



## Simulations des vagues de chaleur dans le futur pour la région de Montréal

Étude réalisée pour le projet A1101

*« Identification des secteurs vulnérables à la chaleur dans une métropole canadienne en vue d'interventions et d'études ciblées en santé publique »*

Auteure : Marie-France Sottile, Assistante de recherche (Ouranos)

Requérants : Tom Kosatsky , Épidémiologiste (DSP Montréal et Université McGill)  
Yves Beaudoin, Directeur du département de géographie (UQAM)

Décembre 2006

## Table des matières

Liste des figures.....	3
Liste des tableaux.....	3
1-Introduction.....	4
2-Données utilisées .....	4
3-Résultats.....	6
3.1- Moyennes mensuelles et saisonnières des températures moyennes quotidiennes .....	6
3.2- Moyennes mensuelles et saisonnières des températures maximales quotidiennes .....	8
3.3- Moyennes mensuelles et saisonnières des températures minimales quotidiennes .....	9
3.4- Nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale à 33°C .....	11
3.5- Nombre de jours où la température minimale est supérieure ou égale à 25°C .....	12
3.6- Nombre de vagues de chaleur sur 3 jours .....	13
3.7- Nombre de vagues de chaleur sur 5 jours .....	14
3.8- Comparaison des modèles avec les données observées .....	15
4- Conclusions .....	17
5- Références .....	17

## Liste des figures

Figure 1 : Évolution de la température moyenne mondiale pour les familles de scénarios SRES .....	4
Figure 2 : Résolution des modèles et zones de référence pour Montréal.....	5
Figure 3 : Moyenne des températures de mai à septembre selon 8 modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085, dans la région de Montréal. ....	7
Figure 4: Évolution du changement des températures moyennes estivales (moy. Mob. sur 30 ans) par rapport à la moyenne de la période de référence 1961-90.....	7
Figure 5 : Moyenne des températures minimales de mai à septembre selon 8 modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085 dans la région de Montréal. ....	10
Figure 6 : Moyenne des changements températures estivales minimales et maximales selon différents MCG pour l'horizon 2085 par rapport à 1975 à Montréal.....	10
Figure 7 : Évolution du nombre de dépassements du seuil de 33°C par été pour les températures maximales quotidiennes à Montréal avec 7 réalisations (moy mob 30 ans) .....	11
Figure 8 : Évolution du nombre de dépassements de 25°C par été pour les températures maximales quotidiennes à Montréal avec 7 MCG (moy mob 30 ans) .....	12
Figure 9 : Évolution du nombre de vagues de chaleur par été sur 3 jours avec $T_{max} \geq 33^{\circ}C$ et $T_{min} \geq 20^{\circ}C$ à Montréal avec 7 réalisations (moy mob 30 ans) .....	13
Figure 10 : Évolution du nombre de vagues de chaleur par été (mai à sept) sur 5 jours avec $T_{max} \geq 35^{\circ}C$ et $T_{min} \geq 22^{\circ}C$ dans la région de Montréal avec 7 réalisations (moy mob 30 ans) .....	14
Figure 11 : Comparaison des simulations et des observations dans la région de Montréal sur les températures moyennes estivales de la période 1961-90 .....	16

## Liste des tableaux

Tableau 1: Modèles et scénarios SRES utilisés dans l'élaboration des futurs climatiques du projet. ....	5
Tableau 2: Températures moyennes mensuelles et saisonnières simulées par différents modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085 dans la région de Montréal. ....	6
Tableau 3 : Températures maximales mensuelles et saisonnières simulées par différents modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085 dans la région de Montréal. ....	8
Tableau 4: Températures minimales mensuelles et saisonnières simulées par différents modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085 dans la région de Montréal. ....	9
Tableau 5 : Occurrence moyenne par été des dépassements du seuil de 33°C sur les températures maximales pour 4 horizons, pour Montréal. ....	11
Tableau 6: Occurrence moyenne par été des dépassements du seuil de 25°C sur les températures minimums pour 4 horizons, à Montréal. ....	12
Tableau 7 : Occurrence moyenne par été (mai à septembre) des canicules sur 3 jours ( $T_{max} \geq 33^{\circ}C$ , $T_{min} \geq 20^{\circ}C$ ) pour 4 horizons, à Montréal. ....	13
Tableau 8 : Occurrence moyenne par été (mai à septembre) des canicules sur 5 jours ( $T_{max} \geq 35^{\circ}C$ , $T_{min} \geq 22^{\circ}C$ ) pour 4 horizons, à Montréal. ....	14
Tableau 9: Observations et simulations des températures estivales moyennes, maximales et minimales pour la période 1961-90.....	15
Tableau 10 :Fréquence des dépassements de seuil et des canicules sur la période 1961-90 pour les observations et les simulations, de mai à septembre.....	16

# 1-Introduction

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'une recherche plus large visant, entre autres, à identifier les zones à risque de chaleur intense sur l'Île de Montréal. Comme les changements climatiques sont susceptibles d'aggraver le phénomène, l'évolution des températures a été estimée pour le 21<sup>e</sup> siècle. Tom Kosatsky, un des chefs du projet, a établi les indicateurs pertinents pour la santé : les moyennes mensuelles et saisonnières, la fréquence de dépassements de divers seuils et l'occurrence de deux types de canicules.

La science des changements climatiques est en constante évolution. Les résultats de l'étude sont issues des meilleures connaissances à ce jour, mais pourraient s'avérer différents dans quelques années. En somme, les conclusions tirées de leur utilisation commandent la plus grande prudence.

## 2-Données utilisées

Les variables identifiées pour le projet sont les températures minimales, maximales et moyennes quotidiennes, entre mai et septembre, jusqu'en 2099. L'humidité relative, bien que pertinente pour la thématique santé, n'a pas été retenue car ce paramètre est moins bien simulé par les modèles et pas toujours disponible.

Les simulations de 3 modèles de circulation générale (MCG) couplés à plusieurs scénarios d'évolution de gaz à effet de serre produisent 7 réalisations équiprobables pour le futur, qu'on analyse habituellement par tranches de 30 ans (2010-2039, 2040-2069, 2070-2099). Cet éventail de réalisations permet d'établir les balises pessimistes et optimistes du futur climat et du même coup renseigne sur les incertitudes des modèles.

Les simulations sur la période de référence (1961-90) ont également permis d'estimer les biais des modèles en les comparant aux observations de 3 stations de la région de Montréal, soit McGill, Dorval et St-Hubert.

Les MCG utilisés répondent tous aux critères de qualité du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2001). Les scénarios de gaz à effet de serre sont tirés du *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) du GIEC (2000). Ils sont basés sur différentes projections économiques, technologiques et démographiques pour l'ensemble du globe. Les scénarios B1, B2, A1b et A2 ont servi dans la présente étude. La figure 1 situe ces scénarios par rapport à leur résultante sur la température planétaire moyenne.

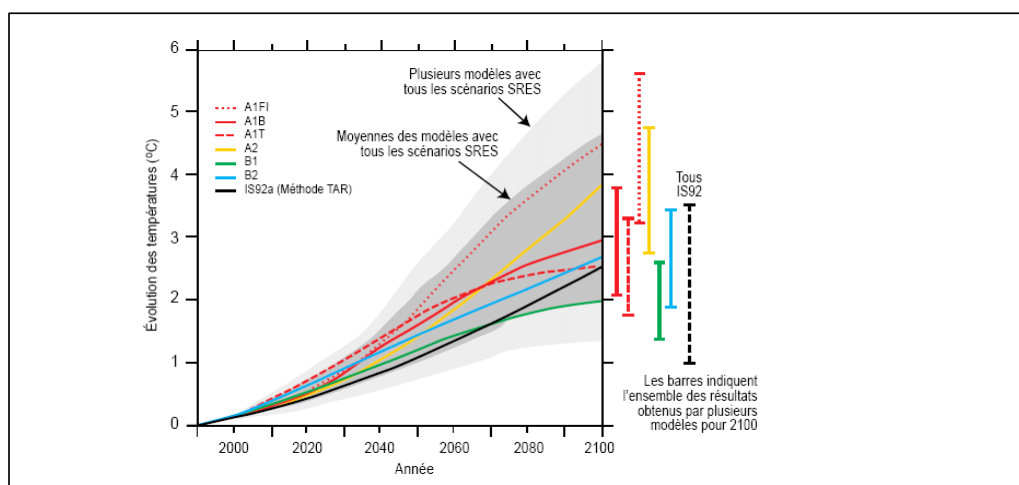


Figure 1 : Évolution de la température moyenne mondiale pour les familles de scénarios SRES

Notons que les MCG ont une résolution peu appropriée aux études d'impact locales. En effet, l'échelle des MCG est de l'ordre de 300 km. Au moment de réaliser l'étude nous disposions de données partielles du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC, version 3.7.1) dont la résolution est de 45 km. Les données mensuelles des périodes 1961-90 et 2041-70 ont été fournies par l'Équipe de Simulations climatiques d'Ouranos (Plummer et al., 2006). Ces données seront comparées à celles des MCG. Le tableau 1 résume les modèles et scénarios disponibles pour l'étude.

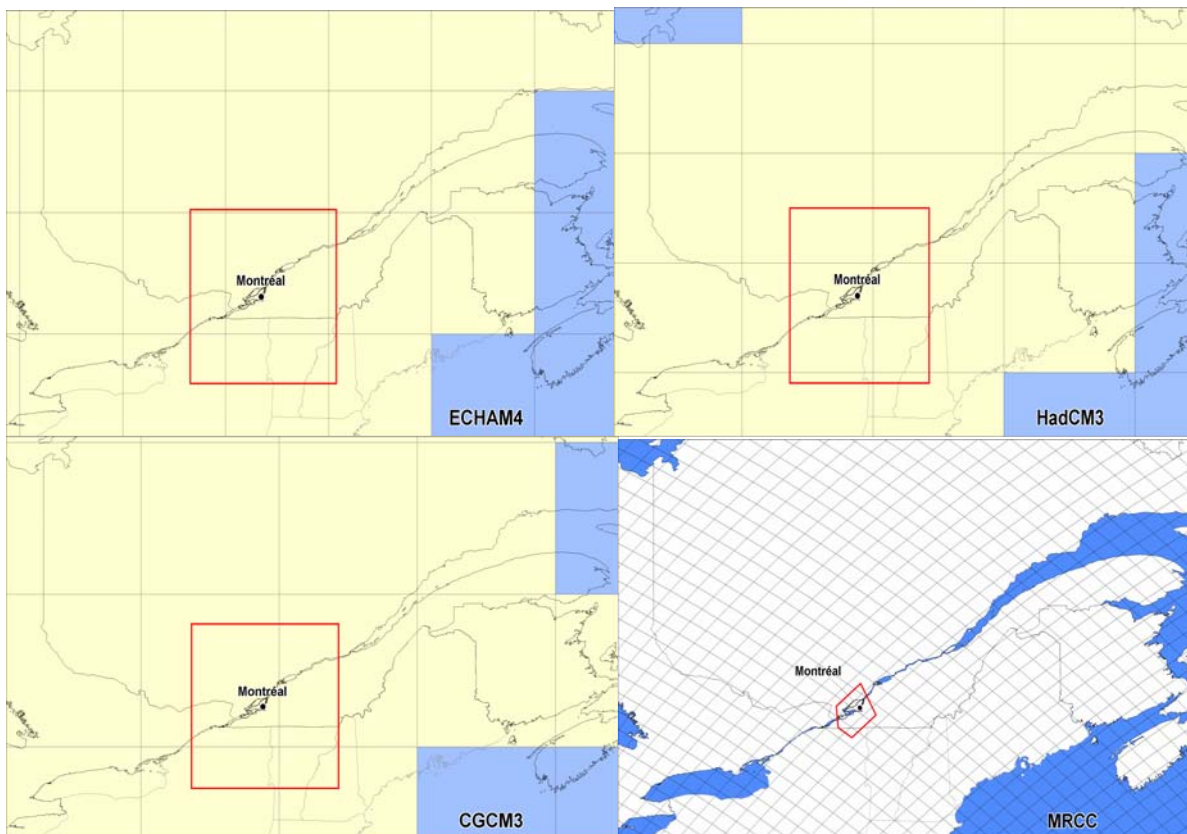
**Tableau 1: Modèles et scénarios SRES utilisés dans l'élaboration des futurs climatiques du projet.**

MCG	Pays	Résolution (latitude X longitude)	SRES
CGCM3	Canada	3,7° X 3,7°	A2-1 , A1b-1,B1-1
ECHAM4	Allemagne	2,8° X 2,8°	A2 , B2
HadCM3	Royaume-Uni	2,25° X 3,75°	A2-a , B2-a
MRCC	Québec	45 km x 45 km	A2

Les indices « a » ou « -1 » indiquent la première de plusieurs simulations avec un même scénario.

Pour un MCG, le GIEC suggère d'utiliser au moins 4 points de grille<sup>1</sup> pour établir le changement climatique sur une région donnée. Étant donné que chaque modèle a sa propre grille (résolution), pour pouvoir comparer les résultats sur une surface commune, une zone de référence est définie. Les résultats des points de grilles de chaque MCG ont été moyennés en proportion de la surface contenue dans cette zone. Par exemple, pour le HadCM3, 6 points de grilles sont considérés dans le calcul de la moyenne pondérée de la température journalière. La figure 2 illustre la zone de référence autour de Montréal ainsi que le masque terre-mer des modèles (tuiles bleues).

Par sa haute résolution, la zone de référence du MRCC, bien que constituée de 9 points de grilles, délimite une surface plus petite que celle des MCG. On tiendra compte de cette représentativité lors de la comparaison des résultats.



**Figure 2 : Résolution des modèles et zones de référence pour Montréal**

<sup>1</sup> Les MCG simulent une multitude d'interactions dans le système atmosphère-terre-mer-glace, à chaque 6 heures et à différentes altitudes/profondeurs. Compte tenu de la capacité actuelle des ordinateurs, il faut limiter leur résolution pour réaliser la tâche dans délai raisonnable. Ainsi, selon le modèle, les points de grille (endroits où les calculs sont effectués) peuvent être plus ou moins espacés. Nous avons choisi des MCG qui ont au moins 4 degrés de résolution en latitude, tel que prescrit par le GIEC.

### 3-Résultats

#### 3.1- Moyennes mensuelles et saisonnières des températures moyennes quotidiennes

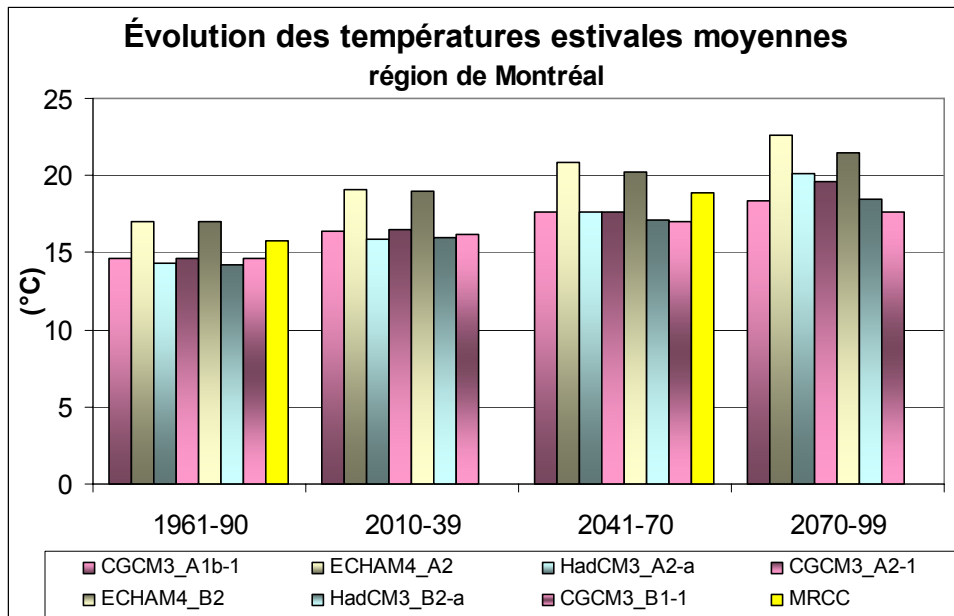
Les températures moyennes quotidiennes ont été rassemblées en 4 périodes de 30 ans. Le tableau 2 résume les résultats mensuels et saisonniers (de mai à septembre pour les différentes simulations).

	1961-90	2010-39	2040-69	2070-99	1961-90	2010-39	2040-69	2070-99
	<b>CGCM3_A1b-1</b>				<b>CGCM3_B1-1</b>			
Mai	9,24	11,42	12,65	13,71	9,24	11,05	12,14	12,18
Juin	15,27	17,11	18,43	18,81	15,27	17,08	17,32	18,13
Juillet	18,36	20,25	21,36	22,08	18,36	20,24	20,67	21,54
Août	17,27	18,51	19,65	20,9	17,27	18,57	19,97	20,19
septembre	12,79	14,45	16,01	16,25	12,79	14,18	14,91	16,2
<b>moyenne</b>	<b>14,59</b>	<b>16,36</b>	<b>17,62</b>	<b>18,36</b>	<b>14,60</b>	<b>16,23</b>	<b>17,02</b>	<b>17,66</b>
	<b>CGCM3_A2-1</b>				<b>ECHAM4_A2</b>			
Mai	10,24	12,48	13,88	15,64	11,64	13,82	15,08	16,79
Juin	16,09	17,97	19	21,25	17,53	19,08	20,88	22,51
Juillet	19,23	20,62	22,16	24,4	20,59	22,48	24,26	26,07
Août	18,17	20,14	21,05	22,93	19,99	22,41	24,27	25,89
septembre	13,76	15,62	16,94	18,65	15,37	17,69	19,59	21,57
<b>moyenne</b>	<b>14,60</b>	<b>16,46</b>	<b>17,68</b>	<b>19,64</b>	<b>17,03</b>	<b>19,09</b>	<b>20,82</b>	<b>22,57</b>
	<b>ECHAM4_B2</b>				<b>HadCM3_A2-a</b>			
Mai	11,64	13,43	14,41	15,56	10,41	12,07	13,62	15,75
Juin	17,53	19,08	20,52	21,67	15,06	16,09	17,81	20,22
Juillet	20,59	22,52	24,02	25	17,49	18,95	21,22	23,81
Août	19,99	22,24	23,46	24,93	16,18	18,19	20,05	22,9
septembre	15,37	17,6	18,82	20,27	12,22	14,05	15,47	17,79
<b>moyenne</b>	<b>17,03</b>	<b>18,97</b>	<b>20,25</b>	<b>21,48</b>	<b>14,27</b>	<b>15,87</b>	<b>17,63</b>	<b>20,09</b>
	<b>HadCM3_B2-a</b>				<b>MRCC_A2</b>			
Mai	10,41	12,05	13,32	14,34	7,79	-	10,53	-
Juin	15,06	16,6	17,88	19,4	14,07	-	17,46	-
Juillet	17,49	19,26	20,4	21,45	20,13	-	23,84	-
Août	16,18	17,86	19,69	21,03	21,22	-	24,39	-
septembre	12,22	14,09	14,16	16,26	15,46	-	18,39	-
<b>moyenne</b>	<b>14,27</b>	<b>15,97</b>	<b>17,09</b>	<b>18,49</b>	<b>15,73</b>	<b>-</b>	<b>18,92</b>	<b>-</b>

**Tableau 2: Températures moyennes mensuelles et saisonnières simulées par différents modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085 dans la région de Montréal.**

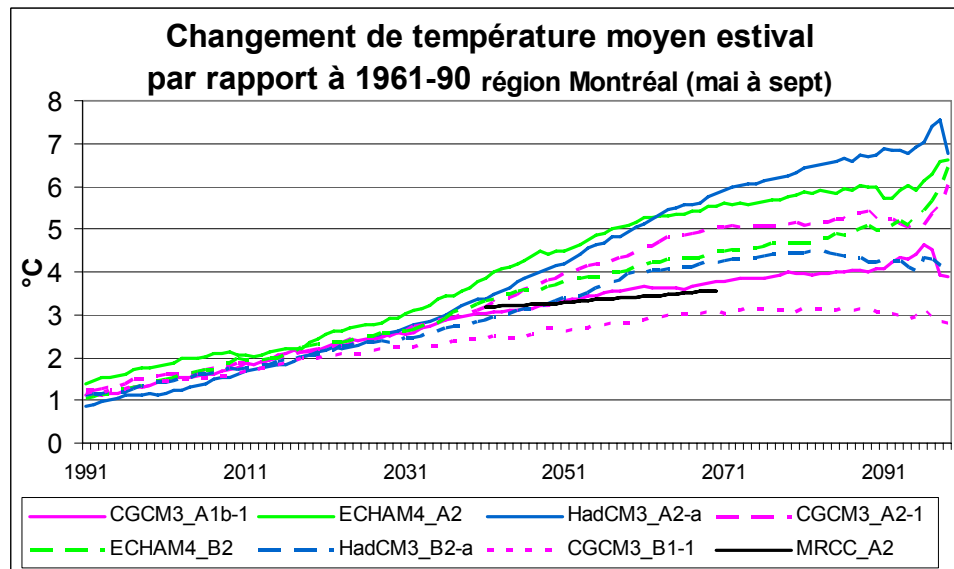
Les températures moyennes montrent que les mois de mai, août et septembre connaîtront les plus fortes hausses de température. La progression, sur l'ensemble de la période estivale, est de l'ordre de 1,8 °C pour l'horizon 2025, de 3,1°C au milieu du siècle, et de 4,6°C pour la dernière période de 30 ans. À la fin du siècle le scénario d'émission A2 produit des températures moyennes 1 à 2 °C supérieurs aux autres scénarios SRES. Le MRCC et les MCG ont des résultats comparables, autant pour le présent que pour l'horizon 2055.

Les simulations ECHAM4\_A2 montrent les moyennes estivales les plus élevées; le MRCC suit de prêt. Le scénario CGCM3\_B1-1 affiche les valeurs les plus faibles, tel qu'illustré sur la figure 3.



**Figure 3 : Moyenne des températures de mai à septembre selon 8 modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085, dans la région de Montréal.**

Tous ces modèles sont basés sur des approximations qui mènent à des biais. C'est pourquoi il est recommandé de considérer le changement des températures au fil du temps plutôt que les valeurs absolues. La figure 4 montre l'évolution du changement (moyennes mobiles sur 30 ans) selon les différents modèles.



**Figure 4: Évolution du changement des températures moyennes estivales (moy. Mob. sur 30 ans) par rapport à la moyenne de la période de référence 1961-90**

Le changement de température moyen estival à la fin du 21<sup>e</sup> siècle, par rapport à la période actuelle s'étend de 3 à 7°C. Le maximum est atteint par le modèle HadCM3-A2, alors que GCM3-B1-1 réchauffe le moins. Les scénarios SRES se distinguent surtout à partir du milieu du siècle. Plus la période est éloignée du présent, plus l'incertitude augmente et les réalisations divergent entre elles.

Le MRCC, plus représentatif du climat local, se classe parmi les résultats conservateurs. Ce constat suggère que la zone de référence établie pour les MCG autour de Montréal témoigne d'un climat plus nordique. En effet, on sait que le changement climatique est plus prononcé vers le nord (GIEC, 2001).

### 3.2- Moyennes mensuelles et saisonnières des températures maximales quotidiennes

Le tableau 3 présente les températures maximales quotidiennes moyennées mensuellement et saisonnièrement (de mai à septembre) selon les 4 périodes de 30 ans.

	1961-90	2010-39	2040-69	2070-99	1961-90	2010-39	2040-69	2070-99
	<b>CGCM3_A1b-1</b>				<b>CGCM3_B1-1</b>			
Mai	15,00	17,06	18,37	19,25	15,00	16,68	17,78	17,83
Juin	21,06	23,01	24,22	24,57	21,06	22,95	23,30	24,02
Juillet	24,21	26,05	27,23	27,84	24,21	26,08	26,73	27,43
Août	22,91	24,08	25,28	26,42	22,91	24,12	25,71	25,76
septembre	18,02	19,55	21,15	21,24	18,02	19,30	20,06	21,42
<b>moyenne</b>	20,25	21,96	23,26	23,88	20,25	21,84	22,73	23,30
	<b>CGCM3_A2-1</b>				<b>ECHAM4_A2</b>			
Mai	15,00	17,28	18,62	20,34	14,64	17,00	18,15	19,87
Juin	21,06	22,98	23,90	26,25	20,83	22,45	24,25	25,79
Juillet	24,21	25,58	27,22	29,41	23,89	25,97	27,72	29,39
Août	22,91	24,85	25,77	27,65	23,29	25,91	27,78	29,17
septembre	18,02	19,84	21,17	22,76	18,52	20,87	22,84	24,72
<b>moyenne</b>	20,25	22,12	23,35	25,29	20,24	22,44	24,15	25,79
	<b>ECHAM4_B2</b>				<b>HadCM3_A2-a</b>			
Mai	14,64	17,28	18,62	20,34	15,76	18,08	19,76	21,63
Juin	20,83	22,98	23,90	26,25	20,24	21,62	23,90	26,18
Juillet	23,89	25,58	27,22	29,41	22,34	24,88	26,92	30,01
Août	23,29	24,85	25,77	27,65	21,32	23,93	25,97	29,31
septembre	18,52	19,84	21,17	22,76	17,41	19,25	21,96	23,52
<b>moyenne</b>	20,24	22,12	23,35	25,29	19,41	21,55	23,70	26,13
	<b>HadCM3_B2-a</b>				<b>MRCC_A2</b>			
Mai	15,76	18,12	19,09	19,91	11,76	-	14,41	-
Juin	20,24	22,16	23,68	24,67	17,92	-	21,24	-
Juillet	22,34	24,54	25,81	26,59	24,40	-	28,3	-
Août	21,32	23,41	25,49	26,55	26,23	-	29,49	-
septembre	17,41	19,02	20,11	22,34	20,49	-	23,65	-
<b>moyenne</b>	19,41	21,45	22,83	24,01	20,16	-	23,42-	-

**Tableau 3 : Températures maximales mensuelles et saisonnières simulées par différents modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085 dans la région de Montréal.**

L'augmentation des maximums moyens est généralisée et assez homogène. L'étendue des résultats dépend plus fortement des scénarios SRES que des MCG. D'ici la fin du siècle, elle se situe autour de 3°C pour les scénarios B1 et B2 et va jusqu'à 8°C avec A2. Le changement le plus notable des températures maximales saisonnières est produit par HadCM3\_A2-a. La réalisation CGCM3\_B1-1 affiche les valeurs absolues et les changements les plus faibles.

Les mois de mai, août et septembre évolueraient davantage bien que juillet affiche les maximums absolus les plus élevés.

C'est à partir de l'horizon 2055 que le changement climatique dépasse la variabilité naturelle interannuelle du climat actuel.

Le MRCC montre des résultats comparables aux MCG en moyenne sur la saison, mais présente des mois de mai et juin plus faibles et des mois de juillet, août septembre plus forts que les autres modèles. Ce décalage est en partie explicable par la caractérisation de la surface dans cette version du MRCC (le sol reste gelé trop longtemps au printemps).

### 3.3- Moyennes mensuelles et saisonnières des températures minimales quotidiennes

Les moyennes saisonnières et mensuelles des températures minimales sont présentées pour les 4 horizons de 30 ans au tableau 4.

	1961-90	2010-39	2040-69	2070-99	1961-90	2010-39	2040-69	2070-99
	<b>CGCM3_A1b-1</b>				<b>CGCM3_B1-1</b>			
Mai	3,48	5,78	6,94	8,17	3,48	5,42	6,51	6,54
Juin	9,48	11,21	12,64	13,04	9,48	11,20	11,34	12,25
Juillet	12,52	14,45	15,48	16,32	12,52	14,41	14,61	15,66
Août	11,64	12,93	14,02	15,38	11,64	13,01	14,24	14,62
septembre	7,56	9,36	10,88	11,27	7,56	9,06	9,77	10,98
<b>moyenne</b>	<b>8,94</b>	<b>10,75</b>	<b>11,99</b>	<b>12,84</b>	<b>8,94</b>	<b>10,63</b>	<b>11,30</b>	<b>12,01</b>
	<b>CGCM3_A2-1</b>				<b>ECHAM4_A2</b>			
Mai	3,48	5,72	7,14	9,08	8,64	10,85	12,71	13,99
Juin	9,48	11,25	12,35	14,42	14,24	16,30	18,27	19,38
Juillet	12,52	13,89	15,41	17,65	17,29	19,32	21,58	23,18
Août	11,64	13,59	14,39	16,16	16,69	19,45	21,39	22,87
septembre	7,56	9,54	10,75	12,62	12,22	14,75	17,12	18,92
<b>moyenne</b>	<b>8,94</b>	<b>10,80</b>	<b>12,01</b>	<b>13,99</b>	<b>13,82</b>	<b>16,13</b>	<b>18,21</b>	<b>19,67</b>
	<b>ECHAM4_B2</b>				<b>HadCM3_A2-a</b>			
Mai	8,64	10,67	11,89	12,48	5,05	7,32	8,66	10,62
Juin	14,24	16,32	17,22	18,40	9,89	11,38	13,38	15,24
Juillet	17,29	19,63	20,93	21,76	12,63	14,88	16,62	18,75
Août	16,69	19,09	20,65	21,70	11,04	13,64	15,39	18,25
septembre	12,22	14,74	16,11	17,26	7,03	9,11	11,47	12,32
<b>moyenne</b>	<b>13,82</b>	<b>16,09</b>	<b>17,36</b>	<b>18,32</b>	<b>9,13</b>	<b>11,27</b>	<b>13,10</b>	<b>15,03</b>
	<b>HadCM3_B2-a</b>				<b>MRCC_A2</b>			
Mai	5,05	7,09	8,14	8,92	5,21	-	7,83	-
Juin	9,89	11,87	13,39	14,13	11,16	-	14,60	-
Juillet	12,63	14,77	15,73	16,67	16,55	-	20,13	-
Août	11,04	13,21	15,04	15,78	17,13	-	20,19	-
septembre	7,03	8,85	9,32	11,53	11,77	-	14,54	-
<b>moyenne</b>	<b>9,13</b>	<b>11,16</b>	<b>12,32</b>	<b>13,41</b>	<b>12,36</b>	<b>-</b>	<b>15,46</b>	<b>-</b>

**Tableau 4: Températures minimales mensuelles et saisonnières simulées par différents modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085 dans la région de Montréal.**

Comme dans la section précédente, les minimums des mois de mai, août et septembre semblent augmenter davantage au fil du temps que le milieu de l'été qui enregistre les températures minimales moyennes les plus élevées. Les simulations ECHAM4-A2 donnent les valeurs absolues les plus fortes. Le changement climatique le plus pessimiste est dominé par HadCM3\_A2-a à la fin du siècle (près de 6°C). Les autres simulations sont comparables, soient un réchauffement de l'ordre de 3 à 5°C vers 2085, par rapport au climat actuel. Comme aux sections 3.1 et 3.2, le modèle CGCM3 montre les changements les plus conservateurs. Le MRCC est plus chaud que la plupart des MCG, mais les changements anticipés sont parmi les plus faibles.

Les scénarios d'émission SRES se distinguent à partir du milieu du siècle. Ils étendent la plage de futurs possibles de 1 à 2°C à la fin du siècle pour un même MCG.

La figure 5 illustre les résultats pour les moyennes saisonnières. Les simulations des températures minimales sont moins homogènes d'un modèle à l'autre que les températures maximales. En effet, la température minimale l'été est régie davantage par la présence d'humidité qui est un paramètre plutôt local, moins fiable dans les MCG. L'incertitude serait ainsi plus élevée sur les températures minimales.

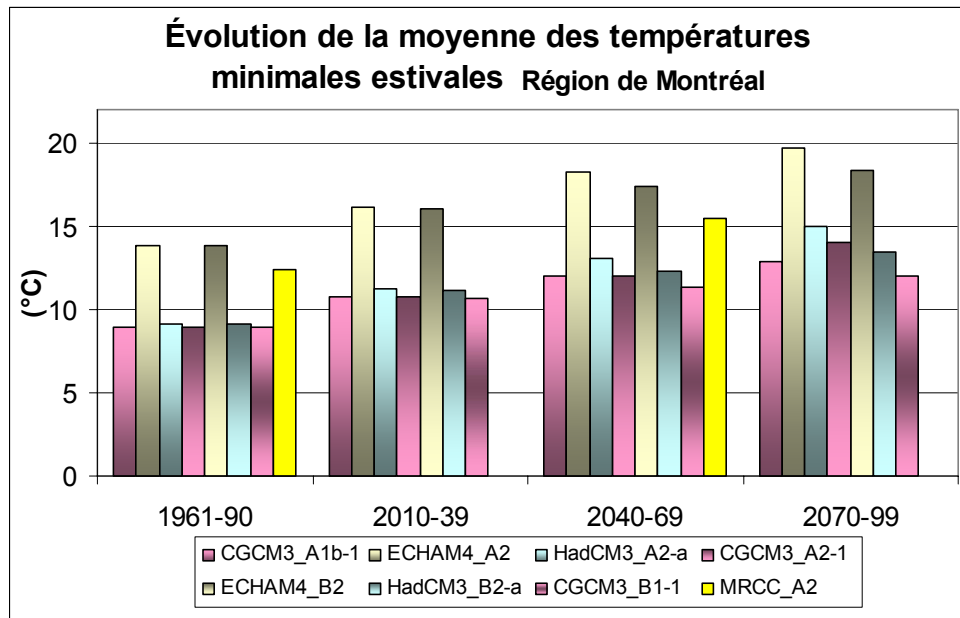


Figure 5 : Moyenne des températures minimales de mai à septembre selon 8 modèles pour les horizons 1975, 2025, 2055 et 2085 dans la région de Montréal.

Vers la fin du 21<sup>e</sup> siècle, les augmentations de température sont légèrement plus prononcées pour les maximums que pour les minimums comme le montre la figure 6.

Certains MCG indiquent une diminution de l'écart diurne (différence entre le maximum et le minimum quotidien), alors que d'autres annoncent l'inverse. Compte tenu de l'incertitude des modèles, on ne peut se prononcer sur cet indicateur.

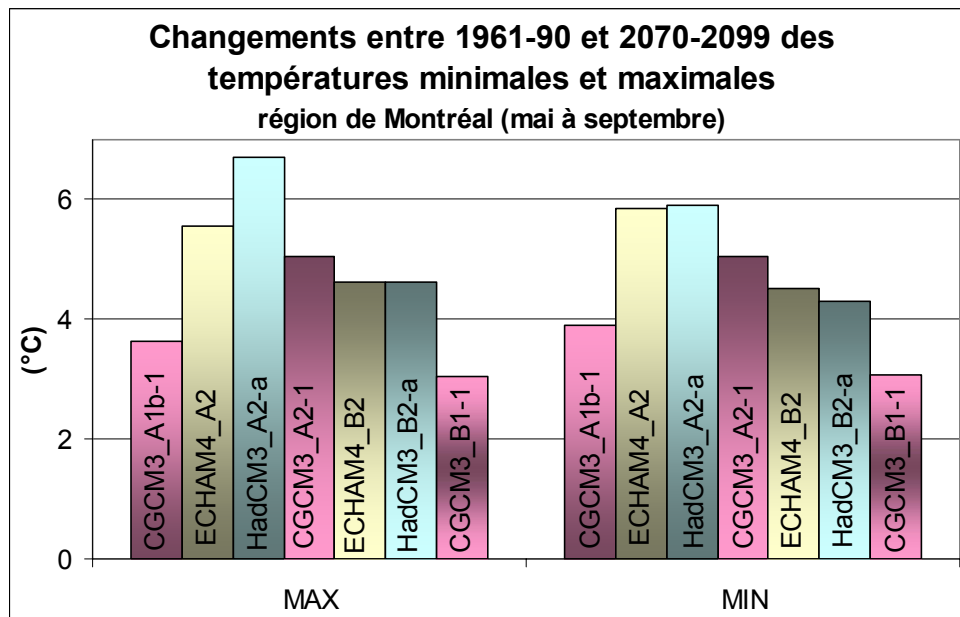


Figure 6 : Moyenne des changements températures estivales minimales et maximales selon différents MCG pour l'horizon 2085 par rapport à 1975 à Montréal.

### 3.4- Nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale à 33°C

À partir des données quotidiennes maximales de mai à septembre, nous avons calculé l'occurrence des dépassements du seuil de 33°C. Le tableau suivant présente la fréquence saisonnière moyenne par modèle-scénario. Les résultats sont regroupés par tranche de 30 ans.

	1961-90	2010-2039	2040-2069	2070-2099
CGCM3_B1-1	1,92	4,21	7,10	7,53
CGCM3_A1b-1	1,92	4,39	7,33	9,43
CGCM3_A2-1	1,92	4,00	7,66	16,27
ECHAM4_A2	0,04	0,73	4,32	9,12
ECHAM4_B2	0,04	0,50	2,51	5,22
HadCM3_A2-a	0,60	1,34	4,83	14,05
HadCM3_B2-a	0,60	1,16	3,10	5,57

Tableau 5 : Occurrence moyenne par été des dépassements du seuil de 33°C sur les températures maximales pour 4 horizons, pour Montréal.

Tous les modèles annoncent une augmentation de la fréquence des épisodes. À la fin du 21<sup>e</sup> siècle, les résultats les plus forts sont produits avec le modèle CGCM3 qui semble avoir une plus grande variabilité (génère davantage d'extrêmes chauds), même si les modèles HadCM3 et ECHAM4 produisent des moyennes et des changements plus élevés (voir section 3.2).

La figure 7 illustre la progression de la moyenne mobile sur 30 ans avec les 7 réalisations de GCM. La hausse des dépassements du seuil de 33°C est plus accentuée à partir de la 2<sup>e</sup> moitié du 21<sup>e</sup> siècle, en particulier avec le scénario A2. Vers 2085, les MCG les plus conservateurs (ECHAM4\_B2 et HadCM3\_B2-a) prévoient une augmentation d'environ 5 dépassements par été par rapport au climat actuel. La médiane est autour de 9 dépassements de plus que la période 1961-90, alors que la plus pessimiste des réalisations montre une hausse de 14.

Selon le détail des modélisations, le seuil de 33°C serait atteint plus souvent autour de la mi-juillet ; ce constat concorde avec les résultats de la section 3.2, qui montraient que juillet était le mois le plus chaud de l'été.

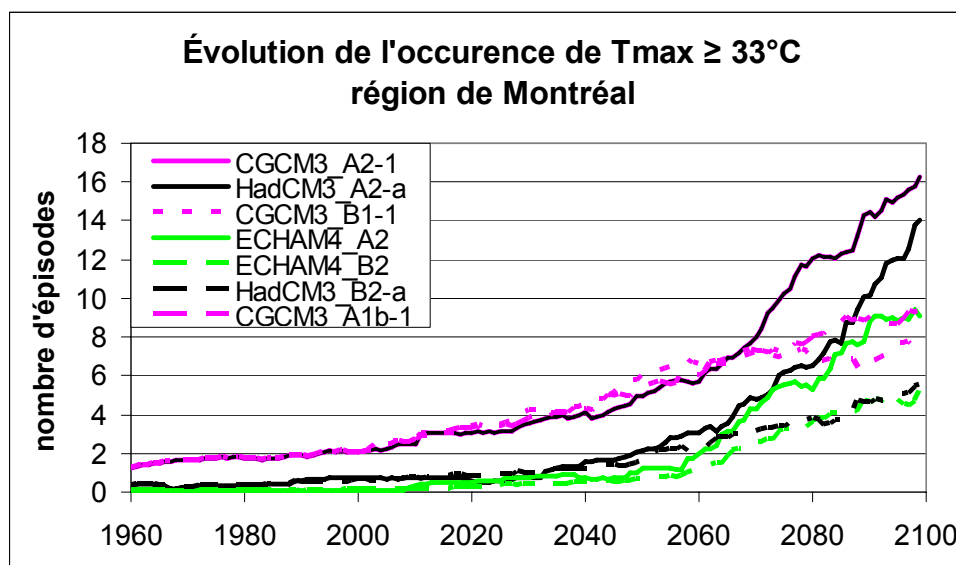


Figure 7 : Évolution du nombre de dépassements du seuil de 33°C par été pour les températures maximales quotidiennes à Montréal avec 7 réalisations (moy mob 30 ans)

### 3.5- Nombre de jours où la température minimale est supérieure ou égale à 25°C

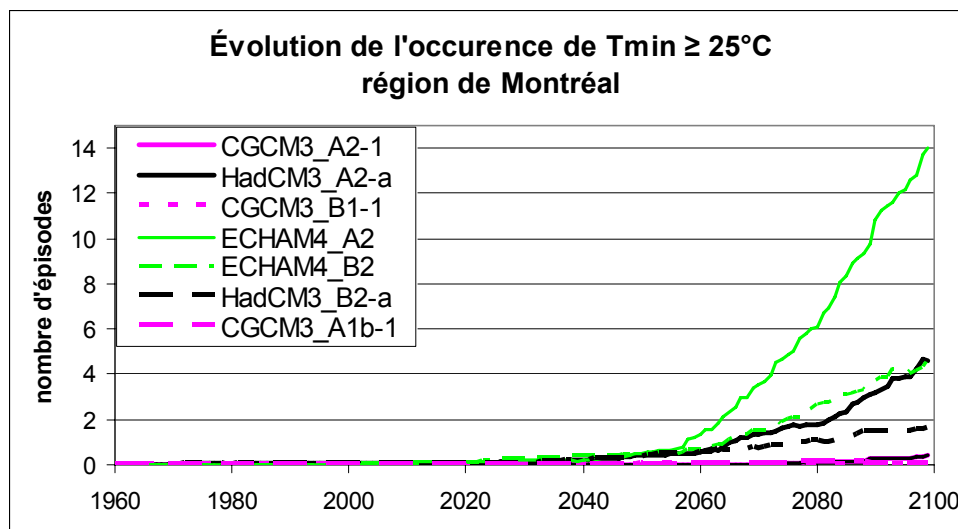
Le total des dépassements du seuil de 25°C avec les minimums quotidiens de mai à septembre, a été regroupé par tranche de 30 ans. Le tableau 5 présente l'occurrence pour les 4 horizons avec les 7 réalisations.

	1961-90	2010-2039	2040-2069	2070-2099
CGCM3_B1-1	0,00	0,01	0,05	0,02
CGCM3_A1b-1	0,00	0,01	0,07	0,08
CGCM3_A2-1	0,00	0,00	0,03	0,40
ECHAM4_A2	0,02	0,17	3,38	13,99
ECHAM4_B2	0,02	0,44	1,53	4,74
HadCM3_A2-a	0,06	0,19	1,37	4,66
HadCM3_B2-a	0,06	0,22	0,74	1,67

**Tableau 6: Occurrence moyenne par été des dépassements du seuil de 25°C sur les températures minimums pour 4 horizons, à Montréal.**

Jusqu'au milieu du siècle, les températures minimales dépasseront très rarement 25°C. Le modèle le plus pessimiste est ECHAM4. La section 3.3 montrait déjà des minimums moyens plus élevés avec ECHAM4 par rapport aux autres modèles. Le modèle le plus conservateur est CGCM3 (presque aucun dépassement). La médiane des résultats suggère environ 5 dépassements de plus que le climat actuel à la fin du siècle. Selon le détail des modélisations, ces événements se produiraient surtout vers la fin de juillet.

La figure 8 illustre l'évolution de la moyenne mobile sur 30 ans des dépassements de 25°C de la température minimale entre 1961 et 2099 pour les 7 simulations.



**Figure 8 : Évolution du nombre de dépassements de 25°C par été pour les températures maximales quotidiennes à Montréal avec 7 MCG (moy mob 30 ans)**

Les résultats de ECHAM4\_A2 se distinguent par rapport aux autres réalisations, non seulement pas le nombre d'événements, mais par la progression très rapide à partir des années 2060. Ce comportement isolé met en doute les résultats du modèle pour la variabilité des minimums. Il serait plus prudent de ne pas considérer les résultats de ECHAM4 pour ce paramètre.

### 3.6- Nombre de vagues de chaleur sur 3 jours

À partir des séries simulées, nous avons compilé le nombre de vagues de chaleur répondant aux conditions suivantes: la température minimale quotidienne est supérieure ou égale à 20°C, la température maximale quotidienne est supérieure ou égale à 33°C et ce, pendant au moins 3 jours consécutifs (moyennes mobiles). Le tableau 6 résume les résultats saisonniers obtenus jusqu'en 2099 par tranches de 30 ans.

	1961-90	2010-2039	2040-2069	2070-2099
CGCM3_B1-1	0,10	0,70	1,48	1,91
CGCM3_A1b-1	0,10	0,75	2,00	3,41
CGCM3_A2-1	0,10	0,40	1,96	7,73
ECHAM4_A2	0,00	0,38	2,78	7,15
ECHAM4_B2	0,00	0,16	1,53	3,44
HadCM3_A2-a	0,11	0,48	3,16	10,12
HadCM3_B2-a	0,11	0,48	1,47	3,44

Tableau 7 : Occurrence moyenne par été (mai à septembre) des canicules sur 3 jours ( $T_{max} \geq 33^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ ) pour 4 horizons, à Montréal.

La fréquence des vagues de chaleur sur la période actuelle et jusqu'au milieu du siècle est très faible. On atteint entre 2 et 10 jours de canicule par été à la fin du siècle selon les modèles-scénarios. Le plus conservateur est le CGCM3-B1 alors que le plus pessimiste est le HadCM3\_A2-a. À partir des résultats détaillés, on trouve que l'écart-type de la fréquence des canicules (variabilité d'une année à l'autre) est du même ordre que l'occurrence moyenne. Autrement dit, les simulations prévoient certains étés sans vague de chaleur ou avec plus de 20 épisodes.

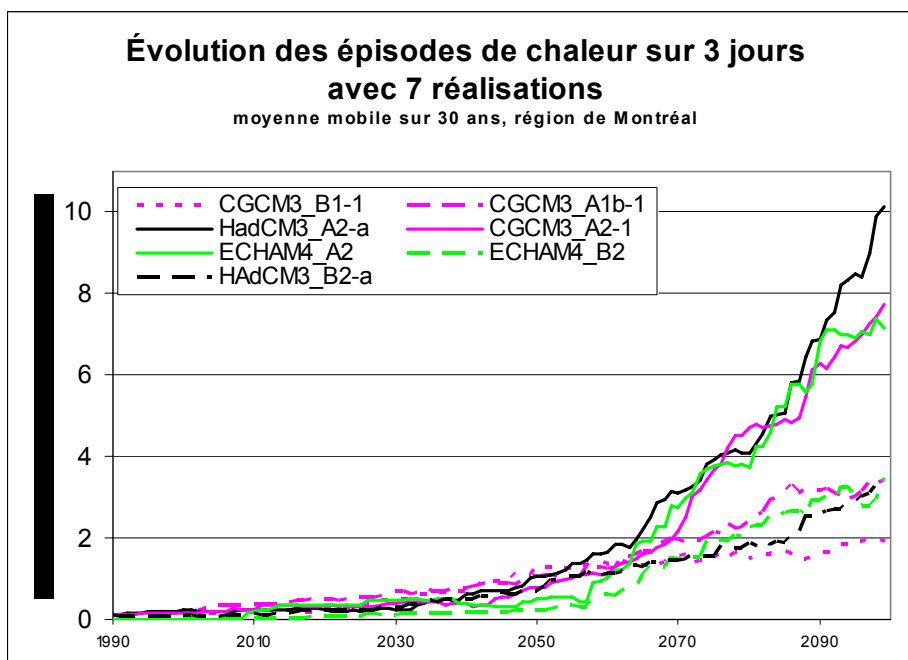


Figure 9 : Évolution du nombre de vagues de chaleur par été sur 3 jours avec  $T_{max} \geq 33^{\circ}\text{C}$  et  $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$  à Montréal avec 7 réalisations (moy mob 30 ans)

La figure 9 illustre la progression des vagues de chaleur au fil des années pour les différents modèles. Compte tenu de la disparité des résultats entre les MCG des sections précédentes (sur moyennes et les extrêmes), il est étonnant de constater que les 3 modèles s'accordent pour produire des fréquences de canicule sur 3 jours très semblables. Ce sont essentiellement les scénarios SRES qui départagent les résultats à la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

### 3.7- Nombre de vagues de chaleur sur 5 jours

À partir des 7 séries quotidiennes de MCG de 1961-2099, nous avons calculé la fréquence des vagues de chaleur répondant aux critères suivants: la température minimale supérieure ou égale à 22°C, la température maximale supérieure ou égale à 35°C, sur au moins 5 jours consécutifs (moyennes mobiles). Le tableau 8 résume les résultats.

	1961-90	2010-2039	2040-2069	2070-2099
CGCM3_B1-1	0	0	0,1	0,05
CGCM3_A1b-1	0	0,03	0,22	0,06
CGCM3_A2-1	0	0	0,032	1,21
ECHAM4_A2	0	0	0,3	1,08
ECHAM4_B2	0	0	0,07	0,17
HadCM3_A2-a	0,01	0,04	0,84	4,14
HadCM3_B2-a	0,01	0,04	0,32	1,03

Tableau 8 : Occurrence moyenne par été (mai à septembre) des canicules sur 5 jours ( $T_{max} \geq 35^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{min} \geq 22^{\circ}\text{C}$ ) pour 4 horizons, à Montréal.

Les modèles sont assez unanimes pour ce paramètre (moins de 5 épisodes par été à la fin du siècle). Les canicules sévères sont des événements peu fréquents dans le futur étant donné que les épisodes de maximums et minimums extrêmes sont assez rares pour tous les MCG (voir sections 3-4 et 3-5). La figure 10 montre l'évolution des épisodes à partir des moyennes mobiles sur 30 ans.

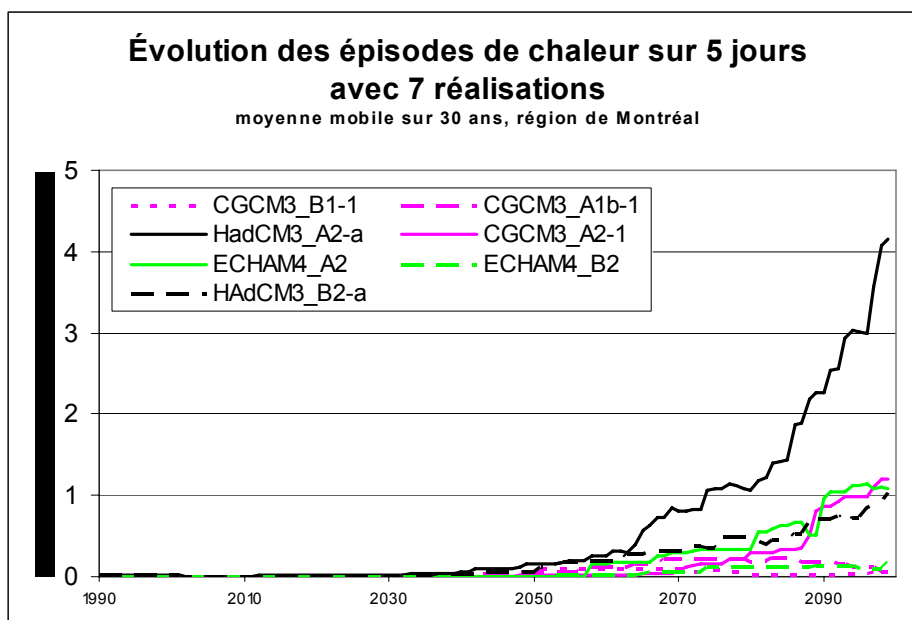


Figure 10 : Évolution du nombre de vagues de chaleur par été (mai à sept) sur 5 jours avec  $T_{max} \geq 35^{\circ}\text{C}$  et  $T_{min} \geq 22^{\circ}\text{C}$  dans la région de Montréal avec 7 réalisations (moy mob 30 ans)

La plupart des modèles-scénarios ne produisent aucune forte canicule avant 2050. Seul le modèle HadCM3\_A2-a semble donner un signal plus prononcé. Comme ce modèle ne simule pas les moyennes les plus élevées, (voir section 3.1), ce comportement isolé suggère une persistance plus prononcée par rapport aux autres modèles. C'est aussi HadCM3\_A2-a qui anticipe un changement plus significatif des températures maximales et minimales (voir fig.6).

### 3.8- Comparaison des modèles avec les données observées

Les simulations sur la période 1961-90 ont été comparées aux mesures de 3 stations météorologiques : Dorval, McGill et St-Hubert. Ces stations ont été sélectionnées en raison de leur localisation et de la longueur de leurs séries (elles couvrent au moins la période de référence). Les modèles considèrent tous les mêmes concentrations de gaz à effet de serre, soit les niveaux mesurés entre 1961 et 1990.

Le tableau 9 met en parallèle les moyennes mensuelles et saisonnières des températures quotidiennes moyennes, minimales et maximales pour les 8 modèles par rapport aux mesures dans la région de Montréal entre 1961 et 90.

<b>Tmoy</b>	<b>CGCM3</b>	<b>ECHAM4</b>	<b>HadCM3</b>	<b>MRCC</b>	<b>McGill</b>	<b>Dorval</b>	<b>St-Hubert</b>
mai	9,24	11,64	10,41	7,79	14,09	12,92	12,75
juin	15,27	17,53	15,06	14,07	19,24	17,98	17,86
juill	18,36	20,59	17,49	20,13	22,05	20,82	20,59
août	17,27	19,99	16,18	21,22	20,60	19,36	19,00
sept	12,79	15,37	12,22	15,46	15,82	14,52	14,18
Moy	14,60	17,03	14,27	15,73	18,36	17,12	16,87
<b>Tmax</b>	<b>CGCM3</b>	<b>ECHAM4</b>	<b>HadCM3</b>	<b>MRCC</b>	<b>McGill</b>	<b>Dorval</b>	<b>St-Hubert</b>
mai	15,00	14,64	15,76	11,76	18,70	18,53	18,85
juin	21,06	20,83	20,24	17,92	23,68	23,45	23,92
juill	24,21	23,89	22,34	24,40	26,36	26,22	26,50
août	22,91	23,29	21,32	26,23	24,65	24,60	24,76
sept	18,02	18,52	17,41	20,49	19,73	19,77	19,89
Moy	20,25	20,24	19,41	20,16	22,62	22,52	22,78
<b>Tmin</b>	<b>CGCM3</b>	<b>ECHAM4</b>	<b>HadCM3</b>	<b>MRCC</b>	<b>McGill</b>	<b>Dorval</b>	<b>St-Hubert</b>
mai	3,48	8,64	5,05	5,21	9,49	7,31	6,57
juin	9,48	14,24	9,89	11,16	14,83	12,51	11,80
juill	12,52	17,29	12,63	16,55	17,77	15,42	14,68
août	11,64	16,69	11,04	17,13	16,56	14,12	13,23
sept	7,56	12,22	7,03	11,77	11,91	9,28	8,40
Moy	8,94	13,82	9,13	12,36	14,11	11,73	10,94

**Tableau 9: Observations et simulations des températures estivales moyennes, maximales et minimales pour la période 1961-90.**

Il apparaît que les modèles sous-estiment les températures moyennes (et surtout maximales) du climat de référence. Le modèle ECHAM4 semble le plus représentatif, mais cette apparente concordance est issue de ses maximums trop faibles et de ses minimums trop hauts.

Le lissage amené par le calcul de la moyenne pondérée sur la zone de référence explique en partie ce problème de sous-estimation (voir section 2). Le biais peut aussi être issu de la définition même de la zone de référence. Une surface légèrement plus au sud aurait généré un climat plus chaud. C'est ce qui explique probablement aussi pourquoi les simulations du mois de mai sont les plus éloignées des observations. La fonte de la neige et/ou le dégel du sol n'est pas complété partout sur la zone de référence et retarde l'arrivée des températures d'été. Les mois d'août et septembre sont, à ce titre, mieux représentés.

On suppose aussi que l'îlot de chaleur de Montréal est « dilué » dans la zone de référence choisie qui intègre tous les types d'utilisation du sol (régions moins urbanisées). Le modèle MRCC est le plus approchant, ce qui confirme sa performance à mieux reproduire le climat local.

Les simulations des températures minimales sont plus disparates que celles des maximums. En effet, les minimums sont davantage sujets à l'humidité (voir section 3.3). Les observations vont aussi dans ce sens les 3 stations météorologiques se distinguent davantage par leurs minimums que leurs maximums.

La figure 11 illustre les résultats du tableau précédent.

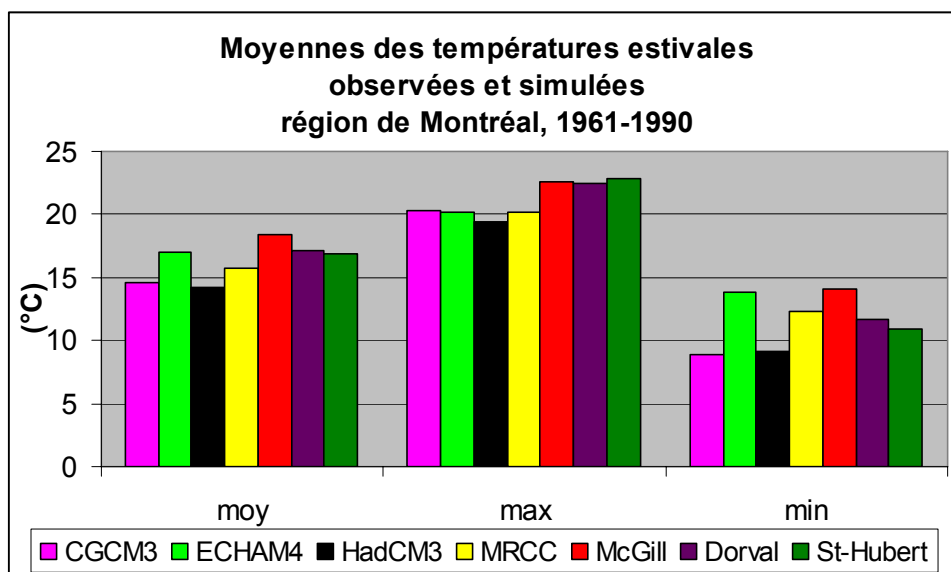


Figure 11 : Comparaison des simulations et des observations dans la région de Montréal sur les températures moyennes estivales de la période 1961-90

Bien que les moyennes des modèles soient plus faibles que les moyennes mesurées, on ne peut pas conclure que les futures moyennes seront sous-estimées. En effet, il n'existe aucun moyen de vérifier la constance des biais.

Il serait possible de corriger les biais en rehaussant les valeurs quotidiennes artificiellement à partir des observations. Non seulement les moyennes résultantes en seraient augmentées, mais cette action rehausserait aussi la fréquence des dépassements de seuils et des canicules. Or, il est impossible de connaître l'évolution des biais dans le futur. C'est pourquoi on suggère plutôt de considérer le changement des températures ou des vagues de chaleur entre les simulations actuelles et futures (voir fig. 4).

Pour les dépassements de seuil et les canicules les modèles semblent assez comparables aux mesures de la région de Montréal tel qu'indiqué au tableau 10. Notons qu'aucune vague de chaleur sur 5 jours n'a été répertoriée dans la région de Montréal depuis que des stations de mesure sont en opération. Les modèles reproduisent bien cette réalité.

	Tmax≥33°C	Tmin≥25°C	canicule 3 jours	canicule 5 jours
CGCM3	57,5	0	3	0
ECHAM4	1,2	0,7	0	0
HadCM3	17,0	1,5	3	0
McGill	18,0	5	6	0
Dorval	23,0	1	8	0
St-Hubert	39,0	0	14	0

Tableau 10 : Fréquence des dépassements de seuil et des canicules sur la période 1961-90 pour les observations et les simulations, de mai à septembre.

Le modèle ECHAM4 semble simuler des maximums trop bas (faible occurrence de dépassements du seuil de 33°C). La figure 7 montrait toutefois que ce modèle produit des fréquences du même ordre que les autres dans le futur. Le CGCM3 indique une surestimation des épisodes au dessus de 33°C par rapport aux observations. Ce même modèle avait produit également des fréquences de dépassements élevées dans le futur (tableau 5),

malgré des moyennes plus faibles (voir sections 3-1, 3-2 et 3-3). On confirme donc une variabilité plus grande du CGCM3.

Le modèle HadCM3 semble le plus approchant du climat actuel pour les dépassements et les canicules.

Nous avons aussi calculé la différence entre les températures maximale et minimale quotidiennes (écart diurne) pour les trois stations de mesure. Il ne semble pas y avoir de consensus. La station au centre-ville montre une diminution des écarts diurnes au fil du temps, alors que Dorval et St-Hubert indiquent une légère augmentation. Les MCG ne semblent pas s'accorder non plus sur le futur de ce paramètre (voir section 3.3). Les incertitudes sur les températures minimales sont peut-être en cause.

## 4- Conclusions

Selon les 8 réalisations climatiques futures analysées dans cette étude, les températures minimales, maximales et moyennes augmenteront, de même que les dépassements de seuil et les vagues de chaleur dans la région de Montréal. Les simulations suggèrent que le changement climatique dépassera la variabilité naturelle du climat actuel à partir de l'horizon 2055. En général, pour le futur éloigné, les réalisations se distinguent autant par le scénario d'évolution de gaz à effet de serre (A2, B1 ou B2) que par le MCG utilisé (CGCM3, ECHAM4 ou HAdCM3).

Le changement anticipé sur la température moyenne estivale à la fin du 21<sup>e</sup> siècle s'étend de 3 à 7°C, selon le modèle-scénario. Le changement est légèrement plus prononcé sur les températures maximales que sur les températures minimales. Les températures de juillet augmenteront moins que celles des autres mois, bien qu'il reste le mois le plus chaud et le plus propice aux canicules. Les vagues de chaleur sur 3 jours se produiront entre 2 et 10 fois par été à la fin du siècle, alors que les plus intenses (sur 5 jours) ont une occurrence médiane autour de 1.

Par rapport au climat actuel c'est HadCM3-A2 qui réchauffe le plus, alors que CGCM3-B1-1 est le plus conservateur. Le même constat s'applique aux vagues de chaleur qui témoignent de la persistance des extrêmes. Ces événements seraient toutefois peu fréquents à Montréal jusqu'au milieu du siècle (environ deux par an).

CGCM3\_A2-1 et ECHAM4\_A2 dominent respectivement les dépassements de seuils pour les maximums et les minimums. Les deux réalisations, assez isolées des autres, nous portent à considérer la médiane des résultats qui se situe autour de 9 dépassements par été pour le seuil de 33°C et de 5 pour celui de 25°C vers la fin du siècle.

En comparant les données aux stations de McGill, Dorval et St-Hubert avec les simulations sur la période 1961-90, on trouve que la plupart des modèles sous-estiment les températures, en particulier les températures maximales. La faible résolution des MCG ferait en sorte qu'ils ne perçoivent pas l'îlot de chaleur de Montréal. Le modèle MRCC dont l'échelle est plus fine est à ce chapitre plus représentatif des observations.

## 5- Références

GIEC, 2000. Rapport spécial du Groupe de travail III, Scénarios d'émissions, Résumé à l'intention des décideurs. OMM, PNUE, Préparé par N.Nakicenovic, O.Davidson, G.Davis, A. Grubler, T. Emilio et al. 27p.

GIEC, 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution du Groupe de travail I au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, N.Y., É.-U., 881p.

Plummer, D.A., D. Caya, A. Frigon, H. Côté, M. Giguère, D. Paquin, S. Biner, R. Harvey, and R. de Elia, 2006: Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian RCM. J. Clim., vol.19(13), 3112-3132.