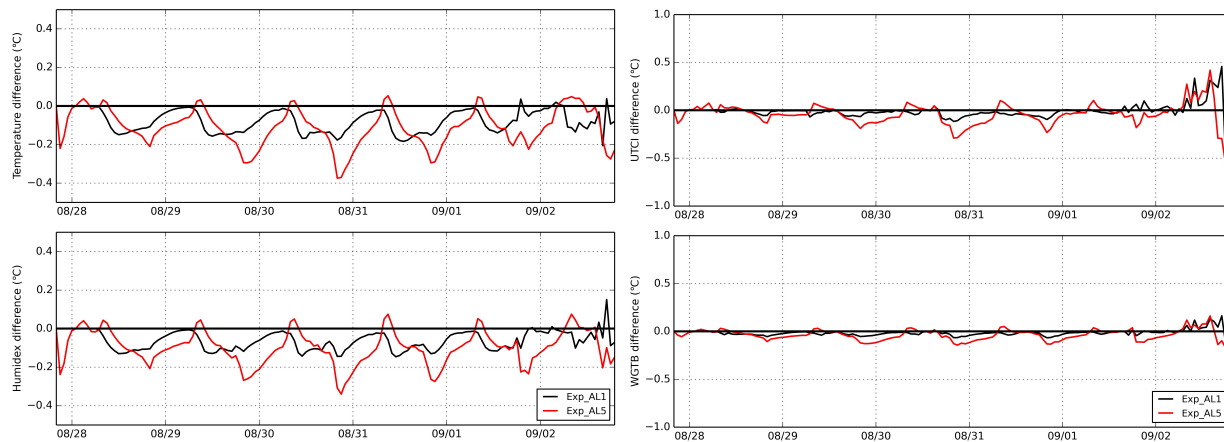


**Figure 15.** Séries temporelles pour la période du 28 août au 2 septembre 2010 de la différence de la température de l'air (panneau du haut à gauche), de l'humidex (panneau du bas à gauche), de l'UTCI (panneau du haut à droite) et du WBGT (tableau du bas à droite) entre l'expérience Exp\_AL6 et l'intégration contrôle. La ligne continue noire représente la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5ème et 95ème percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort, et les valeurs positives indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort. L'annexe A présente les résultats avec une échelle plus large pour l'ordonnée.



L'évolution temporelle des différences pour toutes les variables est assez régulière avec un cycle diurne bien défini. Elles sont aussi assez stables durant toute la période de ce deuxième événement. Les résultats montrent que ce genre de mesures aurait mené à une diminution moyenne de la température de l'ordre de 0.5°C durant le jour, pouvant aller jusqu'à 1°C, et avec un impact restant légèrement négatif durant la nuit jusqu'à 0.15 °C. La sensibilité de l'humidex est essentiellement la même. Les cartes de différences moyennes (voir dans les appendices) montrent que l'impact est en général plus important sur l'île de Montréal, avec un plus gros impact pour les zones où sont les grandes artères routières de la ville de Montréal, ainsi que les zones plus industrielles comme la raffinerie à la pointe est de l'île. Les indices de confort thermiques UTCI et WBGT ont une réponse différente. Le confort thermique selon ces deux indices est nettement dégradé pendant la journée, avec des différences dépassant 0.5 °C pour l'UTCI et 0.19 °C pour le WBGT. La nuit, les différences sont du même ordre de grandeur que la température et l'humidex, atteignant 0.2 °C pour l'UTCI et jusqu'à 0.1 en fin de nuit pour le WBGT.

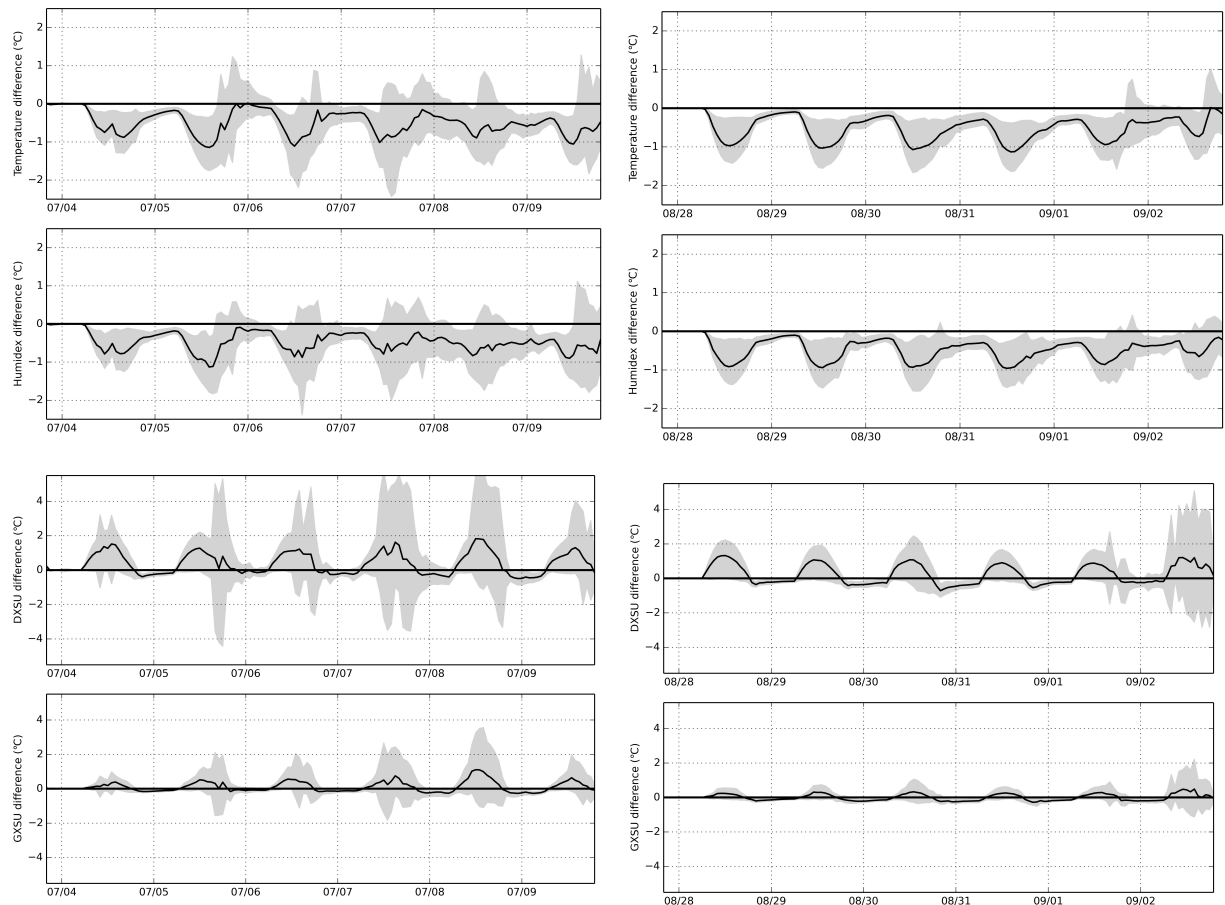
Si l'augmentation de l'albédo est apportée aux toits uniquement (expérience AL1), les cartes montrent que l'impact est plutôt situé au centre et à l'est de l'île de Montréal. Bien que l'amplitude des différences soit plus faible que pour les mesures apportées aux routes si on considère la moyenne sur l'île de Montréal, elle est plus importante le jour que la nuit, avec l'impact maximal après le lever du soleil et qui diminue progressivement après le coucher du soleil. En pratique, les nouveaux toits blancs pour les toits plats sont généralement des membranes élastomères qui remplacent la couche composée de gravier et de goudron. Aussi l'expérience Exp\_AL5 représente-elle l'impact de l'utilisation de ces nouveaux toits. La figure 16 compare les séries temporelles des différences pour l'expérience AL1 et AL5. On remarque que bien que les valeurs ont une amplitude similaire, l'impact des membranes est légèrement décalé vers le soir et la nuit atteignant un pic de 0.36 °C sur la température le 30 août vers 2000- 2100 heure locale, effet qui peut être très appréciable sur la population. Ce résultat souligne l'importance de bien considérer les matériaux utilisés et une étude plus approfondie sur les différents toits manufacturés pourra être menée ultérieurement.



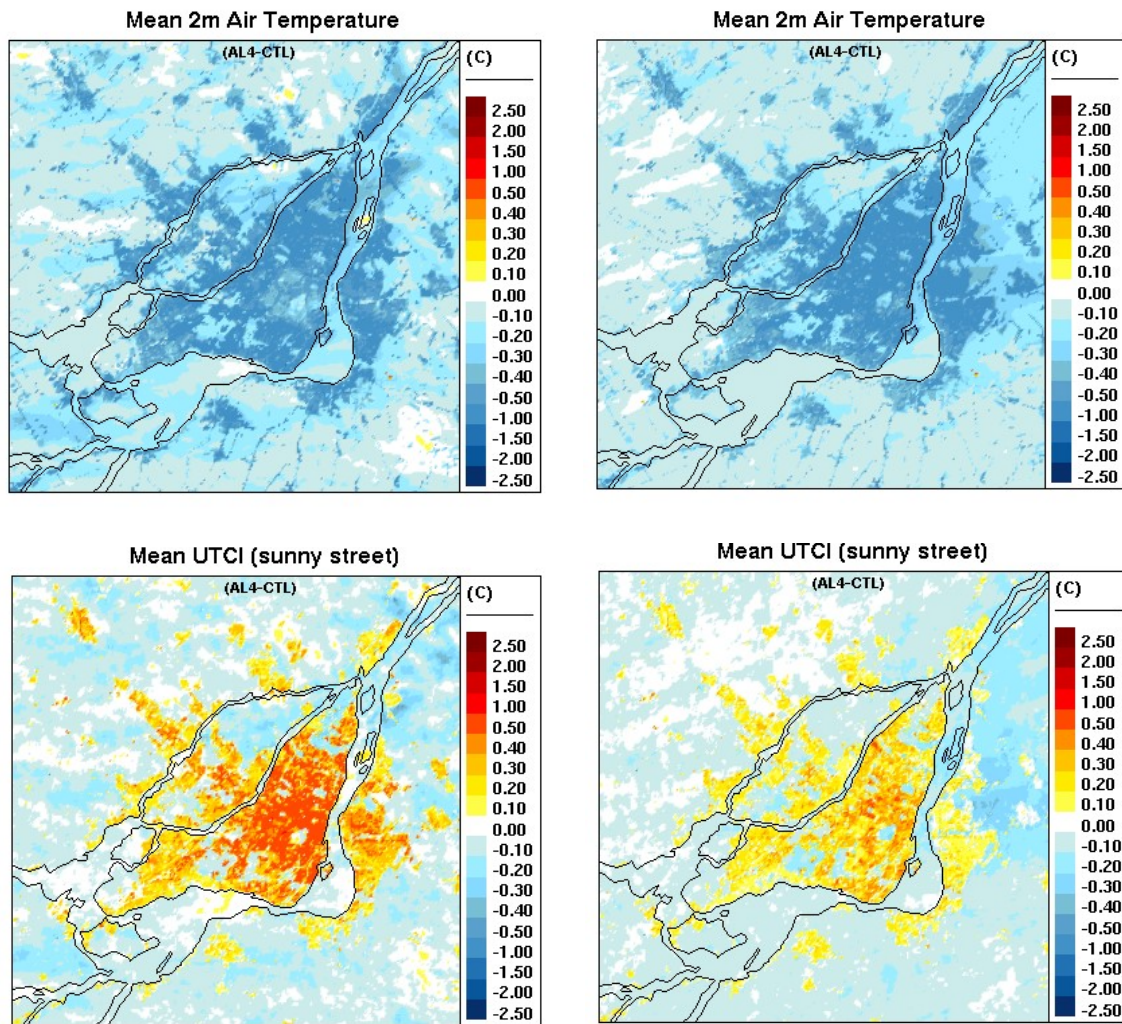
**Figure 16.** Séries temporelles pour la période du 28 août au 2 septembre 2010 de la différence de la température de l'air (panneau du haut à gauche), de l'humidex (panneau du bas à gauche), de l'UTCI (panneau du haut à droite) et du WBGT (tableau du bas à droite) entre les expériences Exp\_AL1 (trait noir) et Exp\_AL5 (trait rouge) et l'intégration contrôle. Les lignes continues représentent la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort, et les valeurs positives indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort. Les résultats sont présentés différemment dans l'appendice A.

L'impact le plus grand parmi les expériences de type AL est obtenu pour l'Exp\_AL4 lorsque les modifications concernent à la fois les toits, les routes, et les murs pour une région qui s'étend au-delà de l'île de Montréal. Il est présenté dans la figure 17 pour les deux événements de chaleur.

Les valeurs moyennes entre les deux événements sont assez similaires, mais la variabilité est moins importante pour l'évènement d'août qui était généralement en condition de ciel clair. La diminution moyenne des températures est autour de 1 °C dans les deux cas au cours de la journée, et elle est plus variable la nuit de l'ordre de 0.25 C. Les indices UTCI et WBGT sont dégradés pendant la journée, alors que l'énergie réfléchiée sur les parois est plus importante lorsque les réflectances sont augmentées, mais restent cependant améliorées la nuit lorsque les échanges infra-rouges dominent et que la température de l'air diminue. Les cartes montrées sur la Figure 18 permettent de distinguer que la variabilité spatiale des résultats est importante, et qu'elle n'est pas identique pour la température et l'UTCI. L'augmentation de l'UTCI est plus évidente au centre et à l'est de l'île, dans les zones les plus urbanisées (figure 6b).



**Figure 17.** Séries temporelles pour les périodes du 4 au 9 juillet 2010 (à gauche) et du 28 août au 2 septembre 2010 (à droite) de la différence de la température de l'air (panneau du haut), de l'humidex (deuxième panneau), de l'UTCI (troisième panneau) et du WBGT (tableau du bas) entre l'expérience *Exp\_AL4* et l'intégration contrôle. La ligne continue noire représente la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5ème et 95ème percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort, et les valeurs positives indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort. L'annexe A présente les résultats de façon différente.



**Figure 18.** Cartes présentent les variabilités spatiales sur la région de Montréal des impacts dudit scénario (différences des valeurs du scénario moins celles du contrôle, en Celsius), en moyenne pour la période du 4 au 9 juillet 2010 (à gauche) et pour la période du 28 août au 2 septembre 2010 (à droite). Les tons bleus indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort thermique, et les tons jaunes à rouges indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort thermique.

#### ***b) Mesures reliées à la végétation et à l'humidité des sols***

D'autres mesures souvent invoquées pour diminuer la sévérité de la chaleur en milieu urbain sont reliées à l'augmentation de la végétation et à l'humidification des sols, en ville et dans les régions avoisinantes.

La végétation peut avoir une influence significative – et complexe – sur toutes les composantes du bilan énergétique à la surface: son albédo est relativement faible, ce qui favorise un plus grand réchauffement de la surface; elle permet l'évapotranspiration, ce qui mène à un refroidissement à la surface, mais aussi à une humidification de la couche de surface et couche limite atmosphérique; elle peut posséder une canopée bien développée, ce qui pour la végétation haute peut donner un certain ombrage et refroidissement au niveau du sol, mais qui peut aussi mener à une augmentation de l'énergie thermique incidente au sol et à un réchauffement à la surface durant la nuit; et finalement sa résistance aérodynamique peut être assez large, ce qui peut mener à de plus grands échanges turbulents entre la surface et l'atmosphère, menant à une couche limite atmosphérique plus développée avec comme impact des températures plus élevées la nuit, et des vents moins forts à la surface (moins de ventilation).

D'une certaine manière, l'effet de l'humidité des sols est plus simple car elle mène simplement à une augmentation de l'évaporation, avec comme impact refroidissement et humidification.

Telles que décrites dans le Tableau 1, quelques expériences numériques ont été effectuées pour évaluer l'impact de ces deux aspects. Pour les mêmes raisons mentionnées dans la sous-section précédente, la deuxième vague de chaleur à la fin juillet début septembre est surtout utilisée pour l'évaluation des impacts.

Basé sur les expériences numériques Exp\_VG2 et Exp\_VG3, il semble que l'effet d'ajouter de la végétation basse en milieu urbain (rue et cour arrière) dépend de manière critique de l'humidité des sols. Dans la première expérience, Exp\_VG2, l'eau du sol est la même que ce qui est utilisé pour l'expérience contrôle, avec des valeurs relativement faibles de l'ordre de  $0.12\text{--}0.20\text{ m}^3\text{m}^{-3}$  (tel que montre dans l'appendice A, figure A3). Dans la deuxième expérience, Exp\_VG3, l'eau du sol a été artificiellement augmentée jusqu'à une valeur de  $0.3\text{ m}^3\text{m}^{-3}$  par endroits, suivant un processus anticipé d'irrigation.

L'impact de cette humidification sur l'efficacité de cette mesure d'atténuation est majeur. Tel que montré par la Figure 19, l'ajout de la végétation, combinée avec des sols humides (courbe noire et ombrages), mène à une réduction attendue de la température sur l'île de Montréal. Le refroidissement est de l'ordre de  $1.0^\circ\text{C}$  durant le jour (variant entre  $0^\circ\text{C}$  et  $2.5^\circ\text{C}$ ), et de  $0.5^\circ\text{C}$  durant la nuit en Août. L'effet est plus régulier en Août qu'en juillet. En effet, pour la vague de chaleur

en juillet, l'effet est plus prononcé au début de la période. Il apparaît que cela correspond à l'évaporation de l'eau du sol (Figure A3) rapide pour cette période.

L'effet sur l'humidex n'est par contre pas aussi avantageux, mais reste quand même appréciable, avec une diminution d'environ 0.2-0.4 durant la nuit, pouvant aller jusqu'à 1.0 °C (ce qui est nettement moins grand que pour la température). L'effet est neutre au début de la journée. Clairement, la diminution de la température se fait aux dépens d'une humidification de la basse atmosphère.

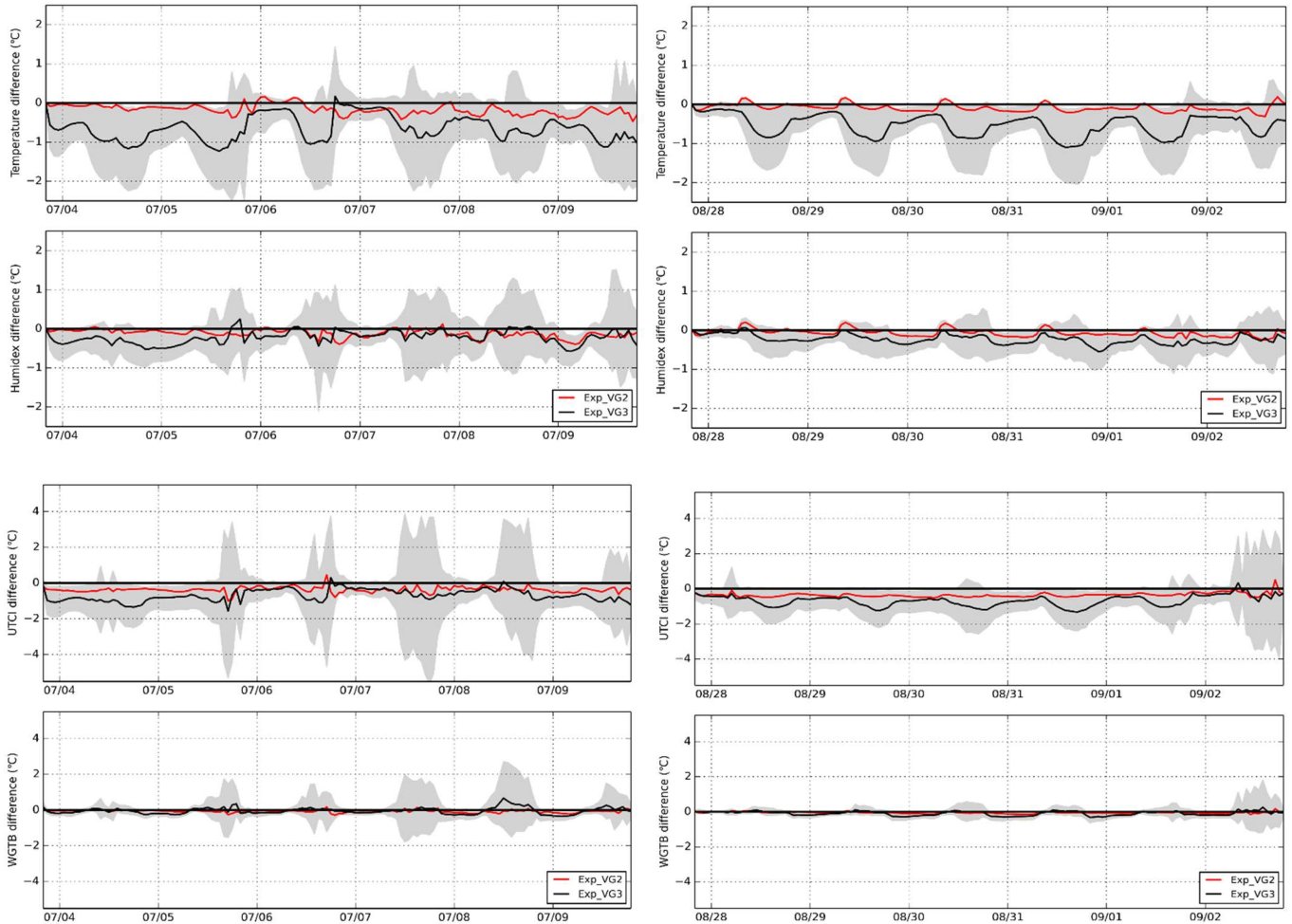
Le confort thermique tel qu'évalué avec l'UTCI est la plupart du temps amélioré. En août, l'UTCI diminue en moyenne de 1.0 °C le jour, et reste à 0.5 °C la nuit. En juillet, le cycle diurne est moins marqué mais l'amélioration est autour de 1 °C au début de la période et s'atténue ensuite. Le WBGT indique une amélioration évidente la nuit, et très peu de différence pendant le jour voire une légère dégradation du confort le 8 juillet 2010.

Si les sols sont plus secs (ligne rouge sur la figure 19), avec les mêmes valeurs de l'eau du sol que l'expérience contrôle, l'impact de l'ajout de végétation est moins important la plupart du temps. La diminution de température et l'amélioration du confort thermique restent cependant toujours présentes, excepté un léger pic d'augmentation de la température et de l'humidex en Août en début de journée.

Il semblerait qu'il n'y ait pas assez d'évaporation (surtout dans la simulation en Août) pour contrebalancer d'autres processus qui pourraient notamment être associés à une diminution de l'albédo de la surface en milieu urbain. Il est à noter qu'il y a un léger refroidissement la nuit, de l'ordre de 0.1-0.2°C. L'impact sur l'humidex est très semblable, ce qui suggère que le changement



sur l'évapotranspiration est faible.



**Figure 19.** Séries temporelles pour les périodes du 4 au 9 juillet 2010 (à gauche) et du 28 août au 2 septembre 2010 (à droite) de la différence de la température de l'air (panneau du haut), de l'humidex (second panneau), de l'UTCI (troisième panneau) et du WBGT (tableau du bas) entre l'expérience *Exp\_VG3* et *Exp\_VG2* et l'intégration contrôle. La ligne continue noire (respectivement rouge) représente la moyenne spatiale pour *Exp\_VG3* (*Exp\_VG2*) sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats de *Exp\_VG3*. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort, et les valeurs positives indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort. L'annexe A présente les résultats de façon différente.

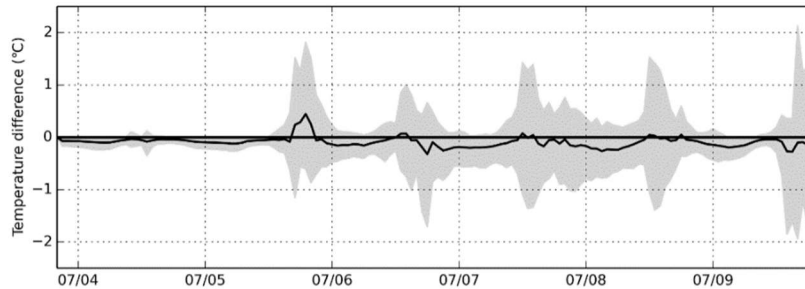
Ainsi, les résultats montrent que l'impact d'un ajout de végétation (basse dans ce cas-ci) dépend en grande partie de l'humidité des sols. Dans ce contexte, un autre test a été fait avec un ajout substantiel d'eau du sol pour les cultures dans les régions avoisinantes de l'île de Montréal (Exp\_VG1). Les résultats, montrés dans les appendices, indiquent que cette mesure mènerait à un refroidissement de l'ordre de 0.2-0.4°C sur la ville sur la température au milieu de la journée et diminuant au cours de la soirée et la nuit. La modification de l'humidex est moindre. L'UTCI diminue également pendant l'après-midi.

Un autre test a été effectué avec l'ajout de végétation haute. Les résultats sont néanmoins assez proches de l'expérience avec la végétation basse. Il est envisagé de réaliser des tests utilisant le schéma de végétation plus sophistiqué SVS qui permettrait *a priori* de mieux représenter la différence de comportement de ces deux types de végétation en ce qui concerne l'accès à l'eau du sol. De plus, les tests présentés dans ce rapport ne tiennent pas compte de l'ombrage additionnel occasionné par l'ajout de végétation haute, ce qui est une limitation importante qui sera abordée ultérieurement.

### ***c) Mesures reliées à la diminution des flux anthropiques***

Dans la configuration utilisée dans la simulation de référence, les flux anthropiques ne sont pas pris en considération. Dans l'expérience Exp\_HF1, la base de données mondiale déterminée mensuellement à 1 km de résolution par Dong et al. (2017) est utilisée. De cette base de données les valeurs horaires des flux anthropiques issues du trafic routier ont été extraites pour Montréal et ont été ajoutées au niveau de la rue dans le système de modélisation. Ainsi, la différence entre les deux simulations permet d'évaluer l'effet d'enlever la chaleur provenant du trafic routier, bien que dans l'idéal, l'expérience de contrôle aurait dû disposer de tous les flux anthropiques. Comme mentionné précédemment, il existe une incertitude concernant ces valeurs et des travaux sont en cours à ce sujet.

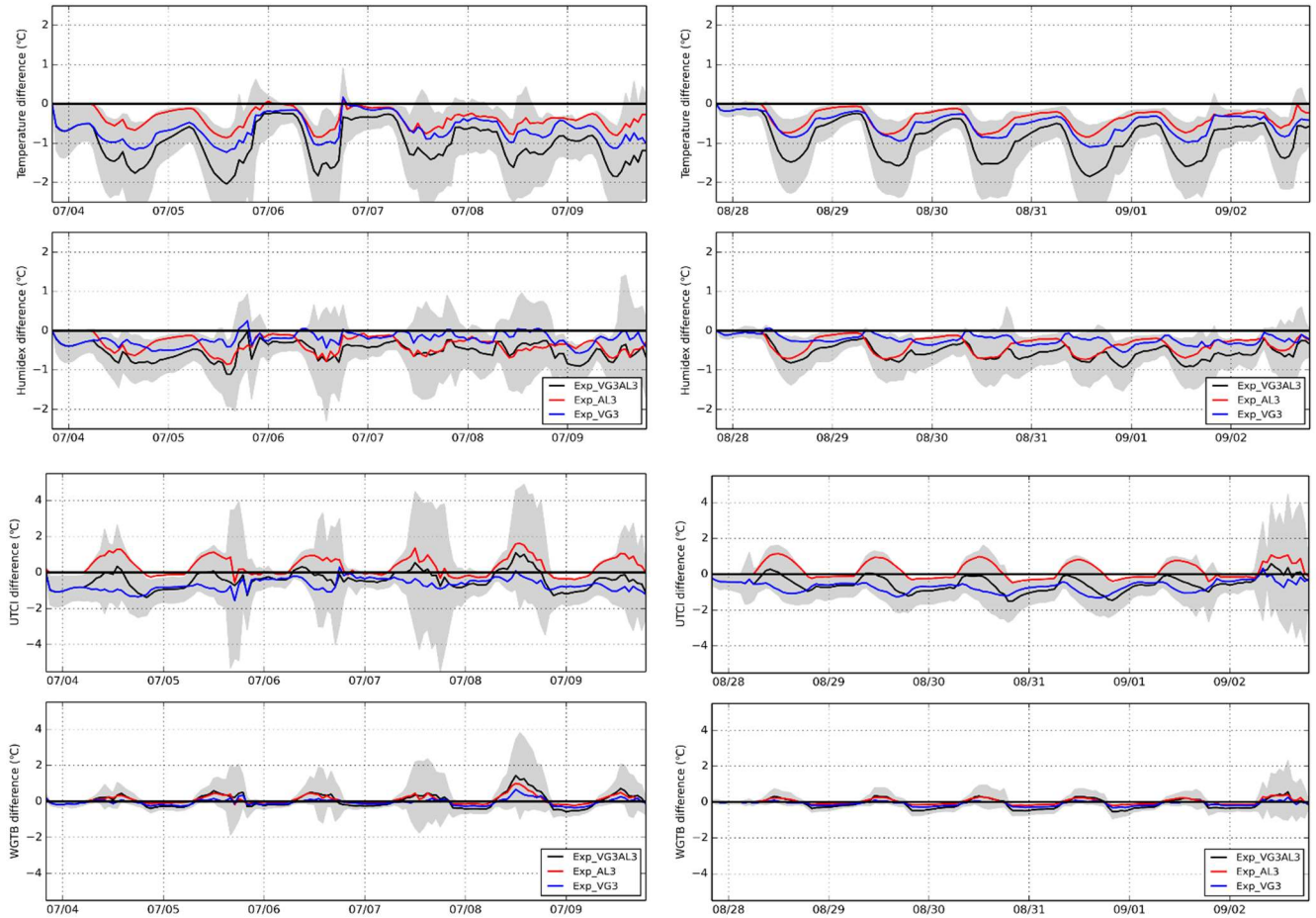
Les résultats montrent que l'arrêt du trafic routier aurait un faible impact en moyenne sur l'île de Montréal. De manière intéressante, la Figure 20 montre néanmoins un refroidissement de la température nocturne de 0.2 C, alors que l'émission de chaleur est diurne, en raison de la complexité des échanges turbulents atmosphériques. L'impact diurne est cependant potentiellement plus important à proximité des sources d'émission et pourra être étudié localement.



**Figure 20.** Séries temporelles pour les périodes du 4 au 9 juillet 2010 de la différence de la température de l'air entre l'expérience Exp\_HCI et l'intégration contrôle. La ligne continue noire représente la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5eme et 95eme percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement, et les valeurs positives indiquent un réchauffement. L'annexe A présente les résultats de façon différente.

#### **d) Combinaison de Mesures**

La Figure 21 illustre les différences obtenues avec la combinaison des scénarios d'augmentation de la végétation basse associée avec de l'irrigation ainsi que l'augmentation de l'albédo des toits, routes et murs. Rejoignant la littérature, il semble en effet que l'impact d'un scénario combiné ne soit pas exactement la somme des impacts des scénarios pris individuellement. Les résultats montrés dans ce rapport indiquent néanmoins qu'ils sont proches. Pour la période en Août, si les mesures d'atténuation visent à améliorer le confort la nuit, alors l'adoption de mesures simultanées est intéressante avec par exemple la nuit du 30 Août, une diminution de l'UTCI jusqu'à 1.5 °C tandis que l'impact est nul au milieu de la journée (si on considère une personne au soleil). Les bénéfices sont moins évidents en juillet car l'ajout de végétation basse et l'irrigation est moins efficace avec la couverture nuageuse. Par exemple l'UTCI est dégradé de 1.5 °C au cours de la journée du 8 juillet 2010.



**Figure 21.** Séries temporelles pour les périodes du 4 au 9 juillet 2010 (à gauche) et du 28 août au 2 septembre 2010 (à droite) de la différence de la température de l'air (panneau du haut), de l'humidex (second panneau), de l'UTCI (troisième panneau) et du WBGT (tableau du bas) entre l'expérience combinée Exp\_VG3AL3 (ligne continue noire et ombrage) et les expériences individuelles et Exp\_VG3 (ligne continue bleue) et Exp\_AL3 (ligne continue rouge). Les lignes continues représentent la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5eme et 95eme percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats de Exp\_VG3AL3. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort, et les valeurs positives indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort. L'annexe A présente les résultats de façon différente.

## 7. Impact des mesures sur les catégories de confort thermique

Les valeurs numériques des indices de confort thermique UTCI et WBGT, bien qu'exprimées en °C, ont une signification plus difficile à interpréter que la température. En pratique, il peut être plus intéressant de communiquer l'impact de ces mesures d'atténuation par le différentiel de temps passé

dans chaque catégorie de confort thermique comme par exemple dans l'étude de De Munck et al. (2018) sur la ville de Paris. Dans ce rapport, cet exercice est réalisé en un point de calcul de l'île de Montréal, celui qui correspond à la station de mesures météorologiques McTavish et est présenté dans le Tableau 3 pour la période du 4 au 9 juillet 2010. On voit à l'aide de ce tableau qu'un individu avait passé jusqu'à 30 heures dans la catégorie de stress thermique très important, 34 heures dans la catégorie de fort stress thermique, et 41 heures dans la catégorie de stress thermique modéré. Les expériences avec ajout de végétation, accompagnées ou non de l'humidification des sols, ont pour effet de diminuer de plusieurs heures pendant la vague de chaleur le temps passé dans des conditions de très fort inconfort. Le plus grand bénéfice est obtenu pour l'EXP\_VG5 avec ajout de végétation haute et humidification des sols pour laquelle 9 heures de moins sont passées dans cette catégorie. Ce temps est transféré aux autres catégories de moindre stress thermique. Le bilan fait apparaître une plus longue période de temps passée dans la catégorie de fort stress thermique, et en général moins de temps dans la catégorie de stress modéré sauf pour l'expérience avec l'humidification des cultures aux alentours de Montréal (Exp\_VG1). Le tableau 4 présente les résultats similaires pour le WBGT comme indicateur de confort. Comme vu précédemment, ces expériences de type VG ont peu d'influence sur le WBGT le jour et un peu plus la nuit. Les catégories d'inconfort n'étaient pas atteintes la nuit et ainsi les différentes expériences présentent des variations temporelles dans chaque catégorie moins importantes.

**Tableau 3.** Bilan, pour la période du 4 au 9 juillet 2010 pour un individu situé dans la rue au soleil à McTavish, du temps modélisé passé dans les catégories d'inconfort thermique selon l'UTCI.

| catégorie de stress thermique | Heures totales | $\Delta$ UTCI en heures |         |         |         |         |
|-------------------------------|----------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                               | CTRL           | EXP_VG1                 | EXP_VG2 | EXP_VG3 | EXP_VG4 | EXP_VG5 |
| UTCI >38 (très fort)          | 30.8           | -6.0                    | -6.8    | -8.8    | -5.5    | -9.0    |
| 38 > UTCI >32 (fort)          | 34.3           | 5.8                     | 5.5     | 4.8     | 4.5     | 6.3     |
| 32 > UTCI >26 (Modéré)        | 40.8           | 1.3                     | -5.3    | -5.8    | -1.5    | -5.0    |

**Tableau 4.** Bilan, pour la période du 4 au 9 juillet 2010 pour un individu situé dans la rue au soleil à McTavish, du temps modélisé passé dans les catégories d'inconfort thermique selon le WBGT.

| catégorie de stress thermique | Heures totales | $\Delta$ WBGT en heures |         |         |         |         |
|-------------------------------|----------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                               |                | EXP_VG1                 | EXP_VG2 | EXP_VG3 | EXP_VG4 | EXP_VG5 |
| WBGT > 31.5                   | 0              | 0                       | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 31.5 > WBGT > 30              | 2              | 0.3                     | -1      | 3       | 0.3     | 1.8     |
| 30 > WBGT > 29                | 16             | -0.3                    | -1.8    | 2.8     | -3.5    | -0.5    |
| 29 > WBGT > 28                | 16             | -2                      | 1.3     | -1.3    | 1.5     | 2.8     |

## 8. Conclusions de l'étude sur Montréal

Les résultats obtenus lors de ce projet montrent que les mesures d'atténuation reliées à des modifications des propriétés thermiques et radiatives des surfaces urbaines et à la présence de végétation combinée avec le niveau d'humidité des sols peuvent avoir un certain impact sur l'inconfort ressenti par les habitants de Montréal lors de deux événements de chaleur intense à l'été 2010. D'après les résultats produits avec les systèmes de prévision numérique environnementale de ECCC, l'impact moyen sur les zones urbaines de l'île de Montréal peut aller jusqu'à 2°C pour la température de l'air, avec un effet plus grand durant le jour. À première vue, les impacts de ces mesures d'atténuation semblent assez locaux, dans le sens où la distribution spatiale des différences avec l'expérience contrôle sont bien corrélées avec les endroits où les modifications ont été faites. Mais une dépendance sur la situation météorologique dominante a aussi été observée, avec des résultats assez différents pour les deux événements examinés dans cette étude (au début juillet et à la fin août). Les modifications à l'extérieur de l'île de Montréal peuvent avoir un léger impact sur la chaleur déterminée sur l'île lorsque les conditions sont favorables. Lorsque l'on considère l'humidex comme indicateur de confort thermique, l'impact des mesures est assez similaire que pour la température, bien que l'amplitude soit moindre lorsque l'on humidifie les sols, car l'effet de refroidissement associé à cette nouvelle végétation irriguée se fait aux dépens d'une humidification de l'air qui dégrade la sensation de confort. L'utilisation des indices de confort thermique UTCI et WBGT plus sophistiqués, en particulier parce qu'ils prennent en compte le rayonnement atmosphérique, apportent une certaine variation dans l'analyse des résultats. En augmentant les réflectances des routes ou des murs, le confort thermique d'un individu dans la rue et exposé au soleil est ainsi dégradé pendant la journée à cause du rayonnement qu'il reçoit, même lorsque la température de l'air est abaissée, mais il est amélioré la nuit. Il ressort clairement en revanche que les mesures associées à l'augmentation de la végétation permettent dans tous les cas d'améliorer le confort déterminé par l'UTCI. Il serait nécessaire de prendre en considération l'impact de l'ombrage additionnel créé par les arbres pour avoir un aperçu complet des bénéfices des mesures sur le confort thermique. En effet l'ombre créée serait en mesure de diminuer l'énergie reçue par un piéton (directement par le soleil et également en diminuant les réflexions sur les surfaces) et d'améliorer son confort. L'étude devrait se poursuivre par l'analyse de la quantité d'eau qui serait nécessaire en terme d'irrigation pour soutenir l'évapotranspiration qui est responsable de l'effet de refroidissement. Le recyclage de l'eau de pluie n'a pas été retenu dans ce rapport à cause



d'une trop faible quantité de précipitation reçue au cours de ces épisodes de chaleur de 2010, mais pourrait être modélisé pour d'autres périodes de canicules.

## **9. Méthode transposée à une autre ville canadienne : Toronto**

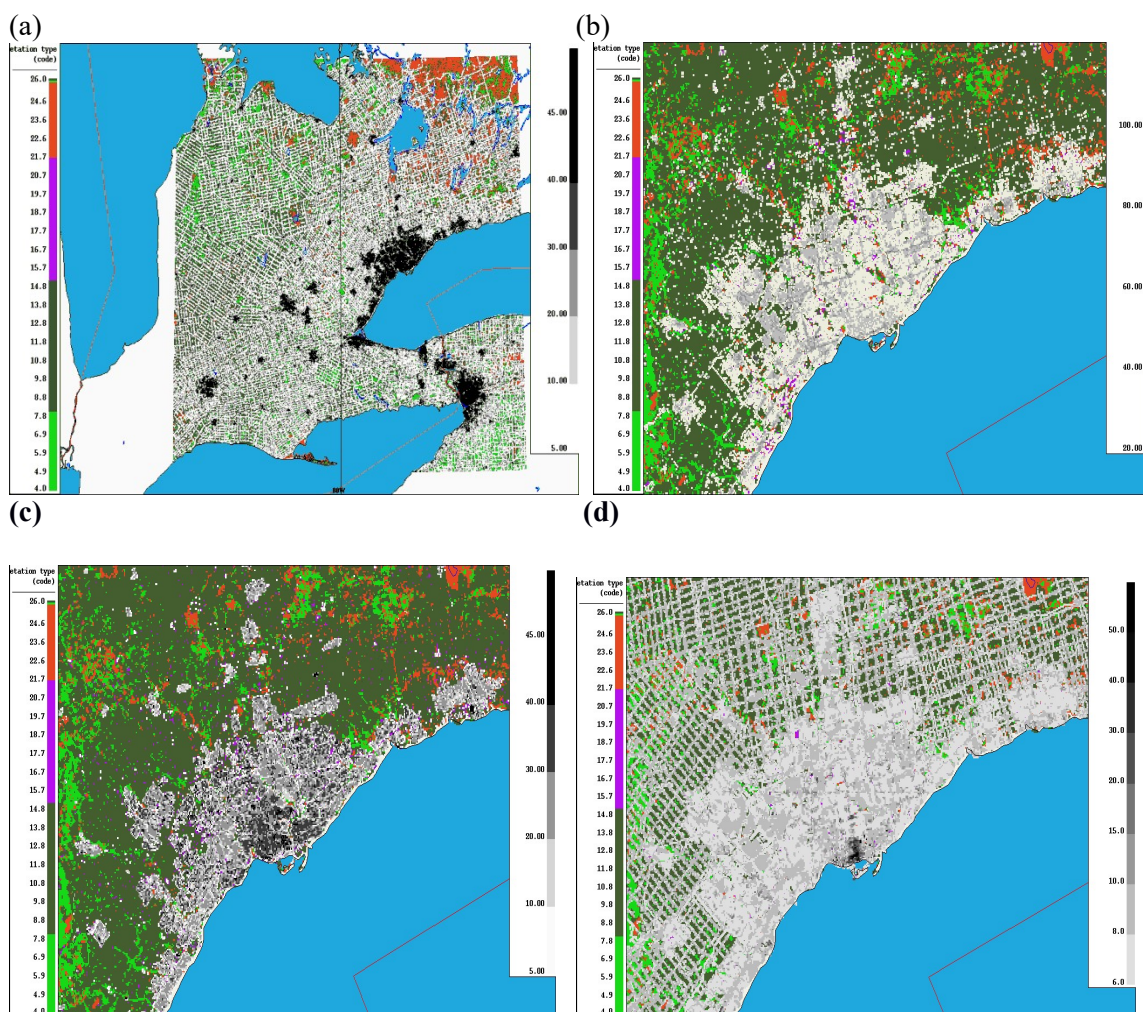
Dans l'optique de généraliser les capacités de produire des scénarios pour les villes Canadiennes, les outils numériques et méthodes de production des expériences utilisées pour Montréal sont intégrés dans une plateforme numérique de simulations et d'analyses. Des expériences sont alors menées sur l'agglomération de Toronto, la plus grande ville du pays. Les principales caractéristiques et quelques résultats sont présentés ici, et l'ensemble des résultats sont présentés dans l'annexe B.

### ***a) Configuration expérimentale***

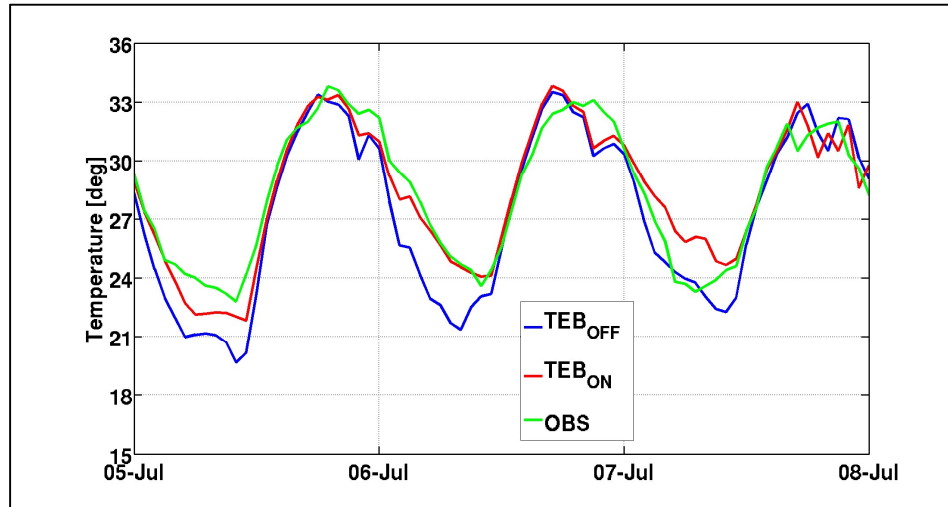
Comme pour les Figures 4 et 6, la Figure 22 montre l'occupation du sol pour la région de Toronto avec des simulations tri-dimensionnelles, pour le domaine de calcul avec des mailles de 250 m de cote.

### ***b) Simulation de contrôle pour la vague de chaleur de juillet 2010***

La période qui correspond à la vague de chaleur de juillet étudiée pour la ville de Montréal est choisie également pour la ville de Toronto qui était affectée également par des conditions de forte chaleur. La Figure 23 représente l'évolution de la température de l'air sur le site de l'aéroport Pearson dans l'expérience de contrôle. Elle est comparée avec les observations, et également avec les valeurs obtenues dans une expérience pour laquelle on a désactivé le schéma de surface TEB. Il apparaît surtout que la température minimale est significativement améliorée lorsque TEB est couplé au modèle atmosphérique.



**Figure 22.** Carte montrant l'étendue du domaine d'intégration pour les simulations tridimensionnelles qui ont été produites avec GEM avec une maille de 250 m sur la région de Toronto. Les tons de la légende à gauche décrivent l'occupation naturelle des sols (végétation). Les tons de gris de la légende à droite indiquent (a) la fraction urbaine, (b) la fraction de routes, (c) la fraction de bâtiment, et (d) la hauteur moyenne des bâtiments.



**Figure 23.** Comparaison entre la température de l'air observée (vert) à la station de l'aéroport de Toronto Pearson avec la prévision numérique 3D avec (rouge, expérience de contrôle) et sans (bleu) TEB durant la vague de chaleur de juillet 2010.

### c) Évaluation des mesures d'atténuation sur Toronto

Le tableau 5 résume les expériences réalisées sur Toronto. Ces expériences sont un échantillon de celles réalisées sur Montréal (Tableau 1), avec en plus une série d'expérience avec différentes valeurs de l'albédo des toits afin de quantifier la sensibilité des résultats à ces valeurs. L'ensemble des résultats est présenté dans l'annexe B. Des scénarios additionnels pourront être ajoutés ultérieurement.

Tout d'abord, il faut noter que les résultats ont une certaine similarité avec ceux de Montréal pour la période de juillet. Une forte variabilité spatiale est par moment obtenue, probablement pour des raisons similaires de présence d'une couverture nuageuse hétérogène, bien que cela n'ait pas été vérifié explicitement pour le moment.

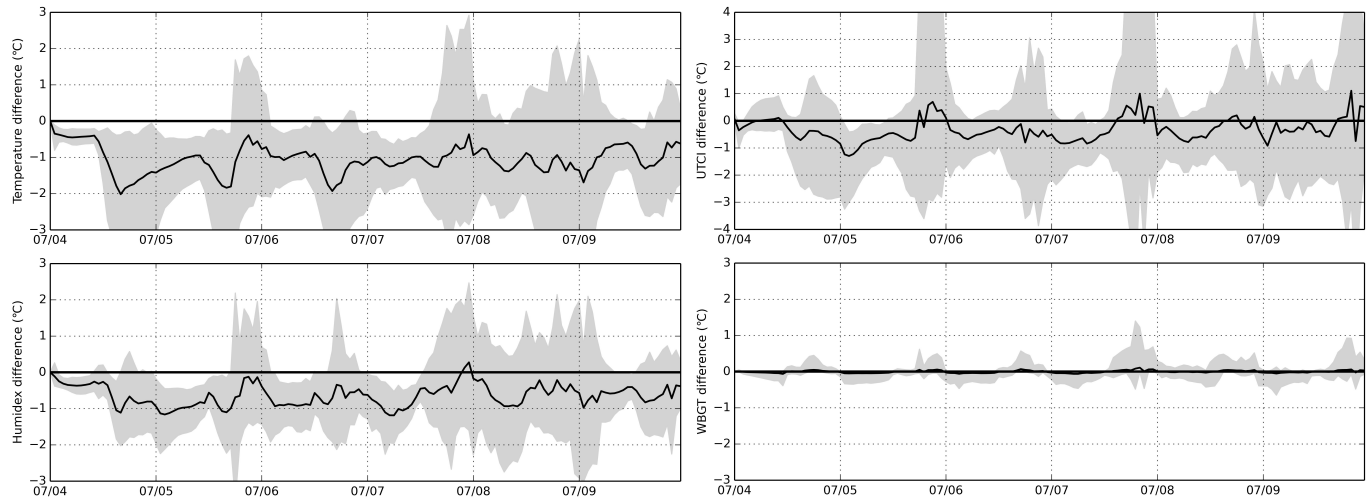
En considérant la ville de Toronto, la Figure 24 montre le résultat de l'expérience Exp\_AL3VG3 (trait noir et ombrages) qui combine l'augmentation de l'albédo des toits, des murs et des routes, avec l'augmentation de la végétation basse incluant l'humidification du sol. Il est à noter que l'Exp\_AL6VG3 avec augmentation de l'albédo de la route est également intéressante (voir l'appendice B). Un abaissement important de la température jusqu'à 2 °C est observé au début de la simulation (4 juillet) et reste intéressant de l'ordre de 1 °C pour le reste de la période. L'humidex

**Tableau 5:** Les mesures d'atténuation testées sur Toronto pour juillet 2010. Les modifications apportées à la surface sont marquées en rouge. GTA indique que les modifications sont apportées à l'ensemble de la région métropolitaine de Toronto (Greater Toronto Area).

| SCÉNARIO       | ALBEDO           |                  |                  | Végétation & eau du sol   |   |
|----------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------|---|
|                | Toits            | Routes           | murs             | Végétation                | Eau du sol                                      |
| Control (ctrl) | 0.12 – 0.20      | 0.20 – 0.28      | 0.15 – 0.25      | ctrl                      | ctrl  |
| Exp_AL1        | 0.65, <i>GTA</i> | ctrl             | ctrl             | ctrl                      | ctrl  |
| Exp_AL1-15     | 0.15, <i>GTA</i> | ctrl             | ctrl             | ctrl                      | ctrl  |
| Exp_AL1-40     | 0.40, <i>GTA</i> | ctrl             | ctrl             | ctrl                      | ctrl  |
| Exp_AL1-90     | 0.90, <i>GTA</i> | ctrl             | ctrl             | ctrl                      | ctrl  |
| Exp_AL4        | 0.65, <i>GTA</i> | 0.45, <i>GTA</i> | 0.60, <i>GTA</i> | ctrl                      | ctrl  |
| Exp_AL6        | ctrl             | 0.45, <i>GTA</i> | ctrl             | ctrl                      | ctrl  |
| Exp_AL7        | ctrl             | ctrl             | 0.60, <i>GTA</i> | ctrl                      | ctrl  |
| Exp_VG2        | ctrl             | ctrl             | ctrl             | Ajout d'herbe, <i>GTA</i> | ctrl  |
| Exp_VG3        | ctrl             | ctrl             | ctrl             | Ajout d'herbe, <i>GTA</i> | 0.3 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> , <i>GTA</i> |
| Exp_AL4VG2     | 0.65, <i>GTA</i> | 0.45, <i>GTA</i> | 0.60, <i>GTA</i> | Ajout d'herbe, <i>GTA</i> | ctrl  |
| Exp_AL4VG3     | 0.65, <i>GTA</i> | 0.45, <i>GTA</i> | 0.60, <i>GTA</i> | Ajout d'herbe, <i>GTA</i> | 0.3 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> , <i>GTA</i> |
| Exp_AL6VG2     | ctrl             | 0.45, <i>GTA</i> | ctrl             | Ajout d'herbe, <i>GTA</i> | ctrl  |
| Exp_AL6VG3     | ctrl             | 0.45, <i>GTA</i> | ctrl             | Ajout d'herbe, <i>GTA</i> | 0.3 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> , <i>GTA</i> |

est amélioré excepté pour un court moment à la fin de la journée du 7 juillet, avec une réduction atteignant des valeurs autour de 1 °C. Le confort thermique tel que vu par l'indice de confort UTCI est aussi amélioré jusqu'à 1.2 °C, mais est également dégradé par moments, rejoignant les résultats obtenus pour Montréal.

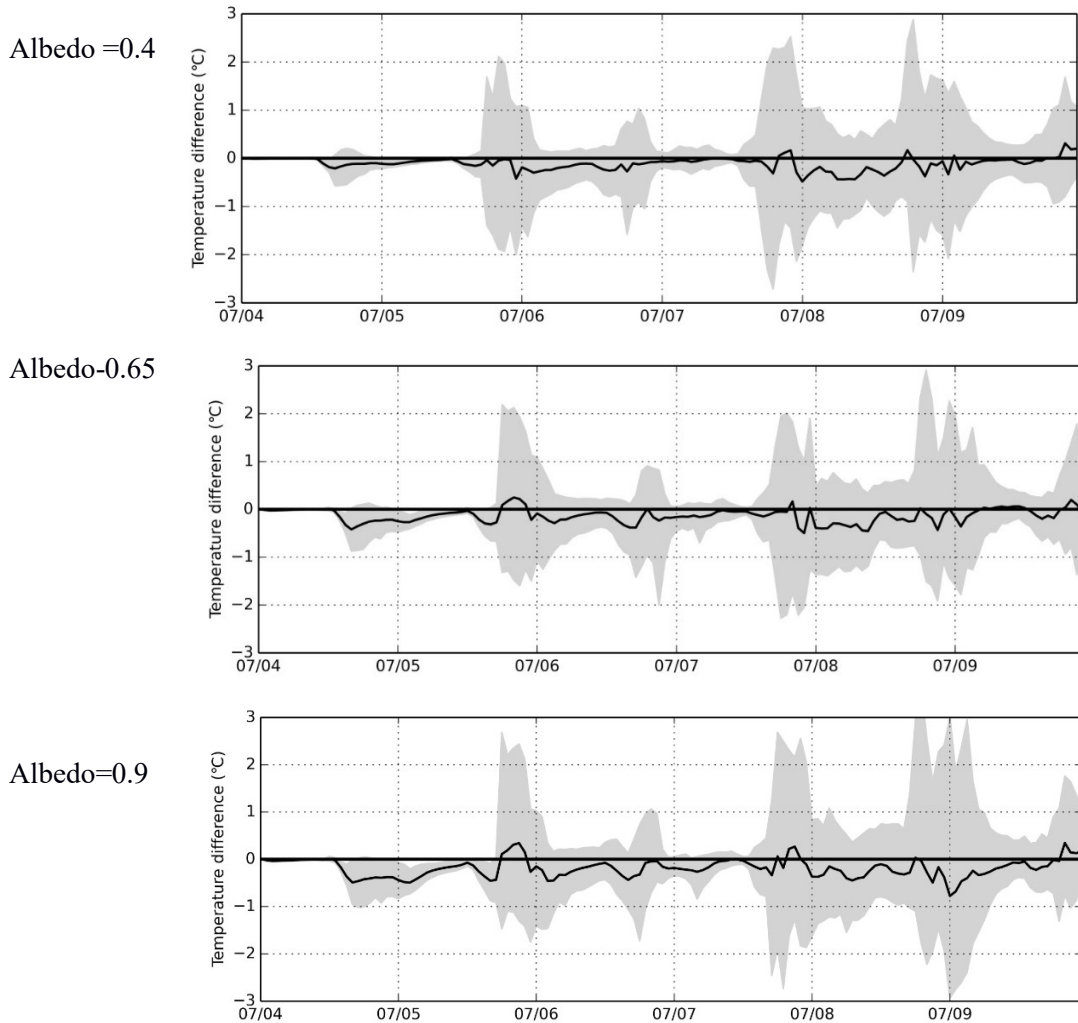
Bien que la mesure qui consiste à augmenter l'albédo des toits ne soit pas très efficace sur cette période de chaleur intense (voir l'appendice B), un test de sensibilité a été effectué avec différentes valeurs de l'albédo et le résultat est montré sur la Figure 25 pour la température de l'air. On peut voir sensiblement que, plus l'albédo est augmenté, plus la température est abaissée, ce qui est confirmé sur les valeurs moyennes pour toute la période.



**Figure 24.** Séries temporelles pour les périodes du 4 au 9 juillet 2010 de la différence de la température de l'air (panneau du haut à gauche), de l'humidex (panneau du bas à gauche), de l'UTCI (panneau en haut à droite) et du WBGT (panneau en bas à droite) entre l'expérience combinée Exp\_VG3AL3 (ligne continue noire et ombrage). La ligne continue représente la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de la ville de Toronto (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5eme et 95eme percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats de Exp\_VG3AL3. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort, et les valeurs positives indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort. L'annexe B présente les résultats de façon différente.

#### **d) Conclusions de l'étude sur Toronto**

Les expériences menées sur Toronto attestent que la méthode est transposable sur une autre ville que Montréal. Les résultats préliminaires obtenus sur la ville de Toronto pour la période de chaleur intense du début de juillet 2010 présentent certaines similarités (jusqu'à 2 °C de refroidissement sont obtenus en combinant des scénarios) et certaines différences (moins de variation diurnes) par rapport aux résultats de Montréal. L'impact du développement des brises de lac du fait de la proximité au lac Ontario est certainement un aspect important qui peut permettre d'expliquer les différences, et se remarque sur les cartes des résultats sur la région. Une analyse plus poussée des résultats obtenus sera proposée dans la suite de ce projet.



**Figure 25.** Séries temporelles pour la période du 4 au 9 juillet 2010 de la différence de la température de l'air entre les expériences *Exp\_AL1-40* (panneau du haut), *Exp\_AL1-65* (panneau du milieu) et *Exp\_AL1-90* combinée *Exp\_VG3AL3* (ligne continue noire et ombrage). La ligne continue représente la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de la ville de Toronto (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort, et les valeurs positives indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort. L'annexe B présente les résultats de façon différente.



## 7. Conclusions générales et prochaines étapes

Cette étude présente la mise en place à ECCC d'outils de modélisation numérique permettant d'évaluer l'influence de scénarios d'aménagements urbains sur la diminution de la chaleur et l'amélioration du confort thermique des citoyens. Deux études ont été menées, une sur Montréal pour deux événements de chaleur intense, et une sur Toronto pour l'événement de chaleur intense similaire à la période étudiée pour Montréal. Lors de ce projet, il a été possible de tester une variété de scénarios. En général, l'effet recherché semble possible à l'aide de mesures simples, bien que certains éléments comme le confort thermique peuvent être par moments détériorés en particulier en augmentant l'albédo dans la rue.

D'autres travaux restent cependant nécessaires. On peut se questionner par exemple sur la généralité de ces résultats, ce qui pourrait demander de procéder avec des tests sur un plus grand nombre d'événements de chaleur intense. Une approche ensembliste qui vise à considérer un grand nombre de périodes de chaleur intenses devrait permettre de fournir des réponses concrètes sur les meilleures mesures à considérer pour une ville. Par ailleurs, l'impact de ces mesures lors de pics de chaleur en-dehors d'une période de canicule s'avèrera également très important puisqu'ils seront probablement plus fréquents dans le futur. Il sera intéressant également de réaliser des tests de sensibilité sur la configuration numérique. En particulier, l'usage de la simulation bi-dimensionnelle pourrait permettre de tester des mesures sur de longues périodes de temps, mais une étude préliminaire serait nécessaire.

Une plus grande emphase devrait être aussi accordée à la distribution spatiale des impacts pour déterminer les points chauds et frais (en terme d'impact) sur les villes, en se concentrant sur les endroits les plus urbains ou habités, ou la population la plus vulnérable a été identifiée.

Afin de généraliser la méthode utilisée, il est à noter que lors de simulations d'événements ayant eu lieu plus de 5 ans auparavant, les archives ne sont plus disponibles au CMC et une simulation doit être régénérée pour le forçage atmosphérique pour cette période. En revanche, pour des simulations plus récentes le système peut s'appuyer directement sur les simulations opérationnelles à 2.5 km, et même incluant le modèle TEB depuis l'été 2018.

Finalement, le service météorologique canadien a exprimé son intérêt quant à l'utilisation d'une telle plateforme numérique afin de fournir des services de scénarios météorologiques en milieu

urbain, en supplément des activités actuelles qui concernent la qualité de l'air en ville.

## REFERENCES

### Systeme:

- Alavi, N., S. Belair, V. Fortin, S. Zhang, S.Z. Husain, M.L. Carrera, and M. Abrahamowicz, 2016: Warm season evaluation of soil moisture prediction in the Soil, Vegetation, and Snow (SVS) scheme. *J. Hydrometeor.*, **17**, 2315-2332.
- Bélair, S., L.-P. Crevier, J. Mailhot, B. Bilodeau, and Y. Delage, 2003a: Operational implementation of the ISBA land surface scheme in the Canadian regional weather forecast model. Part I: Warm season results. *J. Hydromet.*, **4**, 352-370.
- Bélair, S., R. Brown, J. Mailhot, B. Bilodeau, and L.-P. Crevier, 2003b: Operational implementation of the ISBA land surface scheme in the Canadian regional weather forecast model. Part II: Cold season results. *J. Hydromet.*, **4**, 371-386.
- Bernier, N. B., S. Bélair, B. Bilodeau, and L. Tong, 2011: Near-Surface and Land Surface Forecast System of the Vancouver 2010 Winter Olympic and Paralympic Games. *J. Hydrometeor.*, **12**, 508-530.
- Bernier, N.B., and S. Bélair: High horizontal and vertical resolution limited area model: Near surface and wind energy forecast applications. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1061-1078.
- Best, M.J., and C.S.B. Grimmond, 2015: Key conclusions of the first international urban land surface model comparison project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **96** (5), 805-819.
- Côté, J., S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch, and A. Staniforth, 1998a: The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1373-1395.
- Côté, J., J.-G. Desmarais, S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch, and A. Staniforth, 1998b: The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part I: Results. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1397-1418.
- Dong, A.C.G. Varquez, M. Kanda, 2017: Global anthropogenic heat flux database with high spatial resolution, *Atmospheric Environment*, **150**, 276-294, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.040>.

- Girard, C., and co-authors, 2014 : Staggered vertical discretization of the Canadian Environmental Multiscale (GEM) model using a coordinate of the log-hydrostatic-pressure type. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1183-1196.
- Husain, S.Z., S. Bélair, J. Mailhot, and S. Leroyer: Improving the representation of the nocturnal near-neutral surface layer in the urban environment with a mesoscale atmospheric model. *Bound. Layer Meteorol.*, **147**, 525-551.
- Husain, S.Z., N. Alavi, S. Belair, M.L. Carrera, S. Zhang, V. Fortin, M. Abrahamowicz, and N. Gauthier, 2016: The multi-budget Soil, Vegetation, and Snow (SVS) scheme for improved land surface parameterization. *J. Hydrometeorol.*, **17**, 2293-2313.
- John Manville Inc.: [https://www.jm.com/content/dam/jm/global/en/commercial-roofing/Data%20sheets/JM%20TPO%20Data%20Sheets/JM%20TPO\\_JM%20Brand/RS-8633\\_JMTPO60mil.pdf](https://www.jm.com/content/dam/jm/global/en/commercial-roofing/Data%20sheets/JM%20TPO%20Data%20Sheets/JM%20TPO_JM%20Brand/RS-8633_JMTPO60mil.pdf)
- Lemonsu, A., C.S.B. Grimmond, and V. Masson, 2004: Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille. *J. Appl. Meteorol.*, **43**, 312-327.
- Lemonsu, A., S. Bélair, and J. Mailhot, 2009: The new Canadian urban modelling system: Evaluation for two cases from the Joint Urban 2003 Oklahoma City Experiment. *Bound.-Layer Meteorol.*, **133**, 47-70.
- Lemonsu, A., S. Bélair, J. Mailhot, and S. Leroyer: Evaluation of the Town Energy Balance model under cold and snowy conditions during the Montreal Urban Snow Experiment 2005. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 346-362.
- Leroyer, J. Mailhot, S. Belair, A. Lemonsu, and I. B. Strachan, 2010b: Modeling the surface energy budget during the thawing period of the 2006 Montreal Urban Snow Experiment. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 68–84, doi:10.1175/2009JAMC2153.1.
- Leroyer, S., S. Bélair, J. Mailhot, and I. Strachan, 2011: Microscale numerical prediction over Montreal with the Canadian external urban modeling system. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **50**, 2410-2428.
- Leroyer, S., S. Bélair, S.Z. Husain, and J. Mailhot, 2014: Subkilometer numerical weather prediction in an urban coastal area: A case study over the Vancouver metropolitan area. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **53**, 1433-1453.
- Leroyer, S., S. Bélair, L. Spacek, I. Gultepe, 2018: Modelling of radiation-based heat stress indicators for urban high resolution Numerical Weather Prediction, *Urban Climate*, **25**, 64-81. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.003>.
- Masson, V., 2000: A physically based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteorol.*, **94**, 357–397.

Noilhan, J., and S. Planton, 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536–549.

Zadra, A., D. Caya, J. Côté, B. Dugas, C. Jones, R. Laprise, K. Winger, and L.-P. Caron, 2008: The next Canadian regional climate model. *La Physique au Canada*, **64**, 75-83.

### **Revue de littérature:**

Bass, B., et B. Baskaran, 2003: Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaption strategy for urban areas. National Research Council Canada, Ottawa, 106 p.

Bowler, D.E., L. Buyung-Ali, T.M. Knight, et A.S. Pullin, 2010: Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landsc. Urban Plan*, **97**, 147–155.

Charalampopoulos I., I. Tsiros, A. Chronopoulou-Sereli, et A. Matzarakis, 2013: Analysis of thermal bioclimate in various urban configurations in Athens, Greece. *Urban Ecosyst*, **16**, 217–233.

Coutts A.M., E.M. White, N.J. Tapper, J. Beringer, et S.J. Livesley, 2016: Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments Subkilometer Numerical Weather Prediction in an Urban Coastal Area: Theor. Appl. Climatol., **124**, 55–68 DOI 10.1007/s00704-015-1409-y.

Gill, S.E., J.F. Handley, A.R. Ennos, et S. Pauleit, 2007: Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*, **33**, 115-133.

Jacquet, S., 2011: Performance énergétique d’une toiture végétale au centre-ville de Montréal. Résumé de mémoire de thèse, École de Technologie Supérieure de Montréal. 47pp.

Jihad, A.S., M. Tahiri, 2016: Modeling the urban geometry influence on outdoor thermal comfort in the case of Moroccan microclimate, *Urban Clim.*, **16** (2016), pp. 25-42.

Krayenhoff, E.S., et J.A. Voogt, 2010: Impacts of urban albedo increase on local air temperature at daily through annual time scales: Model results and synthesis of previous work. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **49**, 1634–1648.

Li D., E. Bou-Zeid, et M. Oppenheimer, 2014: The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environ. Res. Lett.*, **9**, No. 5.

Loughner C.P., D.J. Allen, D.L. Zhang, K.E. Pickering, R.R. Dickerson, et L. Landry L., 2012: Roles of urban tree canopy and buildings in urban heat island effects: Parameterization and preliminary results. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **51**, 1775–1793.

Masson, V., Y. Lion, A. Peter, G. Pigeon, J. Buyck, et E. Brun, E., 2013: Grand Paris: Regional landscape change to adapt city to climate warming. *Clim. Change*, **117**, 769–782.

Masson, V., et co-auteurs, 2014: Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach. *Urban Climate*, **10**, 407-429.

Park, M., A. Hagishima, J. Tanimoto, et K.-I. Narita, 2012: Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site. *Build Environ.*, **56**, 38–46.

Rettner R., 2009: Hot Cities: The Urban Heat Island Effect, Columbia University, YouTube:

<http://www.youtube.com/watch?v=yB8xcSwrvhY>

- Rosenzweig, C., W.D. Solecki, L. Parshall, B. Lynn, J. Cox, R. Goldberg, S. Hodges, S. Gaffin, R.B. Slosberg, P. Savio, F. Dunstan, and M. Watson, 2009: Mitigating New York City's heat island: Integrating stakeholder perspectives and scientific evaluation. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 90, 1297-1312, doi:10.1175/2009BAMS2308.1
- Souch, C.A., et C. Souch, 1993: The effect of trees on summertime below canopy urban climates: A case study Bloomington, Indiana. *J. Arboric.*, 19, 303-312.
- Spronken-Smith, R.A., et T.R. Oke, 1998: The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *Int J. Remote Sens.*, 19, 2085-2104.
- Taha, H., S. Douglas, J. Haney, 1997: Mesoscale meteorological and air quality impacts of increased urban albedo and vegetation. *Energy Build.*, 25, 169-177.
- Taha, H., S. Chang, H. Akbari, 2000: Meteorological and air quality impacts of heat island mitigation measures in three U.S. cities. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley (CA), USA.
- Taha, H., 2005: Urban surface modification as a potential ozone air-quality improvement strategy in California - Phase one: Initial Mesoscale Modeling. PIER Final Project Report. Prepared for California Energy Commission.
- Taha, H., 2008a: Urban surface modification as a potential ozone air-quality improvement strategy in California: A mesoscale modeling study. *Bound. Layer. Meteorol.*, 127, 219-239.
- Taha, H., 2008b: Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation. *Atmos. Environ.*, 42, 8795-8809.
- Taha, H., 2009a: Mesoscale and meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation in California: Results and regulatory aspects. Conference on Countermeasures to UHI, Berkeley (CA) USA.
- Taha, H., 2009b: Urban surface modification as a potential ozone air-quality improvement strategy in California - Phase Two: Fine-resolution meteorological and photochemical modeling of urban heat islands. Altostratus Inc. for the California Energy Commission, PIER, Martinez (CA), US.
- Touchaei, A. G., H. Akbari, C.W. Tessum, 2016: Effect of increasing urban albedo on meteorology and air quality of Montreal (Canada). Episodic simulation of heat wave in 2005. *Atmos. Environ.*, 132, 188-206.
- Upmanis, H., I. Eliasson, et S. Lindqvist, 1998: The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city Goteborg, Sweden. *Int. J. Climatol.*, 18 , pp. 68.
- Watkins, R., J. Palmer, M. Kolokotroni, 2007: Increased temperature and intensification of the urban heat island: Implications for human comfort and urban design. *Built Environment*, 33, 85-96.
- Yang J, Z.H. Wang, F. Chen, S. Miao, M. Tewari, J.A. Voogt, et S. Myint, 2015: Enhancing hydrologic modelling in the coupled weather research and forecasting-urban modelling system. *Bound.- Layer Meteor.*, 155, 87-109.
- Younger, M., H.R. Morrow-Almeida, S.M. Vindigni, et A.L. Dannenberg, 2008: Built environment, climate change, and health: Opportunities for co-benefits. *Amer. J. Preventive Medicine*, 35, 517-526.
- Zhang, Z., Y. Lu, H. Pan, 2013: Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks. *Urban Forestry and Urban Greening*, 12, 323-329.



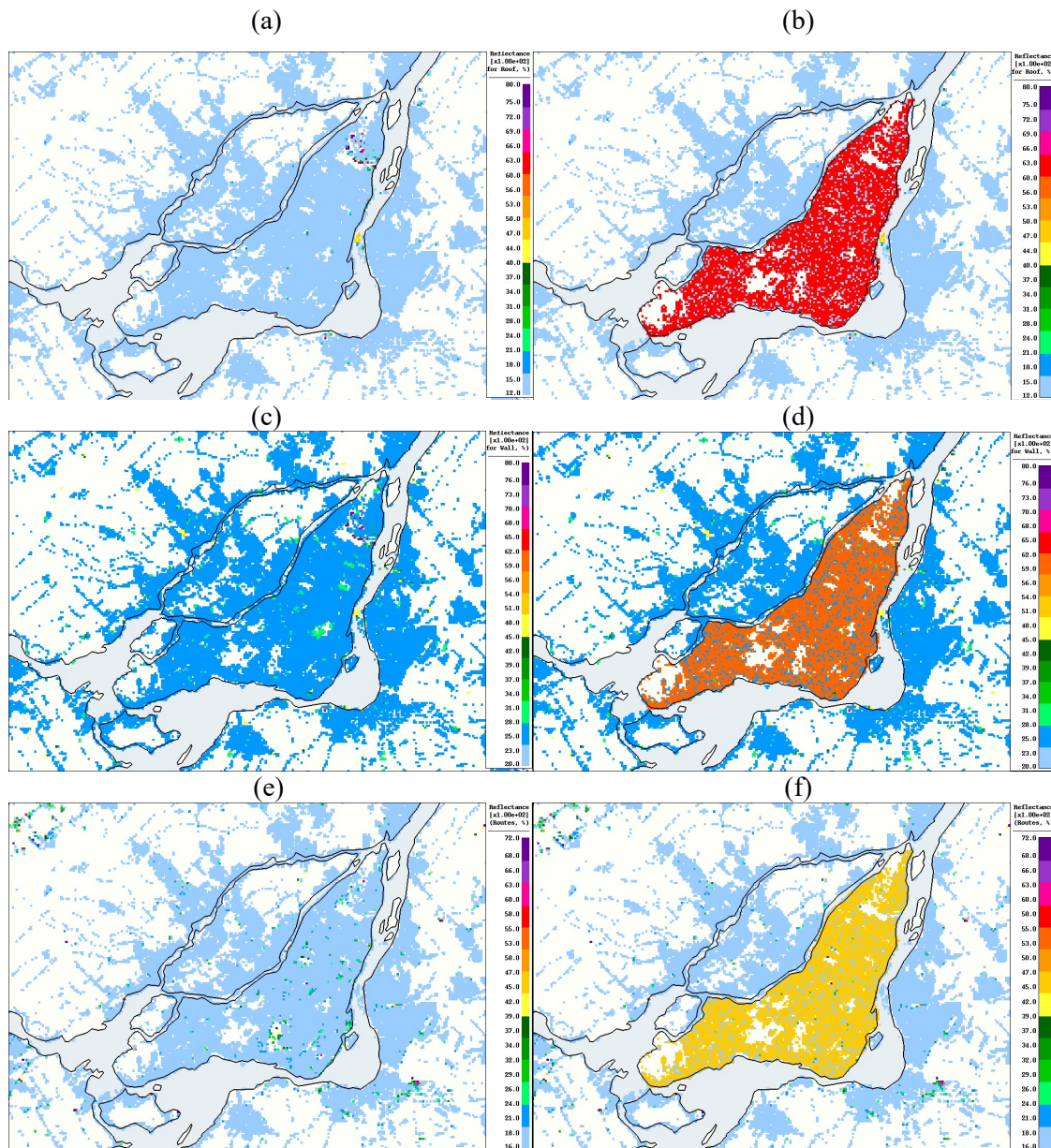
## Appendice A. Résultats pour la ville de Montréal

### A.1) Modifications pour les scénarios

Les principaux aspects modifiés dans les scénarios présentés dans le tableau 1 du rapport sont exposés ici. La première catégorie de scénarios se concentre sur les propriétés thermo-radiatives des matériaux urbains (type AL), la seconde sur l'ajout de végétation (type VG), et la troisième sur les flux anthropiques (type HF).

#### Expériences de type AL

Les valeurs des réflectances sont modifiées tel que présenté dans la figure A1.



**Figure A1.** Valeurs des réflectances initiales (expérience contrôle, (a), (c) et (e), à gauche), et augmentées (à droite); (b) pour les toits dans les expériences AL1, AL3 et AL5; (d) pour les murs dans les expériences AL3 et



AL6; (f) pour les routes dans les expériences AL3 et AL7. Les modifications sont apportées aléatoirement à 85 % des mailles de calcul de l'île de Montréal.

### Expériences de type VG

Dans ces scénarios, une partie des surfaces artificielles (routes, trottoirs, stationnements, zones industrielles) est remplacée par de la végétation selon la distribution montrée à la figure A2. Certains scénarios s'accompagnent d'un processus d'irrigation illustré sur la figure A3.

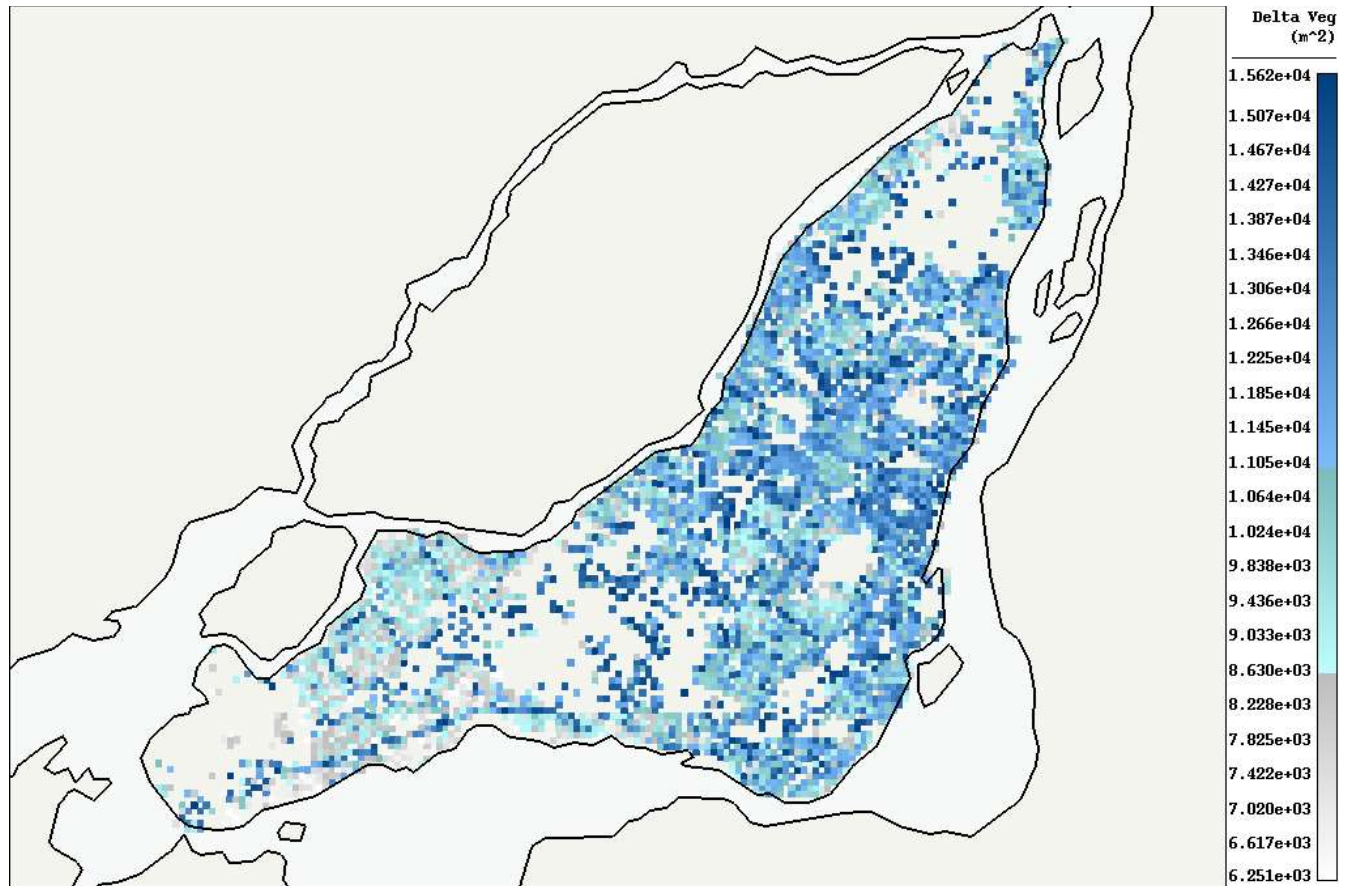


Figure A2. Superficie de la végétation ajoutée (en m<sup>2</sup>) sur l'île de Montréal par rapport à la simulation contrôle pour les scénarios VG2 et VG3 (végétation basse, herbe) et pour les scénarios VG4 et VG5 (végétation haute). La réduction des surfaces imperméables correspond à la même superficie. Les modifications sont apportées pour les mailles de calcul de l'île de Montréal dans laquelle les fractions de surfaces artificielles étaient comprises entre 20 et 50 % afin de conserver les routes principales et les modifications ne dépassent pas 25 % de la maille de calcul qui a une superficie de 6.25e+04 m<sup>2</sup>.

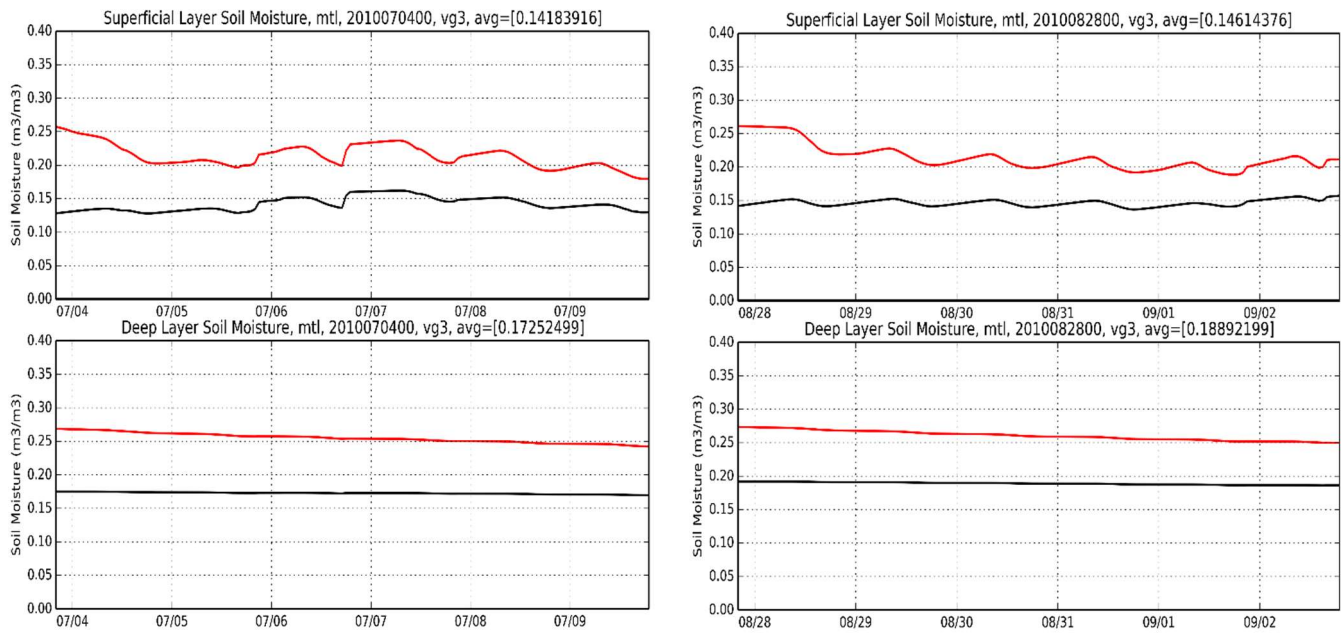


Figure A3. Évolution temporelle moyenne de l'eau du sol ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) pour les couches superficielles (en haut) et profondes (en bas) du sol représentées dans le schéma de végétation, dans la simulation de contrôle (traits noirs), et avec un procédé d'irrigation pour l'expérience VG3 (rouge) en juillet (à gauche) et en août (à droite). La moyenne spatiale est réalisée sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles), tandis que le processus d'irrigation est appliqué sur les mailles de calcul concernées par l'augmentation de la végétation (Figure A2). Il est à noter que les valeurs dans l'expérience VG5 sont similaires.

### Expériences de type HF

La figure A4 illustre la variabilité spatiale des flux d'énergie émis par le trafic automobile. Les valeurs moyennes mensuelles des flux de chaleur sensible et latente évoluent selon un cycle diurne dans le modèle. Dans l'expérience de contrôle, seule une partie des flux anthropiques provenant des bâtiments sont calculés explicitement par le modèle. Dans le scénario présenté dans cette catégorie, ces émissions de chaleur sont prises en compte.

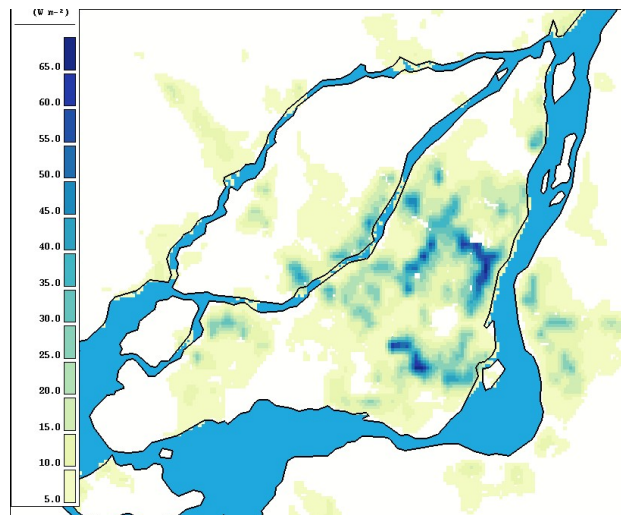


Figure A4. Estimation du flux de chaleur sensible émis par le trafic routier, pour le mois de juillet à 1400 heure locale.

## A.2) Présentation des résultats

Pour chaque scénario, les résultats sont présentés selon des cartes et des séries temporelles pour quatre indicateurs de chaleur et de confort suivants, déterminés près de la surface (au milieu de la rue) : la température, l'Humidex, l'UTCI, et le WBGT, tous exprimés en degrés Celsius. Les vagues de chaleur du mois de Juillet (du 4 juillet au 9 juillet) et d'Aout (du 28 août au 2 septembre) 2010 sont considérées.

### Légende des cartes :

Les cartes présentent les variabilités spatiales sur la région de Montréal des impacts dudit scénario (différences des valeurs du scénario moins celles du contrôle, en Celsius), en moyenne pour les vagues de chaleur de Juillet (à gauche) et d'Aout (à droite) 2010. Les tons bleus indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort thermique, et les tons jaunes à rouges indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort thermique.

### Légende des séries temporelles :

Ensuite, les séries temporelles des impacts dudit scénario au cours des vagues de chaleur de juillet puis d'aout sont présentées pour les mêmes indicateurs (différences des valeurs du scénario moins celles du contrôle, en Celsius). La ligne continue noire représente la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5eme et 95eme percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort, et les valeurs positives indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort.

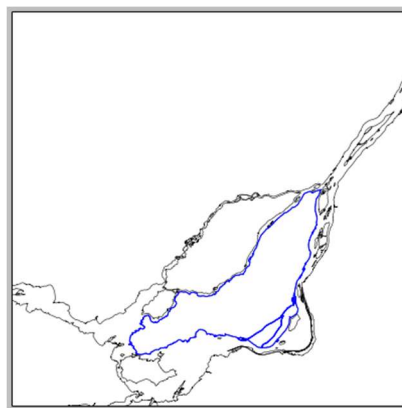


Figure A5. Limites de la zone considérée pour les séries temporelles moyennes (île de Montréal)

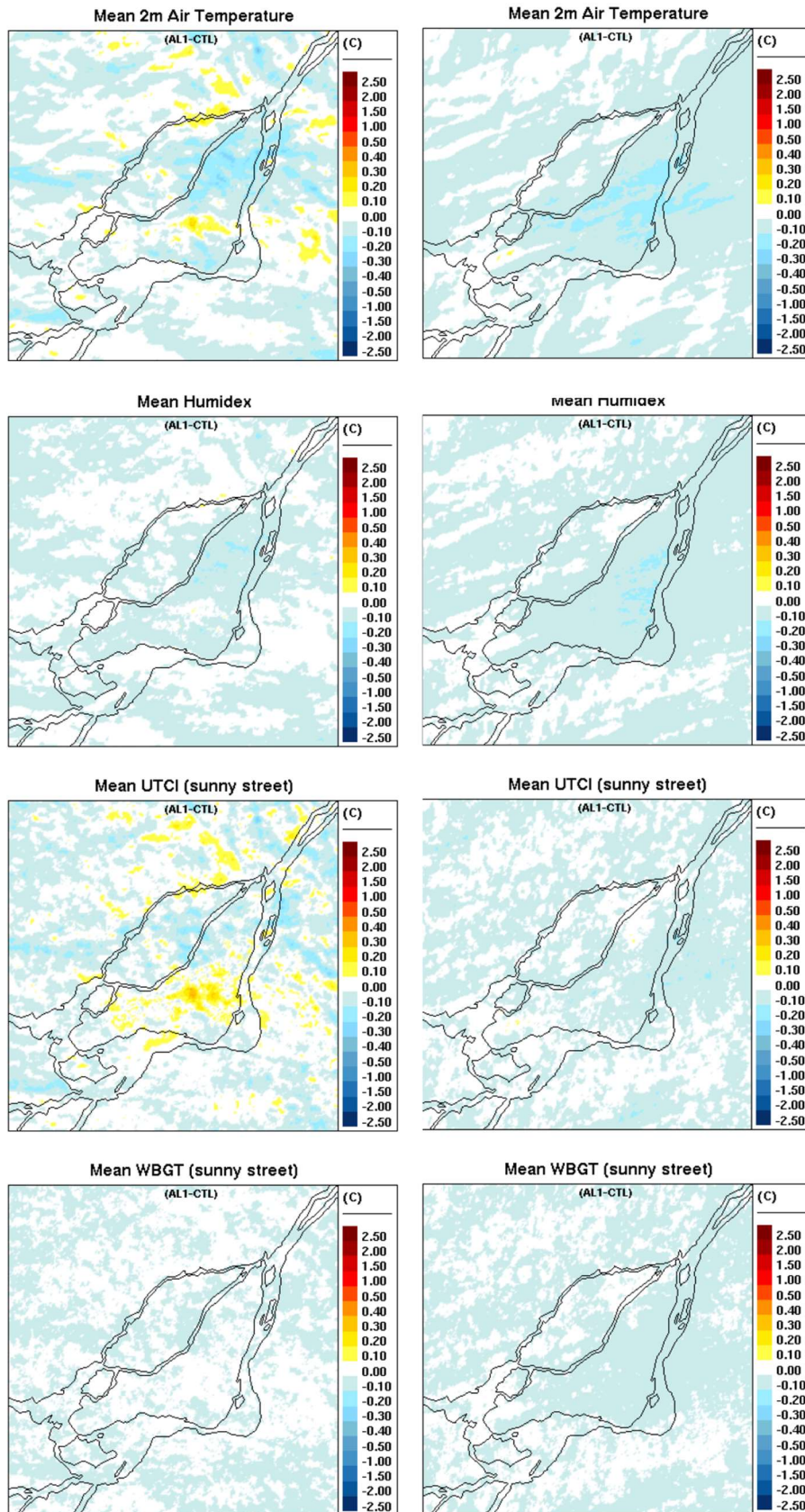
### Exception :

Les résultats de l'expérience HF1 sont présentés selon le calcul des différences des valeurs de contrôle moins celles du scénario afin d'évaluer l'impact d'une mesure de diminution du trafic en milieu urbain sur la chaleur et le confort.

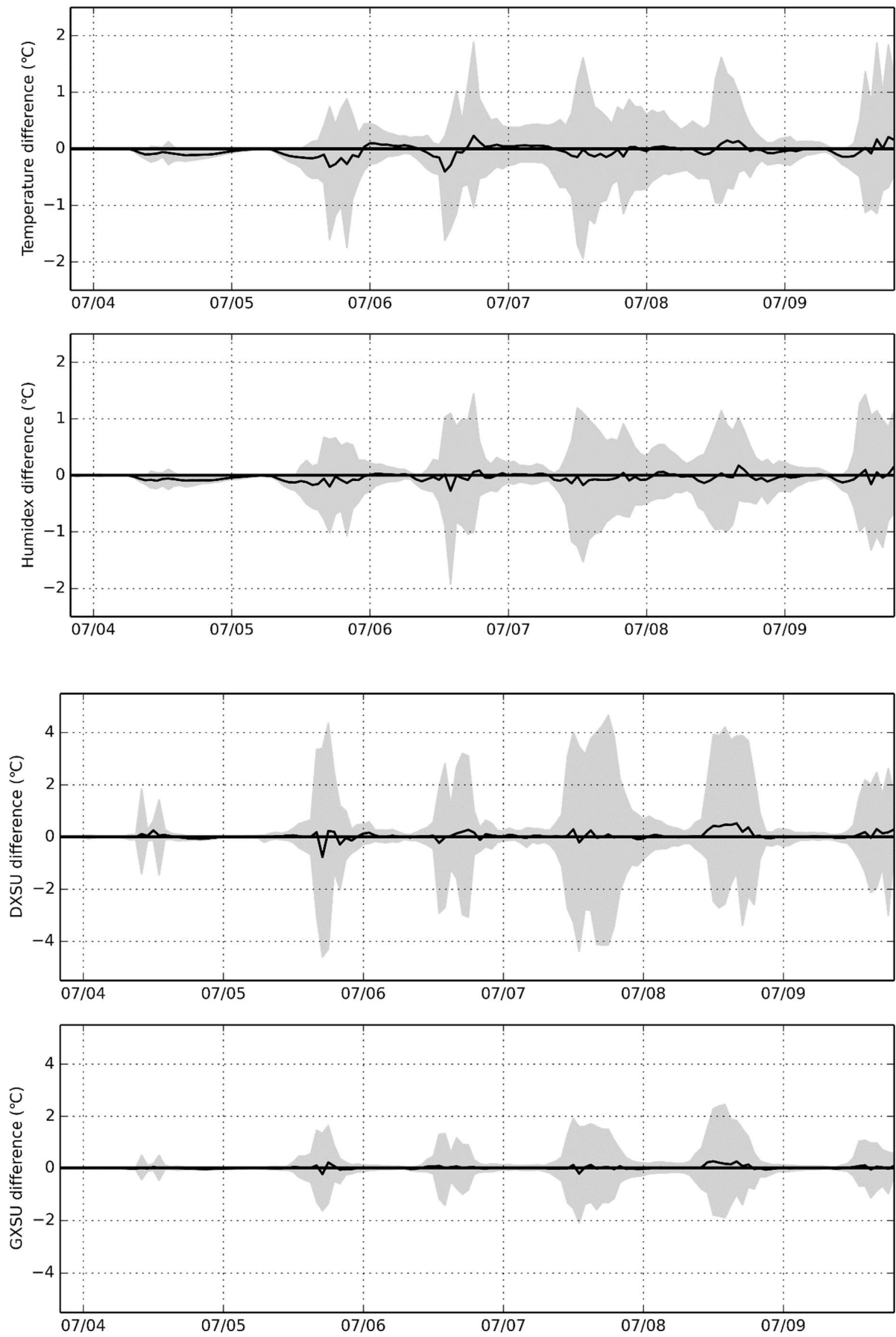


# Scenario Albedo Roof (al1)

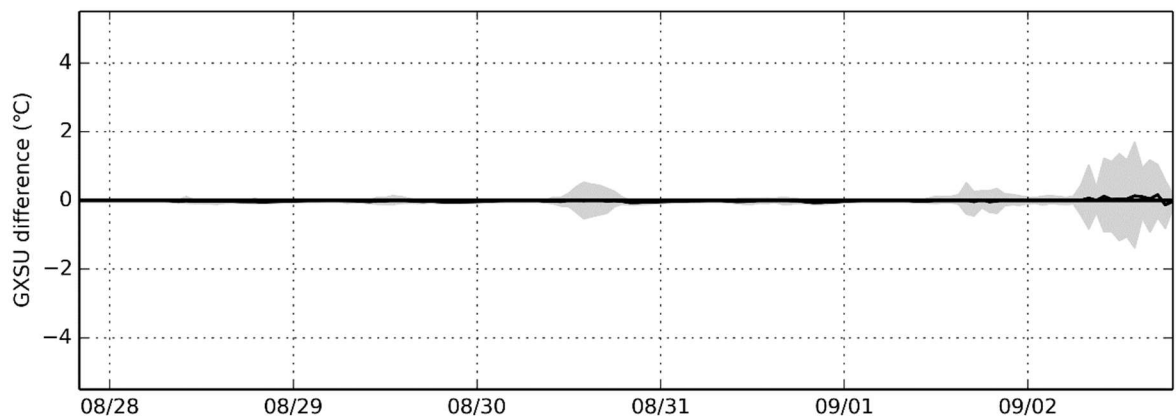
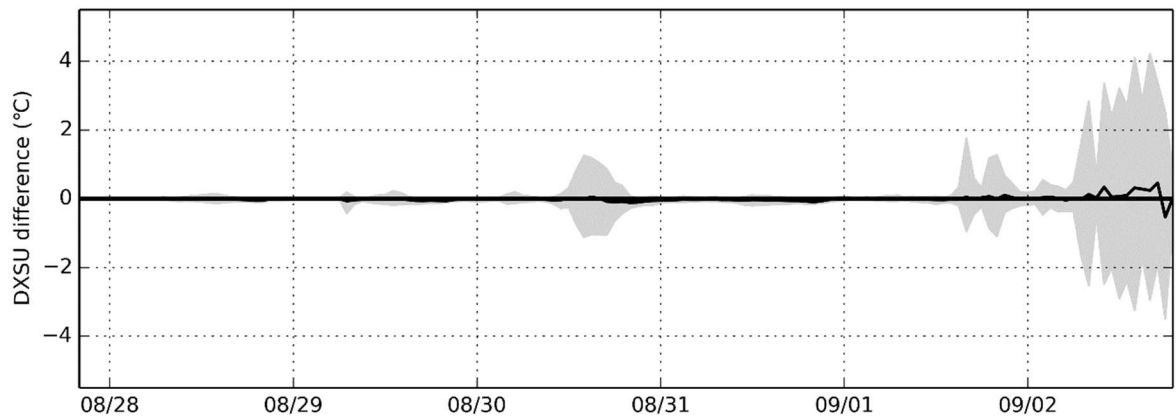
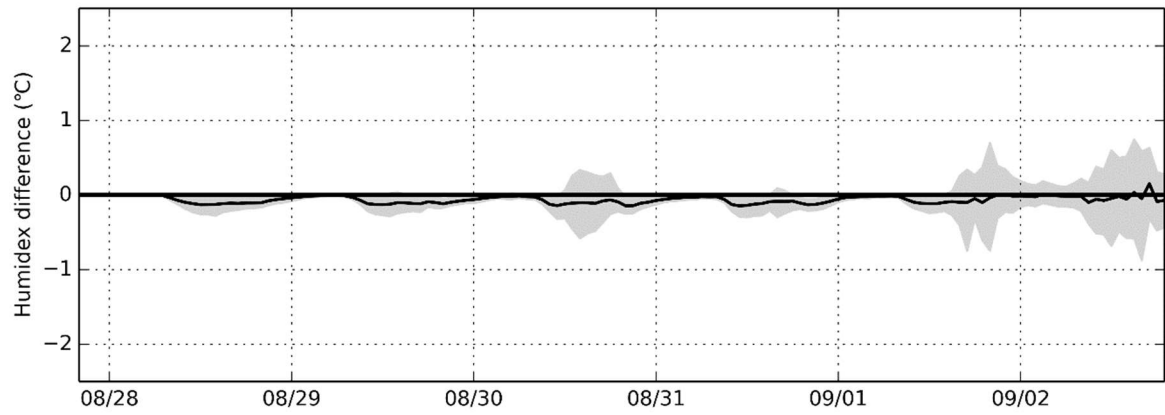
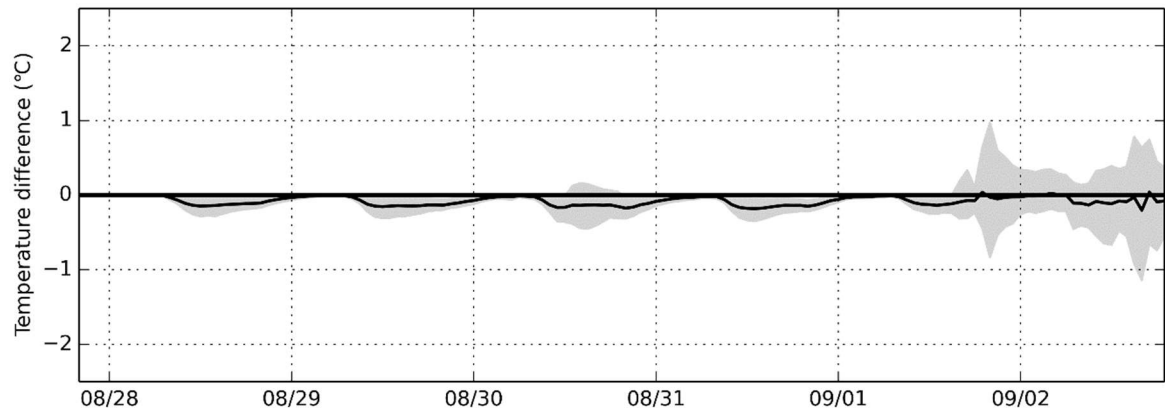
## July August



AL1  
Jul



AL1  
Aug

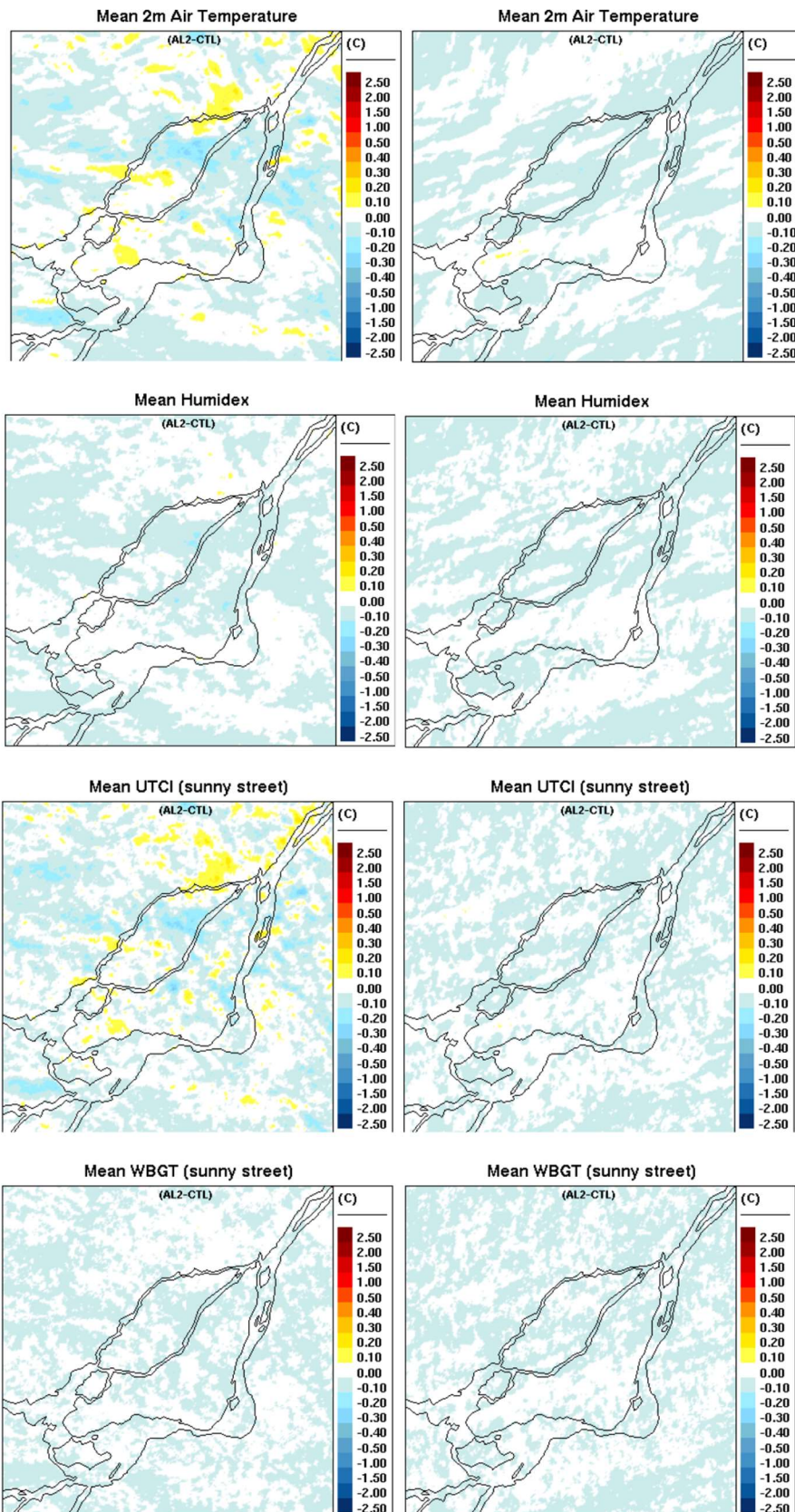




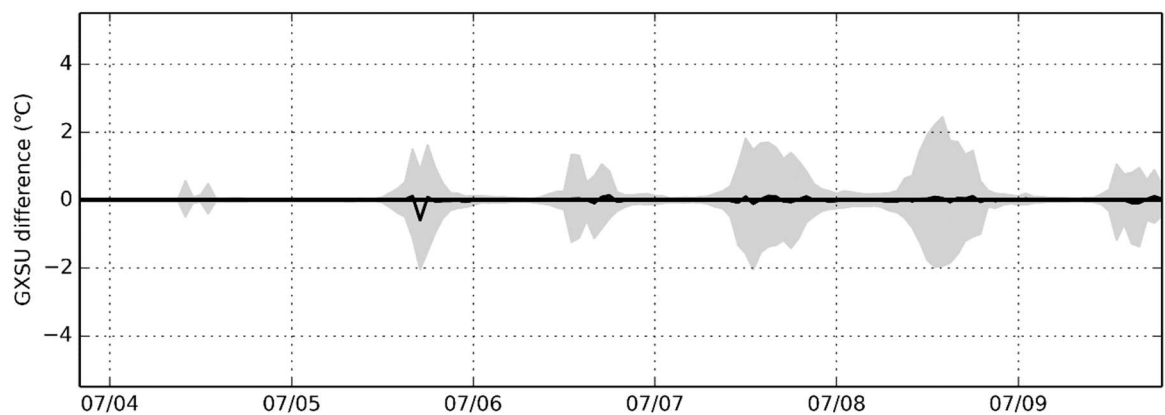
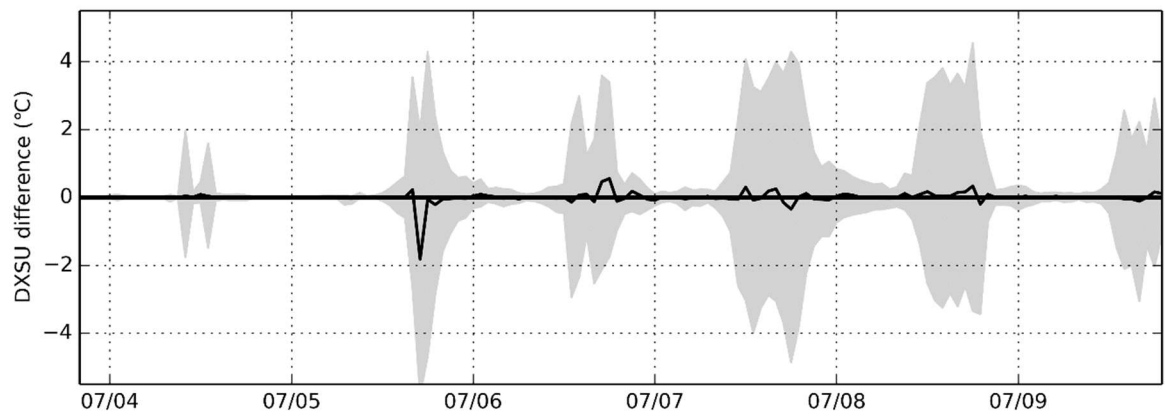
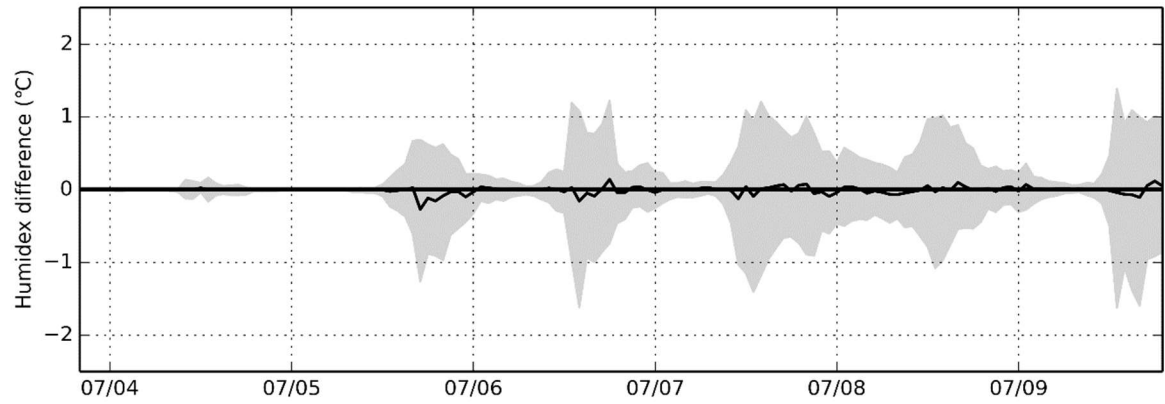
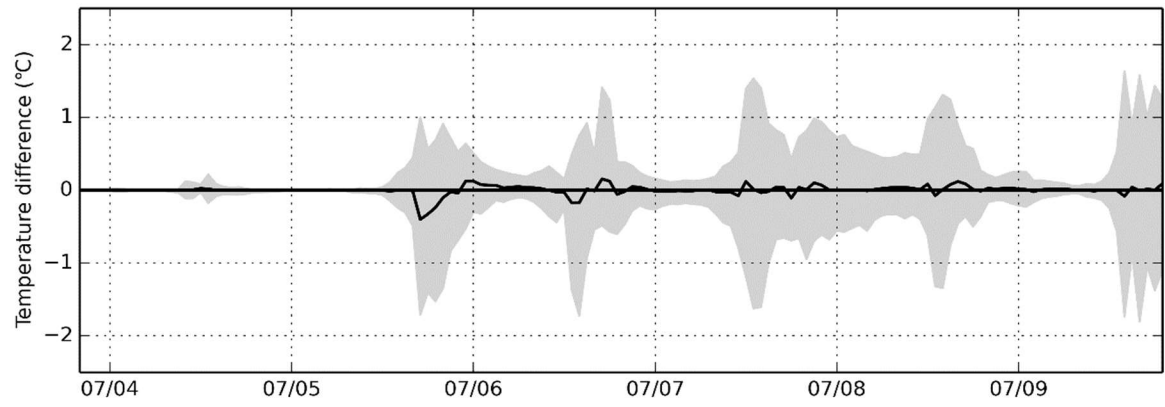
# Scenario Albedo Roof Rosemont (al2)

## July

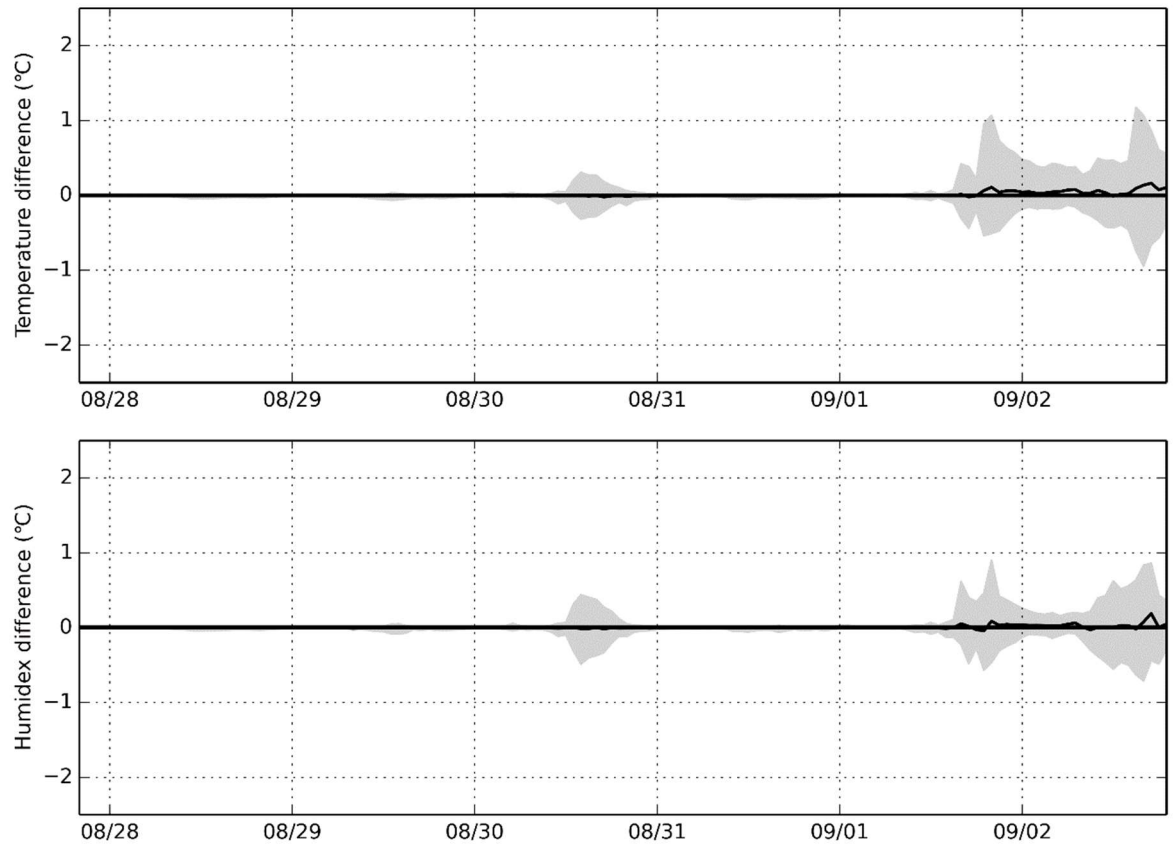
## August

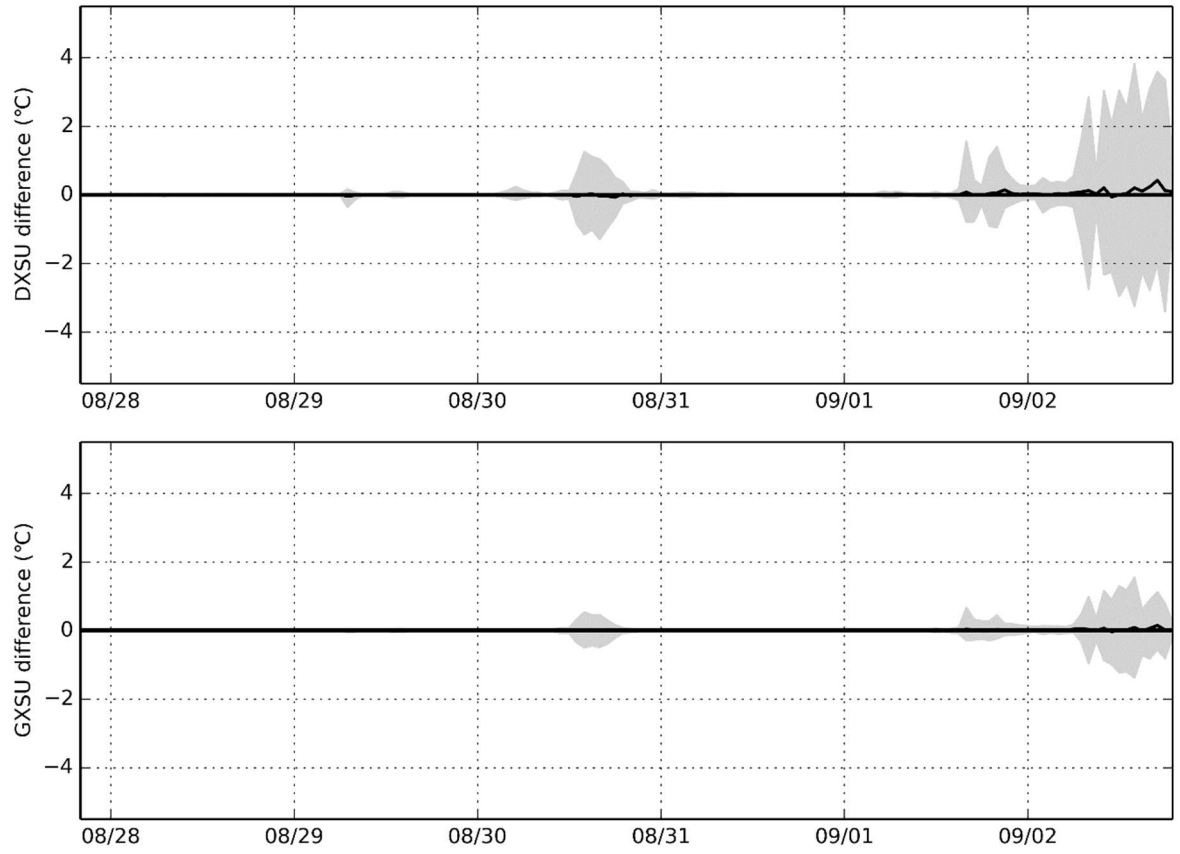


AL2  
Jul



AL2  
Aug



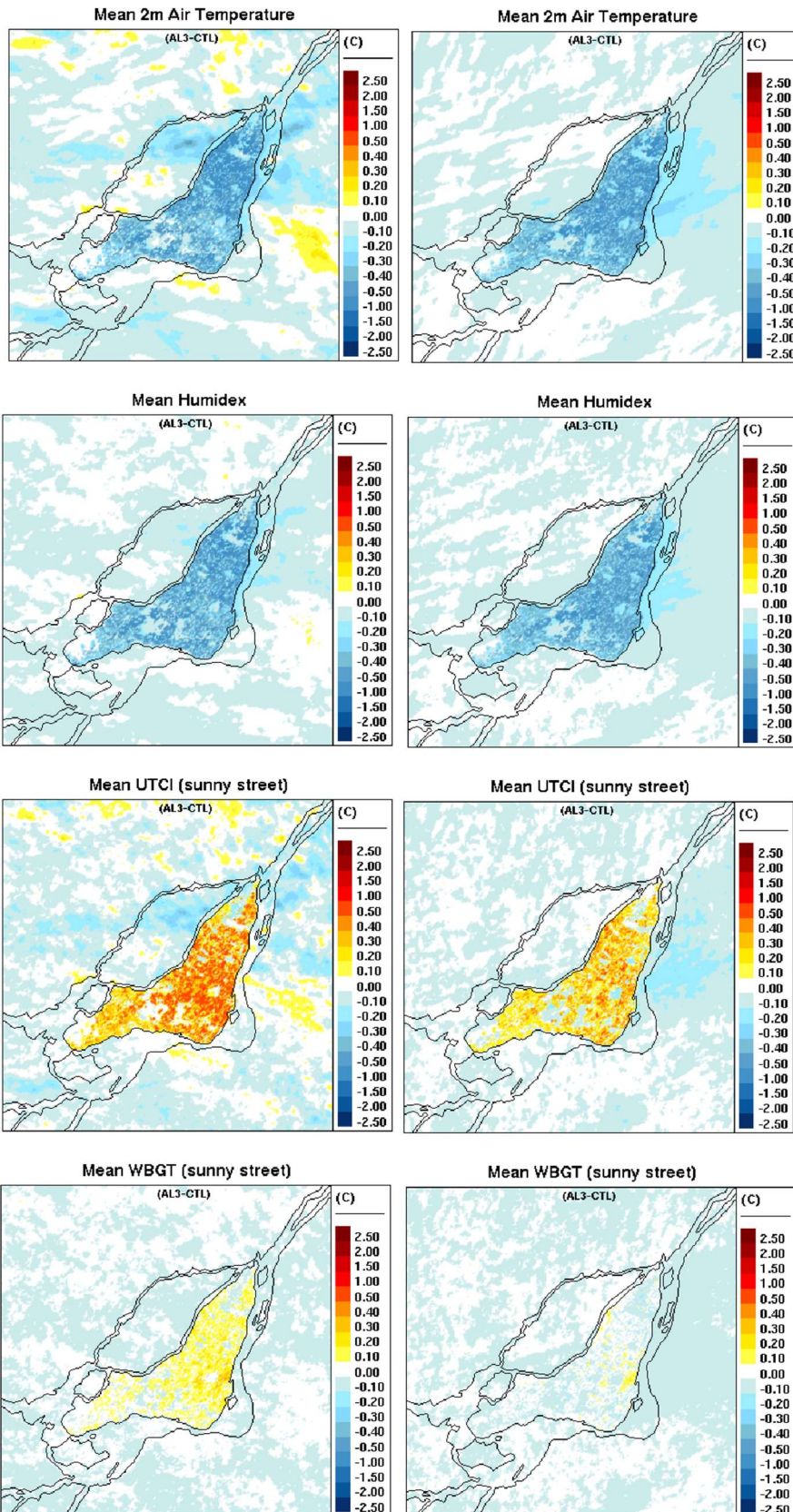




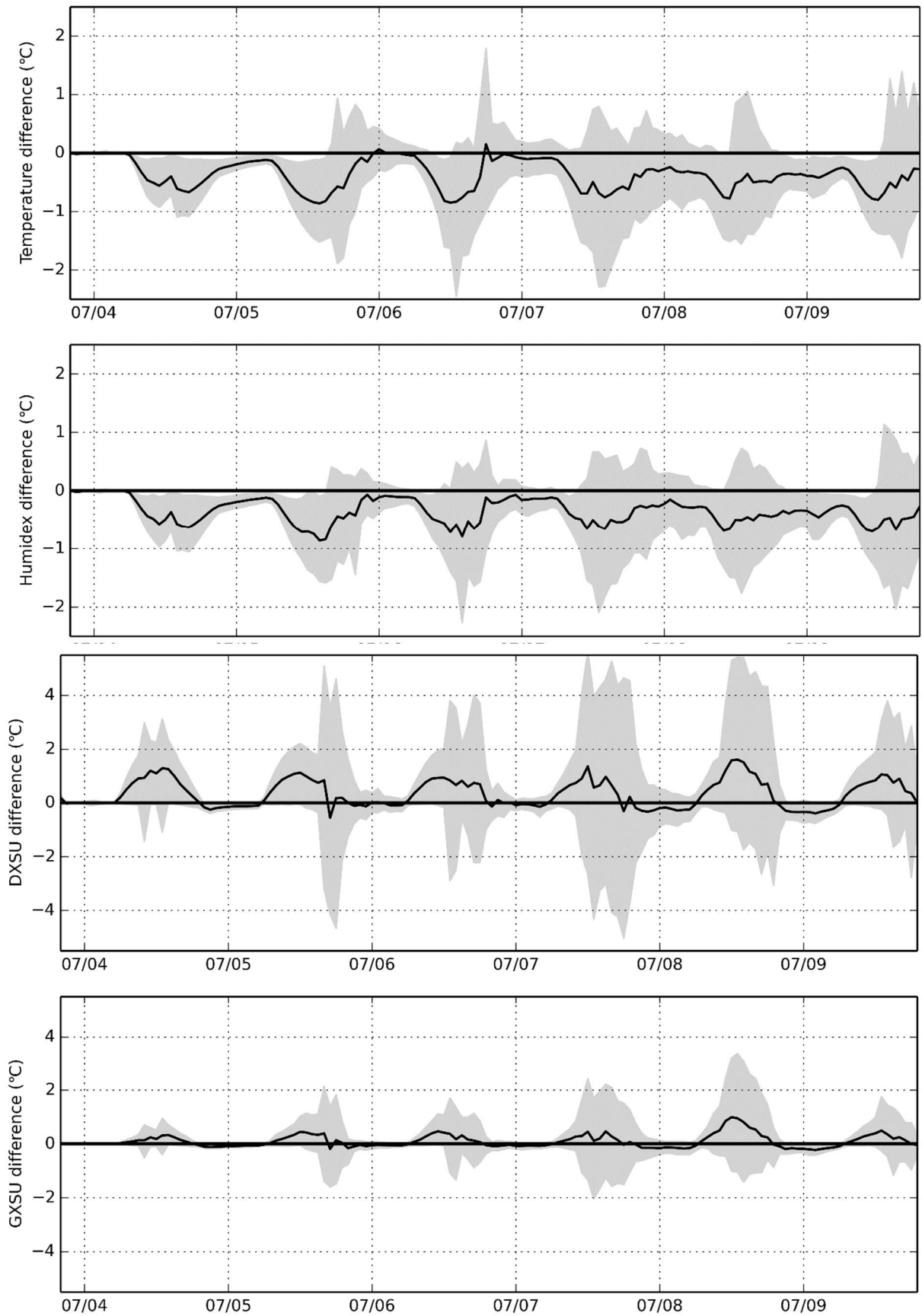
# Scenario Albedo Surfaces (al3)

## July

## August

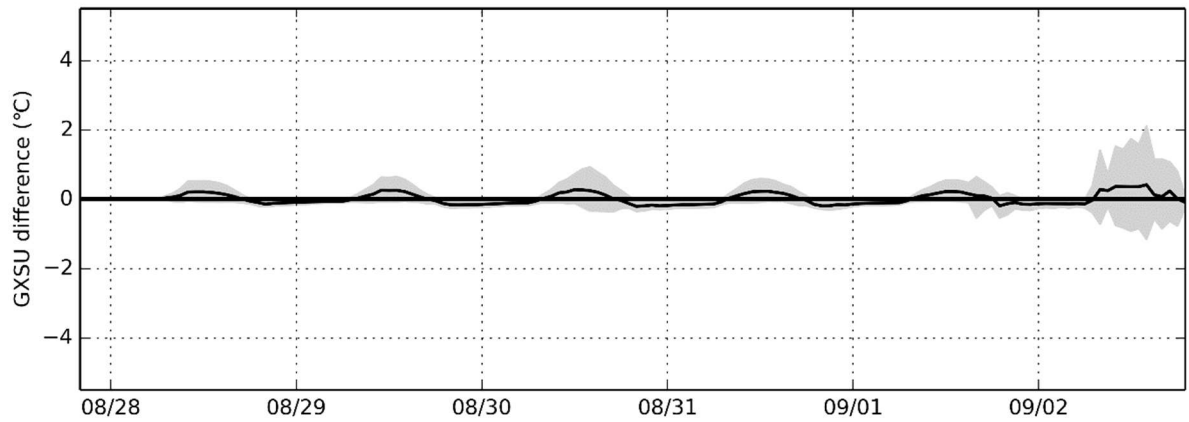
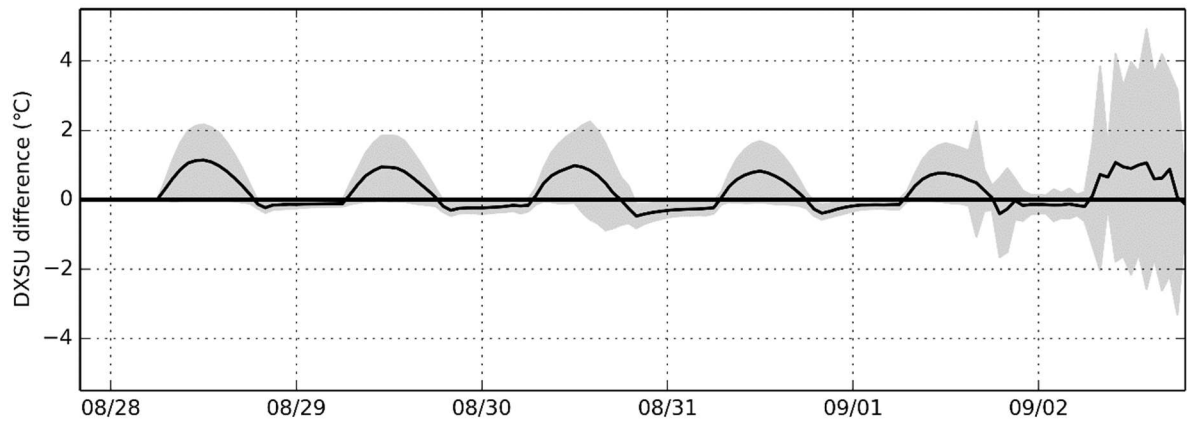
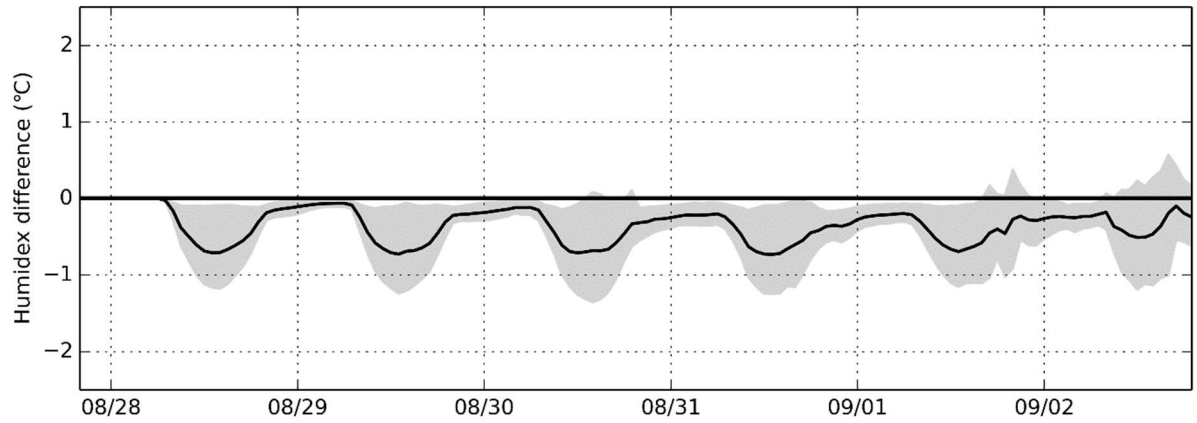
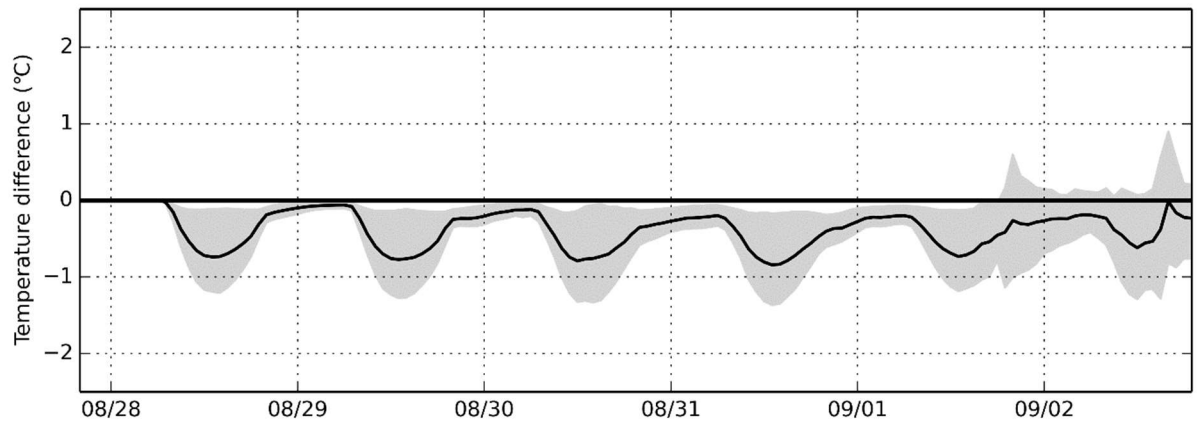


AL3  
Jul



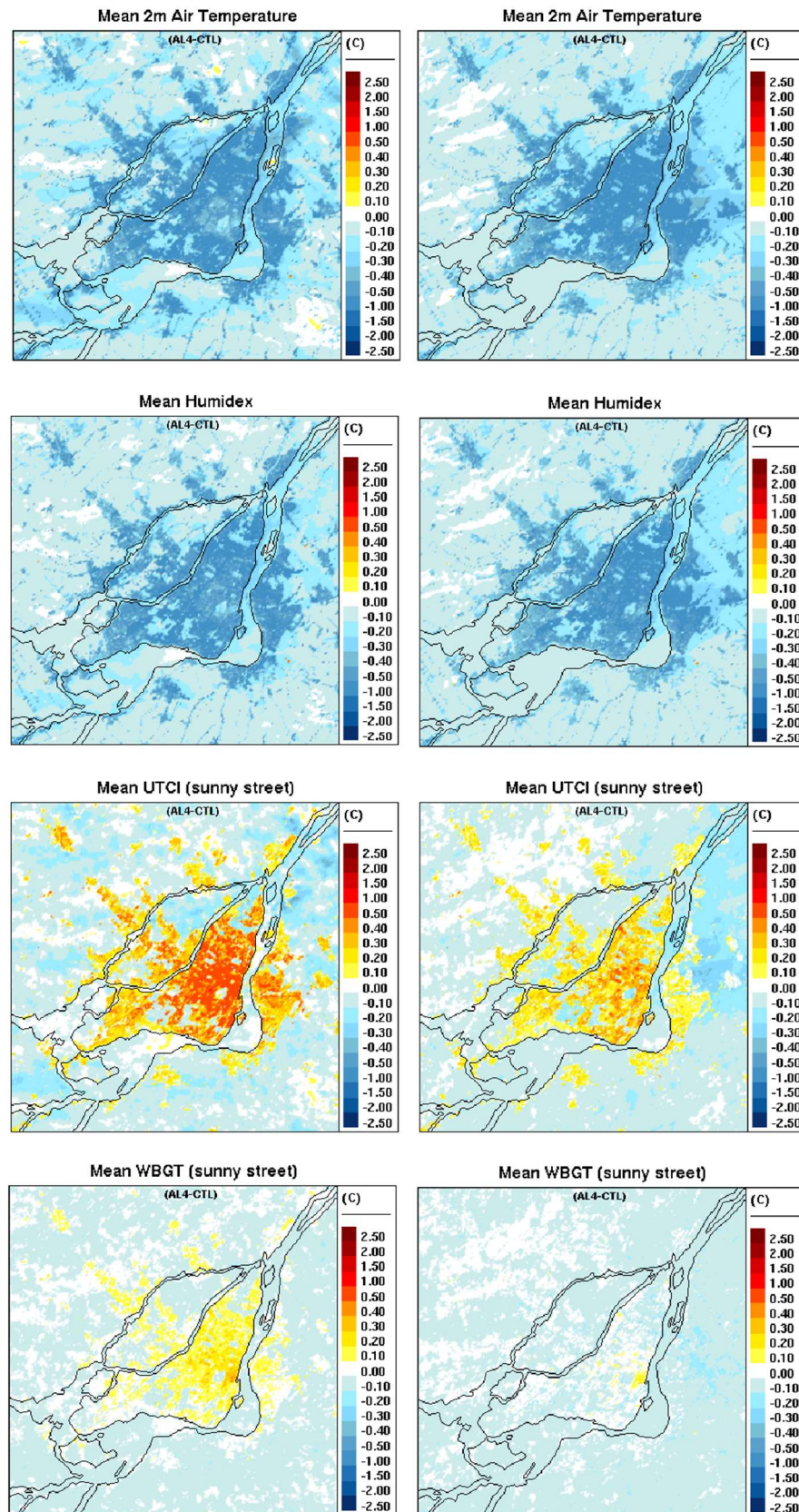


AL3  
Aug

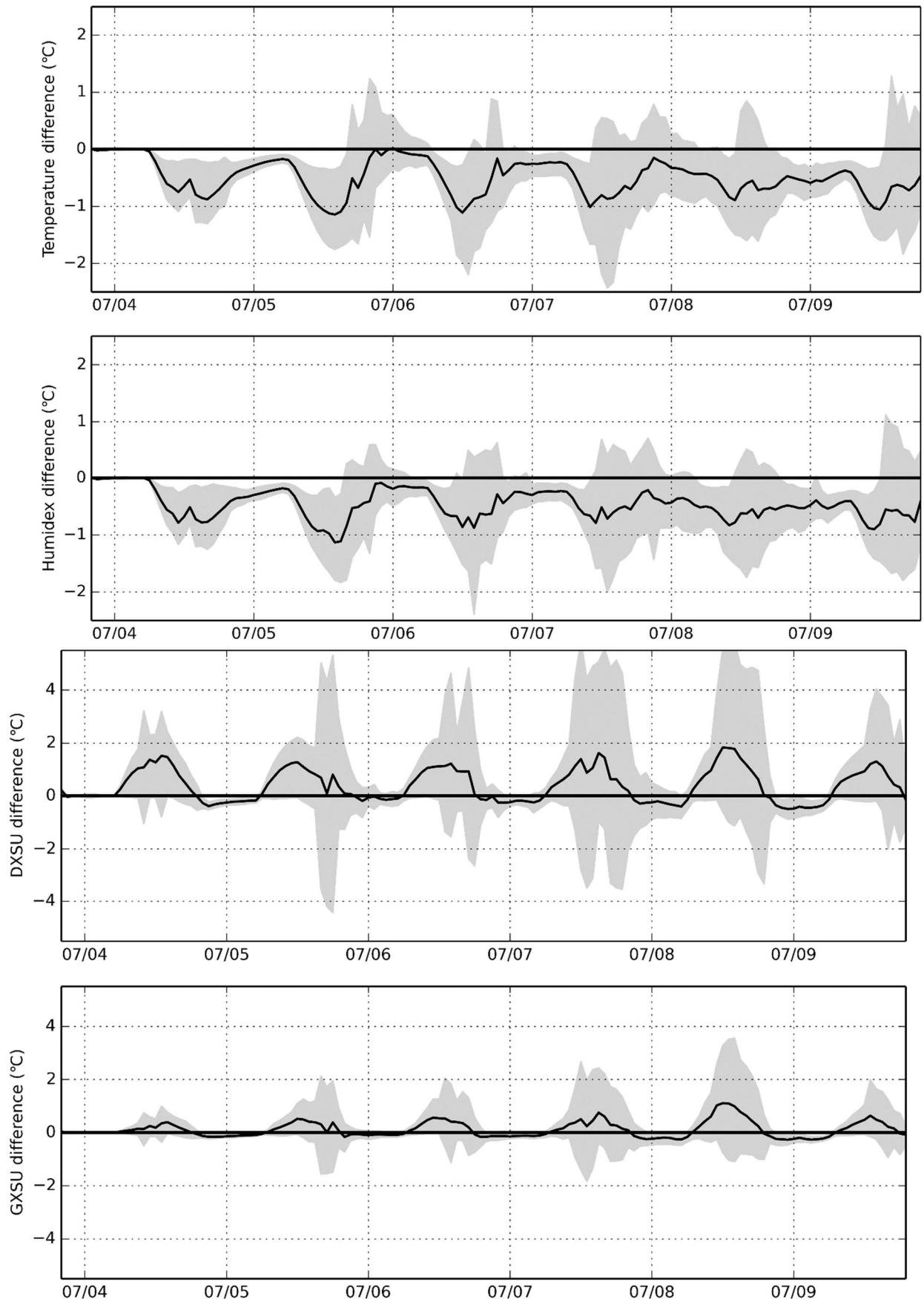


# Scenario Albedo Surfaces Metropolitain (al4)

## July August

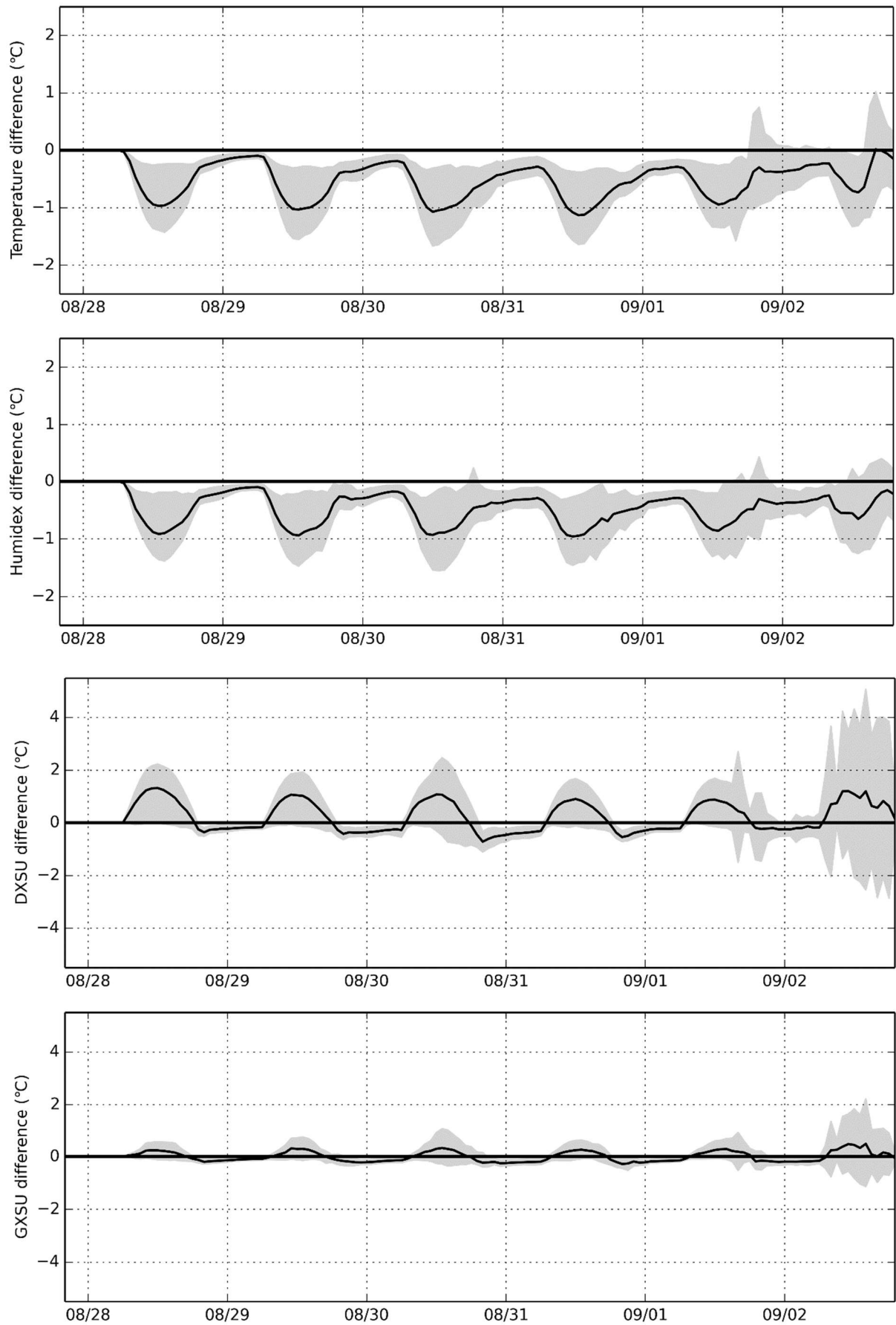


AL4  
Jul



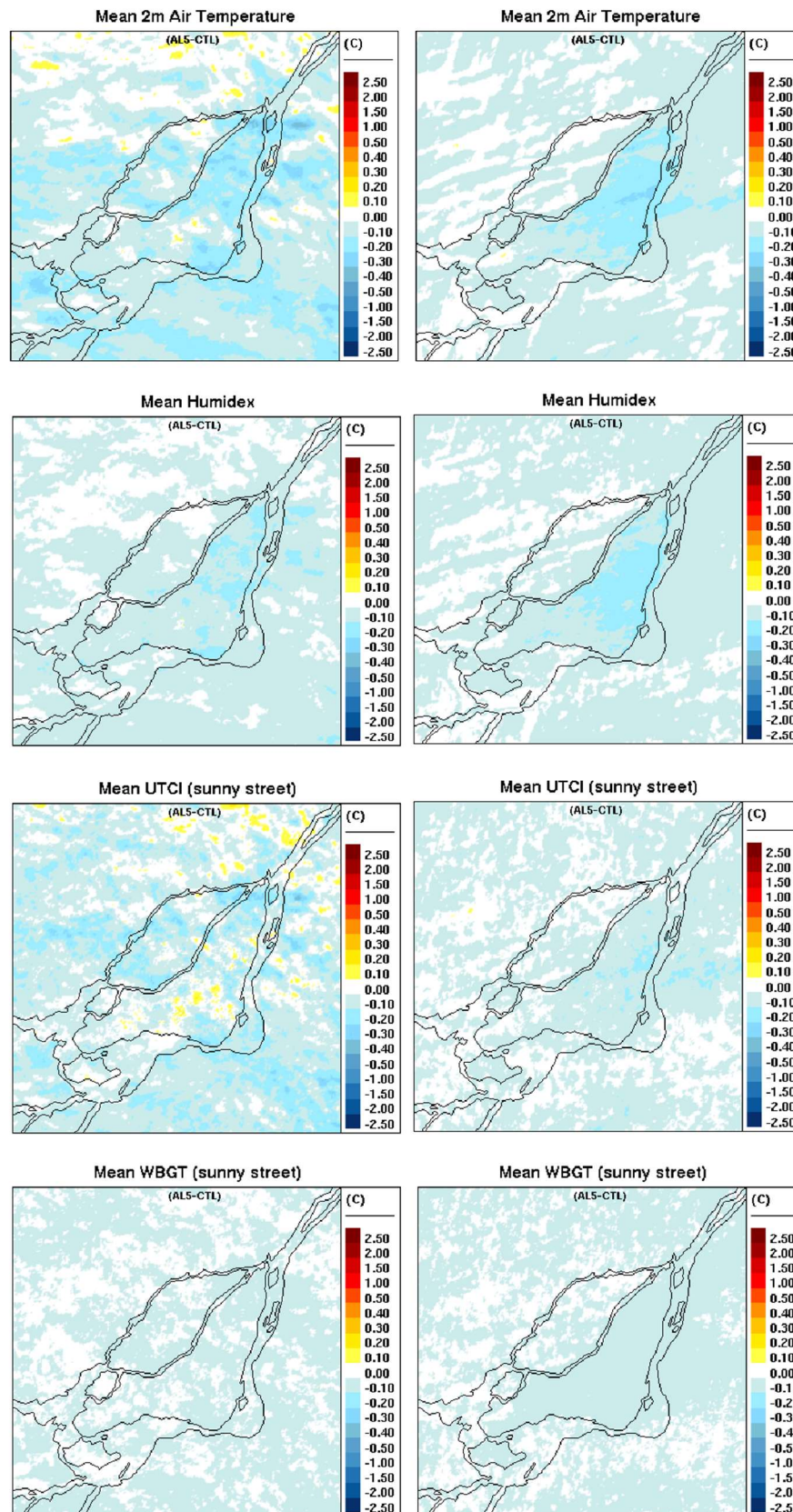


AL4  
Aug

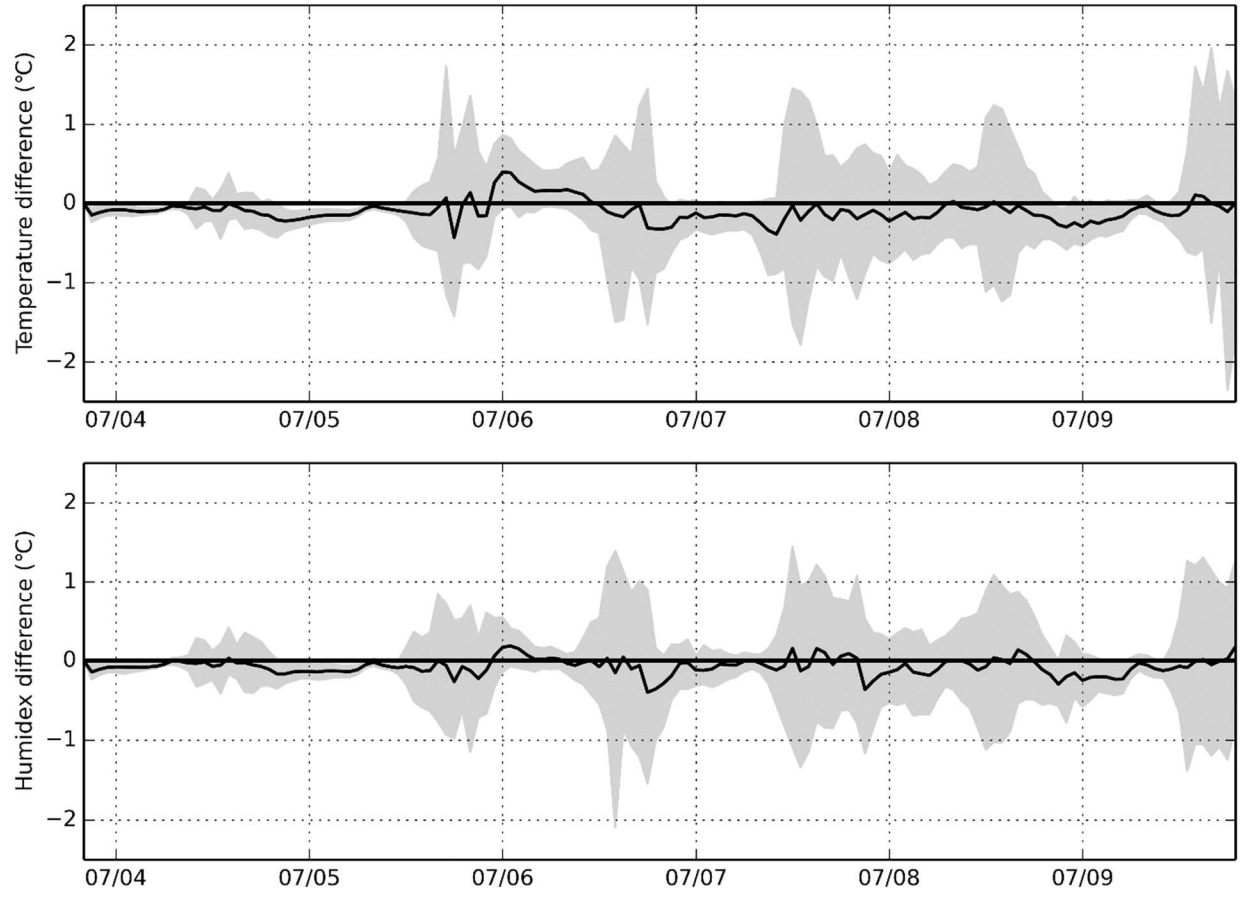


# Scenario thermo-radiatif Roof (AL5)

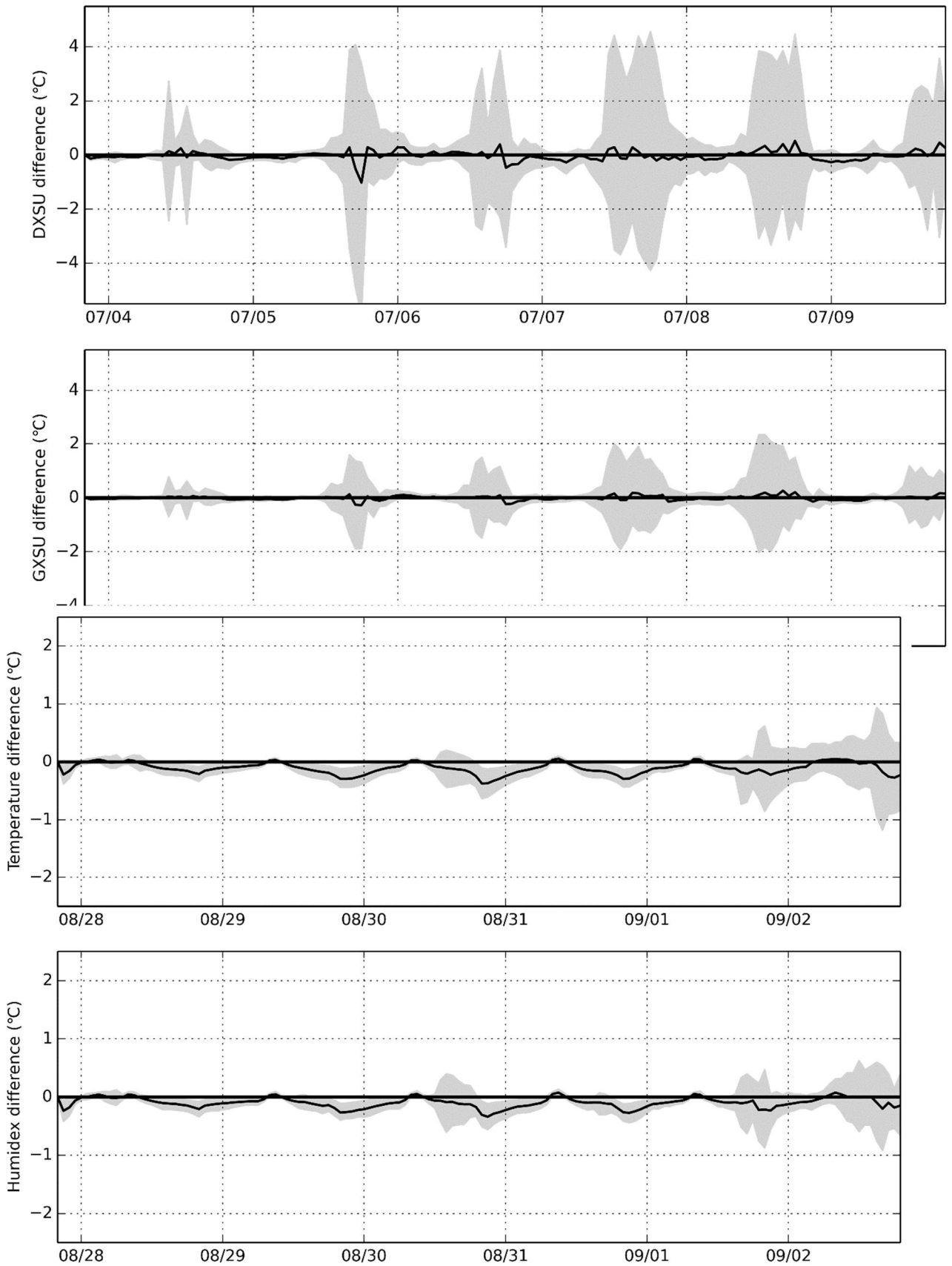
## July August



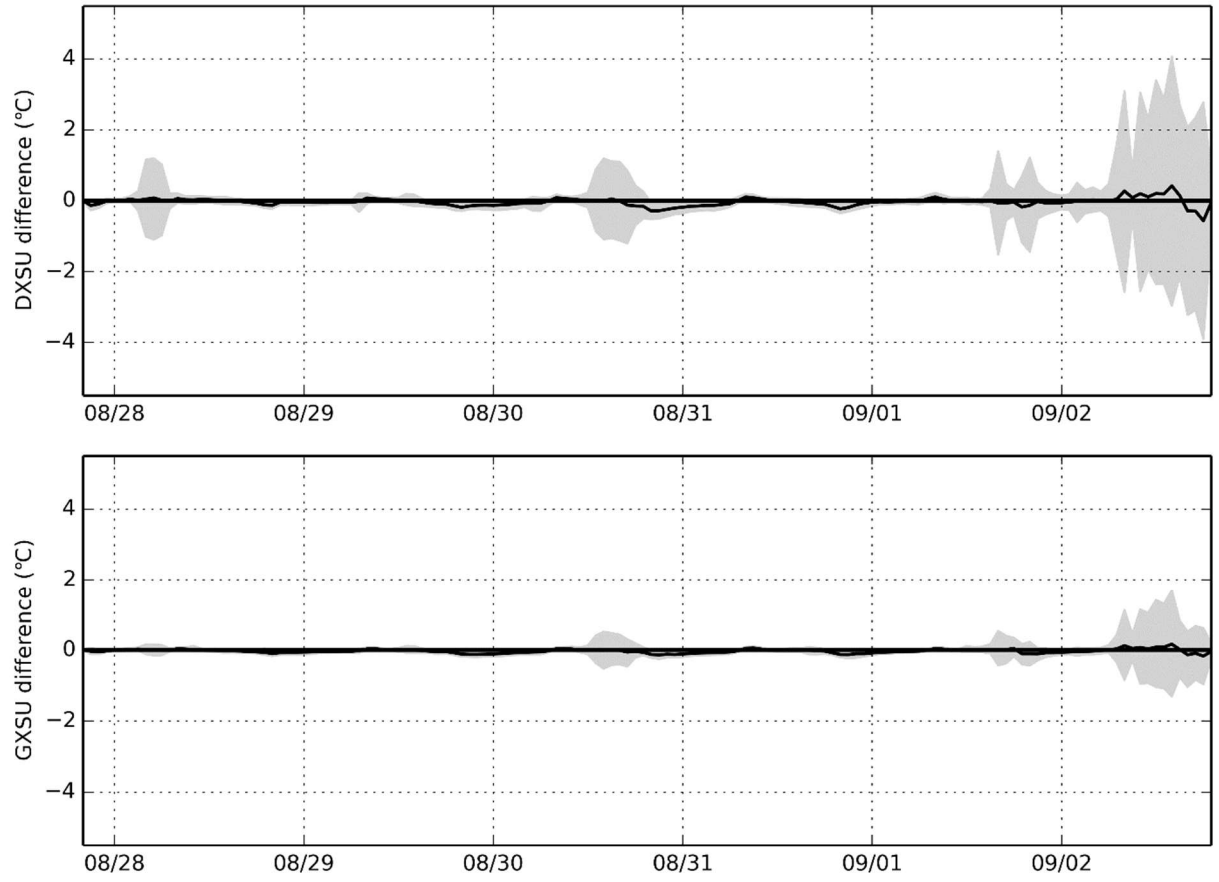
AL5  
Jul





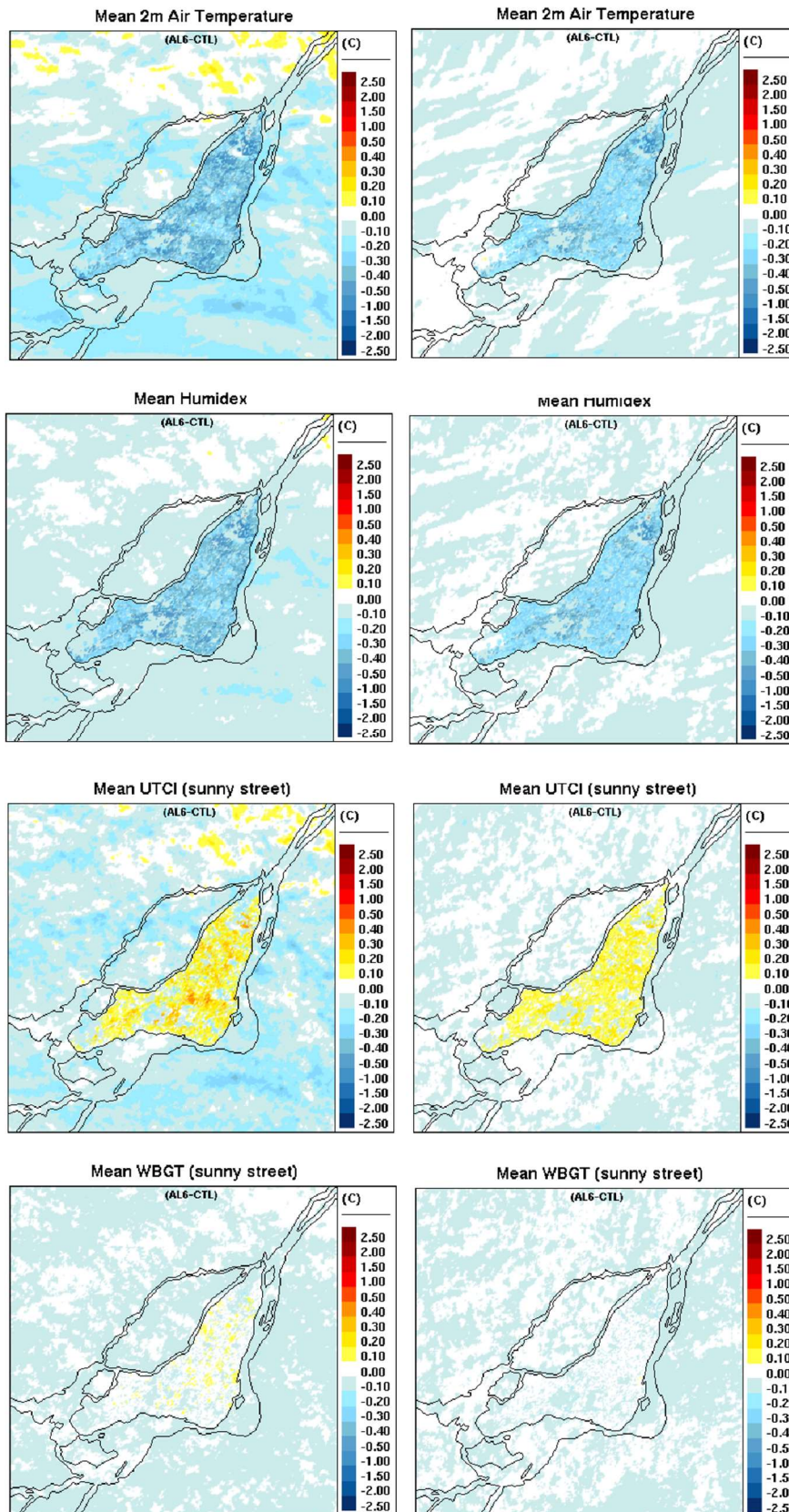


AL5  
Aug

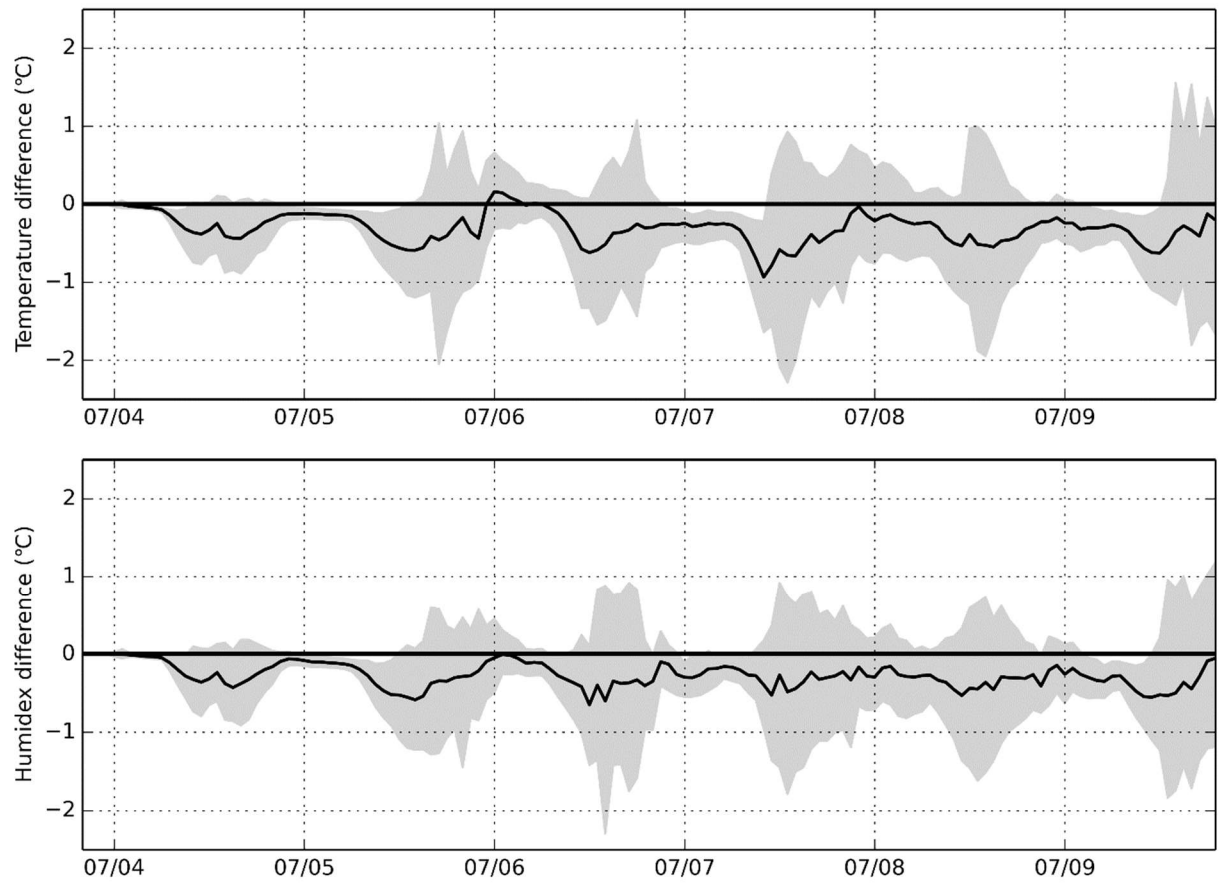


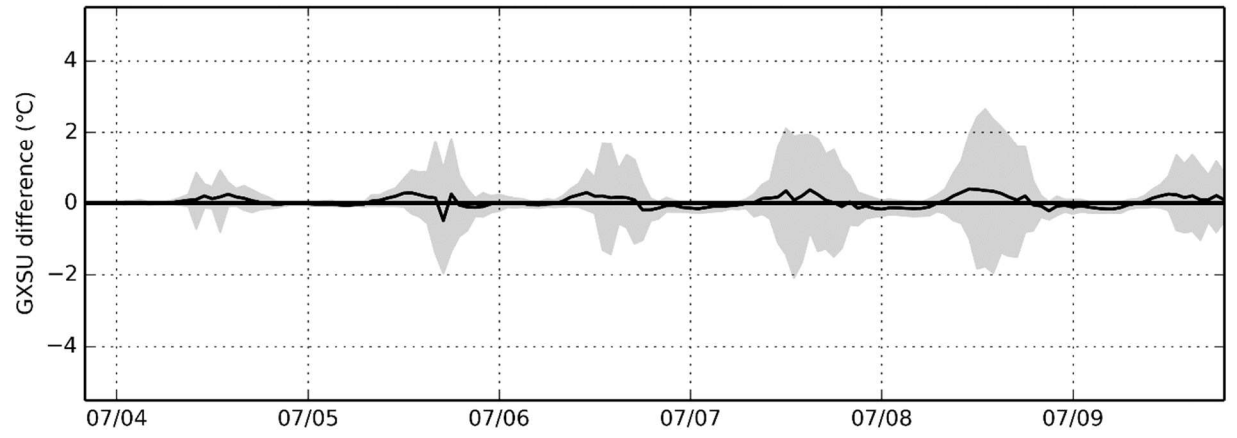
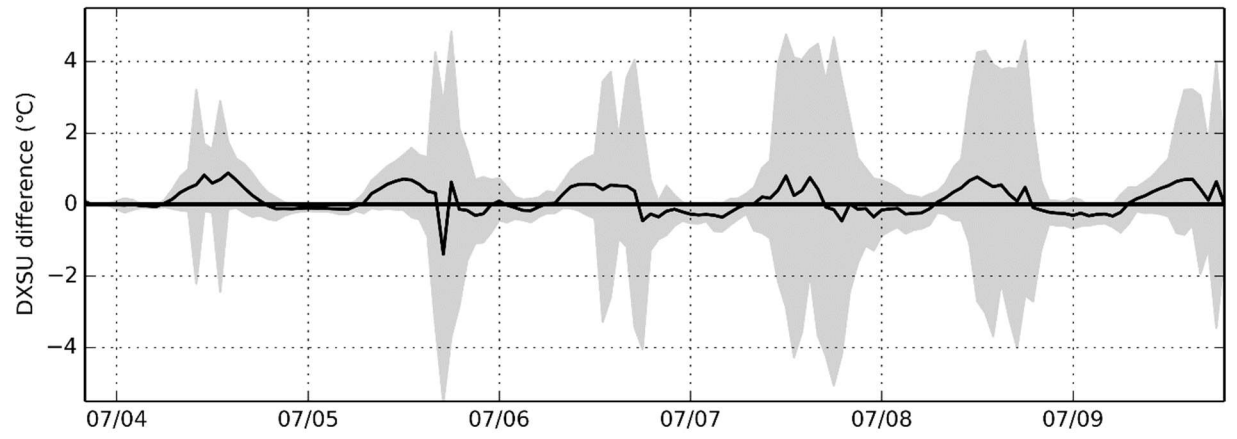
## Scenario Albedo Road (AL6)

### July August



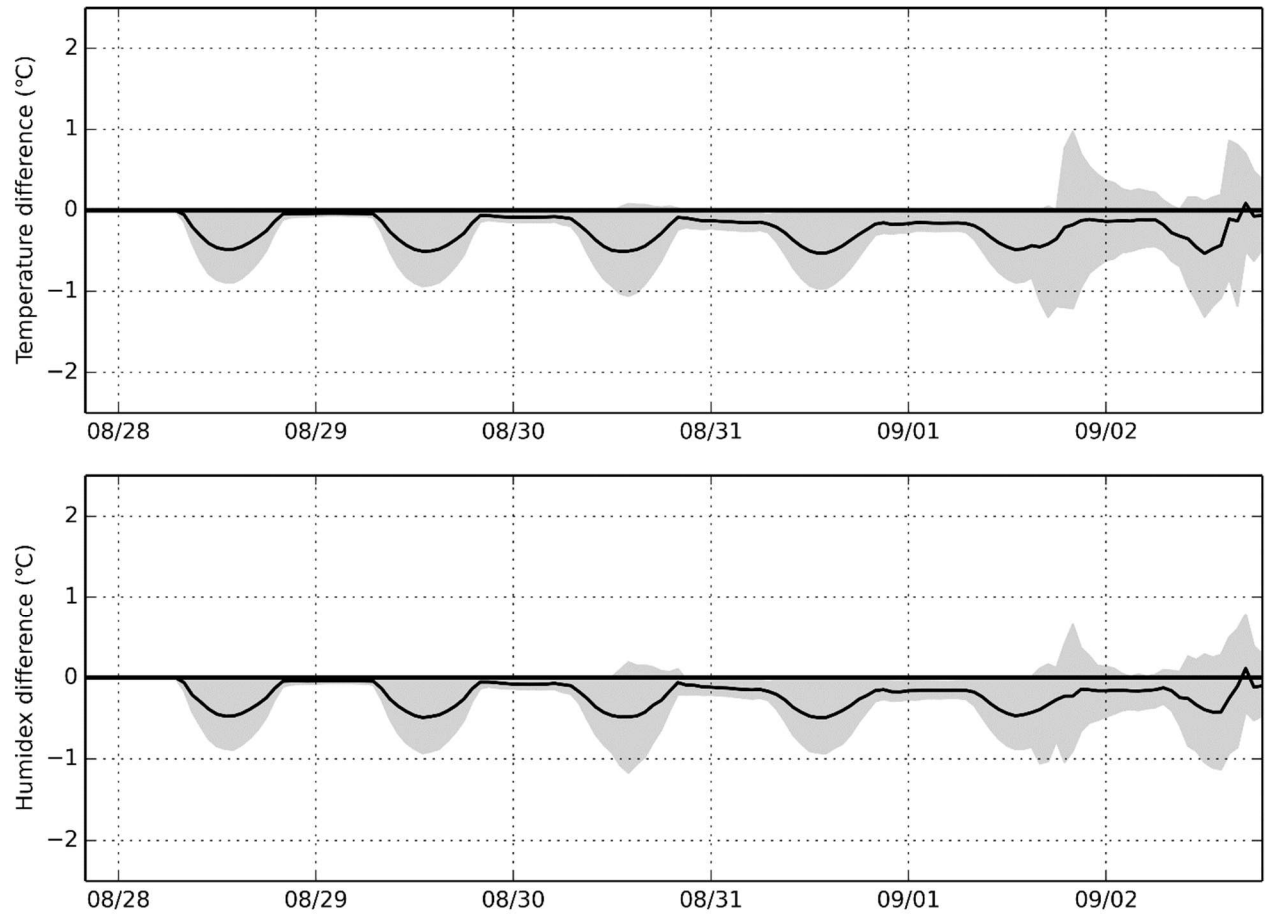
AL6  
Jul



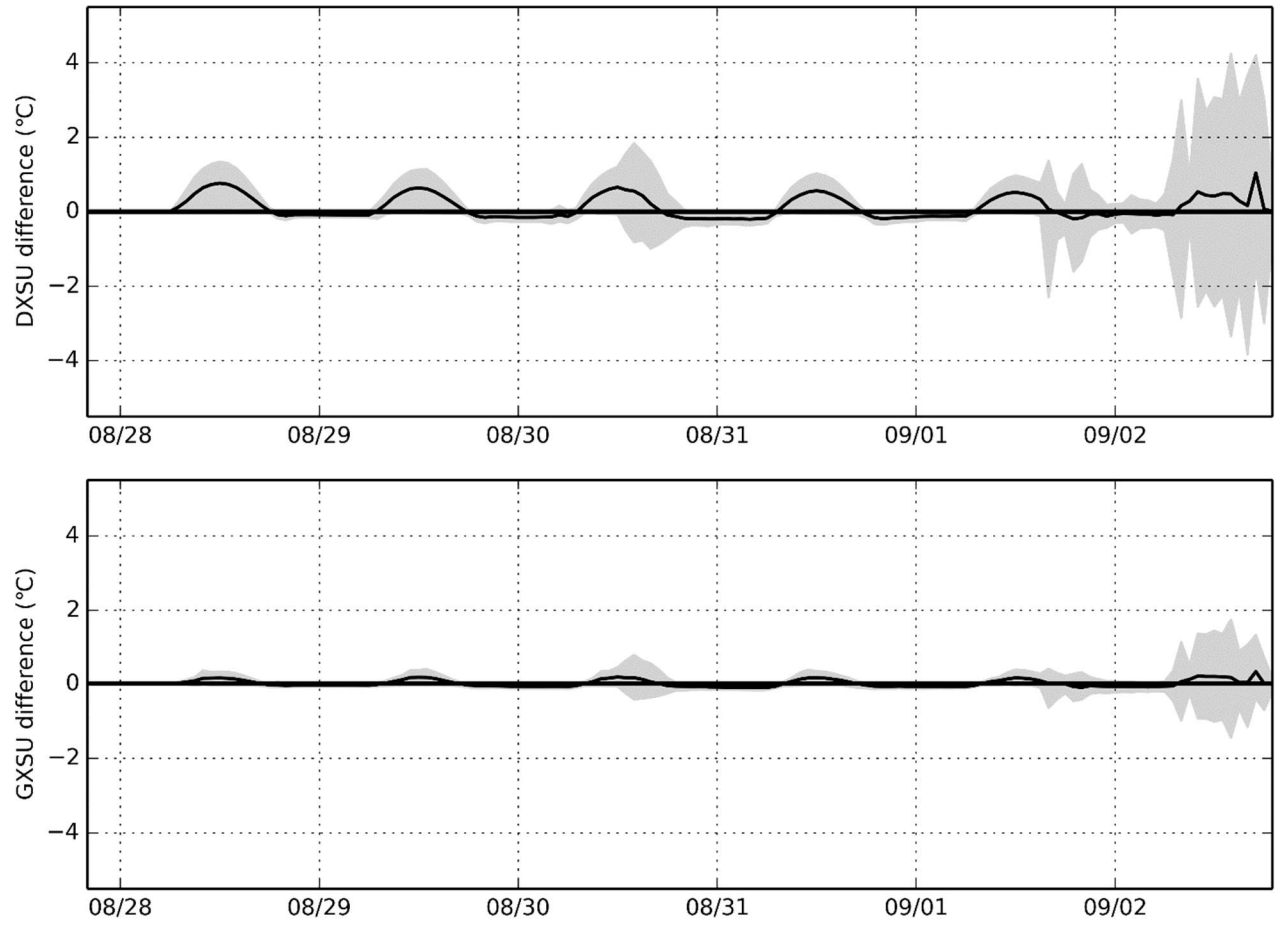




**A16**  
**Aug**



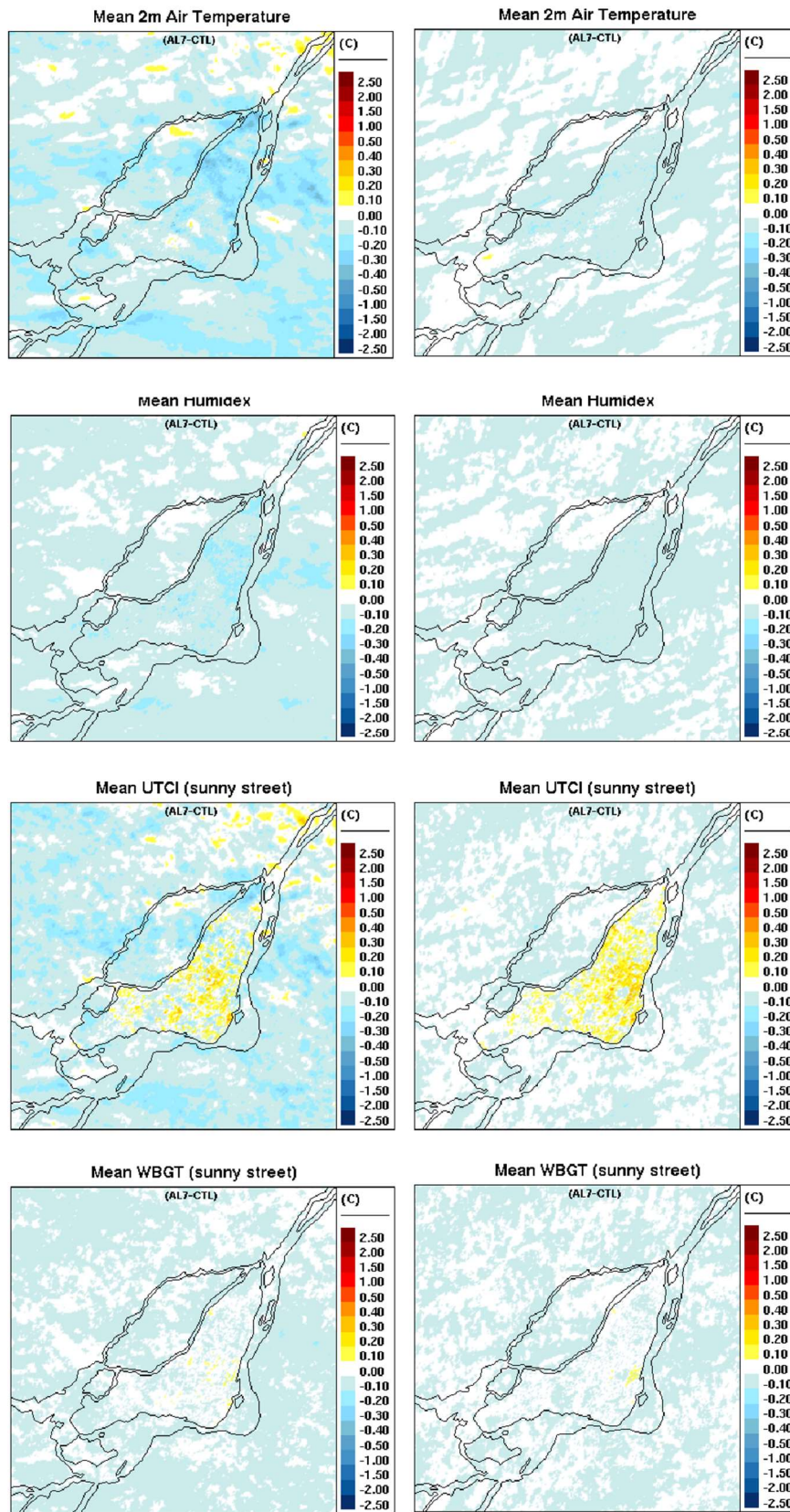




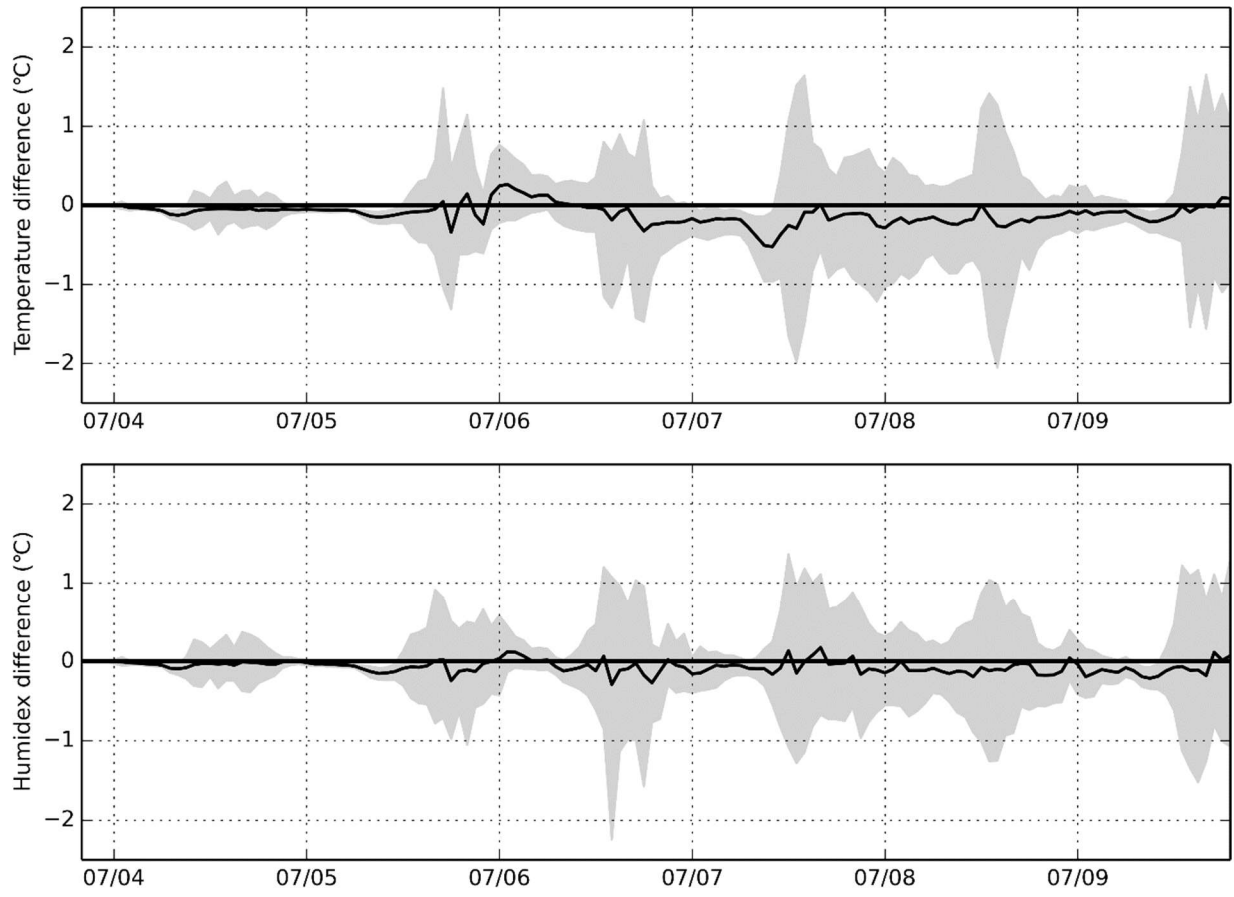
# Scenario Albedo Wall (AL7)

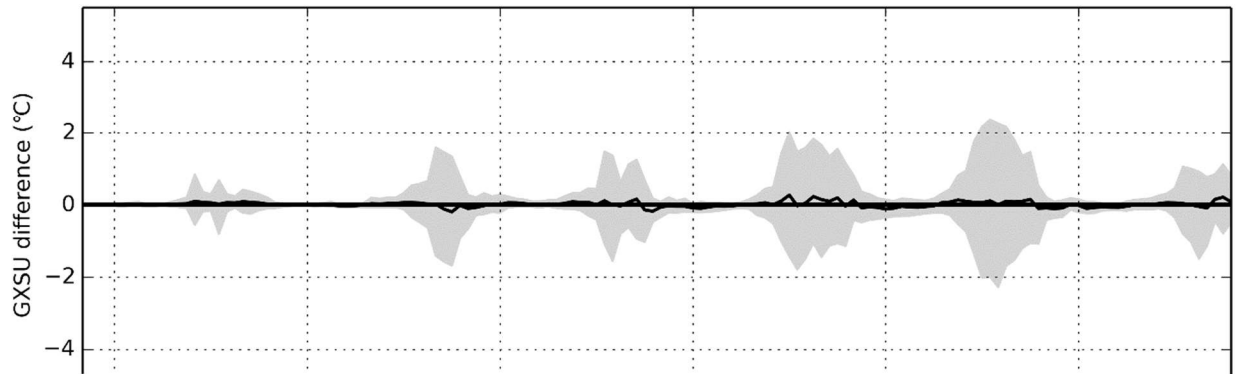
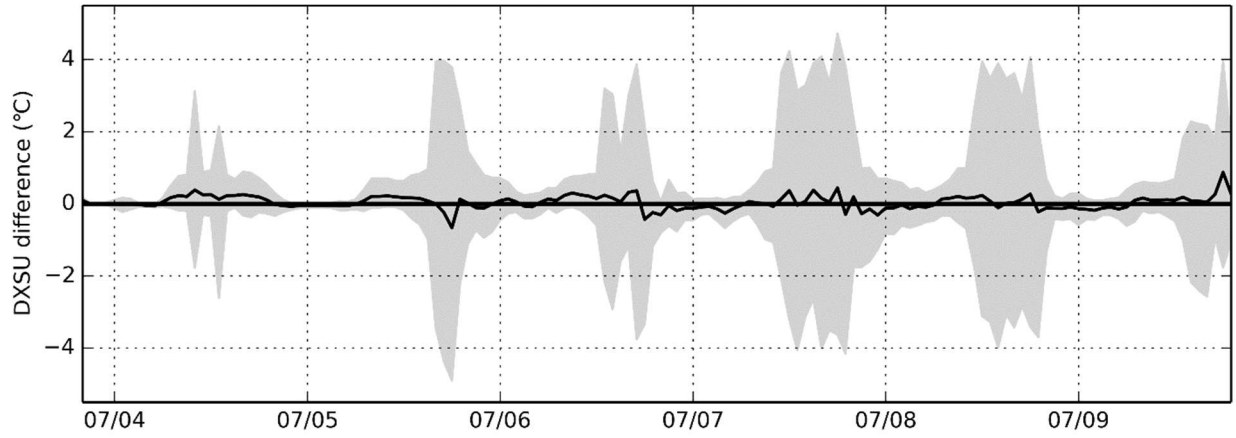
## July

## August

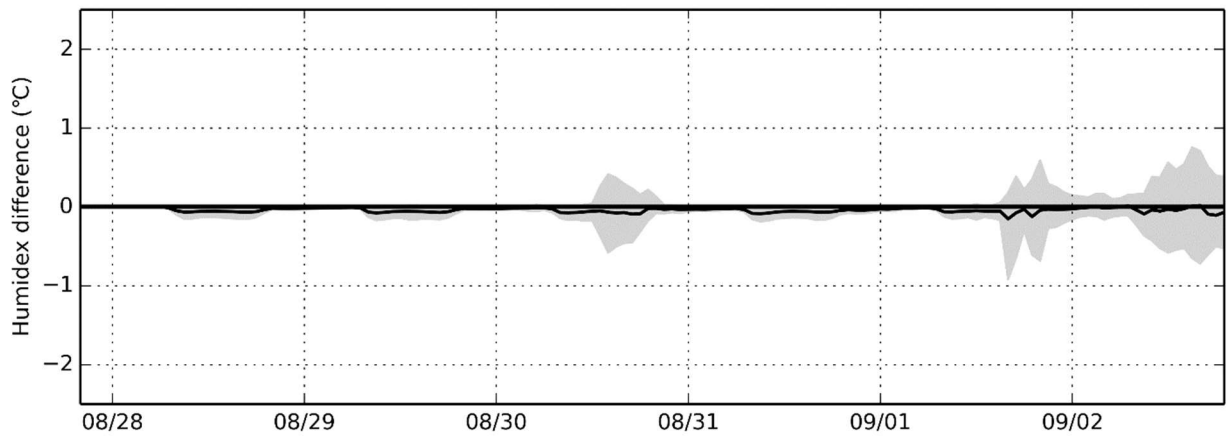
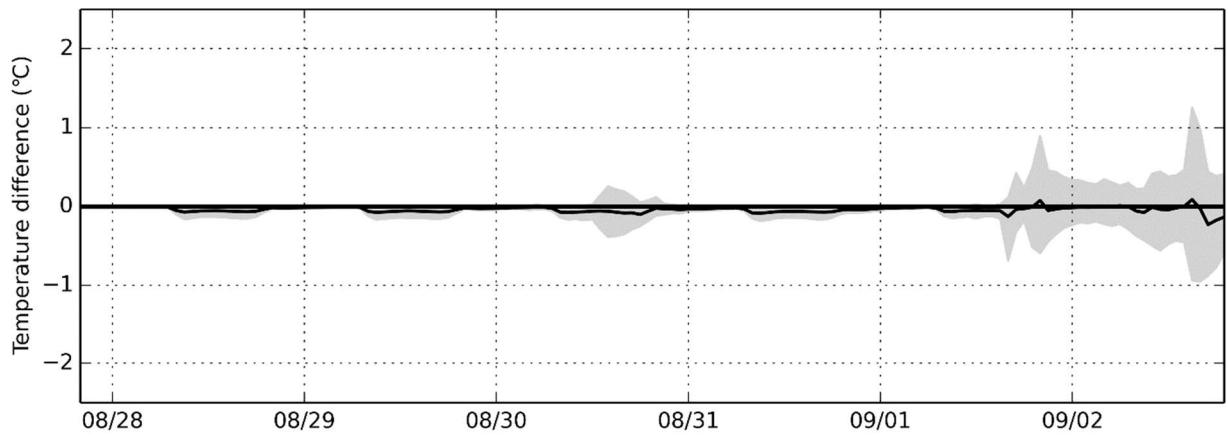


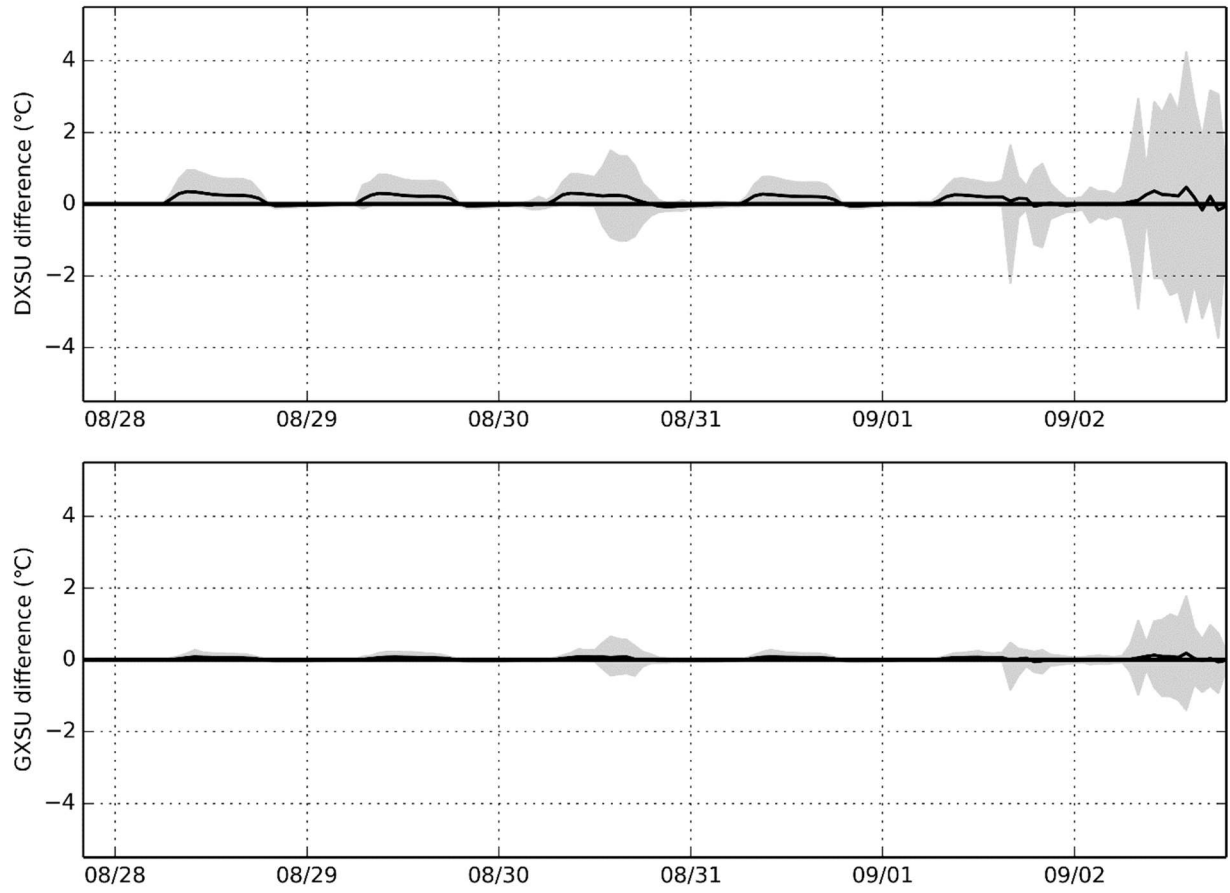
AL7  
Jul





AL7  
Aug

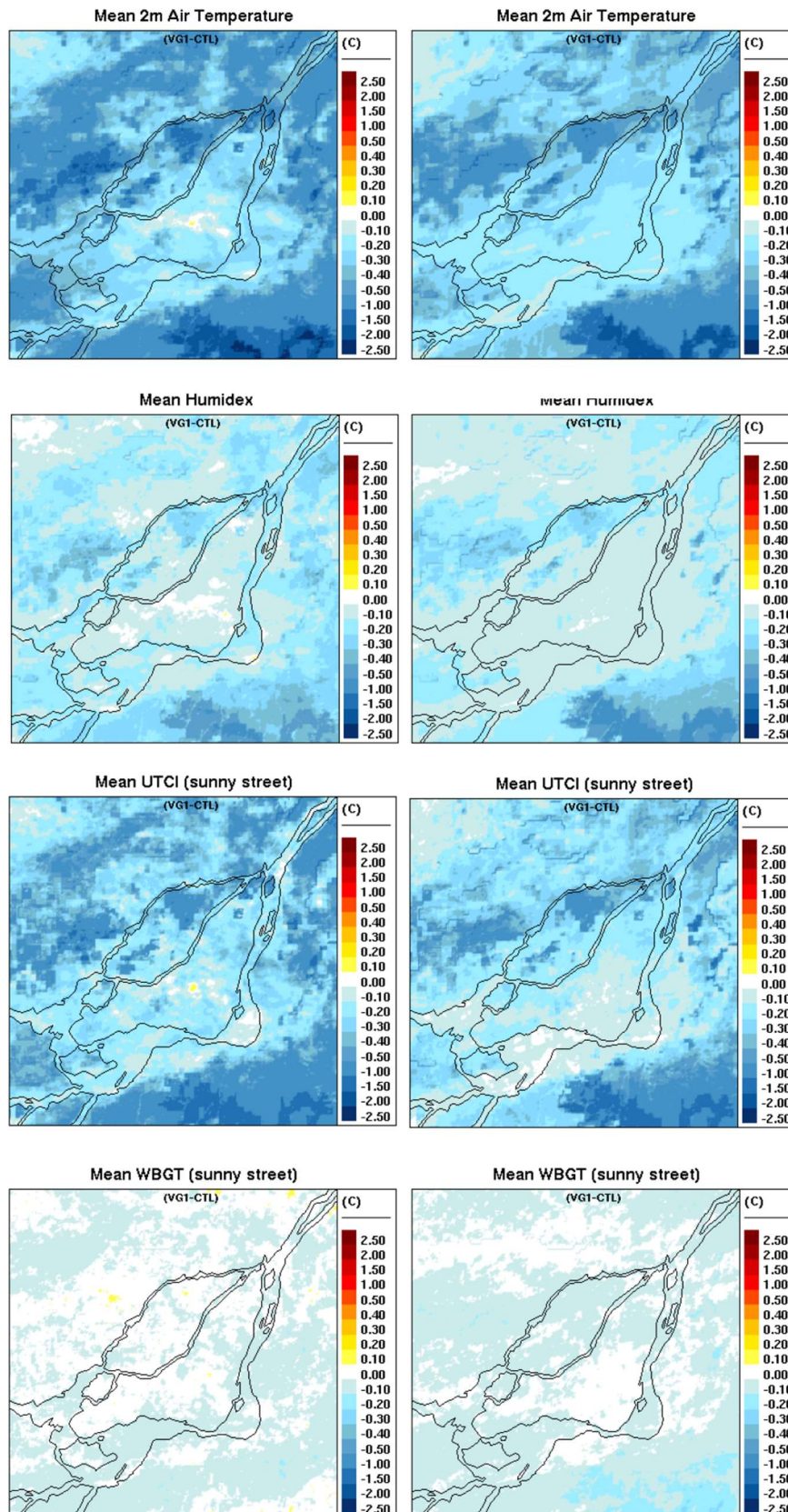






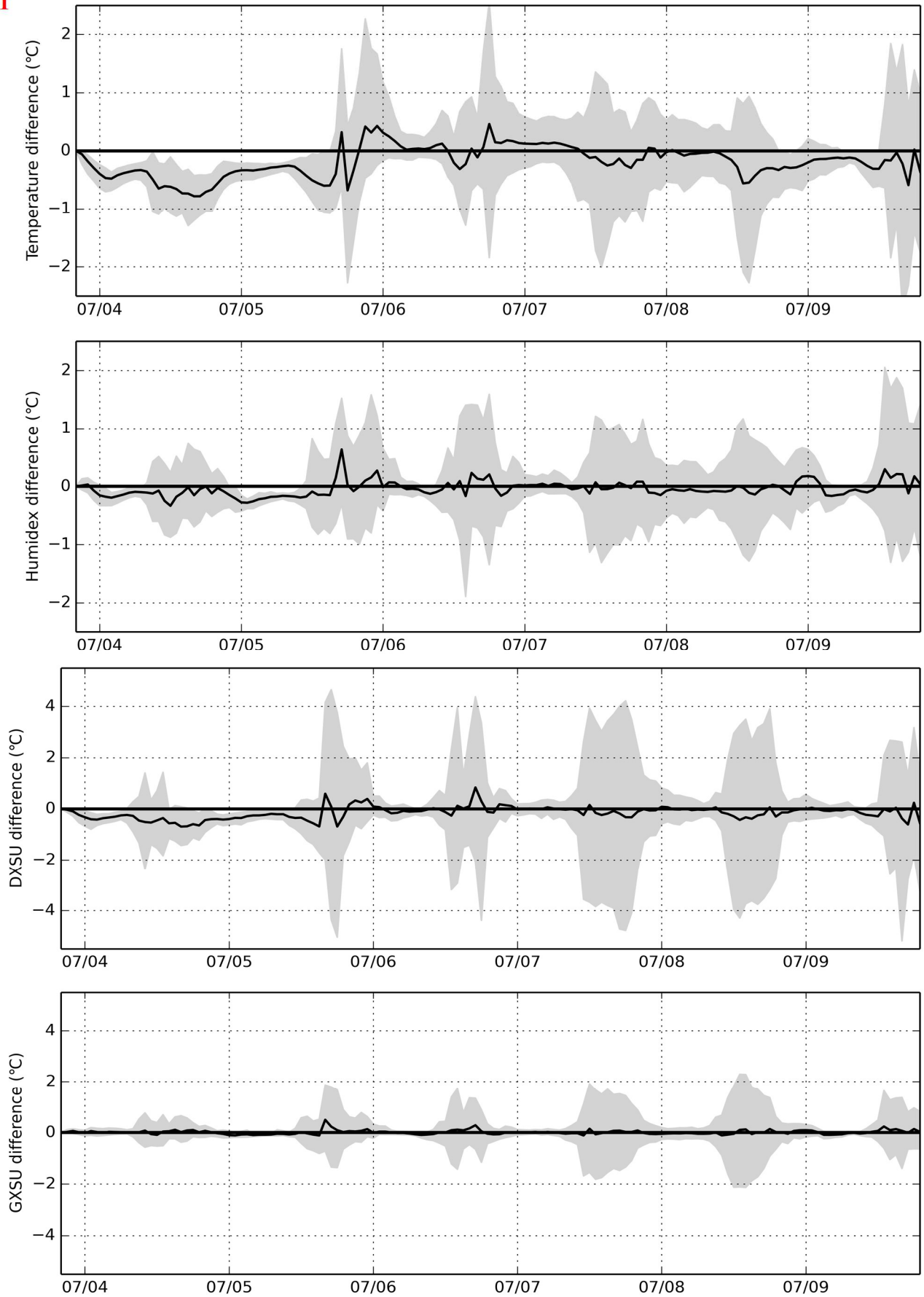
# Scenario Irrigation Crops Metropolitan (vg1)

## July August

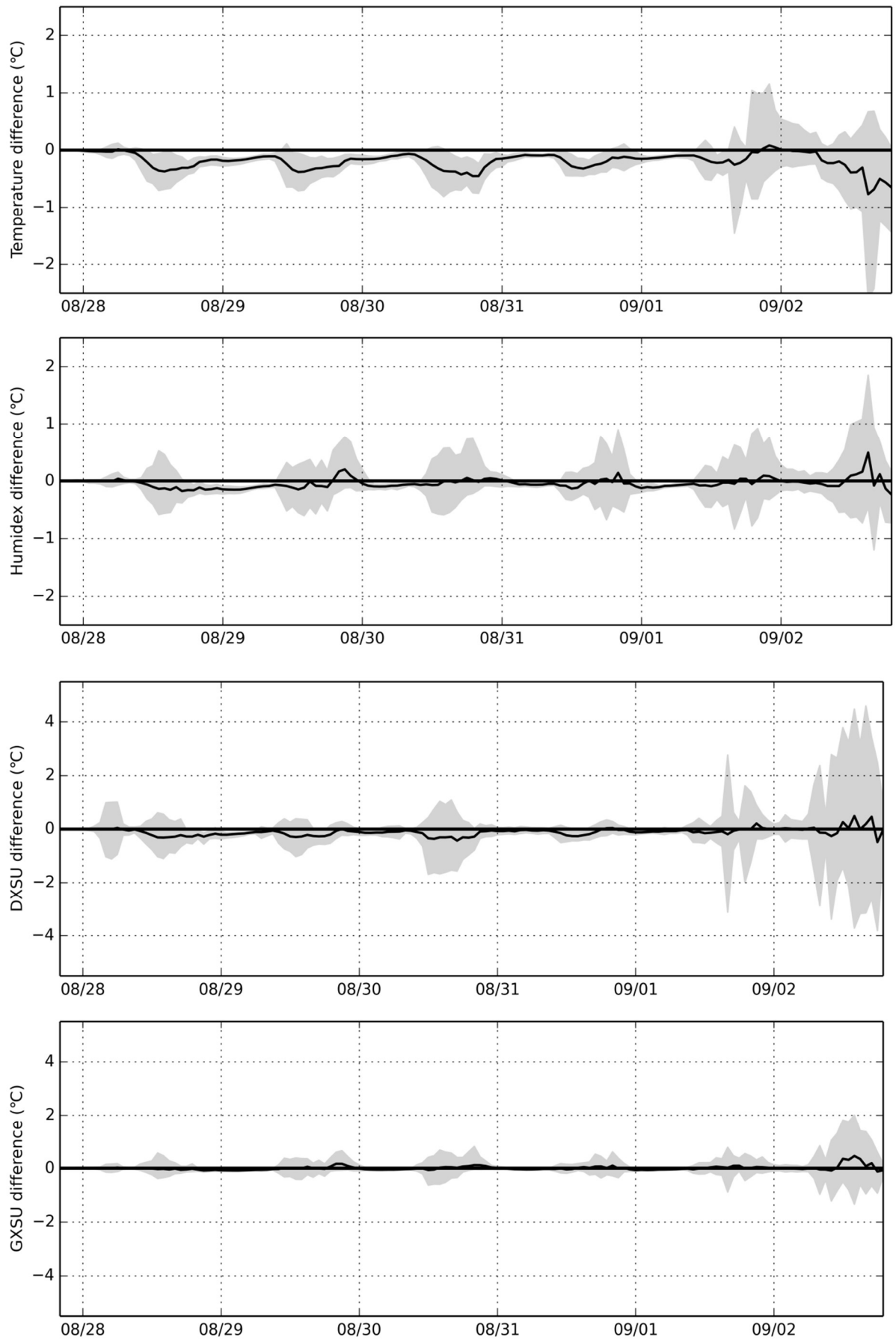




**VGI**  
**Jul**



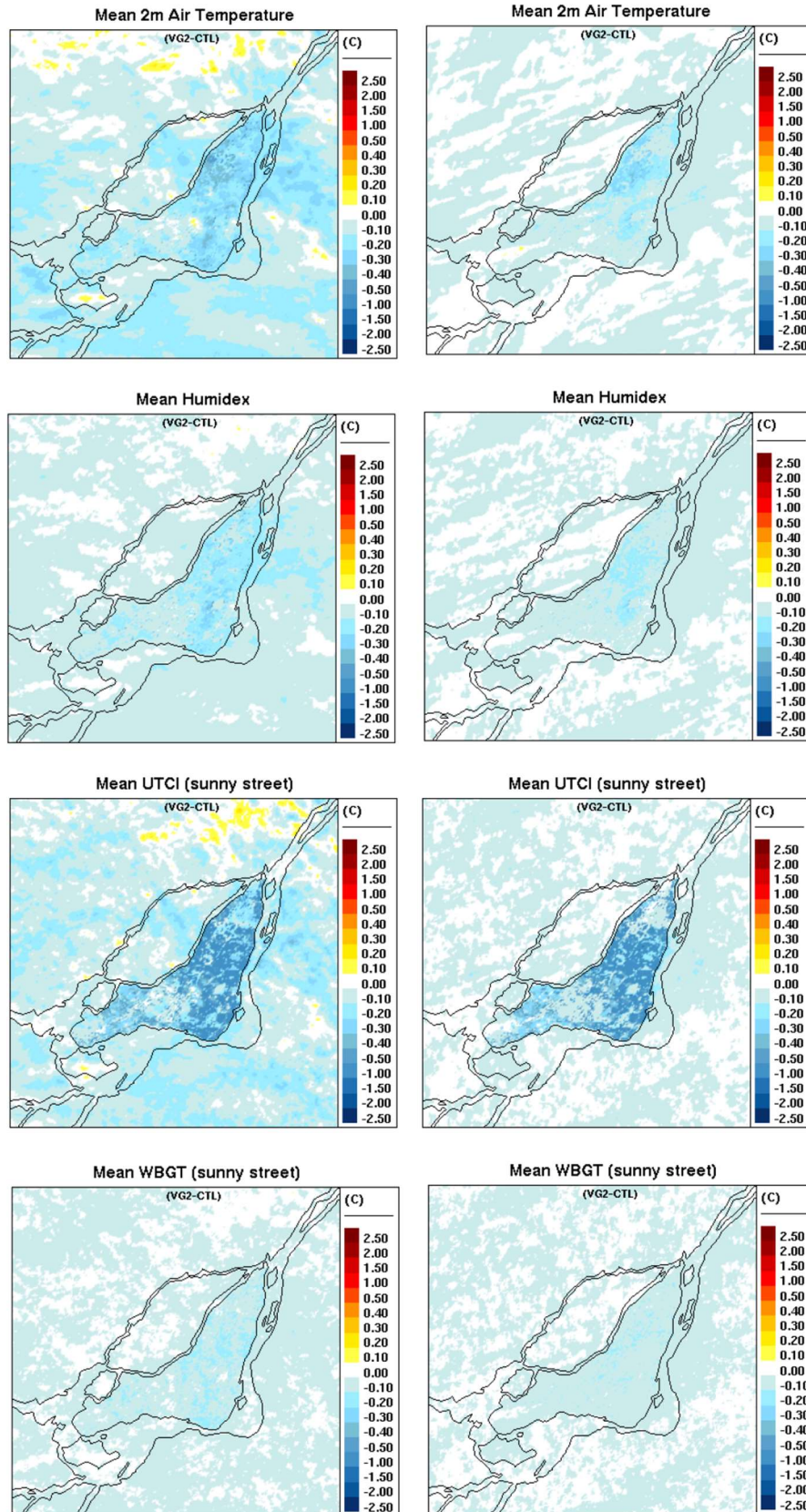
VG1  
Aug



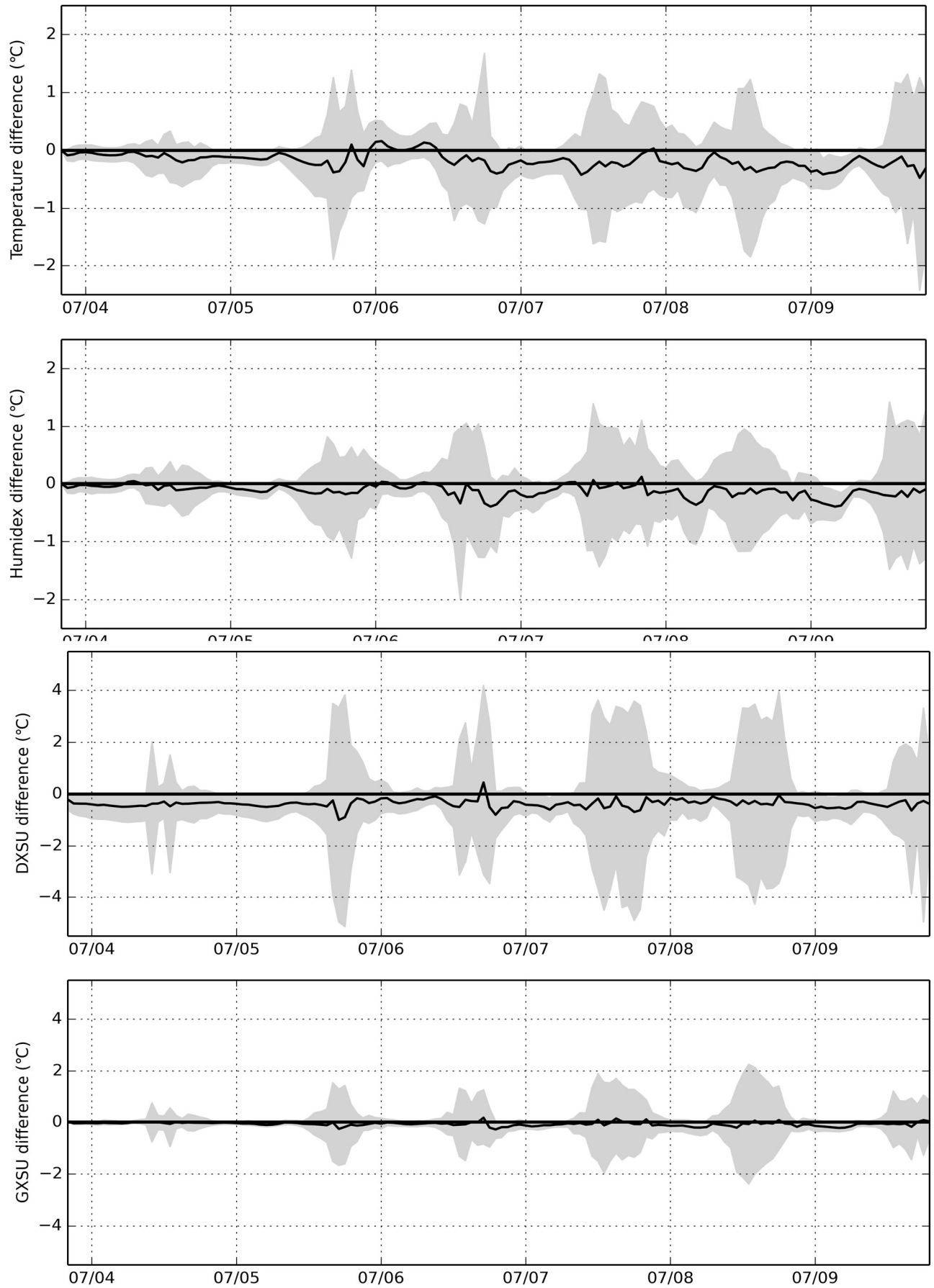
## Scenario short vegetation (vg2)

### July

### August

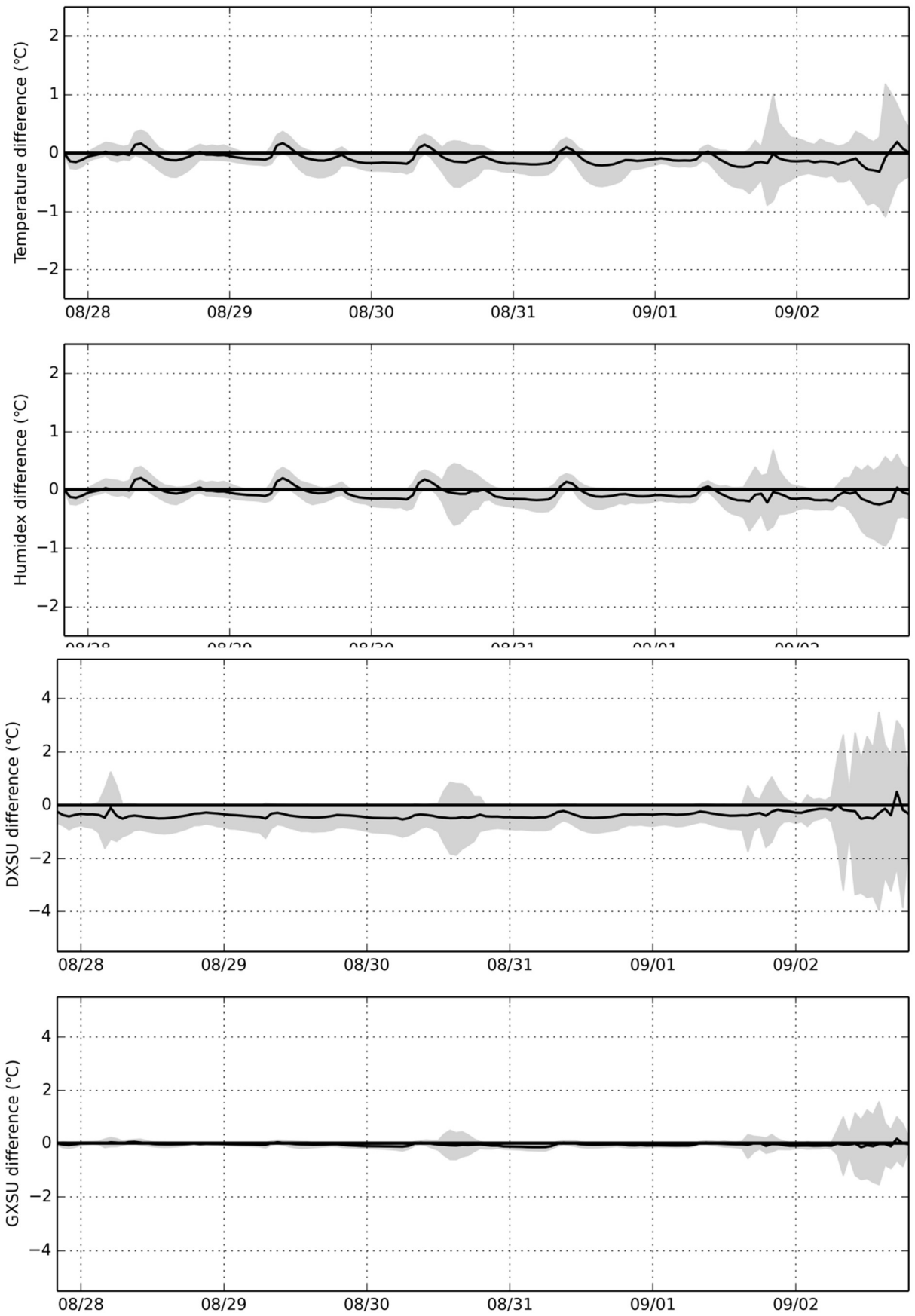


VG2  
Jul





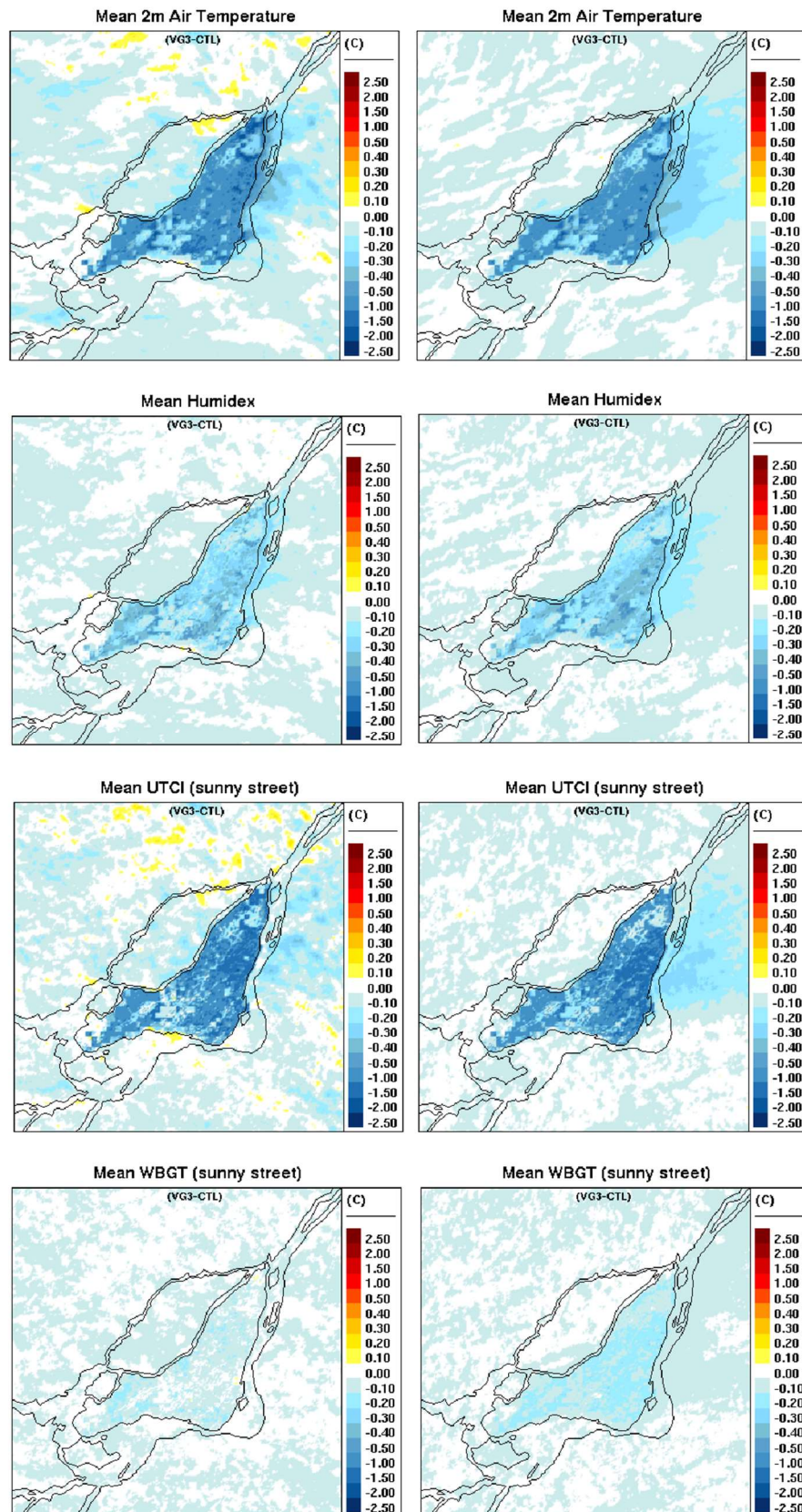
VG2  
Aug



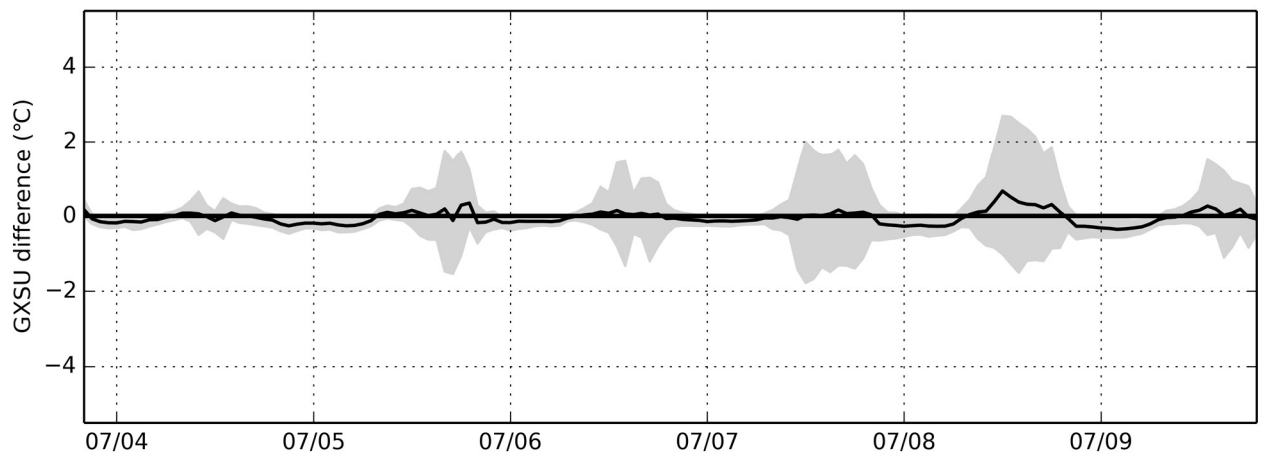
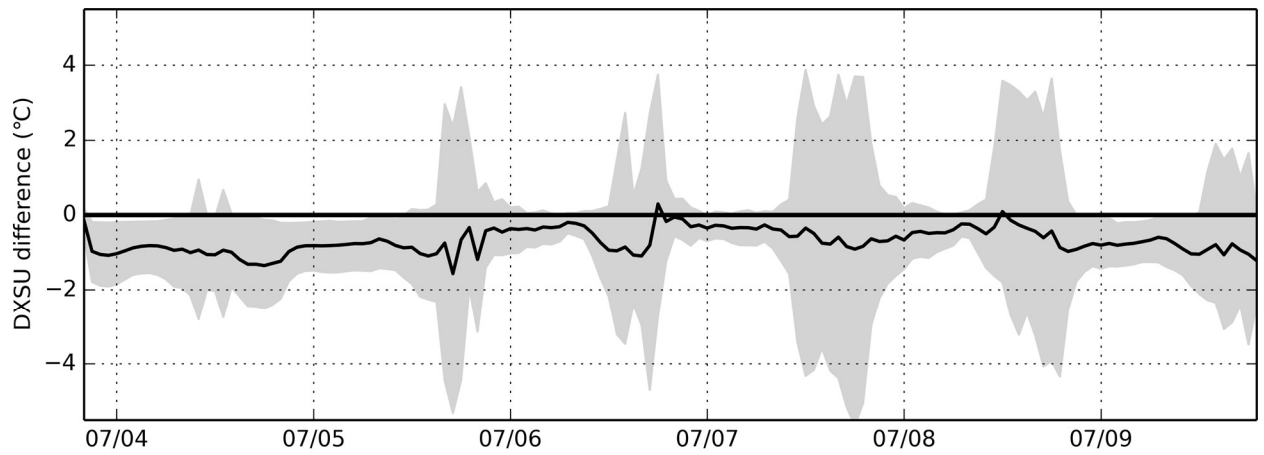
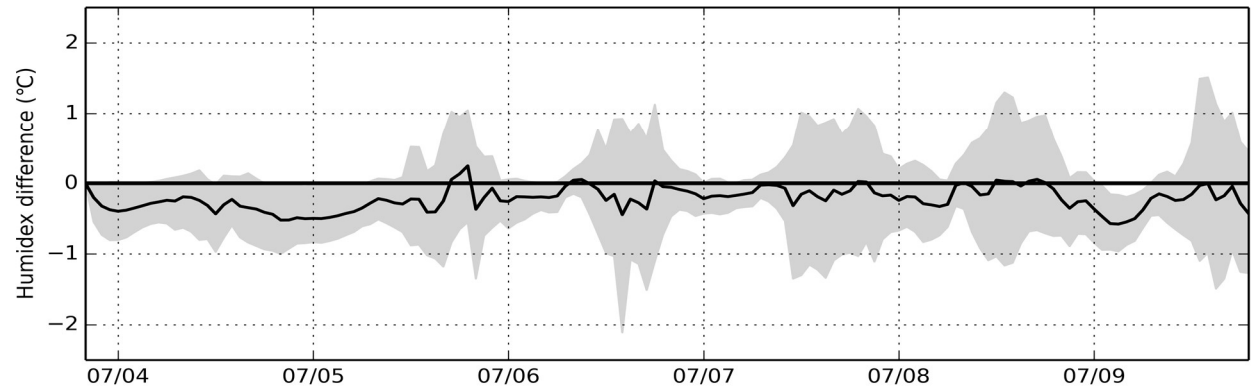
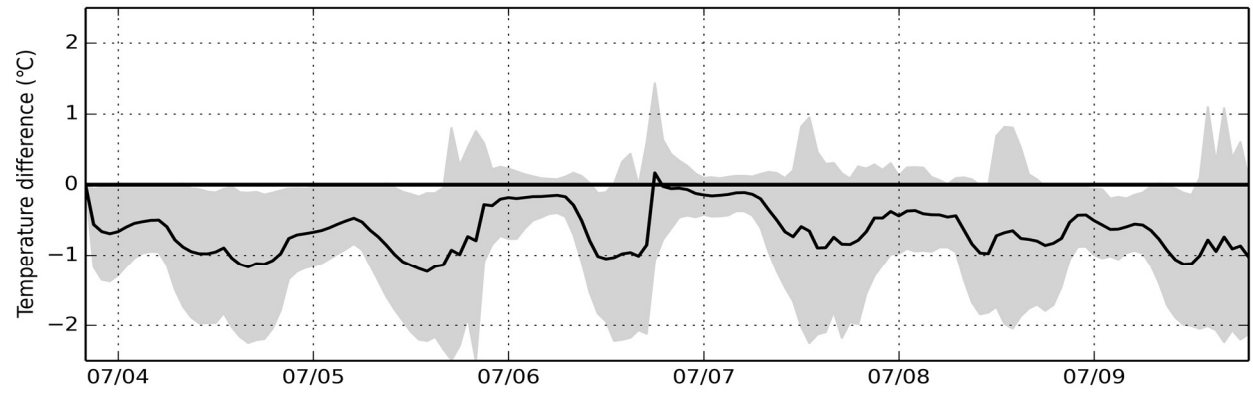


# Scenario irrigated short vegetation (vg3)

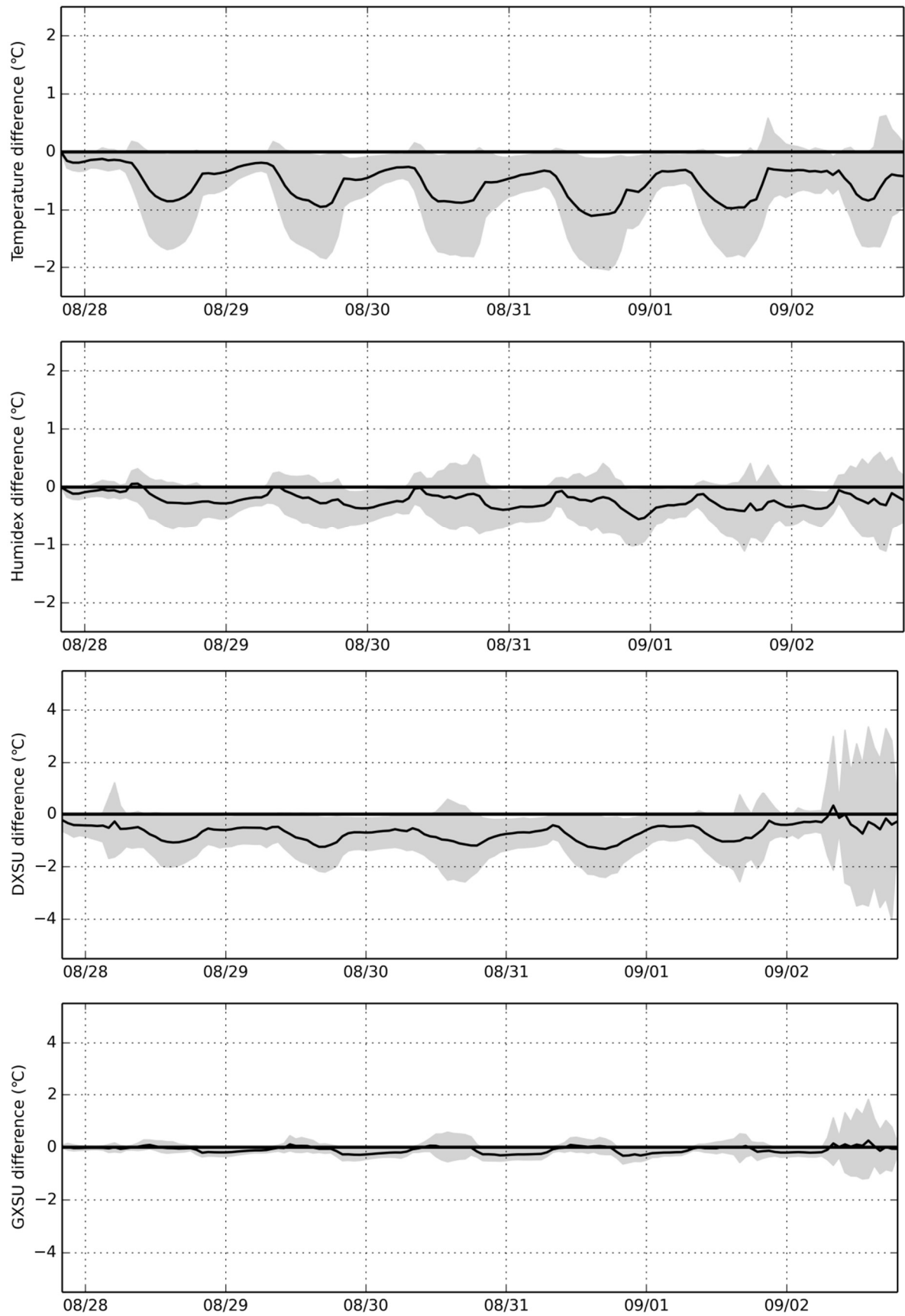
## July August



VG3  
Jul



**VG3**  
**Aug**

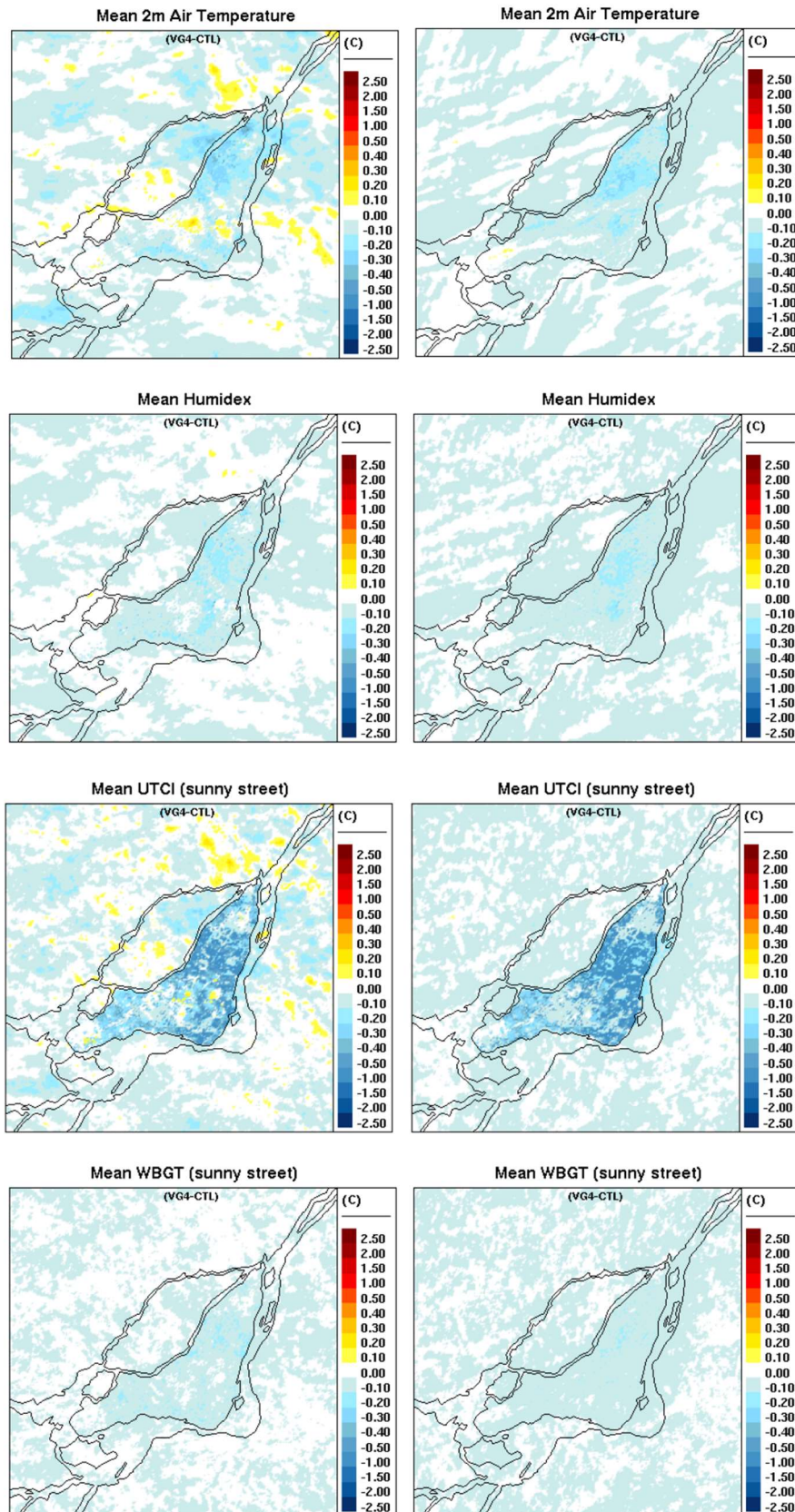




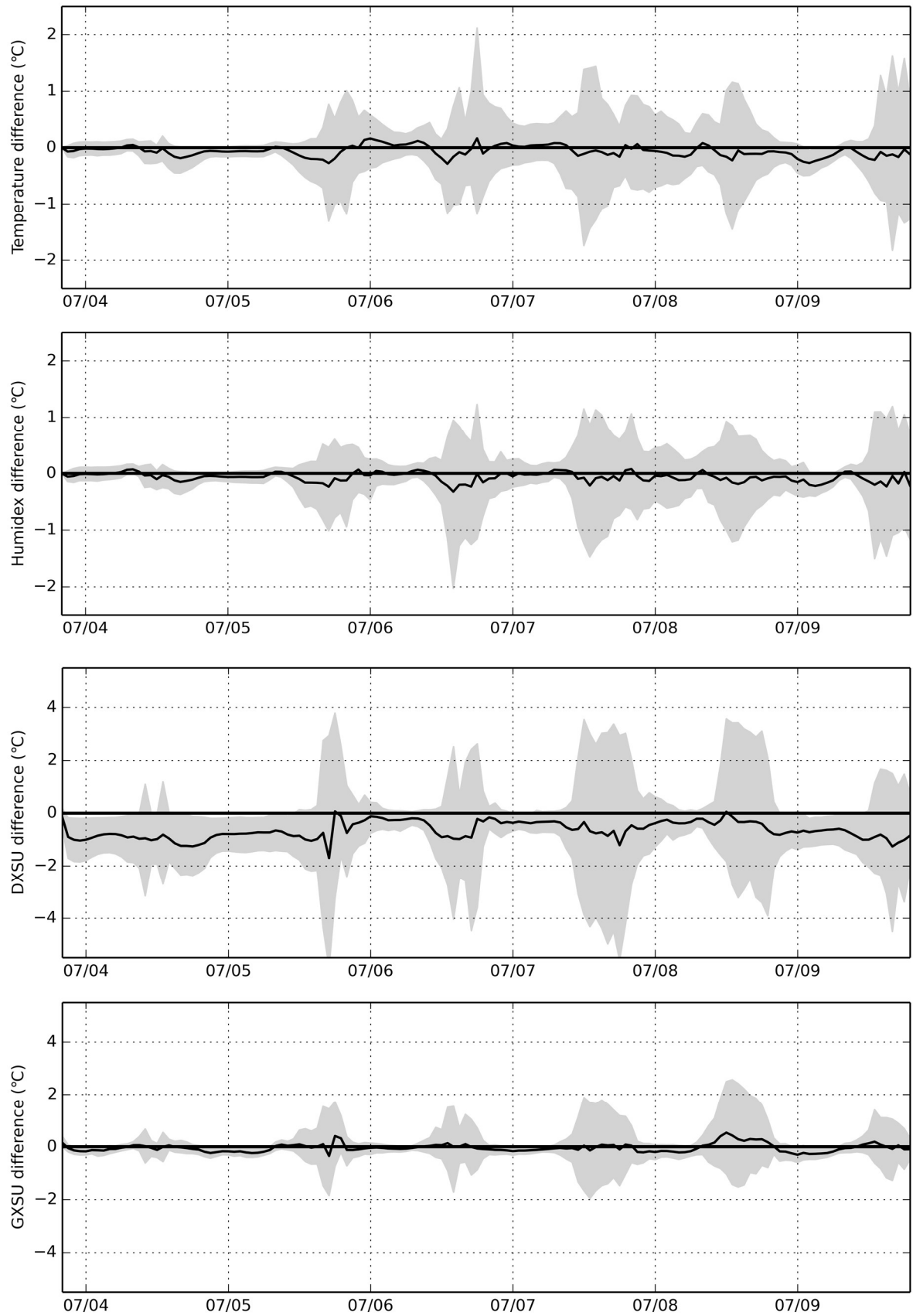
## Scenario Tall vegetation (vg4)

July

August

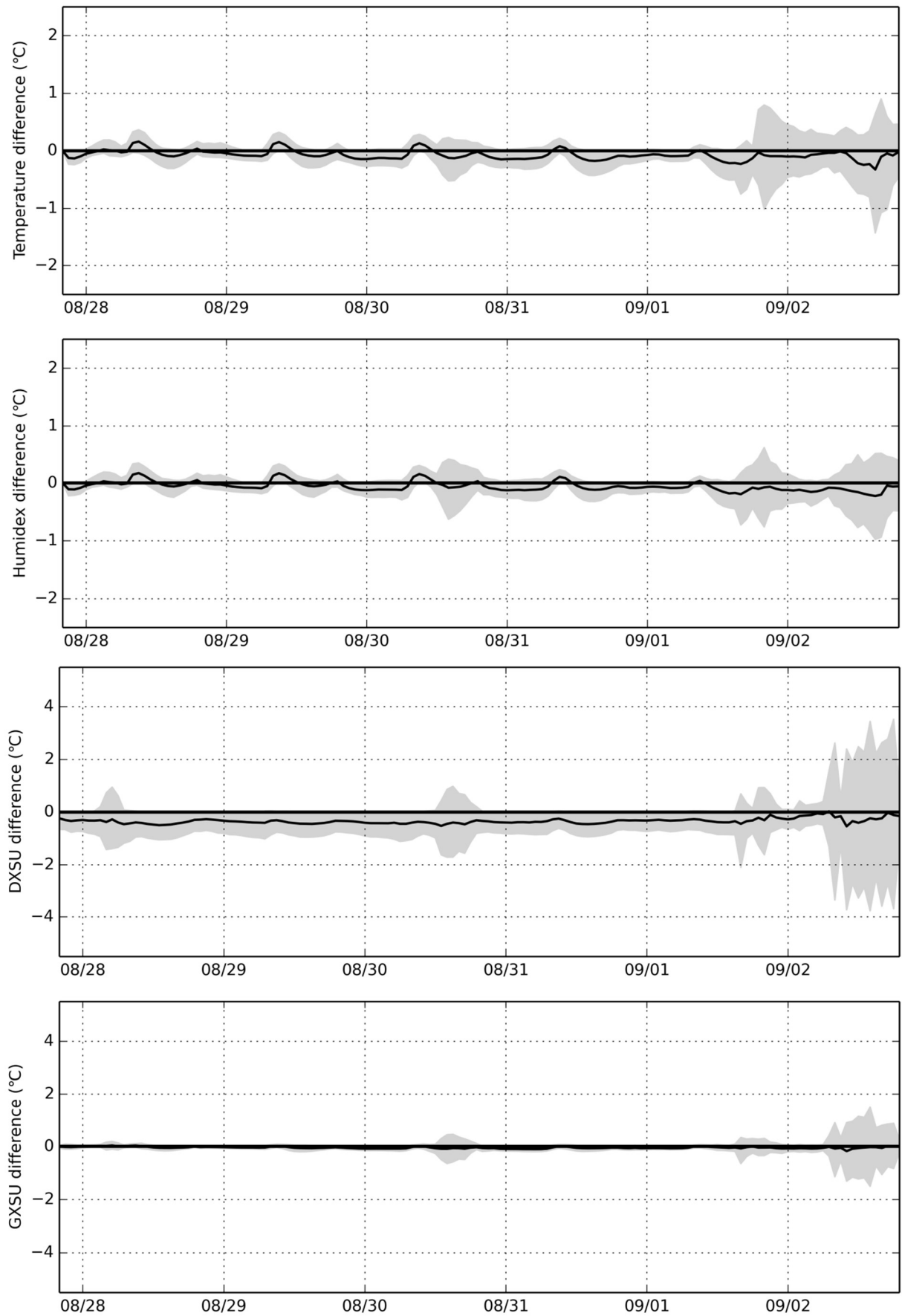


VG4  
Jul



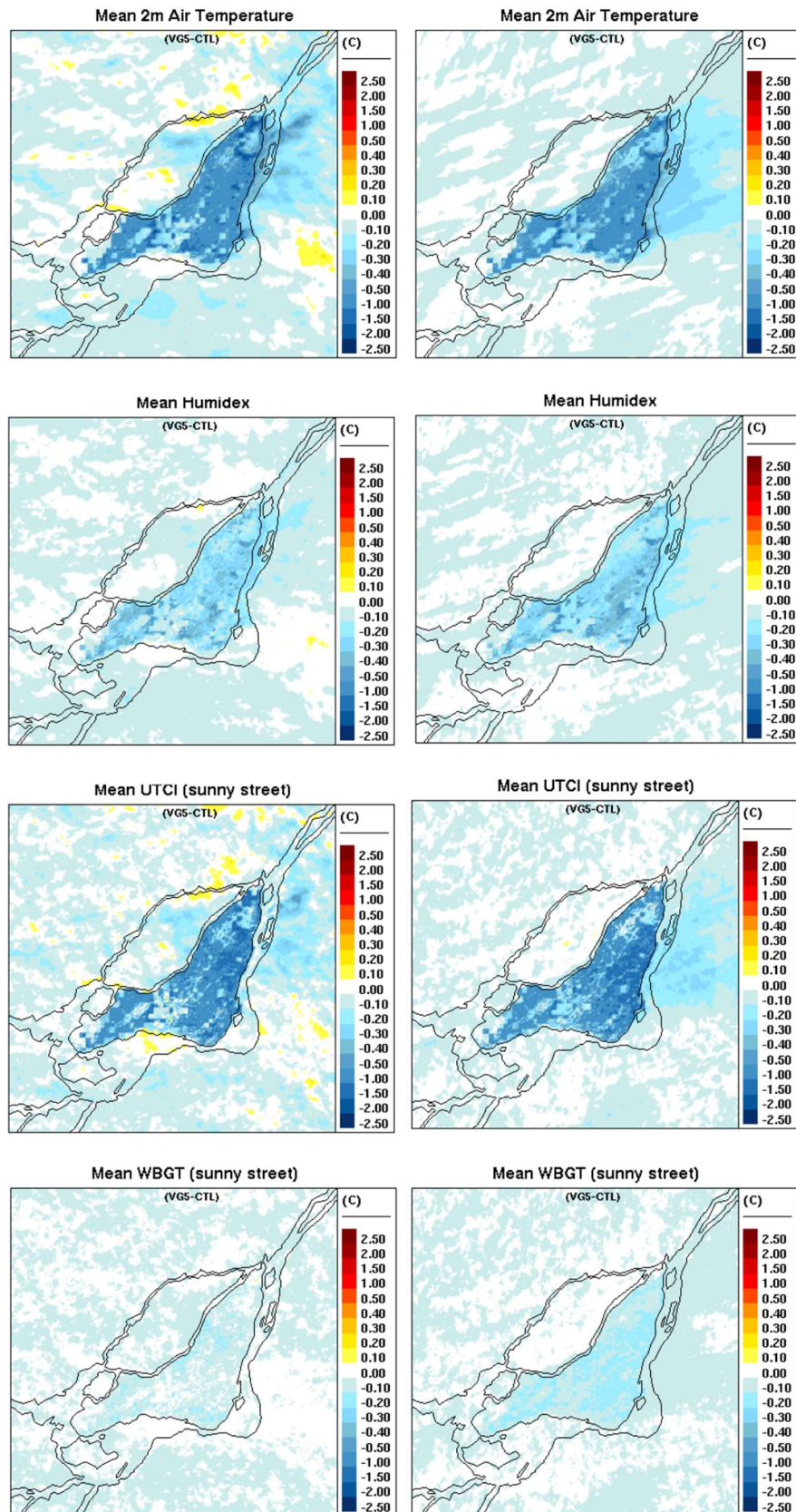


VG4  
Aug

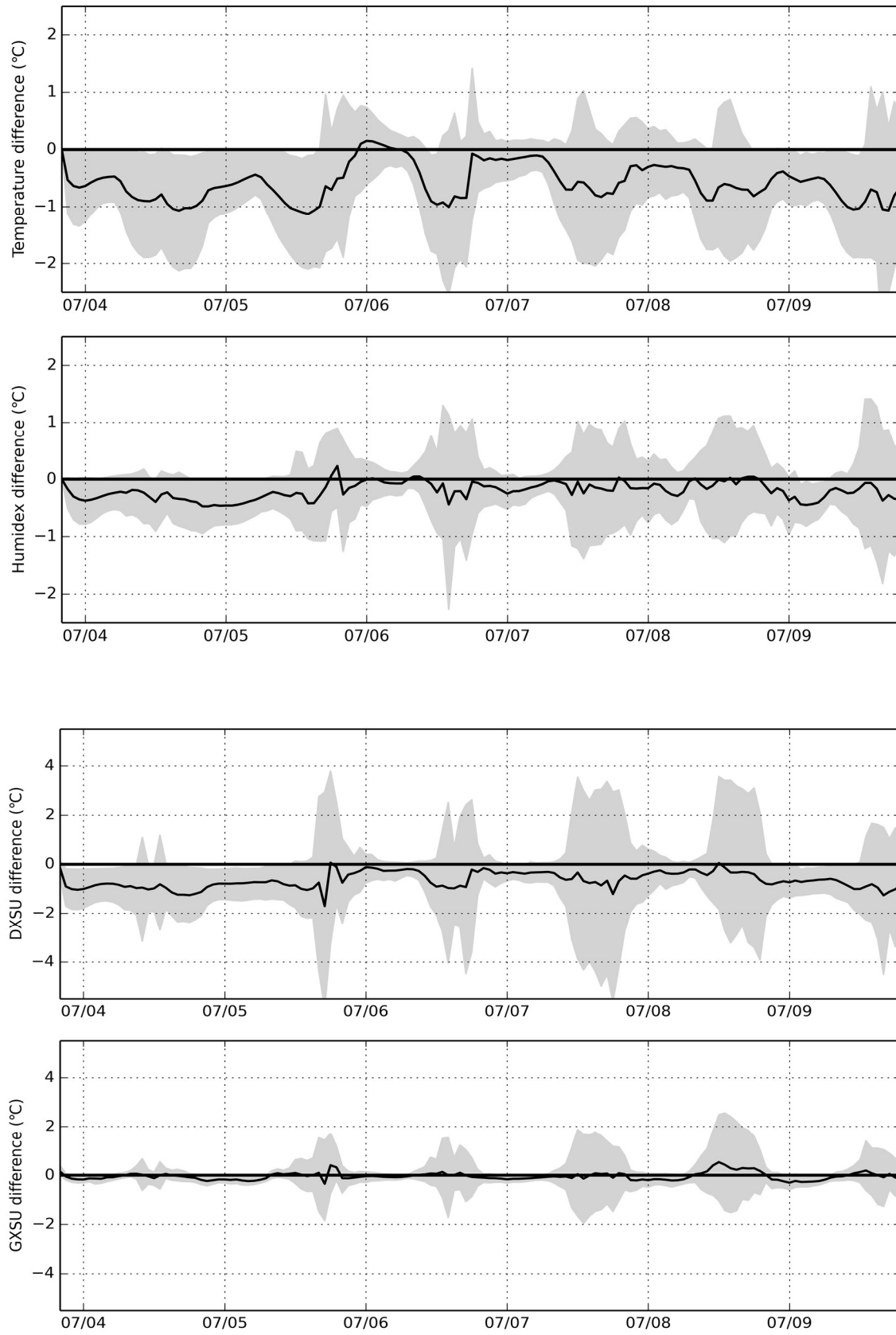


# Scenario Irrigated Tall vegetation (vg5)

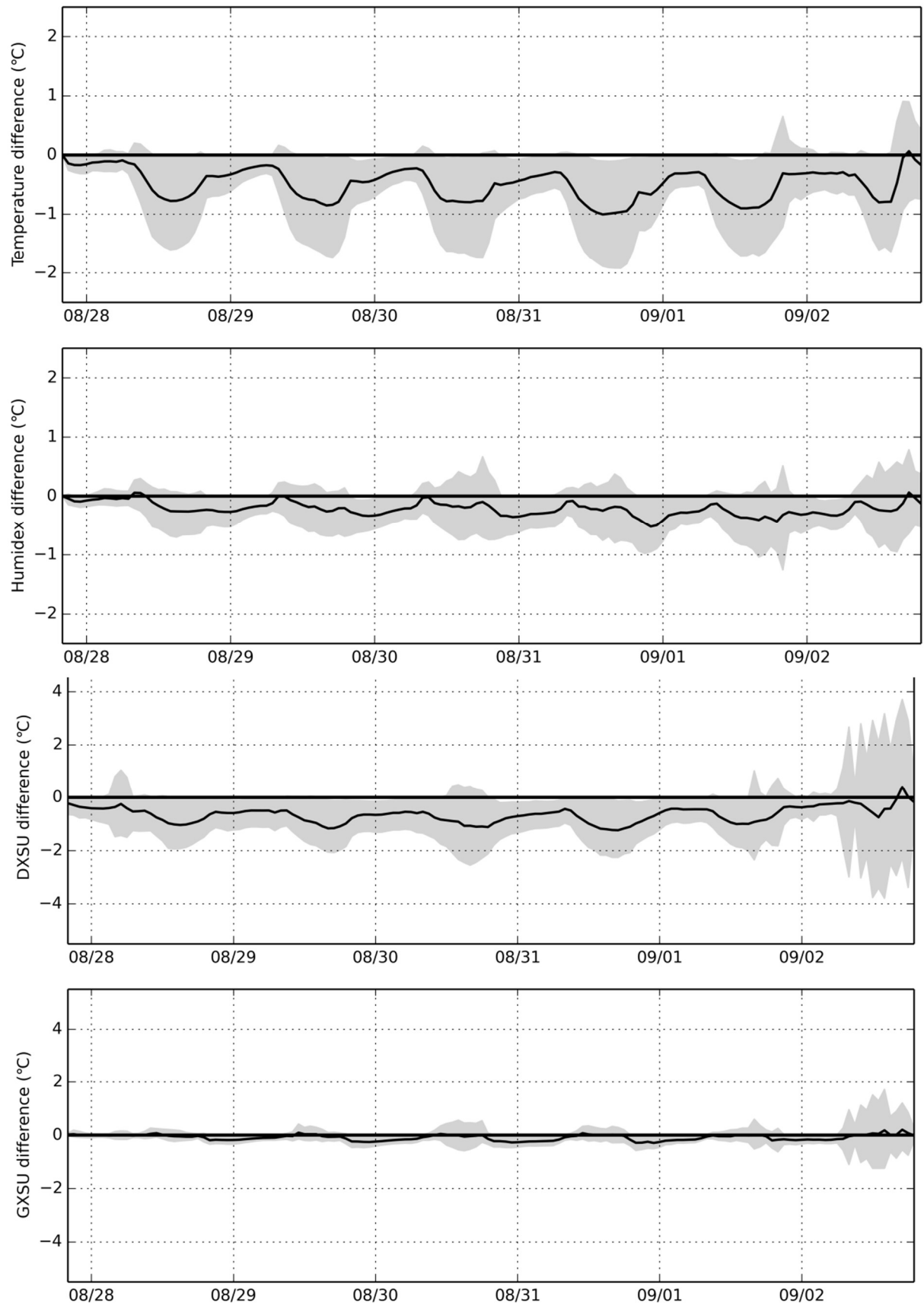
## July August



**VG5**  
**Jul**

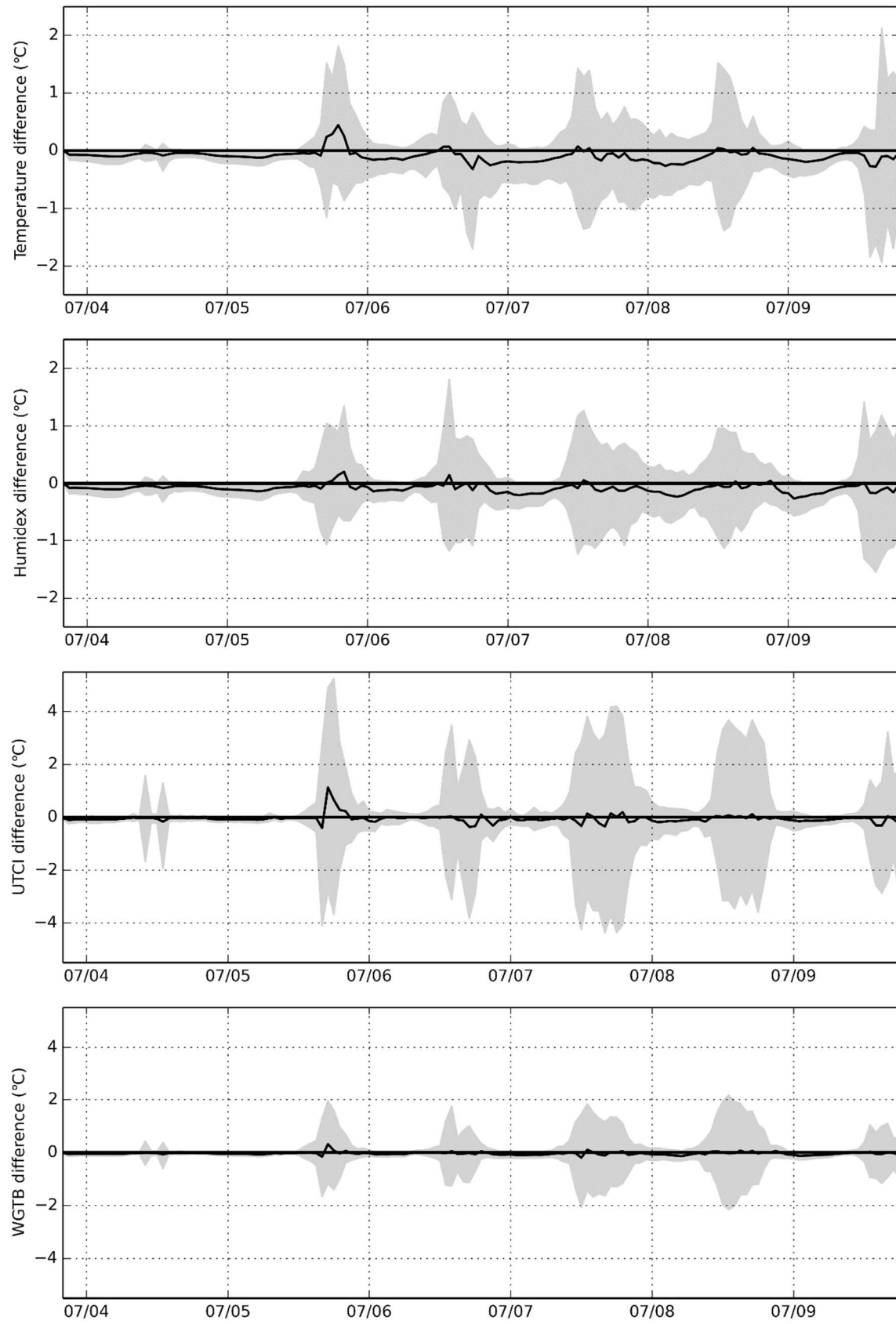


VG5  
Aug



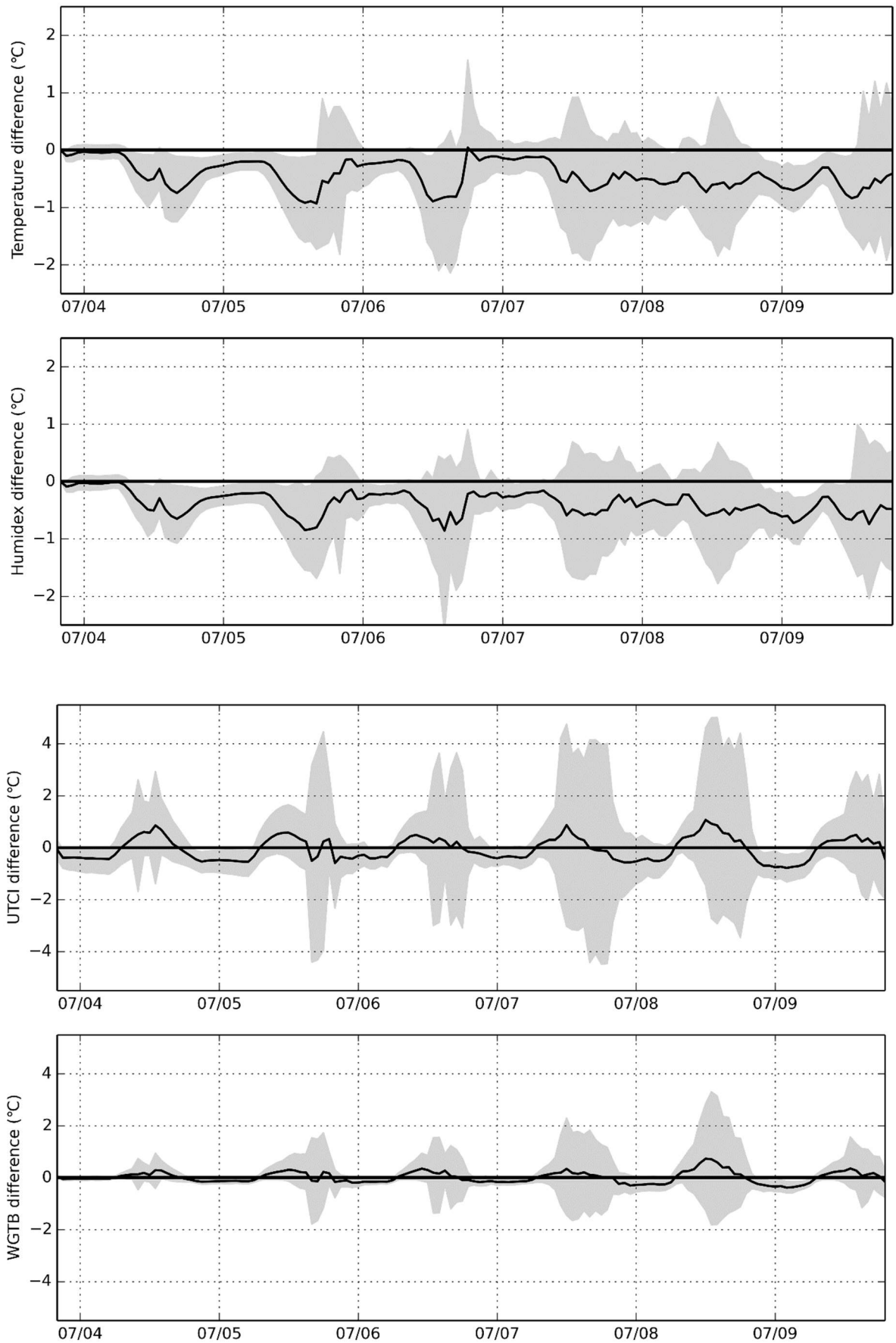


HF1  
Jul

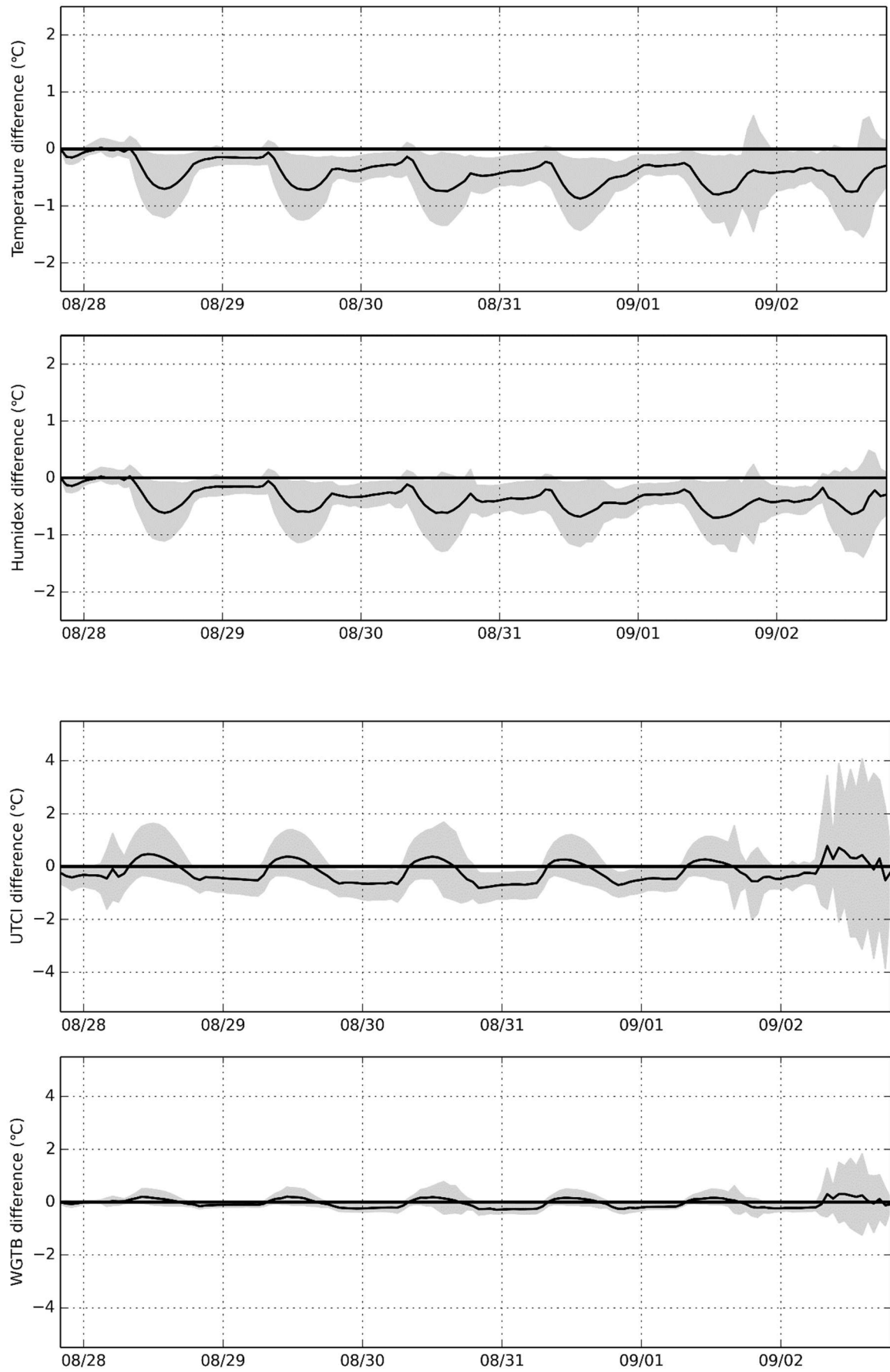




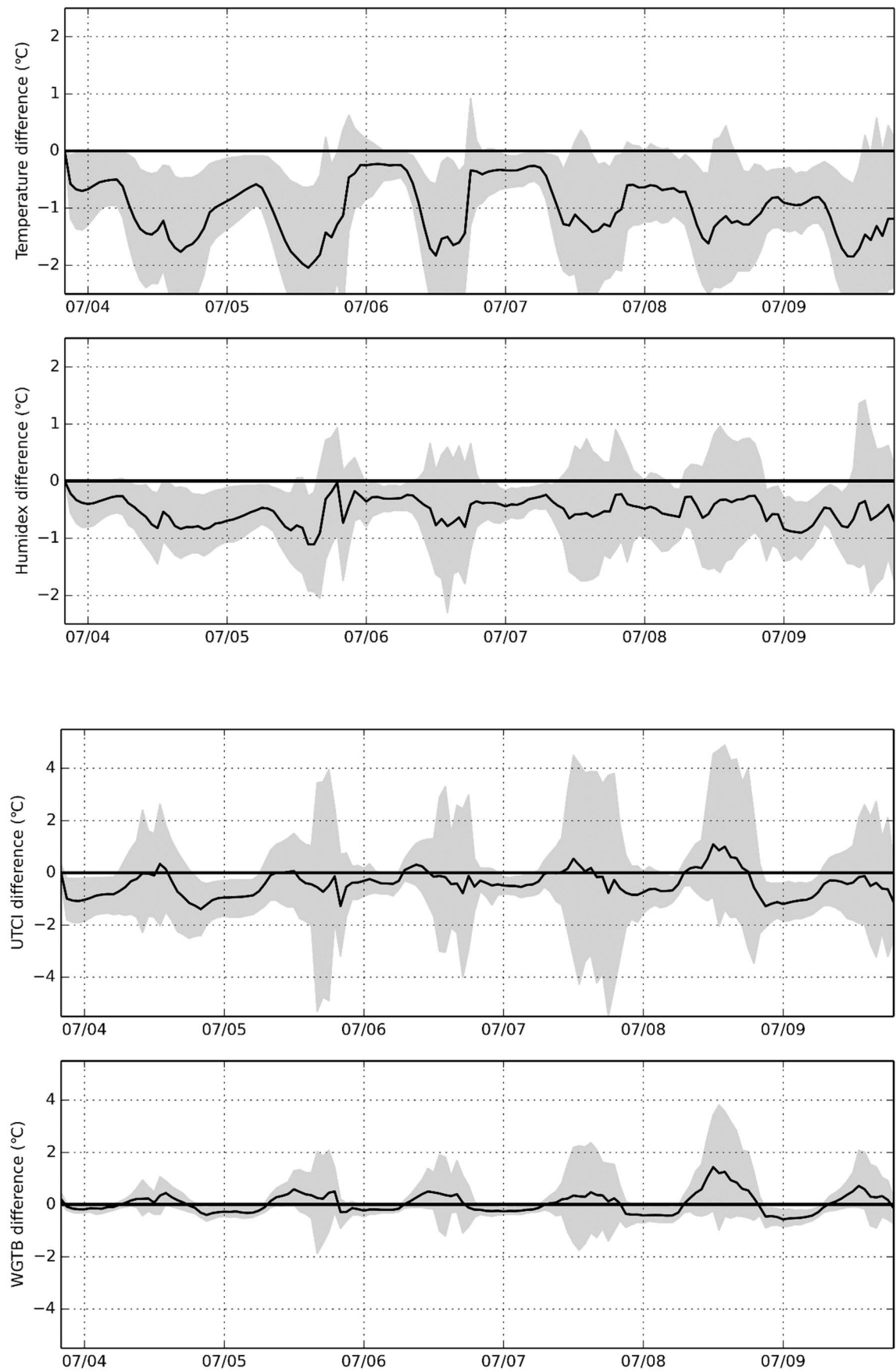
AL3VG2  
Jul



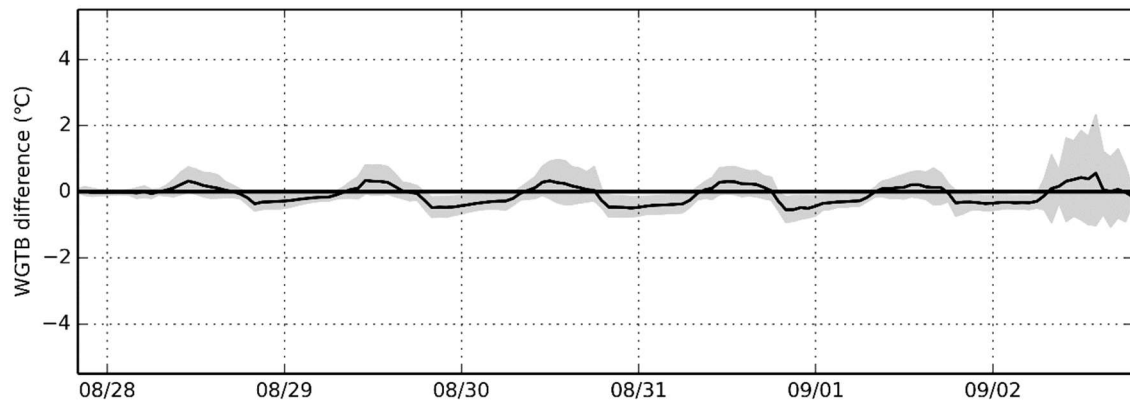
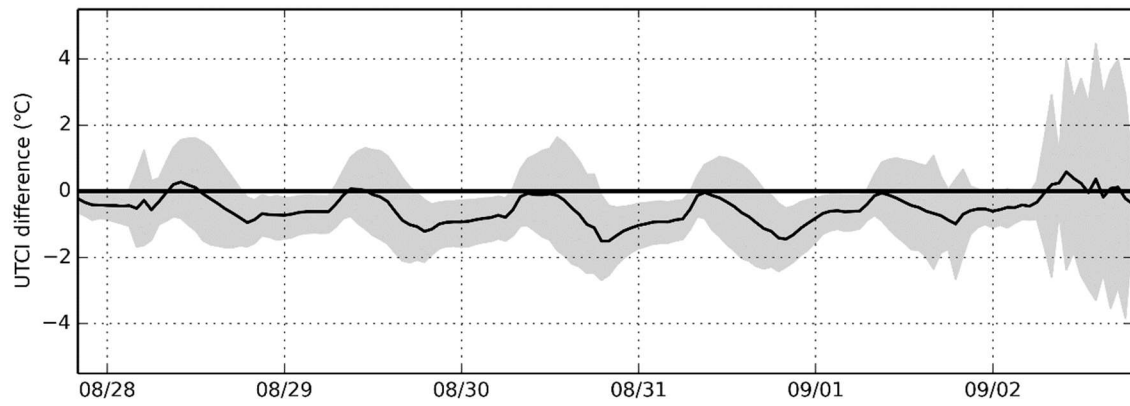
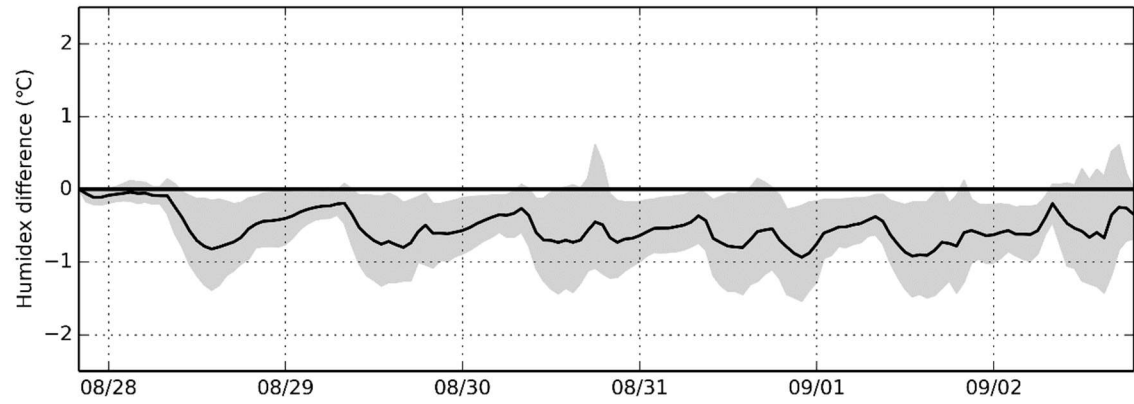
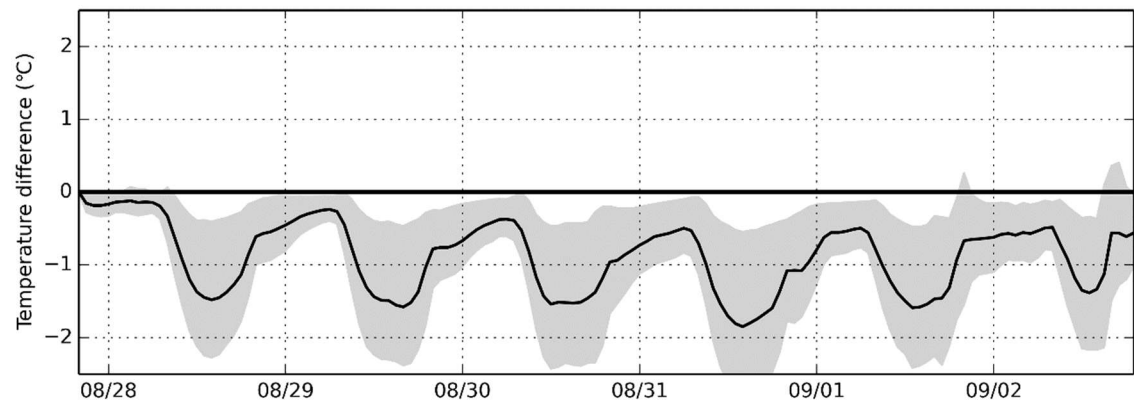
AL3VG2  
Aug



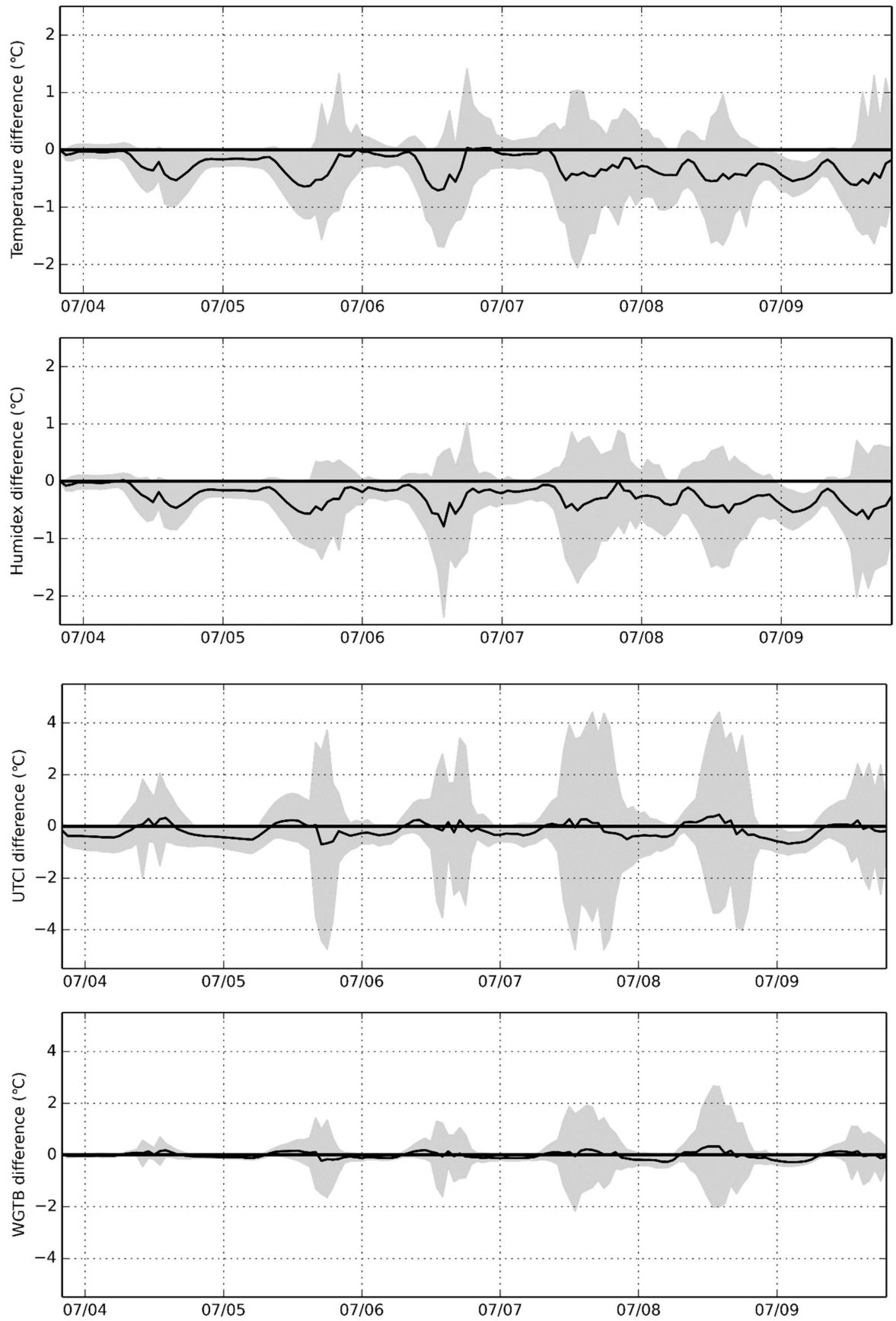
AL3VG3  
Jul



AL3VG3  
Aout

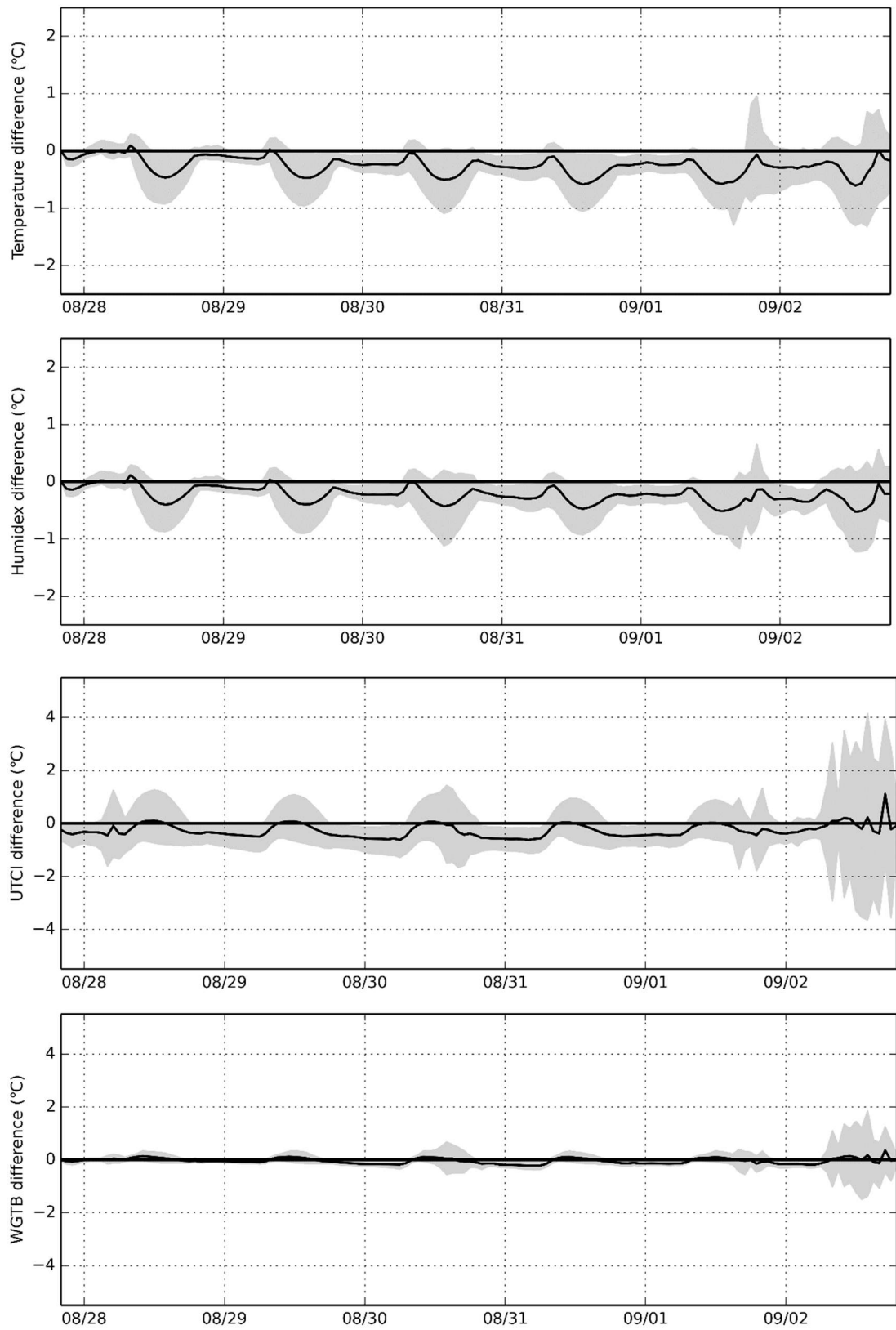


AL6VG2  
Jul

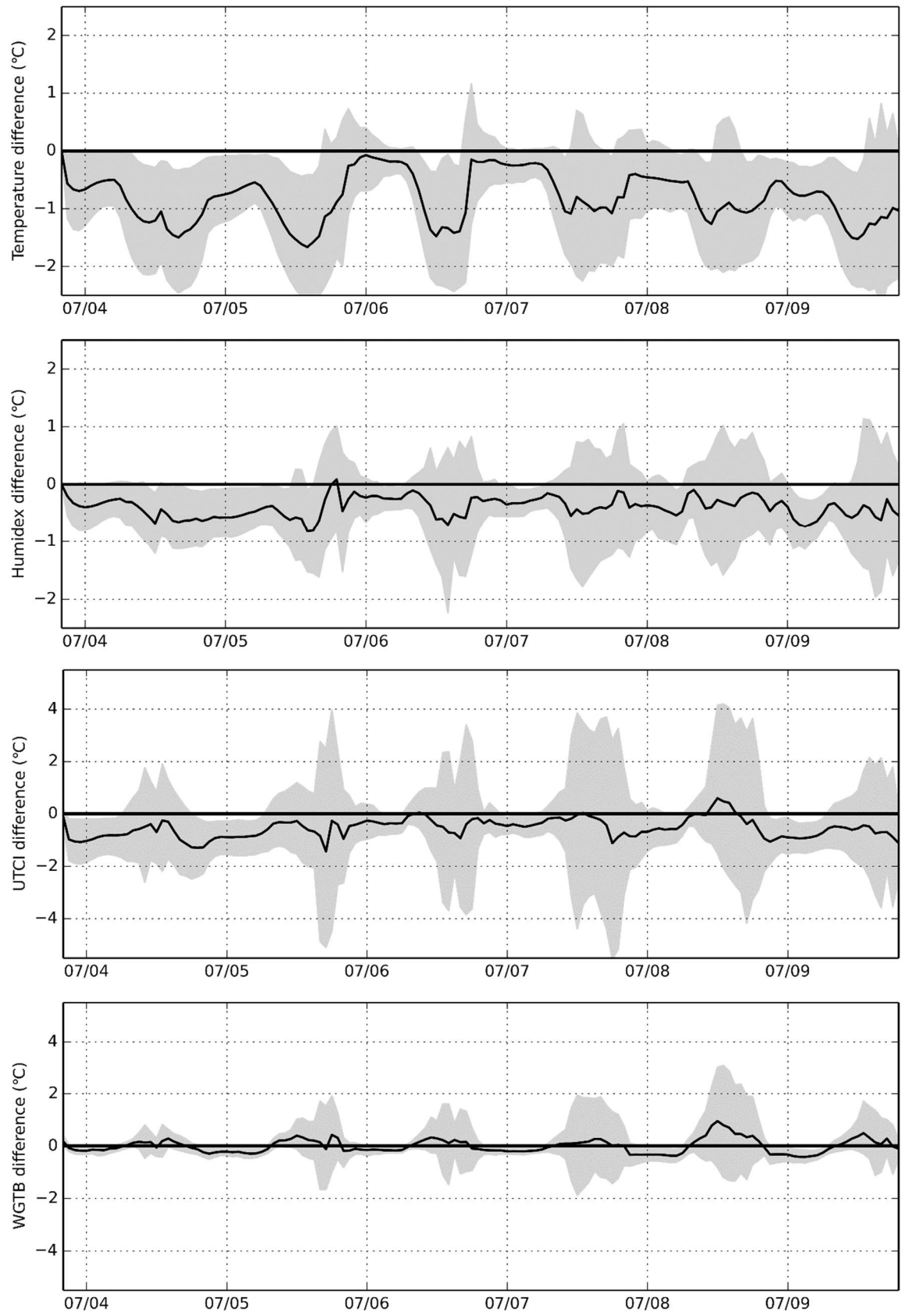




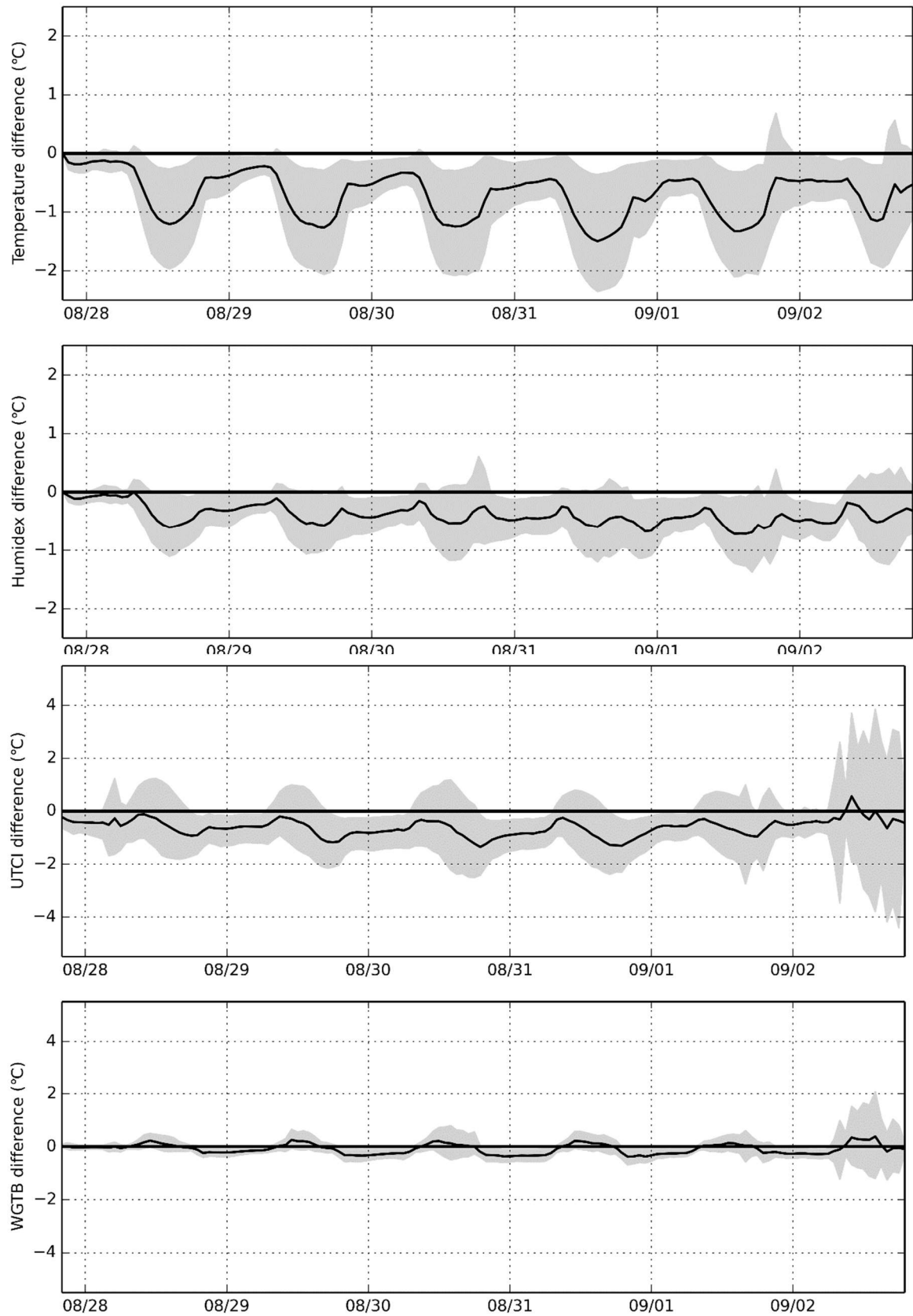
AL6VG2  
Aout



AL6VG3  
Jul



AL6VG3  
Aout



### A.3) Bilan des résultats

Les tableaux suivant résument les valeurs numériques des différences obtenues pour les scénarios, moins celles du contrôle, en Celsius, en moyenne sur l'ensemble des zones urbaines de l'île de Montréal (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles), pour les vagues de chaleur de Juillet (à gauche) et d'Août (à droite) 2010. Les meilleures valeurs obtenues sont en rouge, tandis que les valeurs positives sont en bleu, et représentent un effet non souhaité.

#### 1. Température de l'air

| T      | Difference |       | Diff. jour |       | Diff. nuit |       |
|--------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|        | Juillet    | août  | Juillet    | août  | Juillet    | août  |
| AL1    | -0.04      | -0.07 | -0.06      | -0.08 | 0.01       | -0.04 |
| AL2    | 0.00       | 0.00  | -0.01      | 0.00  | 0.01       | 0.00  |
| AL3    | -0.32      | -0.33 | -0.45      | -0.48 | -0.11      | -0.15 |
| AL4    | -0.44      | -0.44 | -0.59      | -0.61 | -0.18      | -0.23 |
| AL5    | -0.09      | -0.10 | -0.09      | -0.07 | -0.08      | -0.14 |
| AL6    | -0.27      | -0.20 | -0.36      | -0.31 | -0.12      | -0.08 |
| AL7    | -0.10      | -0.04 | -0.12      | -0.05 | -0.07      | -0.02 |
| VG1    | -0.20      | -0.06 | -0.26      | -0.06 | -0.08      | -0.05 |
| VG2    | -0.15      | -0.05 | -0.16      | -0.02 | -0.12      | -0.10 |
| VG3    | -0.63      | -0.23 | -0.76      | -0.19 | -0.39      | -0.27 |
| VG4    | -0.04      | -0.04 | -0.06      | -0.01 | -0.01      | -0.07 |
| VG5    | -0.56      | -0.22 | -0.69      | -0.19 | -0.32      | -0.25 |
| VG2AL3 | -0.37      | -0.33 | -0.45      | -0.40 | -0.22      | -0.24 |
| VG2AL6 | -0.24      | -0.20 | -0.30      | -0.24 | -0.13      | -0.16 |
| VG3AL3 | -0.95      | -0.51 | -1.19      | -0.57 | -0.53      | -0.44 |
| VG3AL6 | -0.75      | -0.71 | -0.94      | -0.96 | -0.43      | -0.41 |

2. Humidex

| Humidex | Difference |       | Diff. jour |       | Diff. nuit |       |
|---------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|         | Juillet    | août  | Juillet    | août  | Juillet    | août  |
| AL1     | -0.04      | -0.07 | -0.05      | -0.08 | -0.01      | -0.04 |
| AL2     | -0.01      | 0.00  | -0.01      | 0.00  | -0.01      | 0.00  |
| AL3     | -0.31      | -0.33 | -0.42      | -0.48 | -0.13      | -0.15 |
| AL4     | -0.41      | -0.44 | -0.53      | -0.61 | -0.21      | -0.23 |
| AL5     | -0.06      | -0.10 | -0.05      | -0.07 | -0.09      | -0.14 |
| AL6     | -0.24      | -0.20 | -0.31      | -0.31 | -0.13      | -0.08 |
| AL7     | -0.06      | -0.04 | -0.07      | -0.05 | -0.04      | -0.02 |
| VG1     | -0.06      | -0.06 | -0.05      | -0.06 | -0.07      | -0.05 |
| VG2     | -0.09      | -0.05 | -0.09      | -0.02 | -0.11      | -0.10 |
| VG3     | -0.20      | -0.23 | -0.16      | -0.19 | -0.28      | -0.27 |
| VG4     | -0.05      | -0.04 | -0.06      | -0.01 | -0.03      | -0.07 |
| VG5     | -0.18      | -0.22 | -0.15      | -0.19 | -0.23      | -0.25 |
| VG2AL3  | -0.33      | -0.33 | -0.40      | -0.40 | -0.21      | -0.24 |
| VG2AL6  | -0.23      | -0.20 | -0.27      | -0.24 | -0.15      | -0.16 |
| VG3AL3  | -0.47      | -0.51 | -0.49      | -0.57 | -0.43      | -0.44 |
| VG3AL6  | -0.36      | -0.38 | -0.36      | -0.41 | -0.36      | -0.34 |

3. UTCI pour un humain au soleil

| UTCI   | Difference |       | Diff. jour |       | Diff. nuit |       |
|--------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|        | Juillet    | août  | Juillet    | août  | Juillet    | août  |
| AL1    | 0.04       | -0.02 | 0.06       | -0.03 | 0.01       | -0.02 |
| AL2    | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.01       | 0.00  |
| AL3    | 0.33       | 0.17  | 0.56       | 0.45  | -0.09      | -0.17 |
| AL4    | 0.37       | 0.16  | 0.67       | 0.50  | -0.15      | -0.25 |
| AL5    | -0.02      | -0.05 | 0.01       | -0.02 | -0.08      | -0.09 |
| AL6    | 0.11       | 0.10  | 0.25       | 0.26  | -0.13      | -0.11 |
| AL7    | 0.03       | 0.09  | 0.09       | 0.18  | -0.07      | -0.02 |
| VG1    | -0.17      | -0.14 | -0.20      | -0.17 | -0.11      | -0.09 |
| VG2    | -0.32      | -0.35 | -0.32      | -0.35 | -0.33      | -0.35 |
| VG3    | -0.63      | -0.73 | -0.66      | -0.85 | -0.58      | -0.58 |
| VG4    | -0.23      | -0.33 | -0.24      | -0.35 | -0.21      | -0.32 |
| VG5    | -0.59      | -0.70 | -0.63      | -0.82 | -0.52      | -0.55 |
| VG2AL3 | 0.00       | -0.22 | 0.21       | 0.01  | -0.38      | -0.49 |
| VG2AL6 | -0.14      | -0.27 | -0.02      | -0.15 | -0.33      | -0.43 |
| VG3AL3 | -0.37      | -0.59 | -0.20      | -0.47 | -0.67      | -0.74 |
| VG3AL6 | -0.48      | -0.65 | -0.40      | -0.64 | -0.63      | -0.67 |



4. UTCI pour un humain à l'ombre

| UTCI   | Difference |       | Diff. jour |       | Diff. nuit |       |
|--------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|        | Juillet    | août  | Juillet    | août  | Juillet    | août  |
| AL1    | 0.03       | -0.03 | 0.04       | -0.03 | 0.01       | -0.02 |
| AL2    | 0.00       | 0.00  | -0.01      | 0.00  | 0.01       | 0.00  |
| AL3    | 0.36       | 0.24  | 0.62       | 0.57  | -0.09      | -0.17 |
| AL4    | 0.39       | 0.23  | 0.70       | 0.63  | -0.15      | -0.25 |
| AL5    | -0.03      | -0.05 | 0.00       | -0.02 | -0.08      | -0.09 |
| AL6    | 0.13       | 0.14  | 0.28       | 0.34  | -0.13      | -0.11 |
| AL7    | 0.04       | 0.11  | 0.11       | 0.22  | -0.07      | -0.02 |
| VG1    | -0.19      | -0.15 | -0.23      | -0.19 | -0.11      | -0.09 |
| VG2    | -0.32      | -0.34 | -0.31      | -0.34 | -0.33      | -0.35 |
| VG3    | -0.68      | -0.76 | -0.73      | -0.91 | -0.58      | -0.58 |
| VG4    | -0.23      | -0.33 | -0.24      | -0.34 | -0.21      | -0.32 |
| VG5    | -0.64      | -0.73 | -0.70      | -0.88 | -0.52      | -0.55 |
| VG2AL3 | 0.02       | -0.16 | 0.26       | 0.12  | -0.38      | -0.49 |
| VG2AL6 | -0.11      | -0.24 | 0.02       | -0.09 | -0.33      | -0.43 |
| VG3AL3 | -0.40      | -0.57 | -0.24      | -0.44 | -0.67      | -0.74 |
| VG3AL6 | 0.01       | -0.09 | 0.14       | 0.03  | -0.21      | -0.23 |

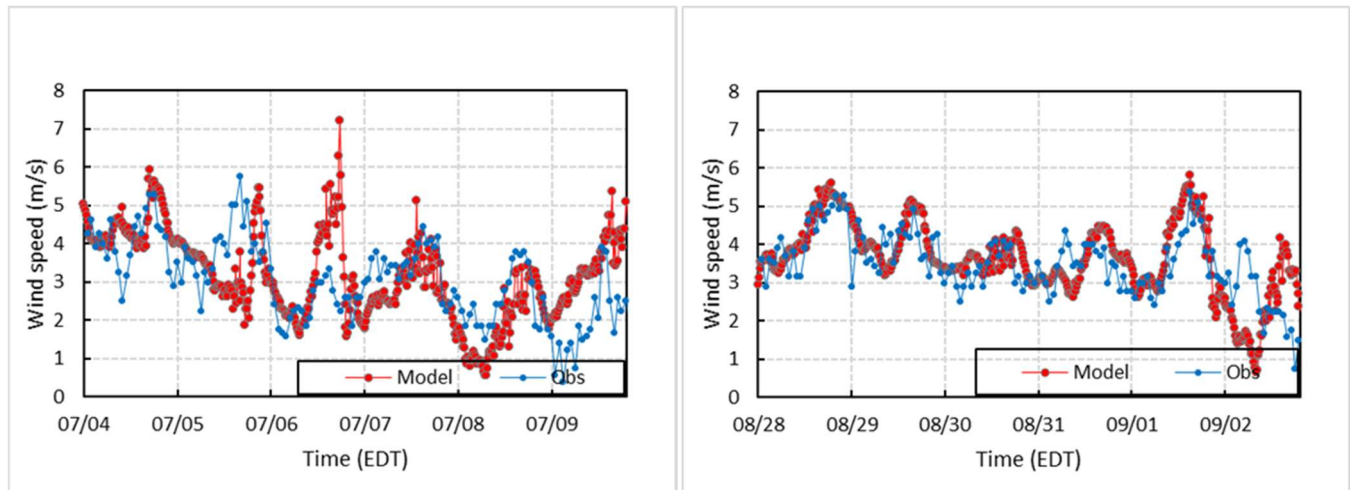
5. WBGT au soleil

| WBGT   | Difference |       | Diff. jour |       | Diff. nuit |       |
|--------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|        | Juillet    | août  | Juillet    | août  | Juillet    | août  |
| AL1    | 0.01       | -0.02 | 0.02       | -0.02 | -0.01      | -0.02 |
| AL2    | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  |
| AL3    | 0.10       | 0.00  | 0.19       | 0.08  | -0.07      | -0.10 |
| AL4    | 0.11       | -0.01 | 0.24       | 0.09  | -0.11      | -0.14 |
| AL5    | -0.01      | -0.04 | 0.01       | -0.01 | -0.04      | -0.07 |
| AL6    | 0.04       | 0.00  | 0.09       | 0.05  | -0.06      | -0.05 |
| AL7    | 0.02       | 0.02  | 0.04       | 0.04  | -0.02      | -0.01 |
| VG1    | 0.01       | -0.01 | 0.02       | 0.00  | -0.01      | -0.01 |
| VG2    | -0.06      | -0.05 | -0.05      | -0.03 | -0.08      | -0.07 |
| VG3    | -0.03      | -0.10 | 0.06       | -0.02 | -0.17      | -0.19 |
| VG4    | -0.04      | -0.04 | -0.05      | -0.03 | -0.04      | -0.05 |
| VG5    | -0.03      | -0.09 | 0.04       | -0.03 | -0.14      | -0.17 |
| VG2AL3 | 0.03       | -0.05 | 0.13       | 0.04  | -0.14      | -0.16 |
| VG2AL6 | -0.01      | -0.04 | 0.04       | 0.01  | -0.10      | -0.11 |
| VG3AL3 | 0.06       | -0.09 | 0.24       | 0.07  | -0.25      | -0.29 |
| VG3AL6 | 0.01       | -0.09 | 0.14       | 0.03  | -0.21      | -0.23 |

6. WBGT à l'ombre

| WBGT   | Difference |       | Diff. jour |       | Diff. nuit |       |
|--------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|        | Juillet    | août  | Juillet    | août  | Juillet    | août  |
| AL1    | 0.01       | -0.02 | 0.02       | -0.02 | -0.01      | -0.02 |
| AL2    | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  |
| AL3    | 0.19       | 0.07  | 0.33       | 0.21  | -0.07      | -0.10 |
| AL4    | 0.21       | 0.07  | 0.39       | 0.24  | -0.11      | -0.14 |
| AL5    | -0.01      | -0.04 | 0.01       | -0.01 | -0.04      | -0.07 |
| AL6    | 0.09       | 0.04  | 0.18       | 0.13  | -0.06      | -0.06 |
| AL7    | 0.04       | 0.03  | 0.07       | 0.07  | -0.02      | -0.01 |
| VG1    | 0.01       | 0.00  | 0.02       | 0.00  | -0.01      | -0.01 |
| VG2    | -0.06      | -0.05 | -0.05      | -0.03 | -0.07      | -0.06 |
| VG3    | -0.06      | -0.11 | 0.00       | -0.06 | -0.17      | -0.18 |
| VG4    | -0.04      | -0.04 | -0.04      | -0.04 | -0.03      | -0.05 |
| VG5    | -0.06      | -0.11 | -0.02      | -0.06 | -0.14      | -0.16 |
| VG2AL3 | 0.10       | 0.01  | 0.24       | 0.14  | -0.13      | -0.16 |
| VG2AL6 | 0.03       | -0.01 | 0.11       | 0.07  | -0.10      | -0.10 |
| VG3AL3 | 0.10       | -0.06 | 0.30       | 0.13  | -0.25      | -0.29 |
| VG3AL6 | 0.02       | -0.08 | 0.15       | 0.05  | -0.21      | -0.23 |

## A.3) Autres figures



**Figure.** Comparaison entre la vitesse du vent ( $\text{m s}^{-1}$ ) observée (en bleu) pour 3 stations à Montréal (même stations que pour les Figures 7, 9 et 10) avec la prévision numérique tridimensionnelle de GEM avec une maille de 250 m, pour le premier événement de chaleur intense (à gauche) et pour le deuxième événement de chaleur intense à la fin août début septembre 2010.

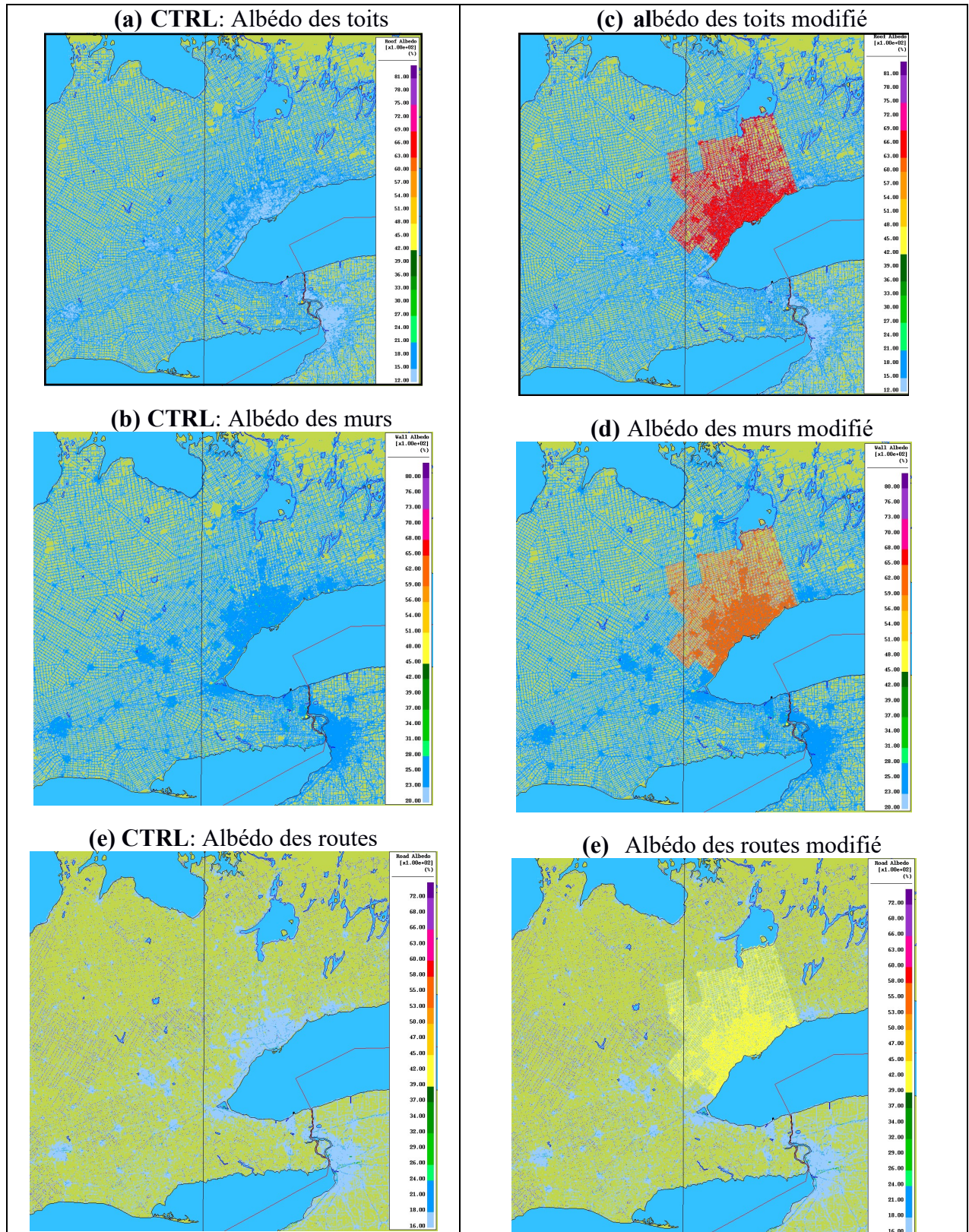
**Appendice B. Résultats pour la ville de Toronto**

B.1) État des modifications pour les scénarios

Les principaux aspects modifiés dans les scénarios présentés dans le tableau 5 du rapport sont exposés ici. La première catégorie de scénarios se concentre sur les propriétés thermo-radiatives des matériaux urbains (type AL), la seconde sur l'ajout de végétation (type VG).

**Expériences de type AL**

Les valeurs des réflectances sont modifiées tel que présenté dans la Figure B1.



**Figure B1:** Valeurs des réflectances initiales (expérience contrôle, (a), (c) et (e), à gauche), et augmentées (à droite); (b) pour les toits dans les expériences AL1, AL4; (d) pour les murs dans les expériences AL4 et AL6; (f) pour les routes dans les expériences AL4 et AL7. Les modifications sont apportées aléatoirement



à 85 % des mailles de calcul de l'île de Montréal.

### Expériences de type VG

Dans ces scénarios, une partie des surfaces artificielles (routes, trottoirs, stationnements, zones industrielles) est remplacée par de la végétation (Figure B2). Certains scénarios s'accompagnent d'un processus d'irrigation équivalent à celui réalisé pour l'étude sur Montréal (Appendice A).

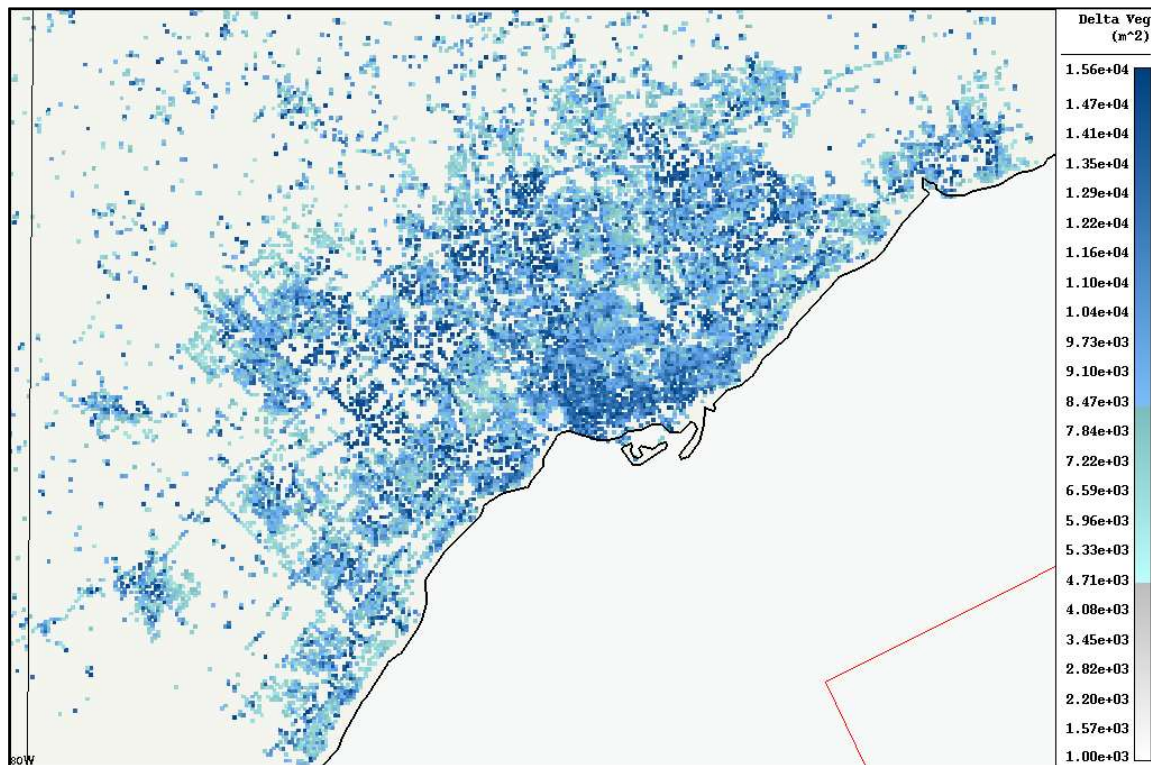


Figure B2. Échantillon sur la ville de Toronto de la superficie de la végétation ajoutée (en m<sup>2</sup>) sur l'agglomération de Toronto par rapport à la simulation contrôle pour les scénarios VG2 et VG3 (végétation basse, herbe). La réduction des surfaces imperméables correspond à la même superficie. Les modifications sont apportées pour les mailles de calcul de l'Agglomération de Toronto dans laquelle les fractions de surfaces artificielles étaient comprises entre 20 et 50 % afin de conserver les routes principales et les modifications ne dépassent pas 25 % de la maille de calcul. Une maille de calcul a une superficie de 6.25e+04 m<sup>2</sup>.



## B.2) Présentation des résultats

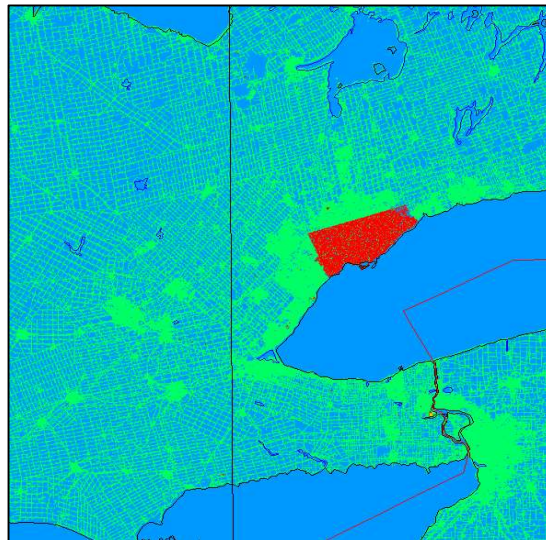
Pour chaque scénario, les résultats sont présentés selon des cartes et des séries temporelles pour quatre indicateurs de chaleur et de confort suivants, déterminés près de la surface (au milieu de la rue) : la température, l'Humidex, l'UTCI, et le WBGT, tous exprimés en degrés Celsius. La période de forte chaleur du mois de Juillet du 4 juillet au 9 juillet 2010 est considérée.

### Légende des cartes :

Les cartes présentent les variabilités spatiales sur la région de Toronto des impacts dudit scénario (différences des valeurs du scénario moins celles du contrôle, en Celsius), en moyenne pour les vagues de chaleur de Juillet. Les tons bleus indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort thermique, et les tons jaunes à rouges indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort thermique.

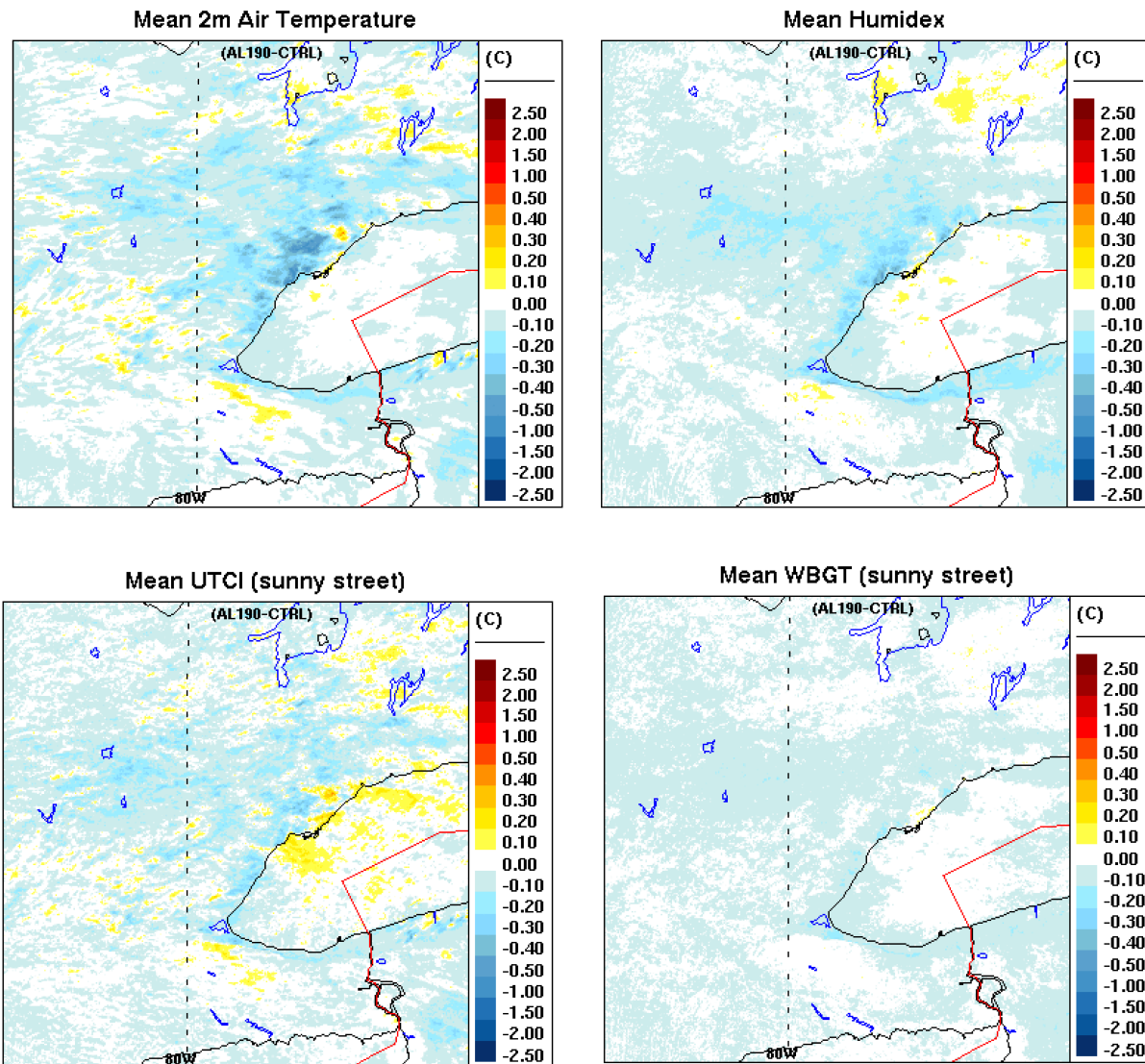
### Légende des séries temporelles :

Ensuite, les séries temporelles des impacts dudit scénario au cours de la vague de chaleur de juillet sont présentées pour les mêmes indicateurs (différences des valeurs du scénario moins celles du contrôle, en Celsius). La ligne continue noire représente la moyenne spatiale sur l'ensemble des zones urbaines de la ville de Toronto (délimitée sur la Figure B3). (La sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles). La partie ombragée indique les 5eme et 95eme percentiles et représente la variabilité spatiale des résultats. Les lignes verticales pour la date indiquent 0000 heure locale. Les valeurs négatives indiquent un refroidissement ou l'amélioration du confort, et les valeurs positives indiquent un réchauffement ou une dégradation du confort.

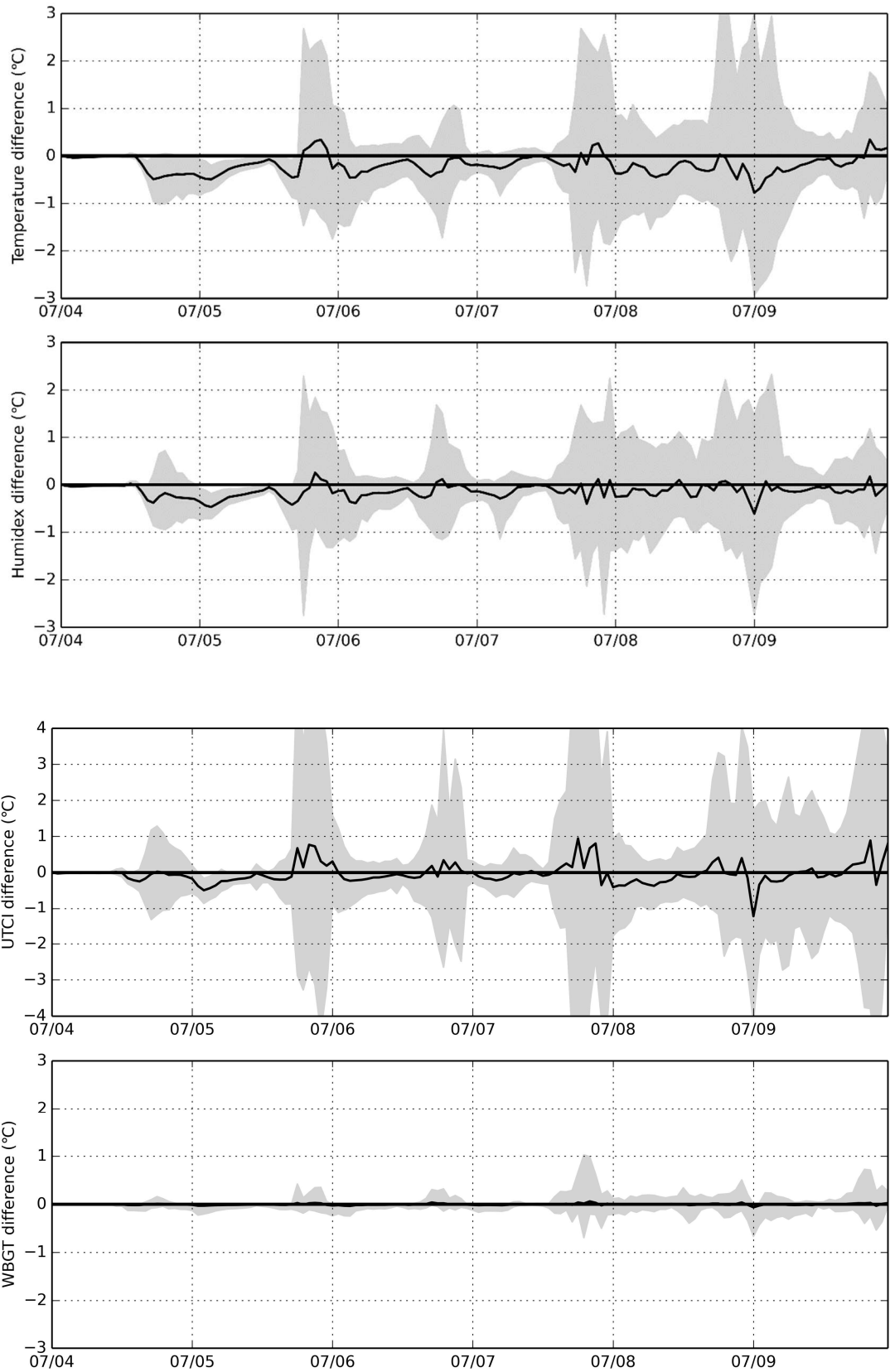


**Figure B3.** Région (en rouge) délimitant la ville de Toronto servant à réaliser les moyennes spatiales des résultats.

# Scenario Albedo Roof (Albedo=0.90) July 2010: AL1-90 - Ctrl

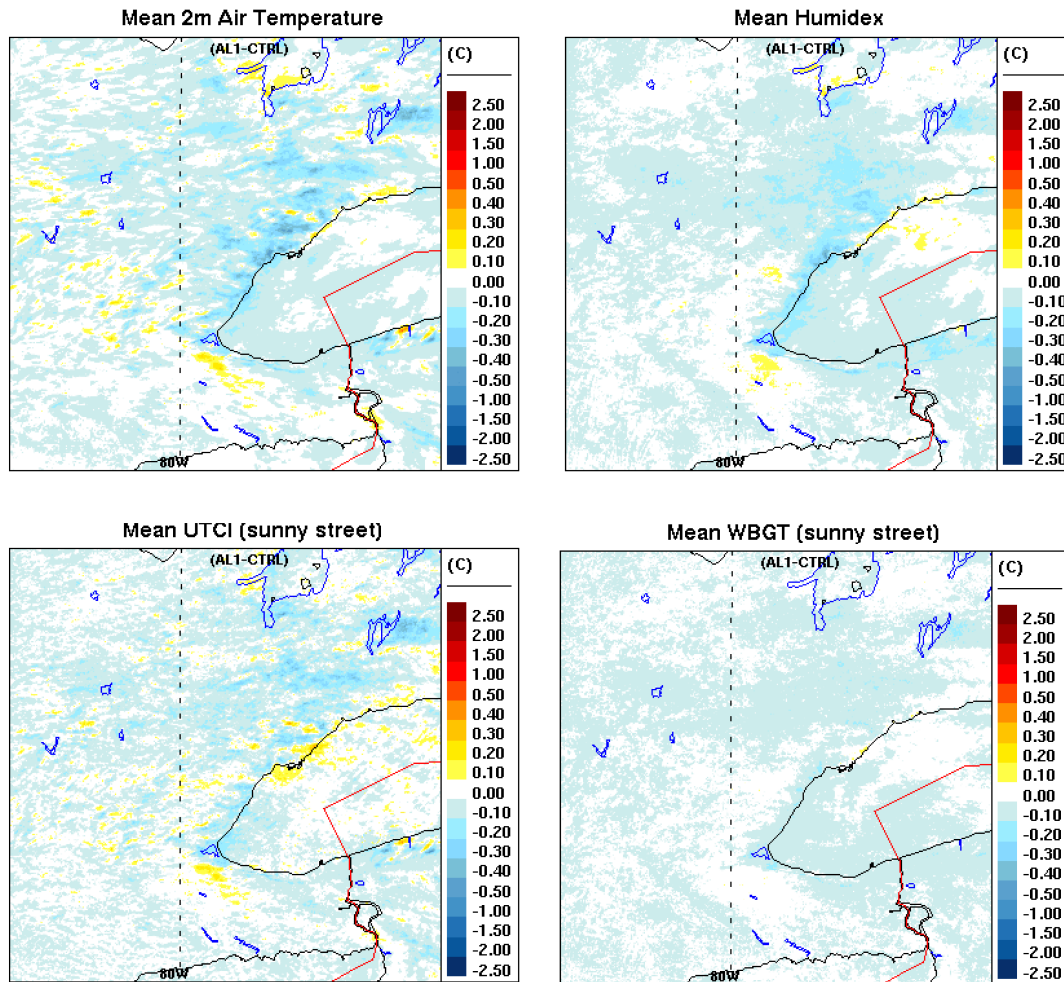


AL190  
Albedo  
=0.90



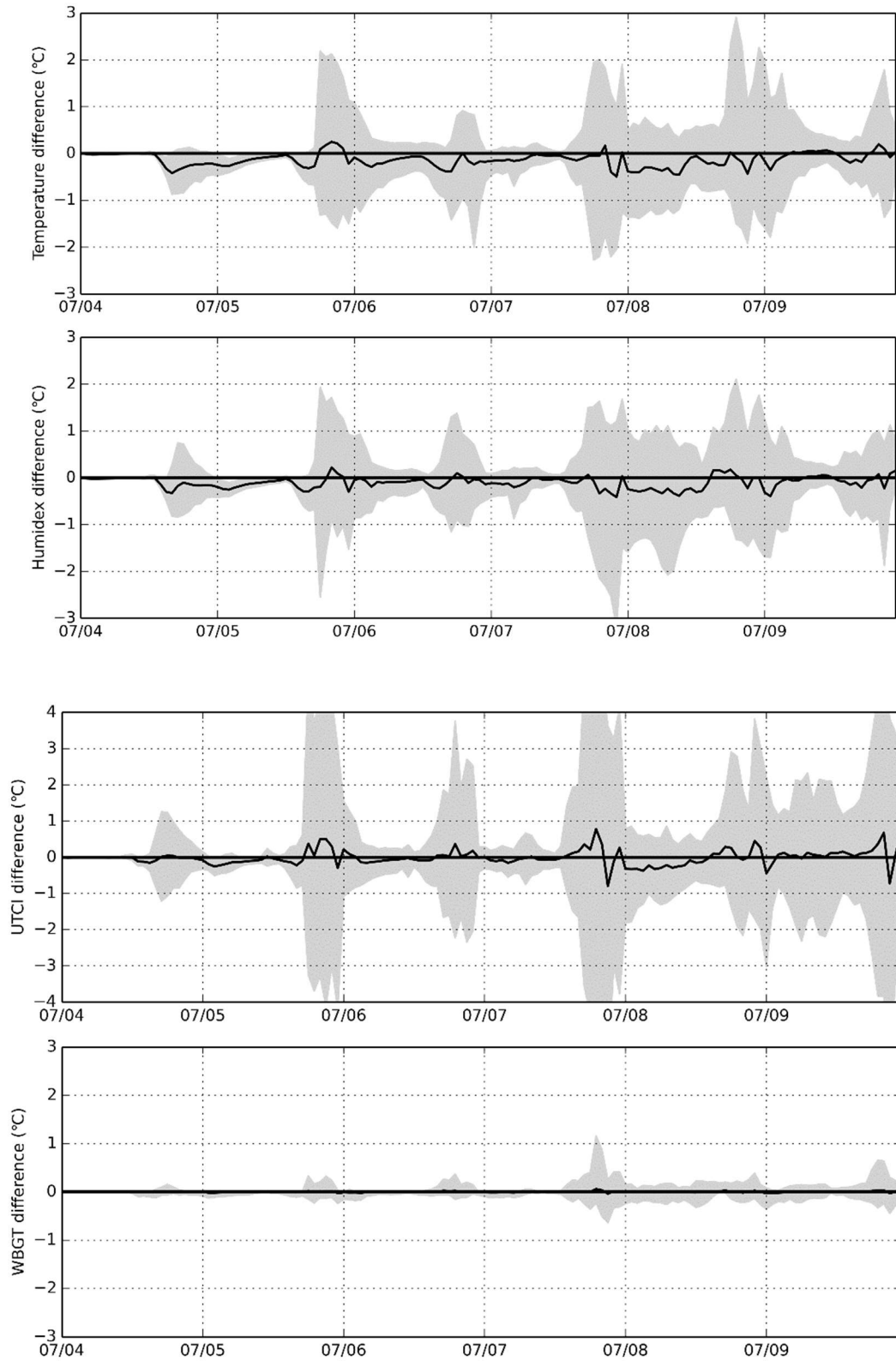
## Scenario Albedo Roof Toronto Town (Albedo=0.65)

July 2010: a1 - Ctrl





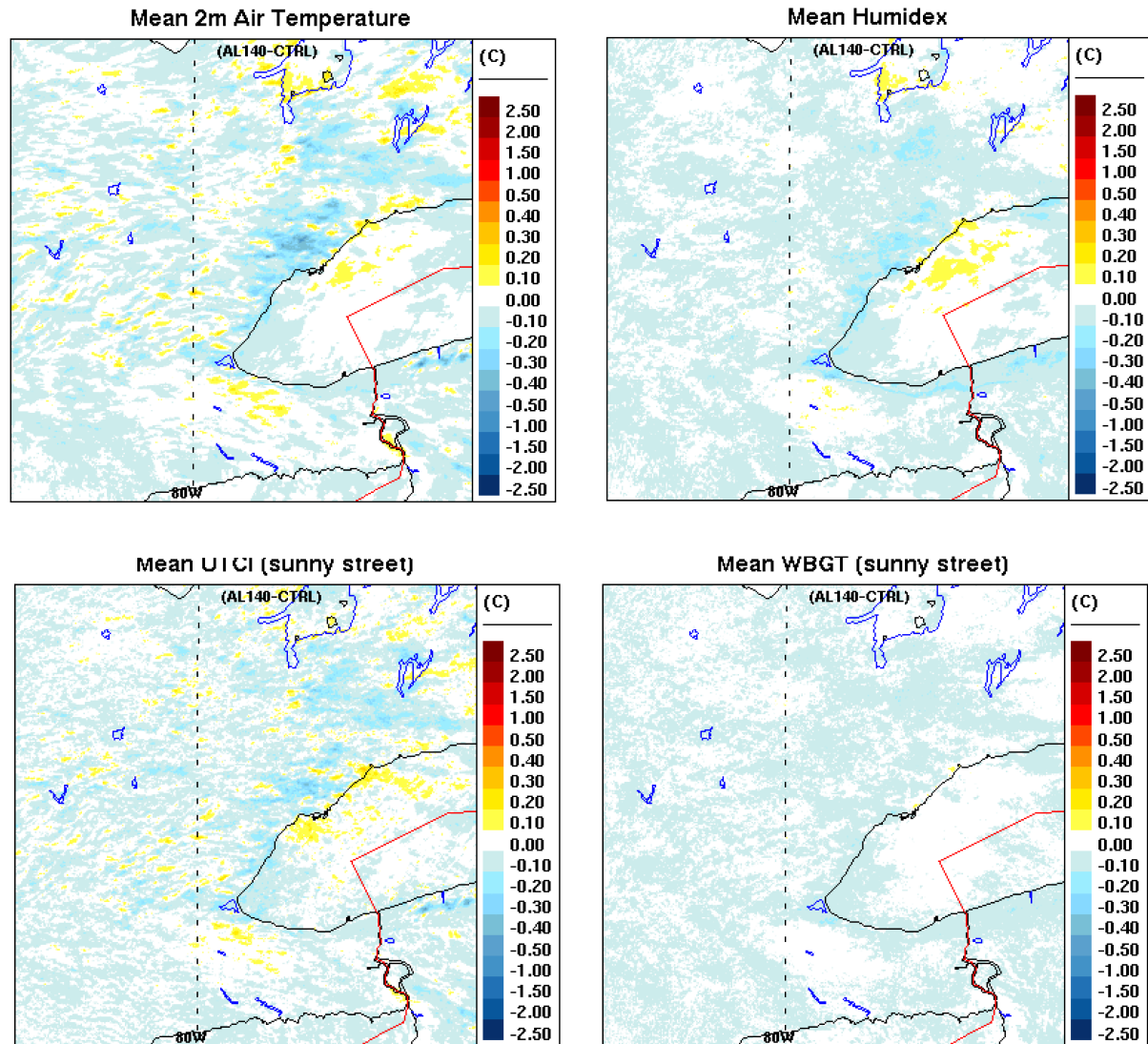
AL1  
Albedo  
=0.65





# Scenario Albedo Roof (Albedo=0.40)

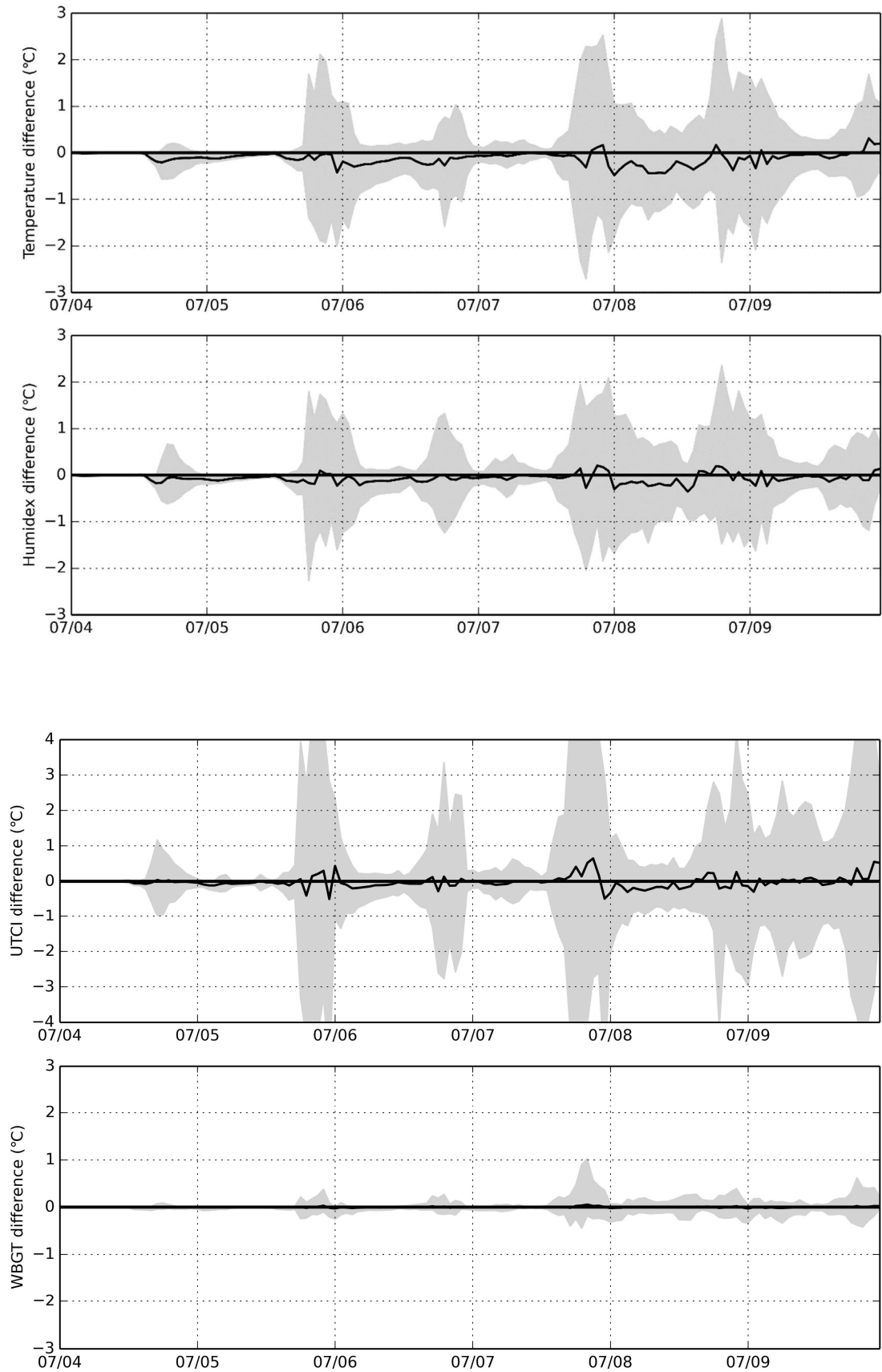
July 2010: AL1-40 - Ctrl



AL140

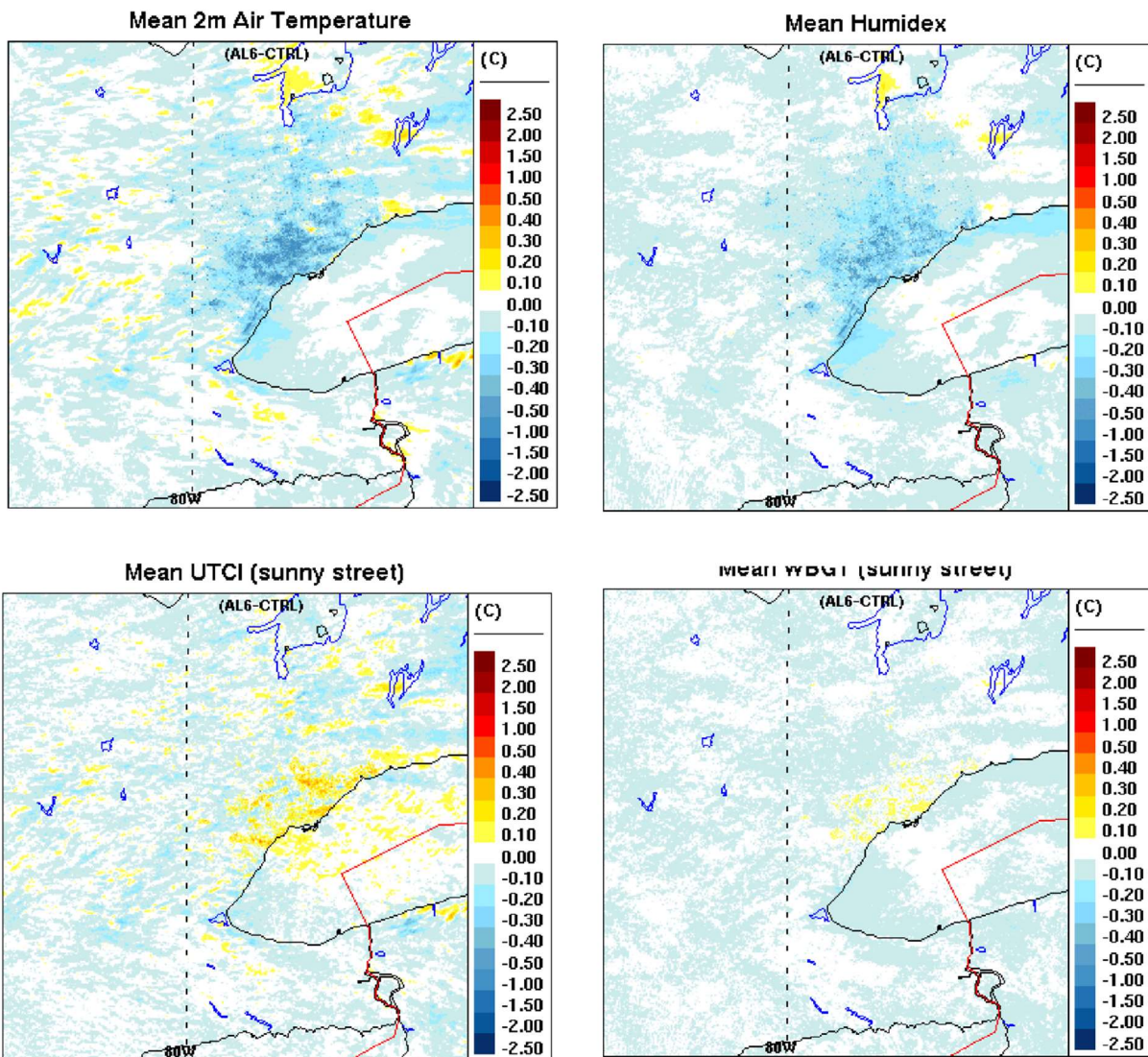
Albedo

0.4

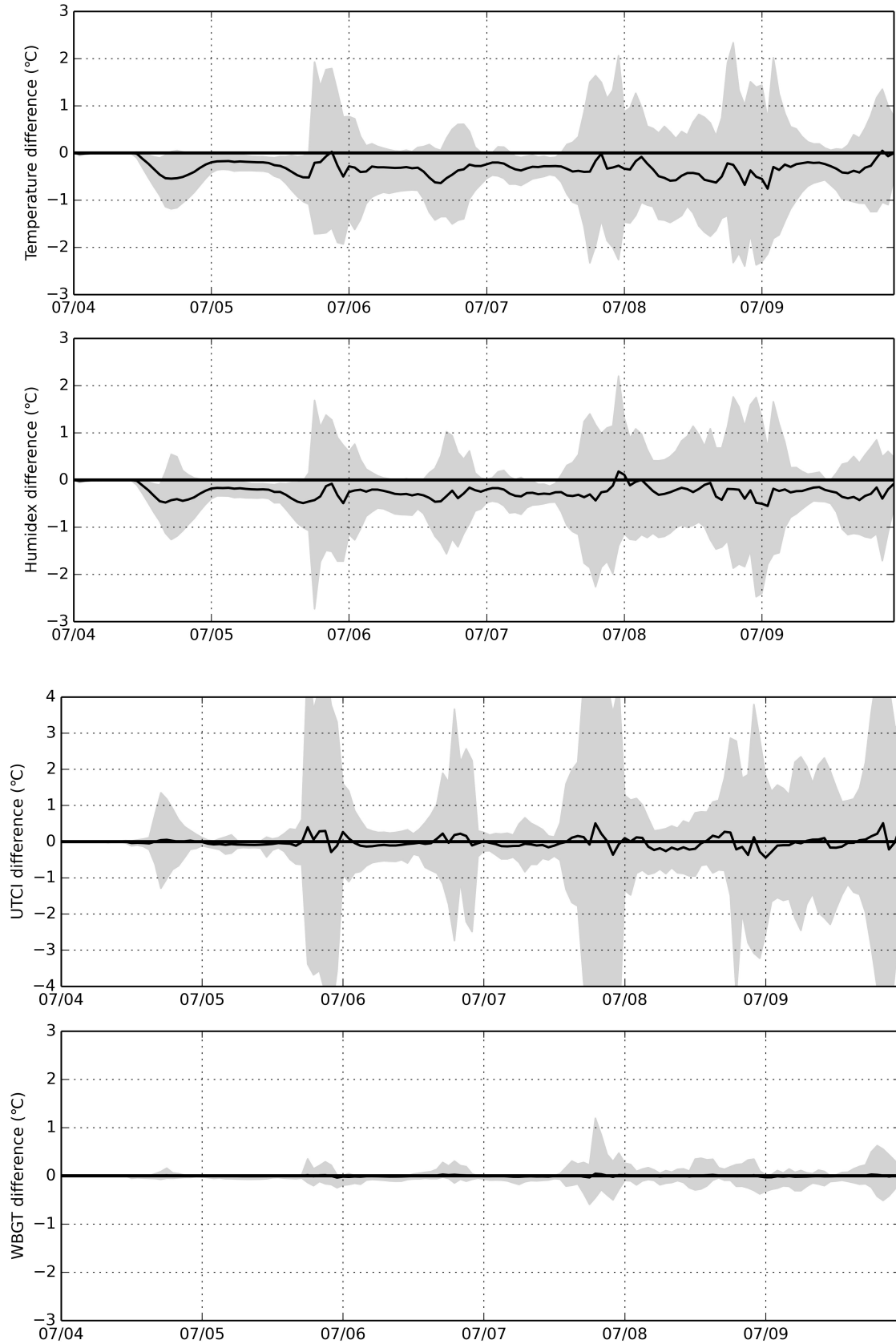


## Scenario Albedo Road (Albedo=0.45)

July 2010: AL6 - Ctrl



AL6  
routes

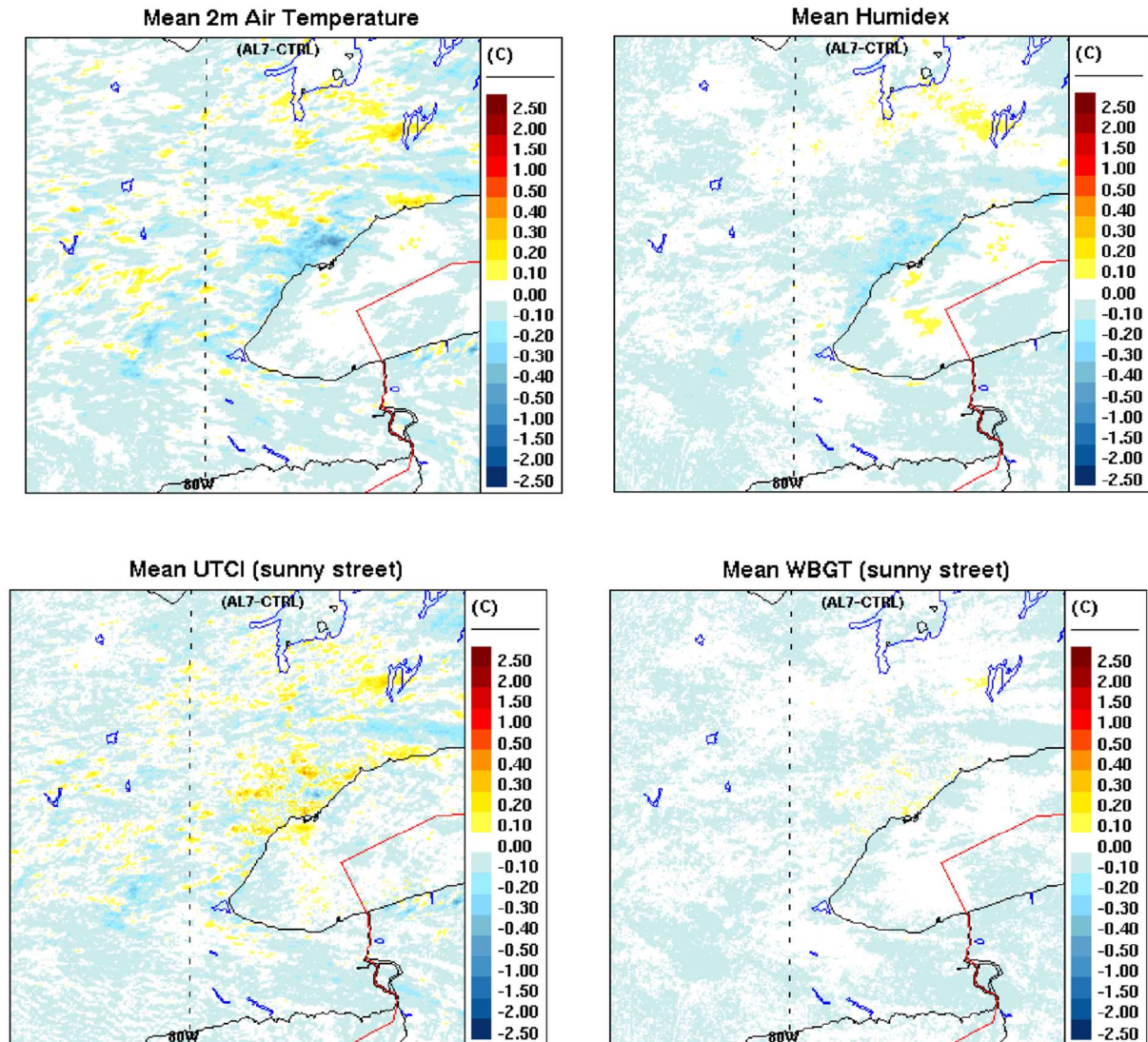






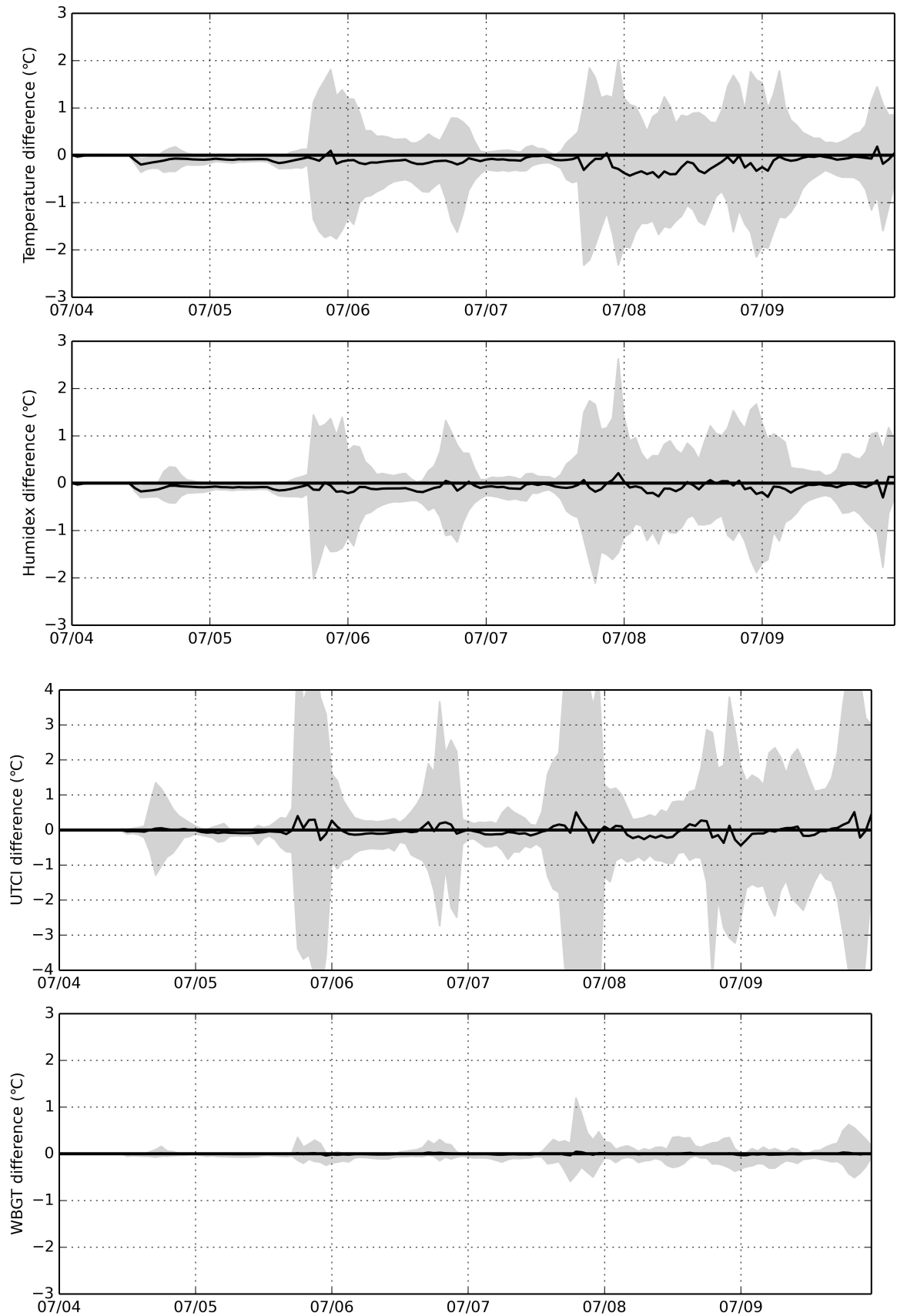
# Scenario Albedo Wall (Albedo=0.60)

July 2010: AL7 - Ctrl



AL7

Murs



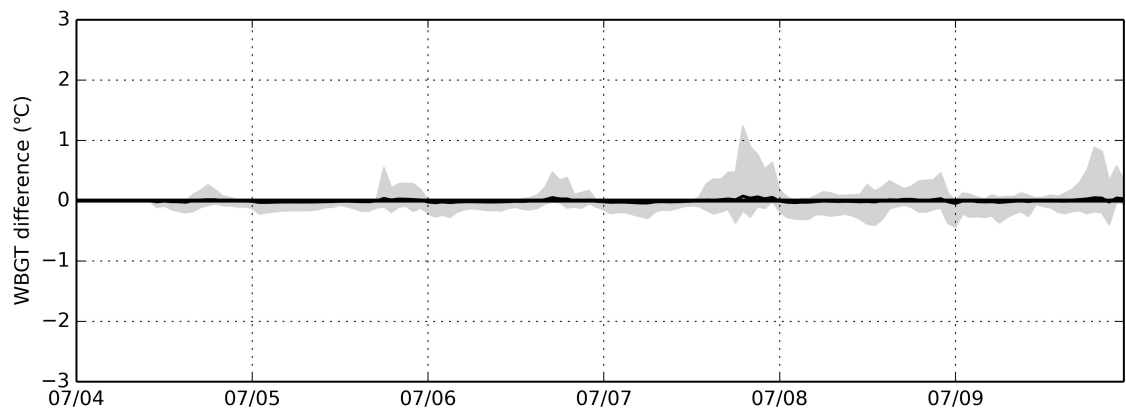
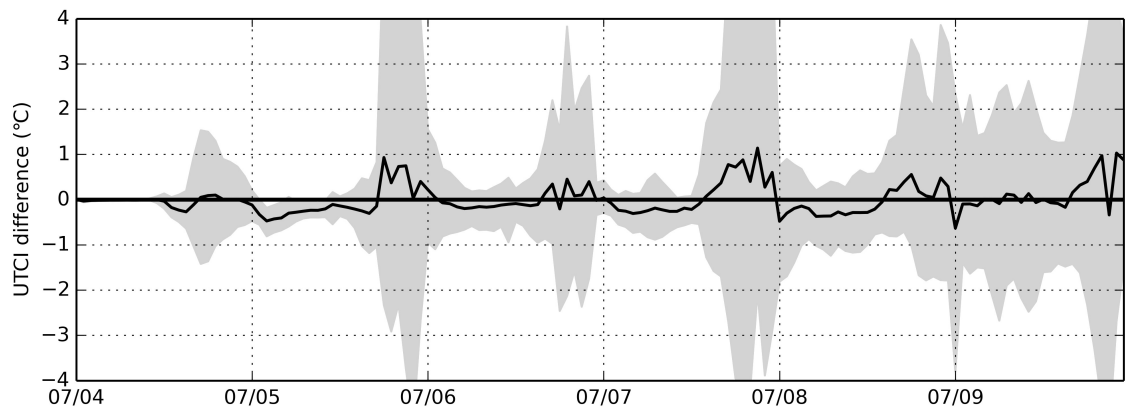
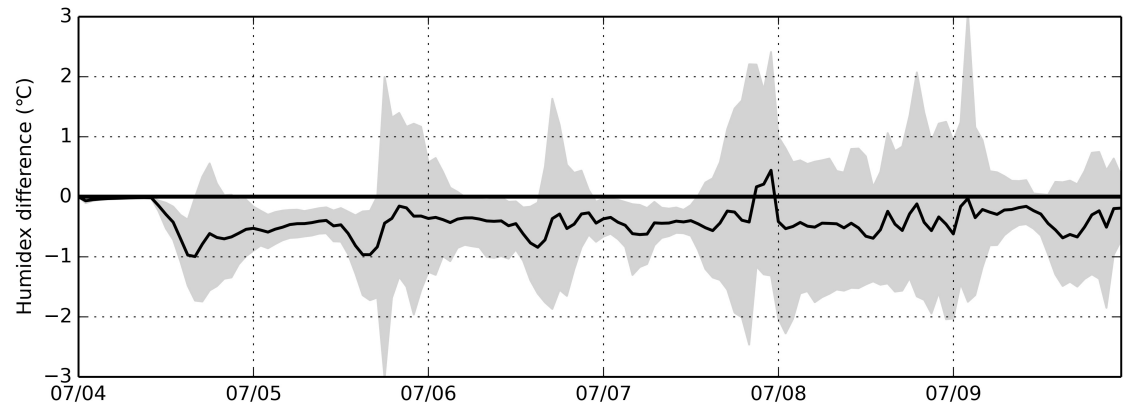
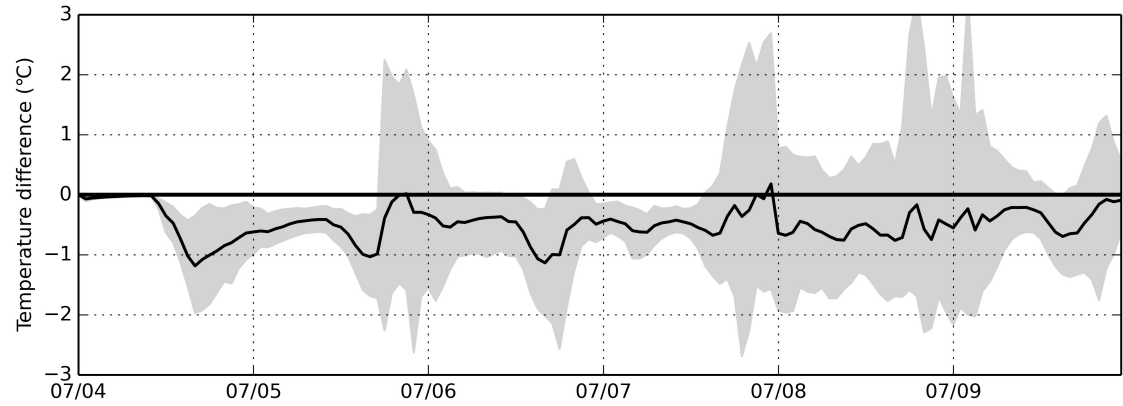


AL3

Toits

Routes

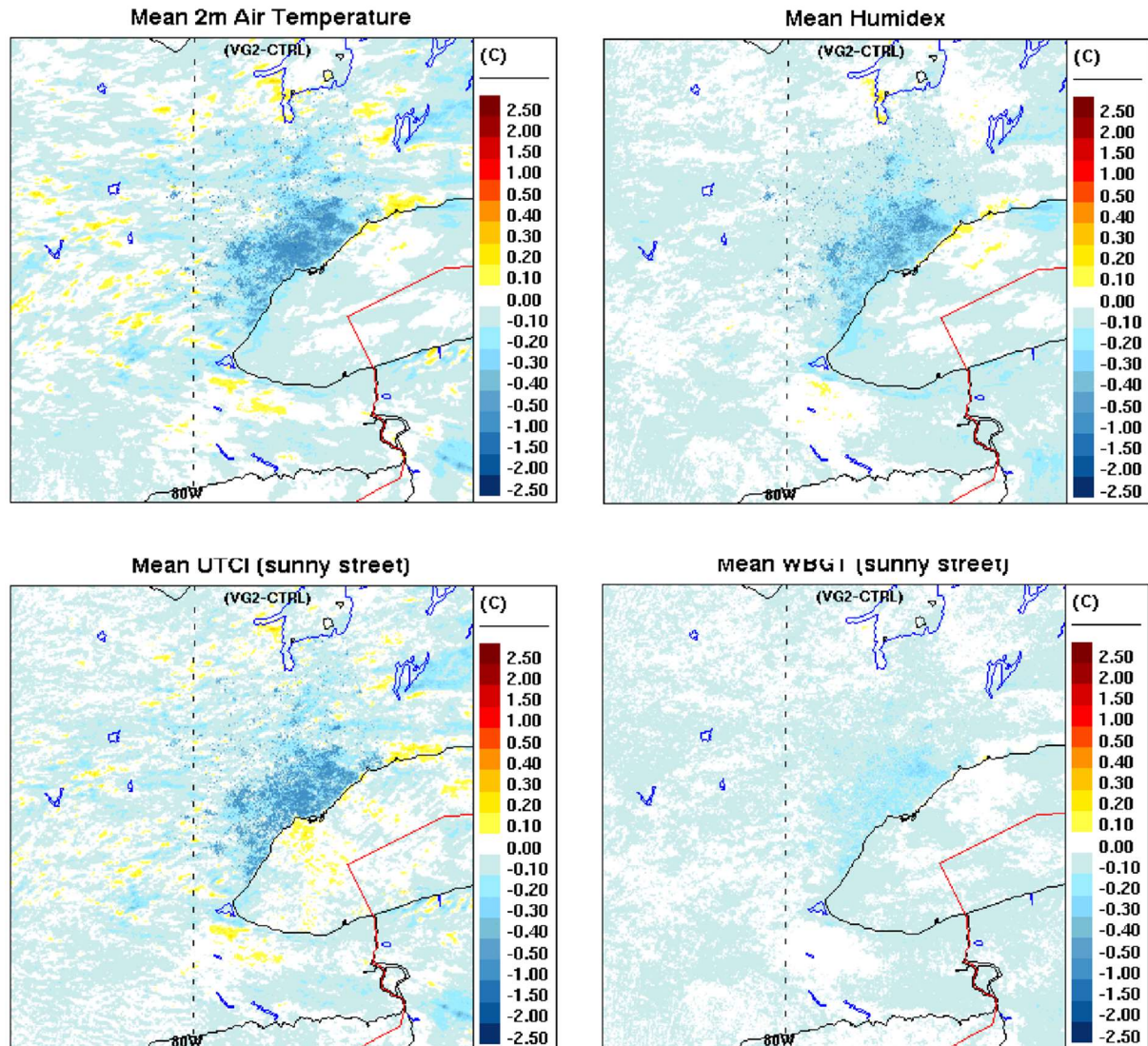
Murs





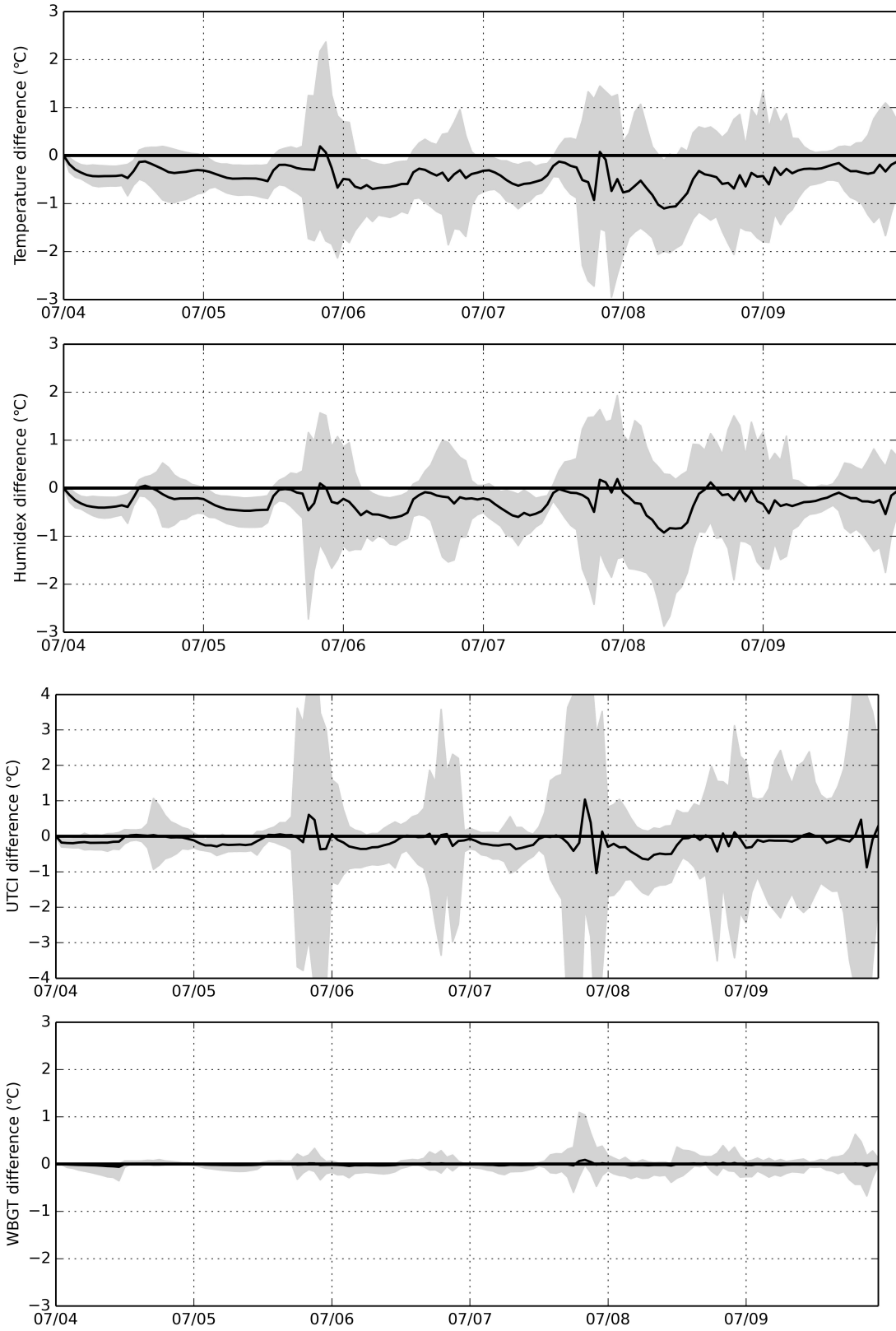
# Scenario Short Vegetation

July 2010: b2 - Ctrl



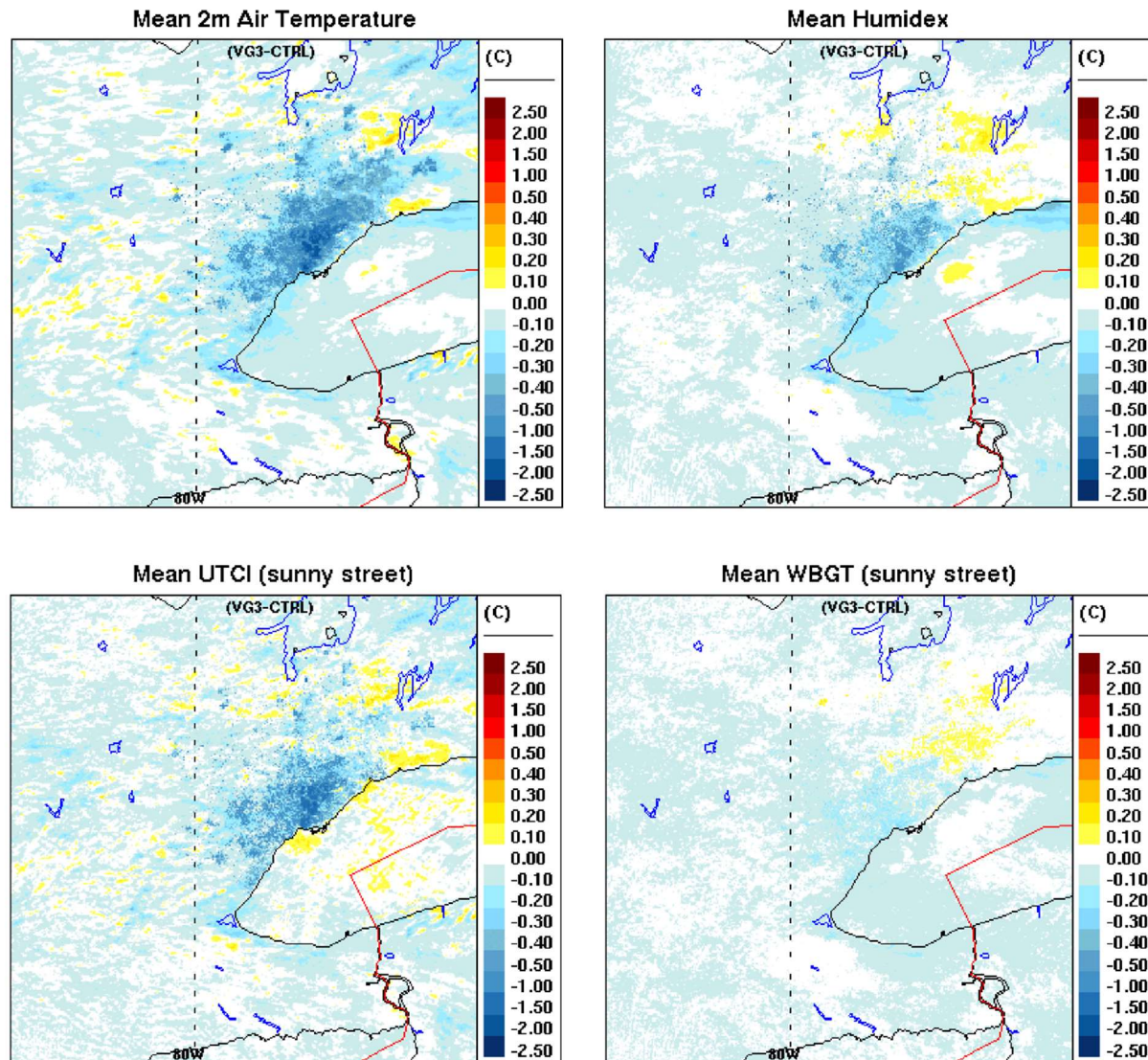


VG2

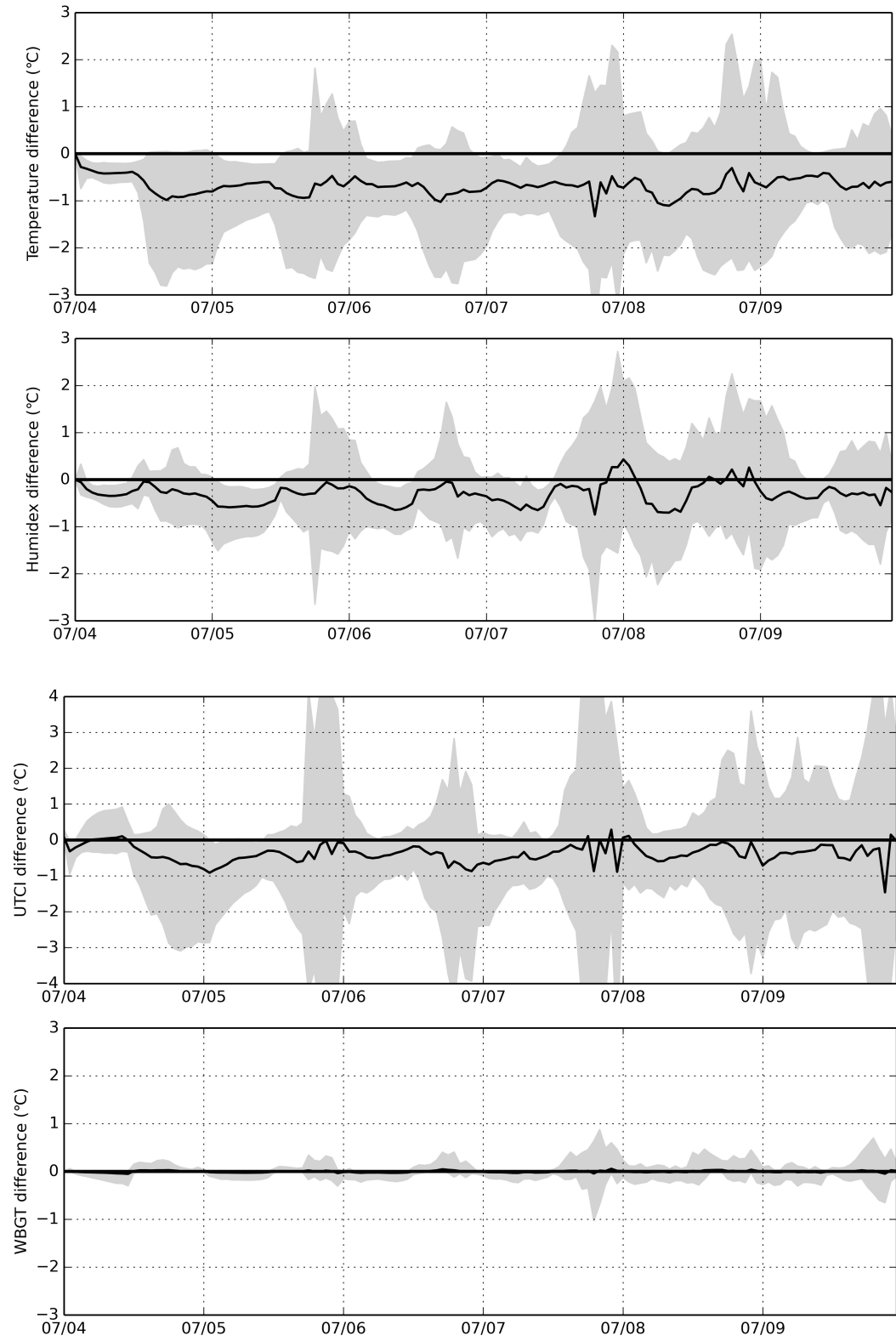


# Scenario irrigated short vegetation

July 2010: VG3 - Ctrl



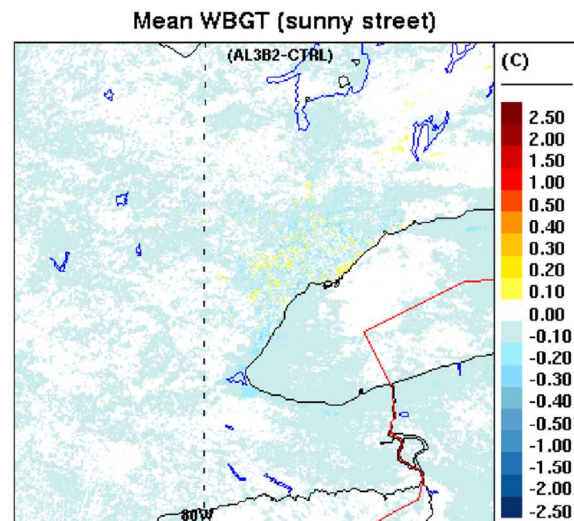
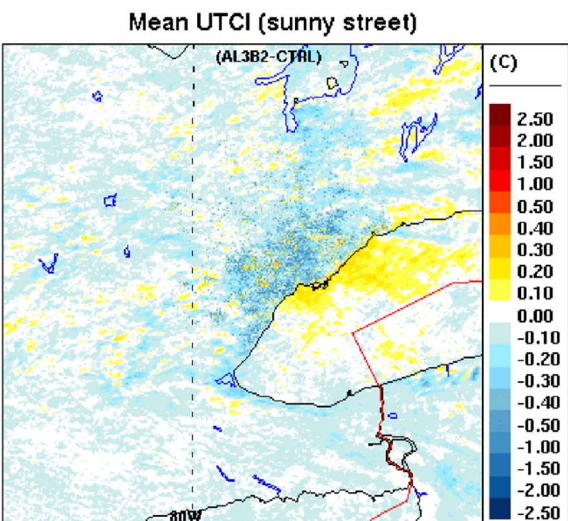
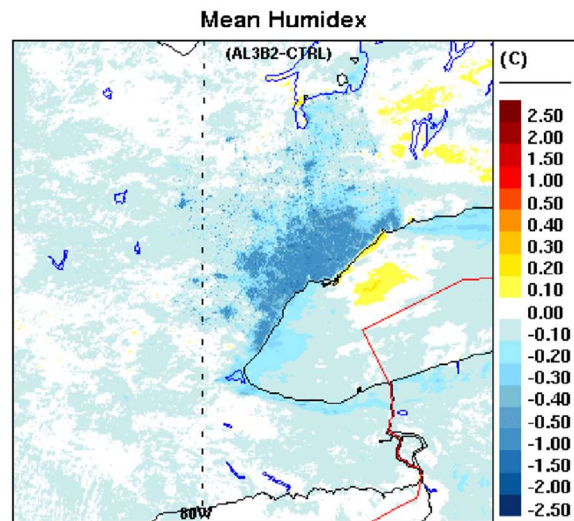
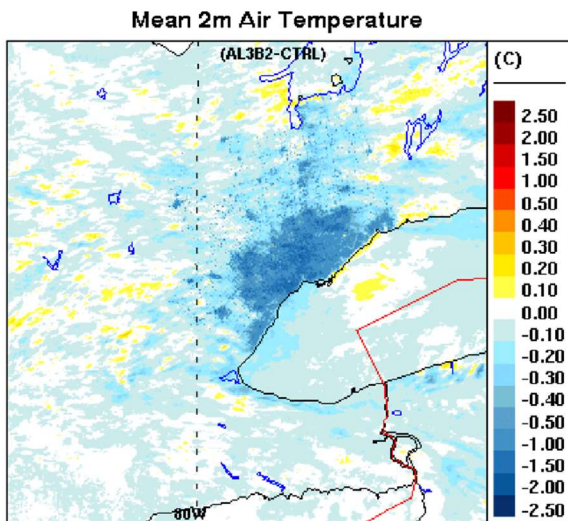
VG3



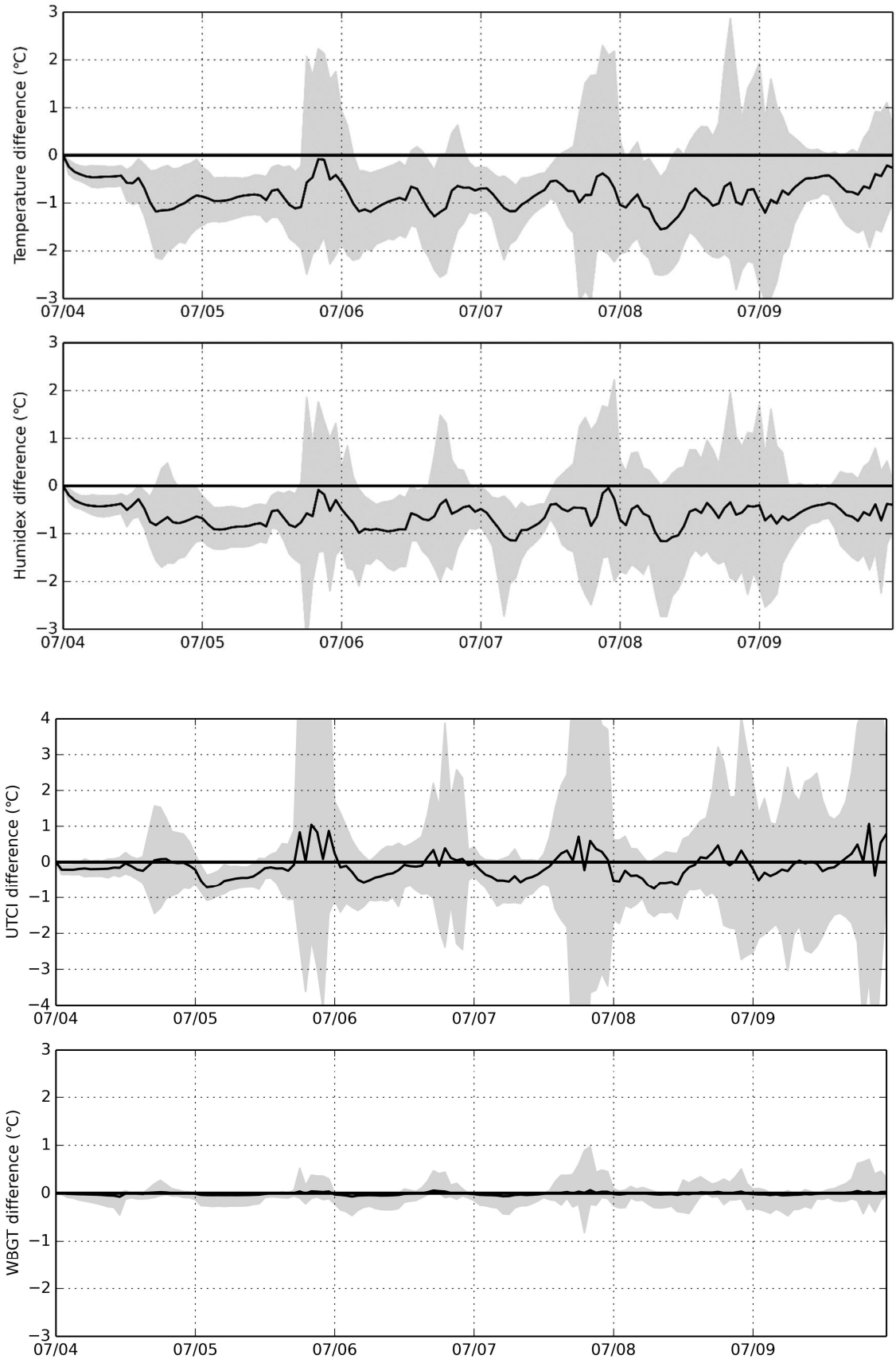


# Scenario Albedo Surfaces + short vegetation

July 2010: AL3VG2 - Ctrl



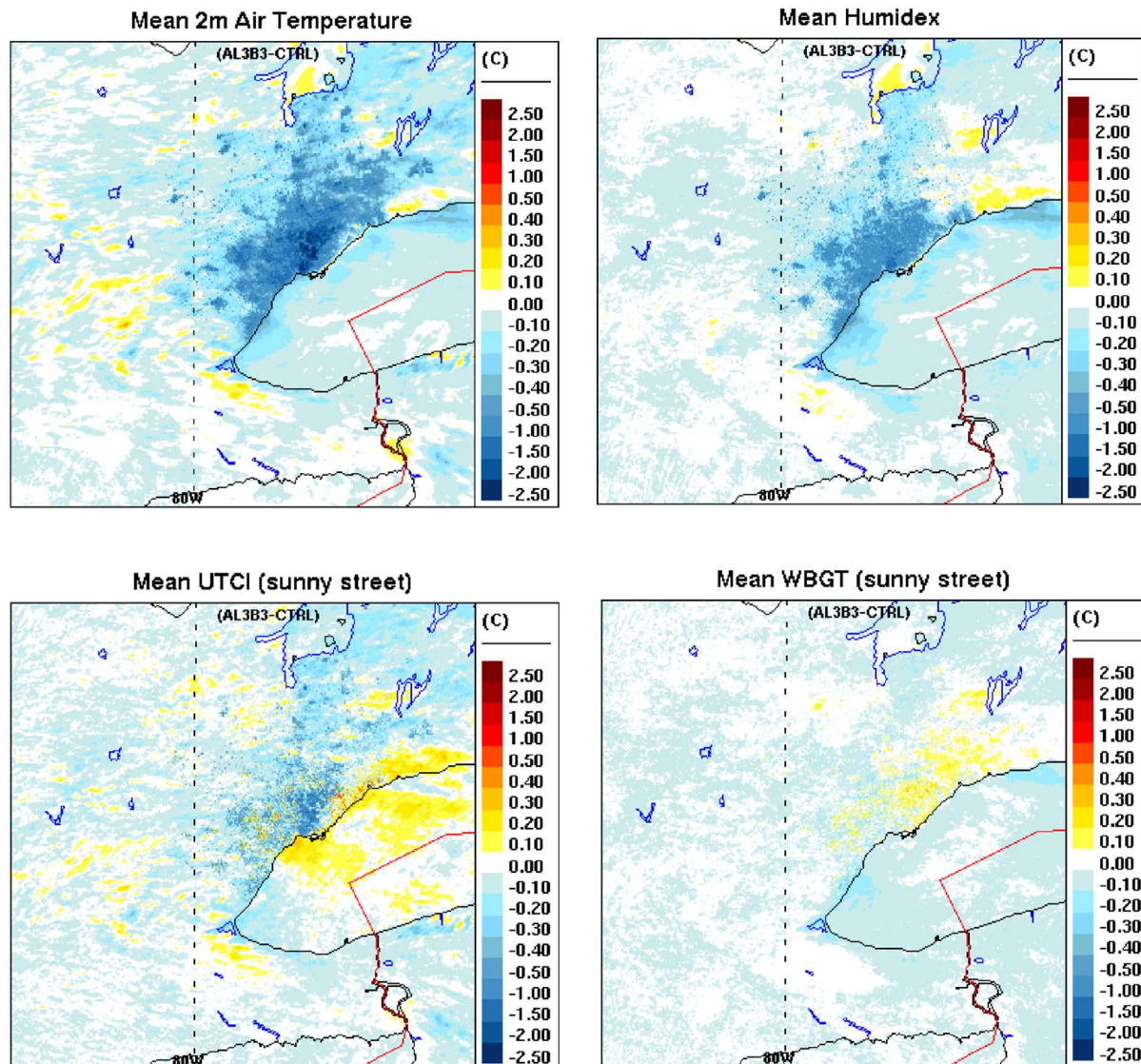
AL3VG2



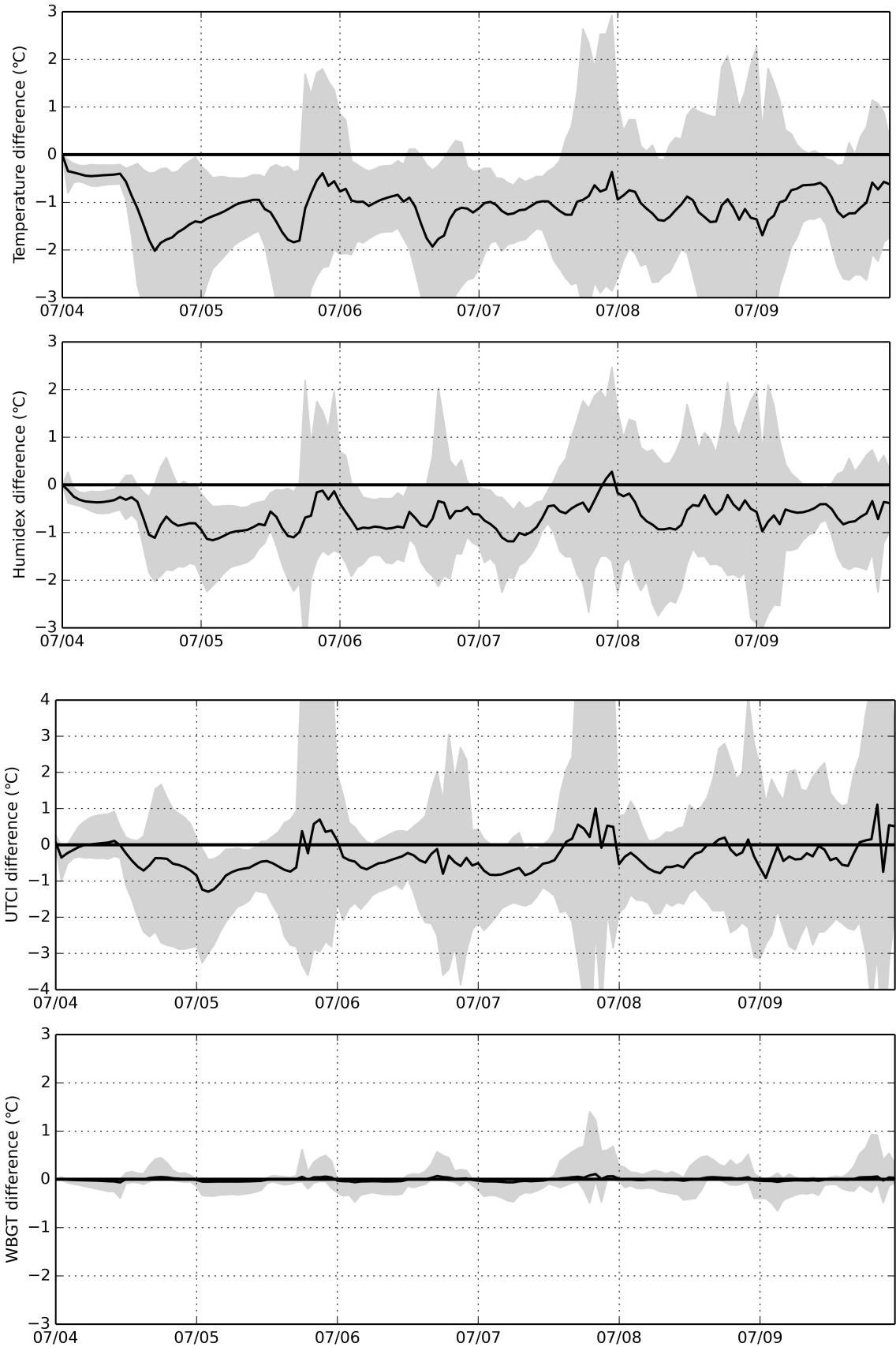


# Scenario Albedo Surfaces + irrigated short vegetation

July 2010: AL3VG3 - Ctrl

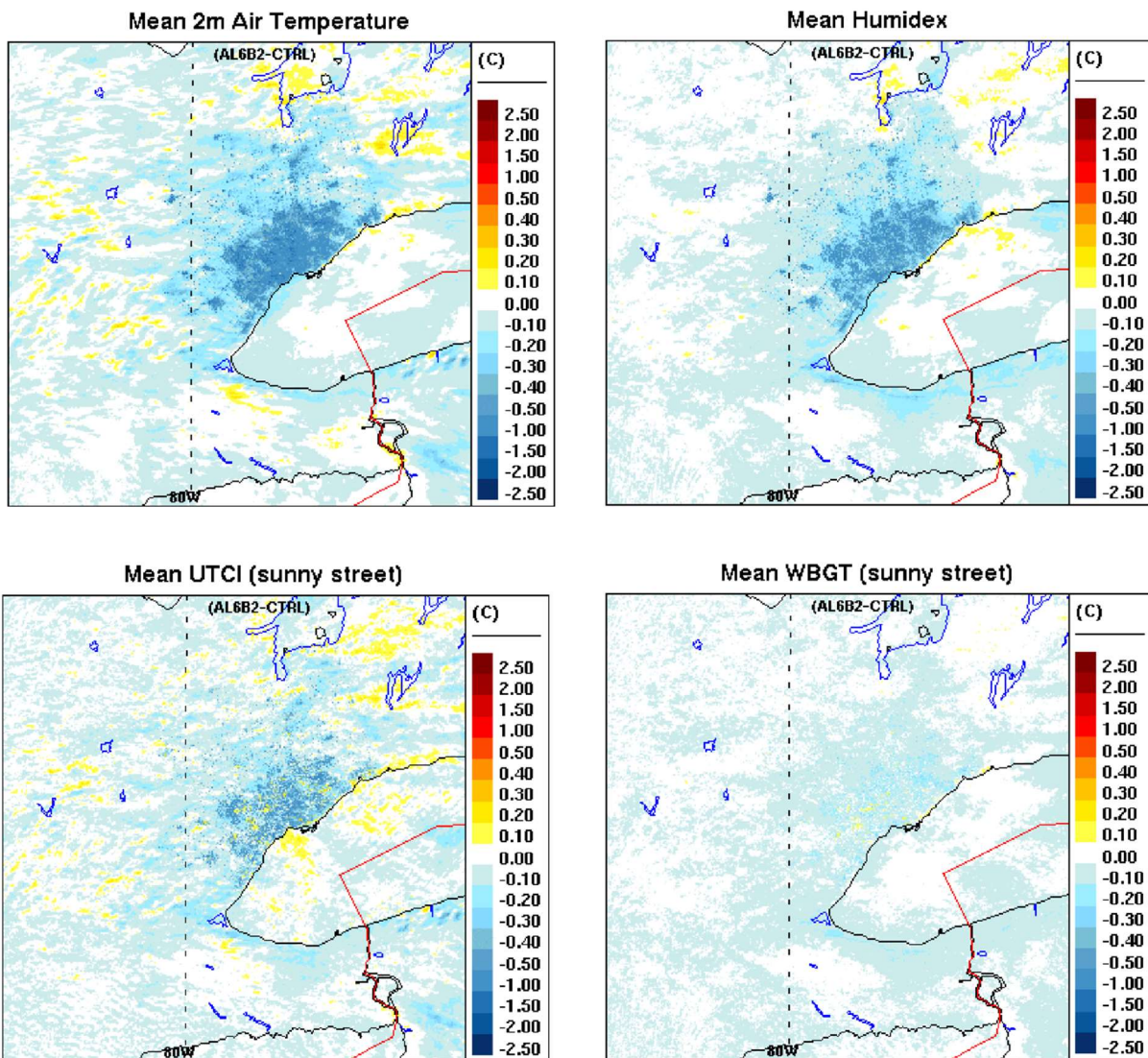


AL3VG3



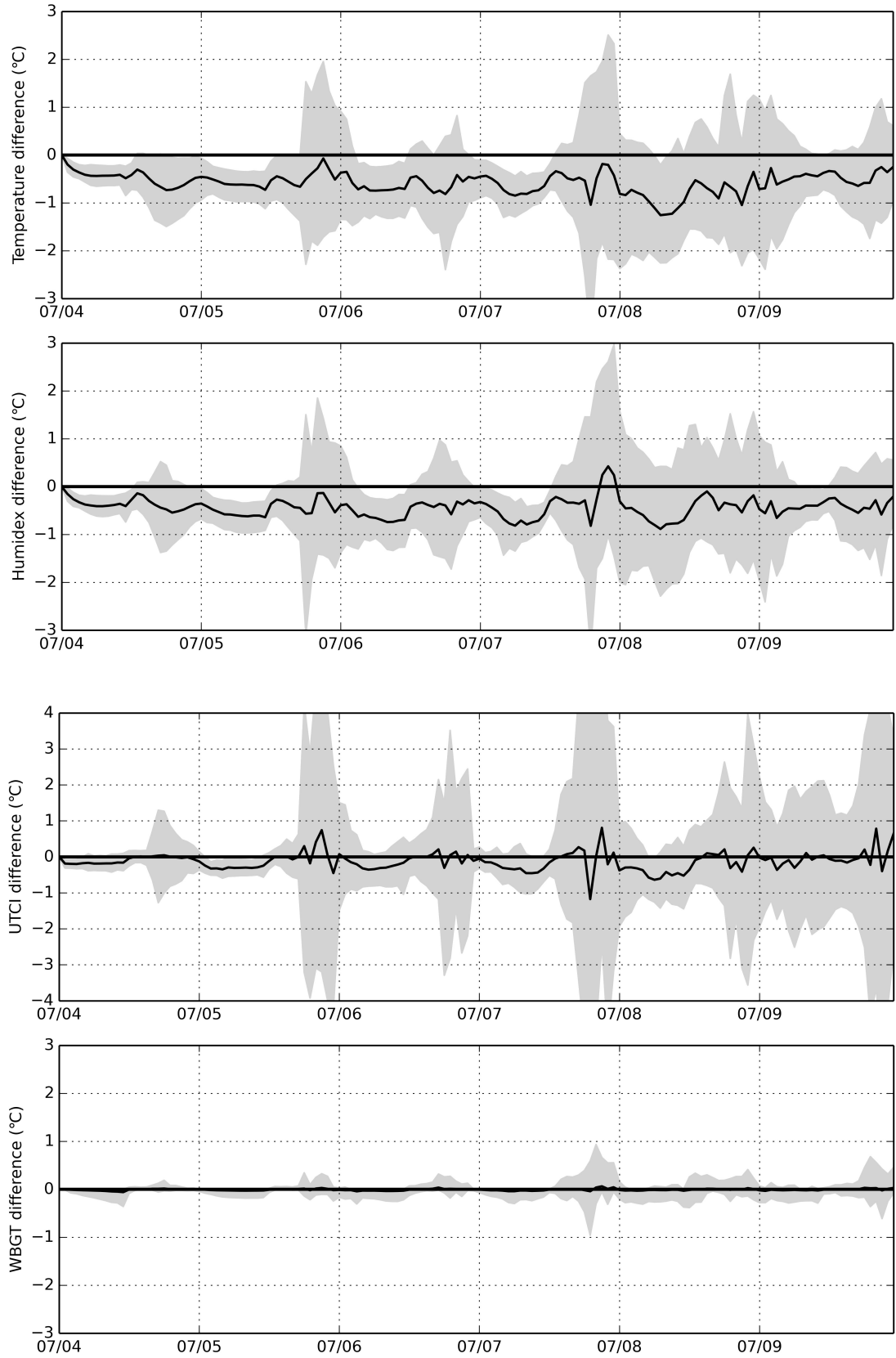
# Scenario Albedo Road + short vegetation

July 2010: AL6VG2 - Ctrl



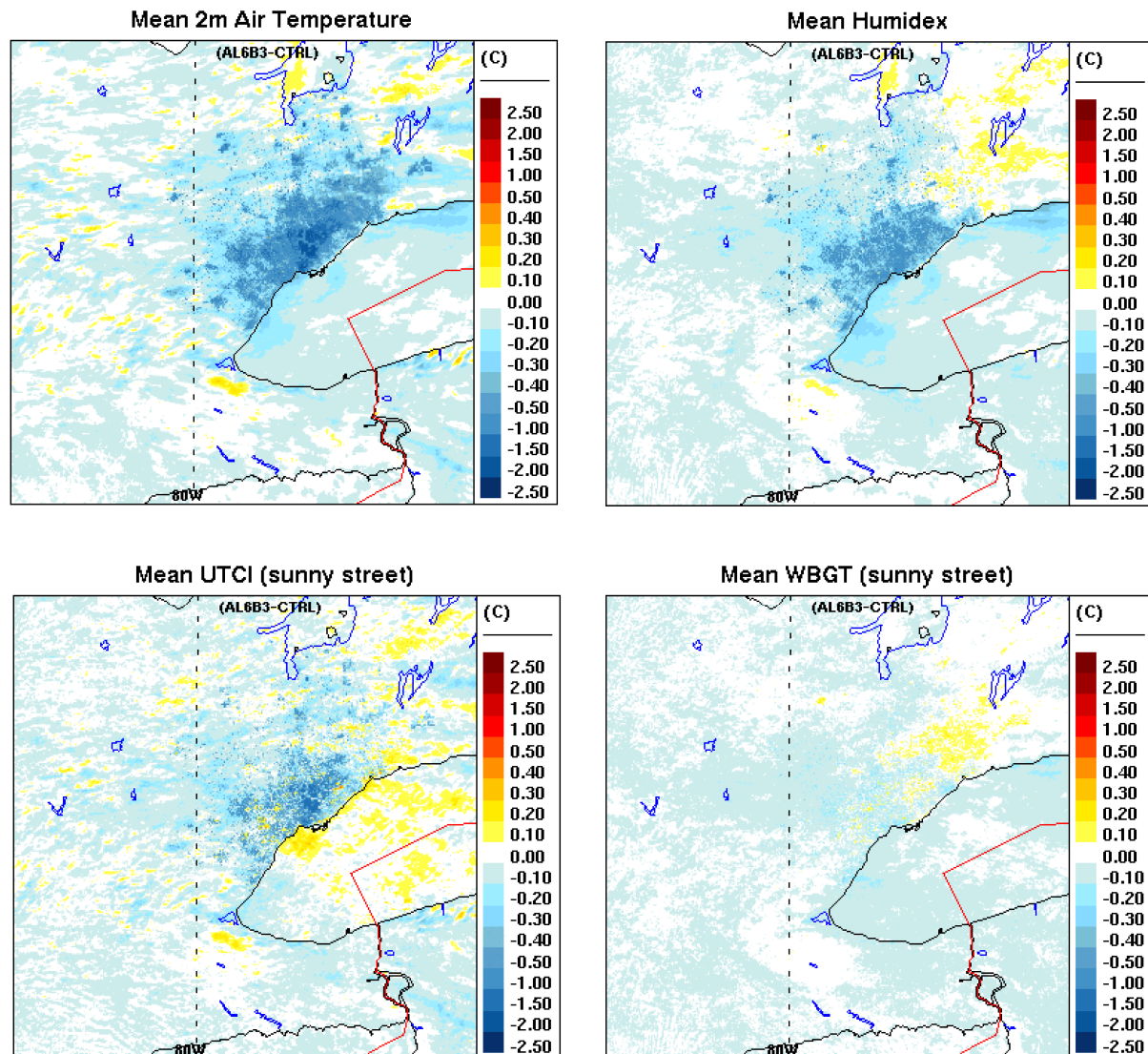


AL6VG2



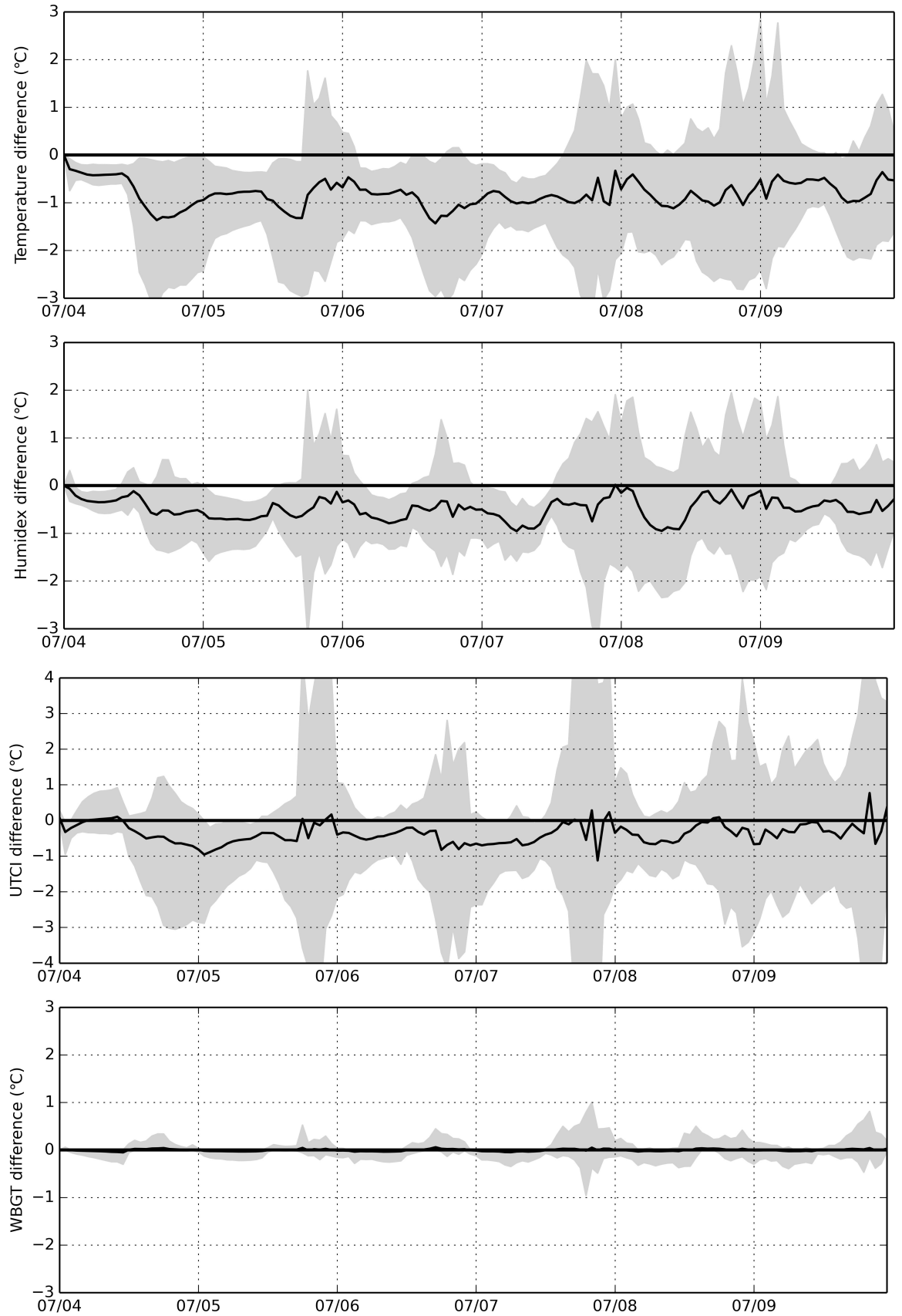
# Scenario Albedo Road + irrigated short vegetation

July 2010: AL6VG3 - Ctrl





AL6VG3



## A.3) Bilan des résultats

Les tableaux suivant résument les valeurs numériques des différences obtenues pour les scénarios, moins celles du contrôle, en Celsius, en moyenne sur l'ensemble des zones urbaines de la ville de Toronto (la sélection s'applique pour les pixels couverts par plus de 10 % de surfaces artificielles), pour la vague de chaleur de Juillet 2010. Les meilleures valeurs obtenues sont en rouge, tandis que les valeurs positives sont en bleu, et représentent un effet non souhaité.

1. Température de l'air

|        | Diff. | Jour  | Nuit  |
|--------|-------|-------|-------|
| AL1    | -0.15 | -0.15 | -0.16 |
| AL1-15 | -0.02 | -0.02 | -0.02 |
| AL1-40 | -0.13 | -0.12 | -0.14 |
| AL1-90 | -0.19 | -0.18 | -0.22 |
| AL3    | -0.48 | -0.52 | -0.41 |
| AL6    | -0.30 | -0.34 | -0.23 |
| AL7    | -0.13 | -0.13 | -0.14 |
| VG2    | -0.43 | -0.36 | -0.56 |
| VG3    | -0.68 | -0.71 | -0.63 |
| AL3VG2 | -0.80 | -0.75 | -0.88 |
| AL3VG3 | -1.05 | -1.13 | -0.92 |
| AL6VG2 | -0.58 | -0.53 | -0.66 |
| AL6VG3 | -0.83 | -0.90 | -0.71 |

2. Humidex

|        | Diff. | Jour  | Nuit  |
|--------|-------|-------|-------|
| AL1    | -0.11 | -0.10 | -0.13 |
| AL1-15 | -0.02 | -0.01 | -0.02 |
| AL1-40 | -0.07 | -0.06 | -0.09 |
| AL1-90 | -0.14 | -0.12 | -0.17 |
| AL3    | -0.41 | -0.44 | -0.36 |
| AL6    | -0.23 | -0.26 | -0.17 |
| AL7    | -0.08 | -0.07 | -0.09 |
| VG2    | -0.28 | -0.17 | -0.48 |
| VG3    | -0.28 | -0.17 | -0.45 |
| AL3VG2 | -0.61 | -0.52 | -0.75 |
| AL3VG3 | -0.61 | -0.53 | -0.75 |
| AL6VG2 | -0.42 | -0.34 | -0.57 |
| AL6VG3 | -0.47 | -0.38 | -0.60 |

3. UTCI pour un humain au soleil

|        | Diff. | Jour  | Nuit  |
|--------|-------|-------|-------|
| AL1    | -0.03 | 0.02  | -0.10 |
| AL1-15 | -0.02 | -0.02 | -0.01 |
| AL1-40 | -0.05 | -0.02 | -0.08 |
| AL1-90 | -0.02 | 0.05  | -0.14 |
| AL3    | 0.29  | 0.64  | -0.30 |
| AL6    | 0.12  | 0.29  | -0.16 |
| AL7    | 0.07  | 0.16  | -0.08 |
| VG2    | -0.41 | -0.32 | -0.56 |
| VG3    | -0.53 | -0.48 | -0.60 |
| AL3VG2 | -0.15 | 0.22  | -0.76 |
| AL3VG3 | -0.24 | 0.11  | -0.83 |
| AL6VG2 | -0.27 | -0.06 | -0.63 |
| AL6VG3 | -0.41 | -0.22 | -0.71 |

4. UTCI pour un humain à l'ombre

|        | Diff. | Jour  | Nuit  |
|--------|-------|-------|-------|
| AL1    | -0.05 | -0.01 | -0.10 |
| AL1-15 | -0.01 | -0.01 | -0.01 |
| AL1-40 | -0.05 | -0.03 | -0.08 |
| AL1-90 | -0.05 | 0.00  | -0.14 |
| AL3    | 0.32  | 0.69  | -0.30 |
| AL6    | 0.15  | 0.34  | -0.16 |
| AL7    | 0.10  | 0.20  | -0.08 |
| VG2    | -0.41 | -0.32 | -0.56 |
| VG3    | -0.54 | -0.51 | -0.60 |
| AL3VG2 | -0.13 | 0.25  | -0.76 |
| AL3VG3 | -0.26 | 0.08  | -0.83 |
| AL6VG2 | -0.26 | -0.04 | -0.63 |
| AL6VG3 | -0.42 | -0.24 | -0.71 |

5. WBGT pour un humain au soleil

|        | Diff. | Jour  | Nuit  |
|--------|-------|-------|-------|
| AL1    | -0.01 | 0.01  | -0.06 |
| AL1-15 | -0.01 | -0.01 | -0.01 |
| AL1-40 | -0.01 | 0.01  | -0.04 |
| AL1-90 | -0.01 | 0.02  | -0.07 |
| AL3    | 0.13  | 0.30  | -0.17 |
| AL6    | 0.07  | 0.15  | -0.07 |
| AL7    | 0.04  | 0.08  | -0.04 |
| VG2    | -0.10 | -0.02 | -0.25 |
| VG3    | -0.05 | 0.07  | -0.25 |
| AL3VG2 | 0.00  | 0.23  | -0.38 |
| AL3VG3 | 0.07  | 0.35  | -0.39 |
| AL6VG2 | -0.05 | 0.10  | -0.29 |
| AL6VG3 | -0.01 | 0.18  | -0.32 |

6. WBGT pour un humain à l'ombre

|        | Diff. | Jour  | Nuit  |
|--------|-------|-------|-------|
| AL1    | -0.02 | 0.01  | -0.05 |
| AL1-15 | -0.01 | -0.01 | -0.01 |
| AL1-40 | -0.01 | 0.00  | -0.04 |
| AL1-90 | -0.02 | 0.02  | -0.07 |
| AL3    | 0.23  | 0.48  | -0.17 |
| AL6    | 0.13  | 0.25  | -0.07 |
| AL7    | 0.07  | 0.15  | -0.04 |
| VG2    | -0.11 | -0.04 | -0.24 |
| VG3    | -0.08 | 0.02  | -0.25 |
| AL3VG2 | 0.09  | 0.36  | -0.37 |
| AL3VG3 | 0.13  | 0.44  | -0.39 |
| AL6VG2 | -0.01 | 0.16  | -0.28 |
| AL6VG3 | 0.01  | 0.20  | -0.31 |