



L'influence des changements climatiques sur la qualité de l'air

*Produit par Ouranos¹
pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec²*

Rapport préparé par :

Marie-France Sottile^{1,2}

NOVEMBRE 2011



**Développement durable,
Environnement
et Parcs**

Québec 

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux.....	2
Liste des figures	3
1 Contexte et objectifs du rapport	4
2 Introduction.....	4
3 Impact de la composition de l'air sur le climat	4
3.1 Gaz et aérosols à effet de serre.....	4
3.1.1 Dioxyde de carbone (CO ₂).....	5
3.1.2 Méthane (CH ₄)	5
3.1.3 Ozone troposphérique (O ₃).....	6
3.1.4 Gaz azotés.....	6
3.1.5 Hydrogène (H ₂).....	6
3.1.6 Radical hydroxyle (OH).....	7
3.1.7 Particules	7
3.2 Émissions actuelles dans les simulateurs de climat	7
3.3 Émissions futures dans les simulateurs de climat	9
3.4 Modèles de circulation générale (MCG)	10
3.5 Modèles régionaux de climat (MRC).....	11
3.6 Changements climatiques anticipés sur le Québec.....	12
3.6.1 Températures et précipitations	12
3.6.2 Vents.....	16
3.6.3 Couvert de neige	17
3.6.4 Humidité des sols	17
3.6.5 Radiation solaire incidente.....	19
3.6.6 Vapeur d'eau dans l'atmosphère.....	19
3.6.7 Saison de croissance.....	20
3.6.8 Canicules	21
4 Impact des changements climatiques sur la qualité de l'air.....	23
4.1 Ozone troposphérique.....	23
4.2 Particules en suspension	24
4.3 Dioxyde de soufre (SO ₂)	25
4.4 Radical hydroxyle (OH)	26
4.5 Gaz azotés	27
4.6 Monoxyde de carbone (CO).....	29
4.7 Composés organiques volatiles (COV).....	30
4.8 Toxiques.....	31
4.9 Allergènes	31
4.10 Mécanismes de transport/dispersion/déposition.....	31
5 Recommandations	32
5.1 Utilisation de modèles de simulation.....	32
5.2 Ajouts de mesures	32
5.3 Politiques concertées de lutte aux émissions	33
6 Conclusion.....	34
7 Vocabulaire, acronymes et notions de base	37
8 Références	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Changements saisonniers moyens de température et de précipitation, calculés à partir de MCG, pour 4 régions du Québec, sur trois périodes futures, par rapport au climat de 1961-1990.....	14
Tableau 2: Changement des précipitations maximales sur 24h, par région et par saison, en 2010-2039 par rapport à 1961-1990 (ratio futur/passé)	16
Tableau 3: Augmentation de l'humidité spécifique (%) entre 1961-1990 et 2010-2039 pour les régions socio-sanitaires due Québec.....	20

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Bilan énergétique solaire et terrestre à travers l'atmosphère	5
Figure 2 : Cirrus et nuages polaires	6
Figure 3 : Répartition des émissions anthropiques des principaux GES	8
Figure 4 : Composantes du forçage radiatif dans l'atmosphère, en Watts/m ²	8
Figure 5 : Précipitations moyennes annuelles planétaires observées (a) et simulées (b), pour la période 1980 à 1999	9
Figure 6 : Émissions anthropogéniques de CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O et SO ₂ pour les 6 scénarios SRES	10
Figure 7 : Évolution du réchauffement global, selon différents scénarios d'émission.....	11
Figure 8 : Températures et précipitations moyennes estivales et hivernales sur le Québec pour le passé (1961-1990) et le futur (2041-2070)	13
Figure 9 : Zones climatique du Québec ayant servi aux calculs du tableau 1	14
Figure 10 : Changement moyen du couvert de neige en mars sur le Québec (%).....	17
Figure 11 : Indice de sécheresse canadien pour la période 1971-2000 (a) et changement projeté de l'ISC pour la période 2041-2070 (b).....	18
Figure 12 : Changement saisonnier médian de radiation solaire incidente entre 1961-1990 et 2041-2070, pour le nord et le sud du Québec, simulé avec 12 MCG	19
Figure 13 : Durée de la saison de croissance, en jours, observée pour la période 1971-2000 (a) et changement projeté pour 2041-2070 (b).....	21
Figure 14 : Îlots de chaleur dans la Communauté Métropolitaine de Montréal en juin 2005 (a) et îlots de chaleur vers la fin du 21e siècle, avec le scénario médian de 11 MCG (b).....	22
Figure 15: Évolution des concentrations maximales d'ozone au sol, sur 8 heures, aux États-Unis, entre 1978 et 2009	23
Figure 16: Évolution des émissions anthropiques mondiales de SO ₂ selon le modèle RAINS (en millions de tonnes)	26
Figure 17 : Anomalies annuelles des concentrations d'OH planétaires (en molécules x10 ⁴ /cm ³) entre 1987 à 2005 par rapport à la moyenne sur la même période	26
Figure 18: Récentes émissions moyennes de NO _x sur 3 continents entre 1980 et 1997 (en Teragrammes/an).....	27
Figure 19: Évolution des émissions anthropiques mondiales de NO _x selon le modèle RAINS (en millions de tonnes)	29
Figure 20: Évolution des émissions anthropiques mondiales de CO selon le modèle RAINS (en millions de tonnes)	30
Figure 21: Concentrations de CO (en ppb) observées (en noir) et simulées par le modèle GEOS (en rouge), entre 1987 et 2005, pour 3 sites : à Hawaï, au Canada et aux Bermudes	30
Figure 22: Les principaux polluants de l'atmosphère, leurs effets physico-chimiques et leur distribution..	35

1 Contexte et objectifs du rapport

Depuis 2008, l'équipe en charge du Programme de surveillance de la qualité de l'air (PSQA) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs améliore et consolide le réseau de mesure des polluants atmosphériques ainsi que le traitement, l'analyse et la diffusion des données. Le PSQA vise maintenant à répondre à ces objectifs et aux différents besoins de ses clientèles tout en tenant compte des nouvelles problématiques comme celle des changements climatiques.

Afin d'orienter le PSQA en termes de recherche et de développement, et possiblement d'adapter le réseau de mesure en conséquence, il est essentiel de connaître les effets potentiels des changements climatiques sur la pollution atmosphérique. Ainsi, le présent rapport est une revue de littérature qui met en lumière les liens entre les différentes composantes de l'atmosphère en vue d'anticiper les futures problématiques de qualité de l'air au Québec.

2 Introduction

Les activités humaines changent la composition de l'atmosphère terrestre de plusieurs manières. Entre autres, depuis le début de l'ère industrielle, la combustion de carburants fossiles, les activités industrielles, le changement d'utilisation du territoire (déforestation, agriculture, urbanisation) ont fait augmenter les concentrations de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane et d'oxyde nitreux, qui constituent les principaux gaz à effet de serre (GES)ⁱ.

Le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a statué en 2007 que les émissions anthropiques de GES sont très probablement la cause des changements climatiques observés depuis quelques décennies; le réchauffement se produit à un rythme inédit dans l'histoire de la terre et cette tendance va en s'accroissant; la dernière décennie a été, de loin, la plus chaude jamais observéeⁱⁱ. Selon le GIEC, ce phénomène est désormais non équivoque, inévitable et pourrait persister pendant plusieurs sièclesⁱⁱⁱ.

La qualité de l'air et le climat sont intimement liées par la chimie, la radiation et la dynamique de l'atmosphèreⁱ. Dans un premier temps, le présent rapport décrit l'effet des GES sur le climat. Puis, nous présenterons les changements anticipés au Québec sur divers paramètres climatiques. Nous expliquerons ensuite les impacts potentiels de ces changements sur la qualité de l'air. Finalement, nous présenterons quelques pistes pour l'amélioration des connaissances sur la future qualité de l'air.

3 Impact de la composition de l'air sur le climat

3.1 Gaz et aérosols à effet de serre

Certains composés de l'atmosphère ont la propriété d'absorber la radiation infrarouge (chaleur). Ainsi, sans ces substances, l'énergie reçue du soleil, serait majoritairement retournée dans l'espace et la température moyenne du globe serait de -18°C au lieu de +15 °C. C'est principalement la vapeur d'eau et le gaz carbonique (CO₂) qui retiennent la chaleur autour du globe. Ce phénomène, appelé effet de serre, est illustré à la figure 1. Toutefois, depuis l'ère industrielle les quantités de GES d'origine anthropique sont en hausse, ce qui augmente le forçage radiatif (chaleur retenue par le système terre-atmosphère) et perturbe le climat^{iv}.

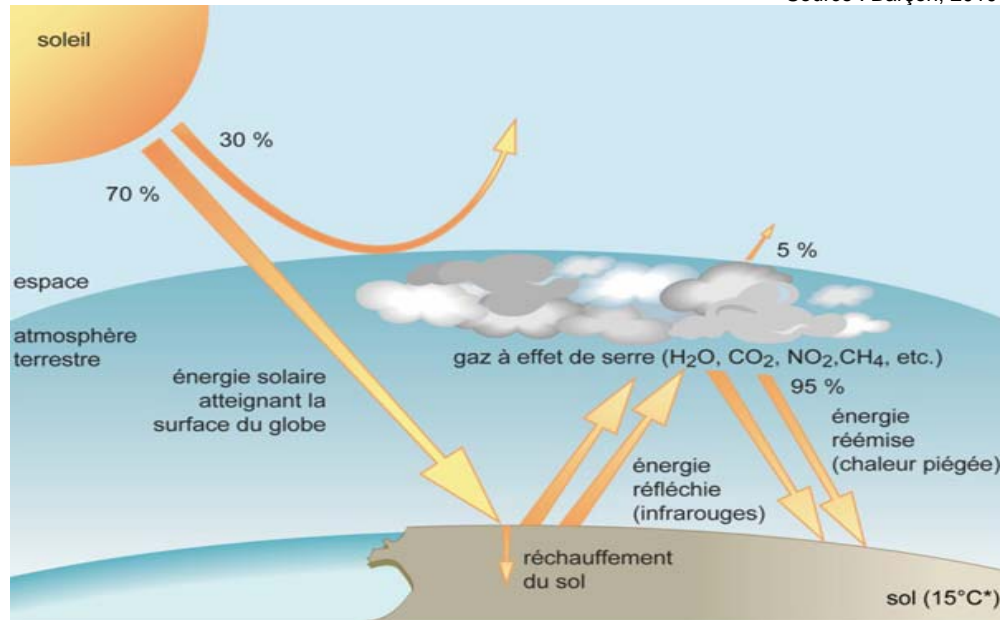


Figure 1: Bilan énergétique solaire et terrestre à travers l'atmosphère

3.1.1 Dioxyde de carbone (CO₂)

Le CO₂ est le plus abondant et le plus persistant des GES; sa durée de vie est de plus de 100 ans dans l'atmosphère. Depuis environ un siècle, les émissions de CO₂, issues de la combustion de carburants fossiles et de biomasse, ne sont plus compensées par l'absorption par les végétaux ou l'océan. Pour les végétaux, c'est la photosynthèse qui permet de stocker le carbone, mais la déforestation est en progression ce qui augmente les concentrations dans l'air. L'océan, quant à lui, emmagasine actuellement environ un tiers du CO₂ produit par la combustion fossile. Or, le CO₂ est plus facilement dissout dans l'eau froide que dans l'eau plus chaude. Donc, le réchauffement climatique diminue la capacité des océans à garder le CO₂, en plus d'augmenter l'évaporation de l'eau (un autre GES), qui accentue l'effet de serre^{v, vi}.

3.1.2 Méthane (CH₄)

Le méthane est un GES moins abondant que le CO₂, mais, par sa structure moléculaire, 23 fois plus puissant pour capter le rayonnement infrarouge; il participe à au moins 20 % du forçage radiatif direct sur le climat^{vii}. Par sa durée de vie (environ 10 ans), il est réparti assez uniformément dans la troposphère^{viii}.

Les sites d'enfouissement, les marais, les tourbières, les rizières, le sous-sol marin, la fonte du pergélisol, la digestion des ruminants et l'agriculture sont des sources de méthane, produit de la fermentation et la décomposition des matières organiques. Lors de la fabrication et la distribution des dérivés du pétrole, du méthane est également produit. Appelé aussi «gaz naturel», c'est un bon combustible, de plus en plus utilisé. La combustion du méthane produit de la chaleur et du CO₂, ce qui contribue aussi à l'effet de serre^{xxvi}.

De nos jours, les émissions de CH₄ sont principalement issues de sources anthropiques^{ix}. Les émissions ont pratiquement doublé depuis le début de l'ère industrielle^x. Toutefois, les observations actuelles tendent à montrer un fléchissement dans le taux d'accroissement depuis 1993, accompagné de variations interannuelles très prononcées^{ix}. Les émissions de CH₄ sont en effet corrélées aux températures, aux précipitations et à l'abondance du radical OH (voir chapitre 3.1.6)^{ix}.

Les hausses de température liées aux changements climatiques favoriseraient les émissions de méthane issues des milieux humides des hautes latitudes^{xi}, à condition qu'elles soient accompagnées d'une hausse des précipitations et de production des écosystèmes. Le méthane serait également libéré

lors de la fonte du pergélisol^{xii}. Pour les sources anthropiques, même en considérant l'application de législations de contrôle, elles progresseront dans l'avenir. Une hausse de 35 % des émissions est estimée d'ici 2030, par rapport à 2000^{vii xiii}.

3.1.3 Ozone troposphérique (O₃)

Le méthane, en s'oxydant en présence d'oxydes d'azote, produit de l'ozone^{xiv xviii}; ce dernier est considéré comme le 3^e plus important GES. Depuis le début de l'ère industrielle, les concentrations d'ozone dans la troposphère; auraient augmenté de plus de 35 % sur la planète^{xi}. L'ozone perturbe également la croissance des végétaux, donc leur capacité d'absorption du CO₂, conduisant aussi à une augmentation de l'effet de serre^{xv}.

3.1.4 Gaz azotés

Le cycle de l'azote est une partie fondamentale du système planétaire. Durant le dernier siècle, les activités humaines ont perturbé significativement ce cycle en augmentant les sources d'oxyde nitreux (N₂O), d'oxydes d'azote (NO et NO₂) et d'ammoniac (NH₃). Le premier est un GES qui contribue directement au forçage radiatif^{xi}; le N₂O est un GES 286 fois plus puissant que le CO₂^{xvi}. Les oxydes d'azote, favorisent la formation d'ozone troposphérique, un GES notoire, mais atténuent également l'effet de serre en diminuant la durée de vie du méthane dans l'atmosphère. De son côté, l'ammoniac (NH₃) issu, entre autres, de l'élevage d'animaux^{xi}, participe à la formation de particules qui refroidissent l'atmosphère^{xvii}.

L'ozone et le dioxyde d'azote sont les deux principaux précurseurs du radical NO₃. Il contribue à plusieurs réactions importantes, incluant la transformation de GES. Malheureusement, il y a très peu de mesures dans l'air ambiant des radicaux NO₃ qui puissent aider à comprendre leur comportement. On sait toutefois qu'ils sont corrélés positivement à la température et négativement à l'humidité relative^{xviii}.

3.1.5 Hydrogène (H₂)

L'hydrogène gazeux est considéré comme un GES indirect. Les émissions de H₂ réduisent la capacité d'oxydation globale de l'atmosphère en se combinant au radical OH pour former de l'eau dans l'atmosphère. Cette eau contribuerait à former des cirrus dans la haute troposphère et des nuages polaires dans la basse stratosphère (voir figure 2). Ce blocage du rayonnement solaire par les nuages s'ajouterait au refroidissement observé depuis quelques décennies dans la stratosphère; or, une température plus basse à cet endroit diminue la production naturelle d'ozone qui capte les ultraviolets (UV) du soleil^{ix}. Les UV contribueraient alors à chauffer davantage la troposphère.

Sources : Météo World.com, 2011 et G.Dargaud, 2011



Figure 2 : Cirrus et nuages polaires

3.1.6 Radical hydroxyle (OH)

Le radical hydroxyle est le premier oxydant de l'atmosphère^{ix}; il agit directement sur l'abondance et la durée de vie de certains GES comme le méthane, les hydrocarbures (HC, HFC, HCFC) et l'ozone, principale source d'OH. Les émissions de NO_x et de CO influencent également la concentration d'OHⁱ.

3.1.7 Particules

Les particules sont également appelées aérosols car elles voyagent dans l'air un certain temps avant de se déposer. Lorsqu'elles sont visibles (de grande taille), on les appelle aussi poussières. Les particules sont majoritairement d'origine naturelle (feux de forêt, océans, érosion éolienne, volcans). En milieu urbain, les particules sont surtout issues de la combustion industrielle et du transport (suie et fumées noires). Les particules peuvent être émises directement ou être un sous-produit d'oxydation, comme les nitrates, sulfates, aérosols d'ammoniac ou dérivés de composés organiques volatiles (COV)^{xi}. Par exemple, l'élevage d'animaux, via le NH₃, est une source indirecte de particules.

Les particules influencent le bilan énergétique terrestre en diffusant, réfléchissant, diffractant ou absorbant la radiation solaire, selon leurs propriétés optiques, elles-mêmes régulées par l'humidité dans l'air^{xix}. Par l'absorption, les particules de suie («*black carbon*») captent l'énergie solaire, provoquant un forçage radiatif positif^{xv}. Par les processus de réflexion, diffusion ou diffraction, les particules privent la surface terrestre des UV solaires, diminuant du même coup le taux de production photochimique de l'ozone et son forçage radiatif : Ces particules contrecarrent donc doublement l'effet de serre^{xx}. En somme, on estime, avec une grande marge d'incertitude, que les particules ont annulé 75 % du réchauffement causé par les GES entre 1750 (ère préindustrielle) et 2005^{viii}.

Les particules participent également à divers processus dans les nuages : nucléation, condensation, évaporation, sublimation, coagulation et déposition^{xxi xxii}. À l'échelle de quelques centaines de kilomètres, l'augmentation de particules peut réduire jusqu'à 30 % les précipitations^{xxiii}. Indirectement, elles servent à former ou changer les nuages qui, eux-mêmes influencent considérablement le budget radiatif (environ ¾ de l'effet de serre), via la vapeur d'eau et l'albédo^{xxi}. Les particules modifient aussi le temps de résidence des nuages modulant ainsi le taux de radiation solaire réfléchi. Les particules peuvent également modifier la structure thermique des basses couches de l'atmosphère et augmenter la fréquence de brouillard au sol^{xxiv}.

Parmi les particules biogéniques, on estime à 15 % la contribution actuelle des océans aux émissions globales de sulfates^{xvii xxv}. L'océan est une source naturelle de sulfates d'ammonium, d'ammoniac et de SO₂, via le phytoplancton. Le SO₂, quant à lui se transforme en acide sulfurique (H₂SO₄). Ce dernier et les sulfates d'ammonium sont d'efficaces noyaux de condensation pour la formation de nuages. Le forçage radiatif résultant au dessus des océans est négatif, mais sa quantification exacte reste à faire^v.

L'impact net des aérosols terrestres et océaniques sur le climat est un refroidissement. L'énergie perdue via les sulfates, nitrates et particules organiques représente environ 25% du bilan radiatif total^{xvii}. Cette estimation est basée sur la composition, la taille et la distribution horizontale et verticale des aérosols, des informations rares et approximativesⁱ. On attribue d'ailleurs une grande part de l'incertitude des projections climatiques à la méconnaissance des émissions et procédés de formation/transport des particules^{xxi}.

3.2 Émissions actuelles dans les simulateurs de climat

Selon le dernier rapport du GIEC^{xxvi}, les émissions des GES sont en constante augmentation. La figure 3 illustre cette progression ainsi que ses origines. Notez que les émissions de GES présentées ici sont pondérées selon leur potentiel de réchauffement planétaire sur 100 ans.

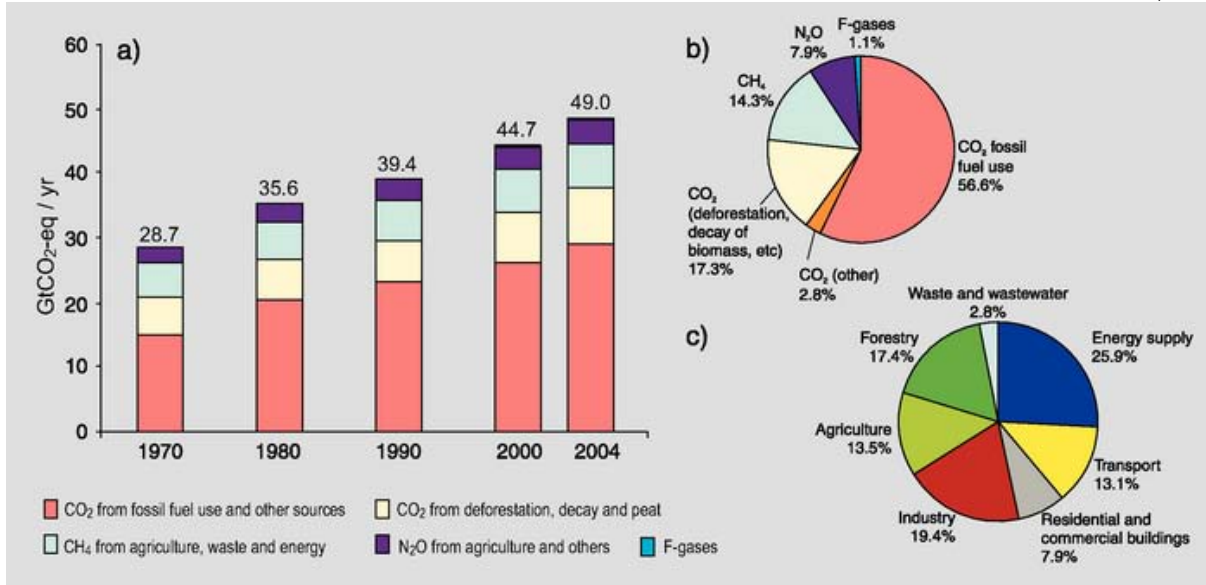


Figure 3 : Répartition des émissions anthropiques des principaux GES

- (a) Émissions anthropiques globales de GES de 1970 à 2004 en Gigatonnes d'équivalent CO₂
 - (b) Proportion des différentes émissions de GES en 2004 en CO₂-équivalent.
 - (c) Répartition des émissions de GES anthropiques par source en CO₂-équivalent.
- «F-gases» : GES impliquant du fluor : les hydrofluorocarbures(HFC), perfluorocarbures (PFC) et hexafluorures (SF₆).

Ce sont ces estimations qui sont intégrés dans les modèles de simulation de climat (voir section 3.4 et 3.5). Certains modèles sont plus élaborés en termes de chimie atmosphérique et incluent plus de 35 GES^{xxvii}. En fait, dans les modèles, les émissions de GES sont converties en forçages radiatifs (contributions négatives ou positives à l'énergie globale dans l'atmosphère). La figure 4, tirée du dernier rapport du GIEC (2007) illustre la proportion des différents forçages^{xxvi}.

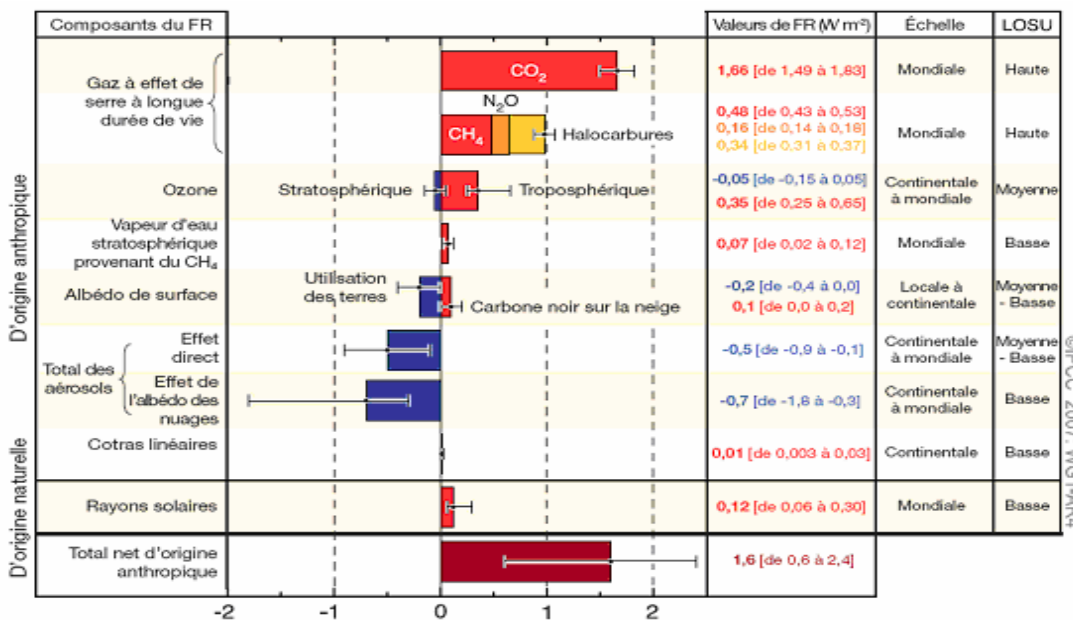


Figure 4 : Composantes du forçage radiatif dans l'atmosphère, en Watts/m²

Ces forçages radiatifs sont des estimations moyennes pour l'ensemble du globe en 2005 par rapport à 1750 (ère préindustrielle) pour les principaux GES et aérosols; on indique aussi leur échelle spatiale et leur niveau de connaissance scientifique (LOSU). Notez que l'expression «Cotras linéaires» réfère aux traînées de condensation des avions.

Les plus grandes incertitudes entourent les émissions liées à l'utilisation des sols, aux processus biologiques et à l'identification des COV^{xxviii}. Malgré tout, les simulations climatiques utilisant ces estimations de forçage représentent assez bien la réalité observée, comme le montre la figure 5, qui intègre les résultats d'un ensemble de modèles^{ix}. On compare ici les précipitations annuelles observées (a) et simulées (b), pour la période 1980-1999. En fait, les simulations sur le passé récent servent souvent à tester la performance des modèles.

Source : GIEC, 2007

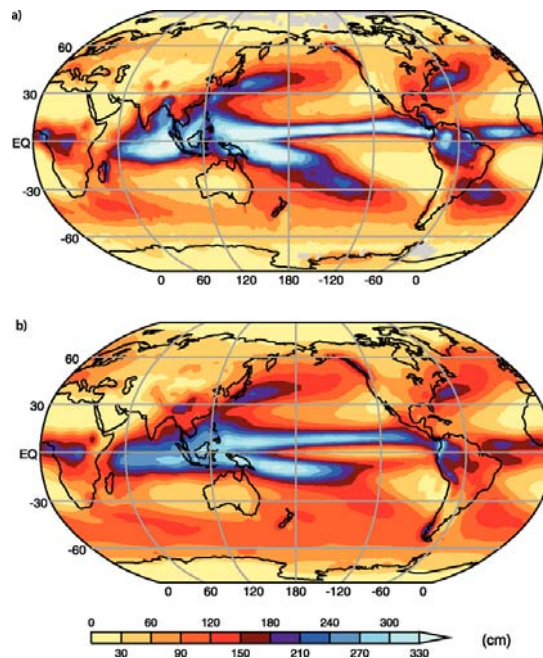


Figure 5 : Précipitations moyennes annuelles planétaires observées (a) et simulées (b), pour la période 1980 à 1999

Notez qu'à l'échelle de quelques centaines de kilomètres, les forçages radiatifs des GES peuvent être différents de ceux calculés pour l'ensemble du globe; ils résultent des émissions de sources ponctuelles et des rétroactions locales de changements climatiques. En fait, les effets globaux et locaux peuvent être de signes opposés, selon le type d'émission. Habituellement les émissions locales ont un effet plus prononcé sur le climat local^{xxvii}.

À l'opposé, il a été démontré que les aérosols et GES ayant une courte vie peuvent avoir des effets directs et indirects sur le climat bien loin de leur point d'émission, et même au-delà de la distance où ils sont transportés. Ce phénomène est plus important aux latitudes moyennes et dans l'axe est-ouest^{xxix xxxi}.

3.3 Émissions futures dans les simulateurs de climat

Si l'estimation des émissions actuelles comporte de grandes incertitudes, alors celle des futures émissions l'est d'autant plus qu'on lui ajoute des hypothèses de développement démographique, technologique, économique et politique. Six scénarios de développement ont été retenus depuis 2000^{xxx}. Le «*Special Report on Emission Scenario*» (SRES) a été élaboré pour l'ensemble du globe jusqu'en 2100^{xxvi}. Les projections climatiques fournies par le GIEC intègrent donc un de ces 6 scénarios d'émission tels qu'illustrés sur la figure 6 (en Gigatonnes 10^9 ou en Teratonnes 10^{12}). Notez que le scénario IS92a a

été réalisé dans les années '90 et est jugé aujourd'hui non réaliste en regard au SO₂; il est rapporté ici à titre indicatif.

Source : IPCC, 2007

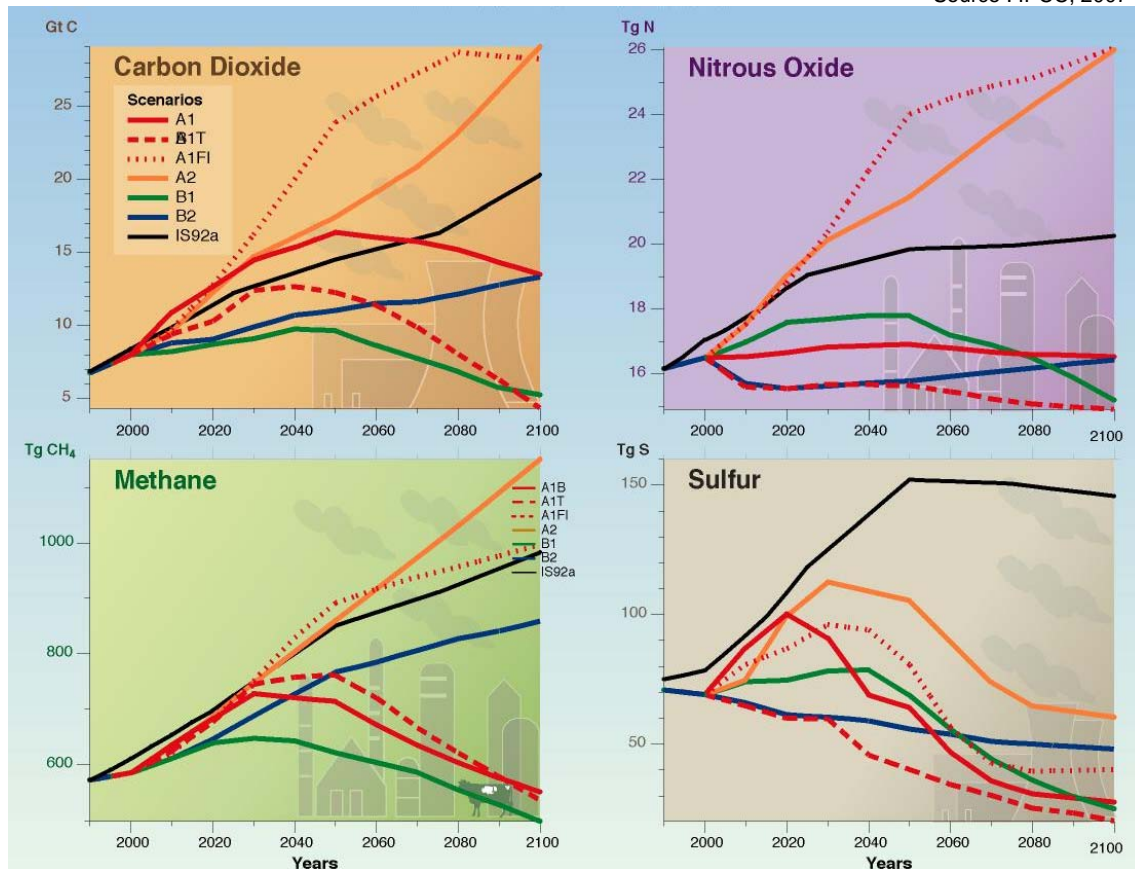


Figure 6 : Émissions anthropogéniques de CO₂, CH₄, N₂O et SO₂ pour les 6 scénarios SRES

Parmi ces scénarios, l'A2 est le plus utilisé; il est considéré pessimisteⁱ. Toutefois, depuis sa conception en 2000, les émissions observées ont dépassé cette prévision^{xxxii}.

3.4 Modèles de circulation générale (MCG)

Afin d'évaluer l'effet des polluants émis dans l'atmosphère, on utilise des modèles de circulation générale (MCG). Ce sont des simulateurs du climat en 3D. Ils intègrent les forçages radiatifs observés jusqu'en 2000 et pour la suite, les scénarios d'émissions ci-haut présentés sont utilisés.

Les MCG sont basés sur les lois physico-chimiques qui régissent l'atmosphère, l'océan, la glace, le sol et la végétation; ils calculent pour le passé, le présent et le futur, sur l'ensemble du globe, tous les paramètres hydrométéorologiques impliqués, et ce, à différentes altitudes et profondeurs. Les résultats sont disponibles à une fréquence quotidienne (au moins); leur résolution spatiale est de l'ordre de 300 km.

Notez que les MCG sont des modèles climatiques, par opposition aux modèles de prévisions météorologiques. Ils ne sont pas alimentés par des observations météorologiques; ils ne sont pas conçus pour établir la météo d'une date en particulier; ils sont adéquats pour produire des statistiques à long terme. On choisit habituellement des horizons de 30 ans afin de distinguer le signal de changement climatique de la variabilité inter annuelle du climatⁱⁱⁱ.

Le comportement du système planétaire contient une partie chaotique (aléatoire, non prévisible); c'est pourquoi il existe une multitude d'états plausibles pour la planète à un instant donné; en variant

légèrement les conditions initiales d'un modèle, on simule un de ces états. Voilà pourquoi il est recommandé d'utiliser plusieurs simulations pour produire le plus grand éventail de futurs possibles dans laquelle le vrai futur se retrouvera. De plus, chacun des modèles comporte des approximations qui génèrent des biais et des erreurs. Il est donc prescrit d'utiliser plusieurs modèles : La moyenne de l'ensemble est plus juste que chacun des modèles pris séparément. L'étendue des réponses individuelles autour de cette moyenne qualifie l'incertitude de la projection moyenne.

Le graphique de la figure 7 illustre l'évolution de la température moyenne planétaire selon différents scénarios d'émissions de GES (A2, A1b et B1) par rapport à la moyenne de 1980-1999. L'ombre entourant les résultats moyens, associés à chaque scénario d'émission, est la plage de réponses (incertitude) générée par les différents modèles.

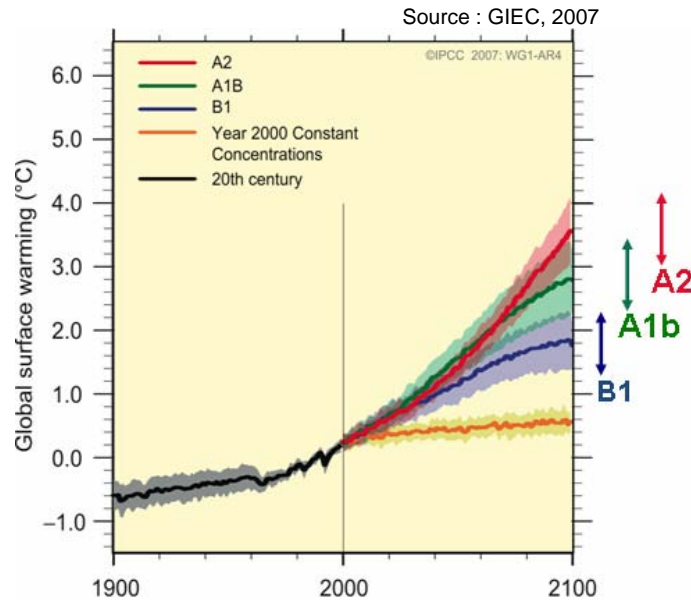


Figure 7 : Évolution du réchauffement global, selon différents scénarios d'émission

Outre les incertitudes des modèles, il faut tenir compte de celles des scénarios d'émission. Dans les deux cas, plus on s'éloigne du présent, plus elles sont prononcées. En somme, en 2100, le réchauffement global se situerait entre 1,4 et 4°C par rapport à la dernière décennie du 20^e siècle. Notez que sur la figure 7, le scénario représentant un niveau constant de GES (concentrations de l'an 2000) n'est pas réaliste; il est présenté ici pour montrer l'inertie du système planétaire et la persistance de certains GES. Autrement dit, même si les émissions cessaient d'augmenter, le climat continuerait à se réchauffer.

Les projections produites avec des MCG sont nombreuses. Malgré leur résolution grossière, elles fournissent une indication robuste de l'étendue possible du signal de changement climatique. Pour la température, les résultats sont considérés très fiables.

3.5 Modèles régionaux de climat (MRC)

Dans leur formulation, les modèles régionaux de climat (MRC) sont semblables aux MCG, mais avec une résolution beaucoup plus fine (50 km ou moins). Les MRC sont des outils plus adaptés aux études d'impact dont les enjeux sont plutôt locaux; ils sont également plus performants sur les phénomènes extrêmes ou de fine échelle temporelle^{xxxii}. Ils peuvent mieux tenir compte des inhomogénéités de la surface (types et utilisations du sol, topographie)^{xxxiii}.

Étant donné leur résolution, ils demandent une grande capacité informatique de calcul. Or, pour produire les résultats dans un délai raisonnable, leur domaine de simulation est réduit à une portion du globe. Afin de conserver la cohérence avec la météo du reste de la planète, ce domaine est connecté au pourtour à

un MCG, appelé «pilote». Notez que les MRC actuels sont alimentés par le pilote, mais ne sont pas conçus pour lui retourner une réponse^{xxxiii}.

Les MRC ajoutent donc des détails plausibles aux projections de MCG. Toutefois, les MRC héritent également des défauts (biais) de leur pilote. Ainsi, les détails supplémentaires fournis par les MRC ne doivent pas être considérés comme une augmentation de la précision des simulations^{xxxii}.

Les simulations de MRC sont moins nombreuses et variées que celles des MCG. Ouranos dispose d'une trentaine de simulations couvrant le Québec sur les périodes 1961-2000 et 2041-2070. Plus de la moitié provient de la 4^e version du Modèle Régional de Climat Canadien (MRCC4)^{xxxiv xxxv} piloté avec le MCG canadien, le CGCM3^{xxxvi}. Ces simulations intègrent le scénario d'émission A2. Le MRCC4 produit plus de 200 variables, à une résolution spatiale de 45 km et une résolution temporelle de 3h, 6h ou 24h.

3.6 Changements climatiques anticipés sur le Québec

3.6.1 Températures et précipitations

Les températures influencent le transport et la dispersion des polluants; elles agissent aussi sur les réactions chimiques entre les constituants de l'atmosphère. Les précipitations, quant à elles, interviennent dans la formation, le transport et le dépôt des aérosols. Elles conditionnent également le processus de décomposition (émission de méthane) et agissent sur la croissance de la végétation qui émet/absorbe certains GES et produit des allergènes (pollens, spores).

Pour les températures et les précipitations, les cartes de la figure 8 mettent en parallèle les moyennes historiques (1961-1990) et futures (2041-2070) au Québec^{xxxvii}. Les saisons hiver et été sont présentées. Les cartes du passé sont issues d'observations interpolées sur grille^{xxxviii}. Celles de l'horizon 2050 reprennent ces observations auxquelles est appliqué le changement climatique moyen tiré de 17 projections du MRCC4. Dans le cas des températures, ce changement moyen est la différence entre les simulations du passées et celles du futur ; on l'additionne ensuite aux observations. Pour les précipitations, le changement entre les deux périodes est plutôt un ratio, afin d'éviter des résultats négatifs; on multiplie ensuite les observations par ce ratio. Cette approche, appelée «méthode des deltas», a l'avantage d'annuler une partie des biais du modèle.

L'analyse de la figure 8 montre que les températures futures formeront toujours un gradient sud/nord. Les précipitations resteront plus abondantes dans le sud. Le climat futur semble être simplement un décalage spatial du climat passé vers le nord. Toutefois, en y regardant de plus près, les changements ne se répartissent pas nécessairement selon ce gradient et pas uniformément durant l'année. Par exemple, les changements de température et de précipitation les plus forts se produiront dans le nord du Québec, l'hiver. Le tableau 1 met davantage en évidence ces disparités saisonnières et régionales.

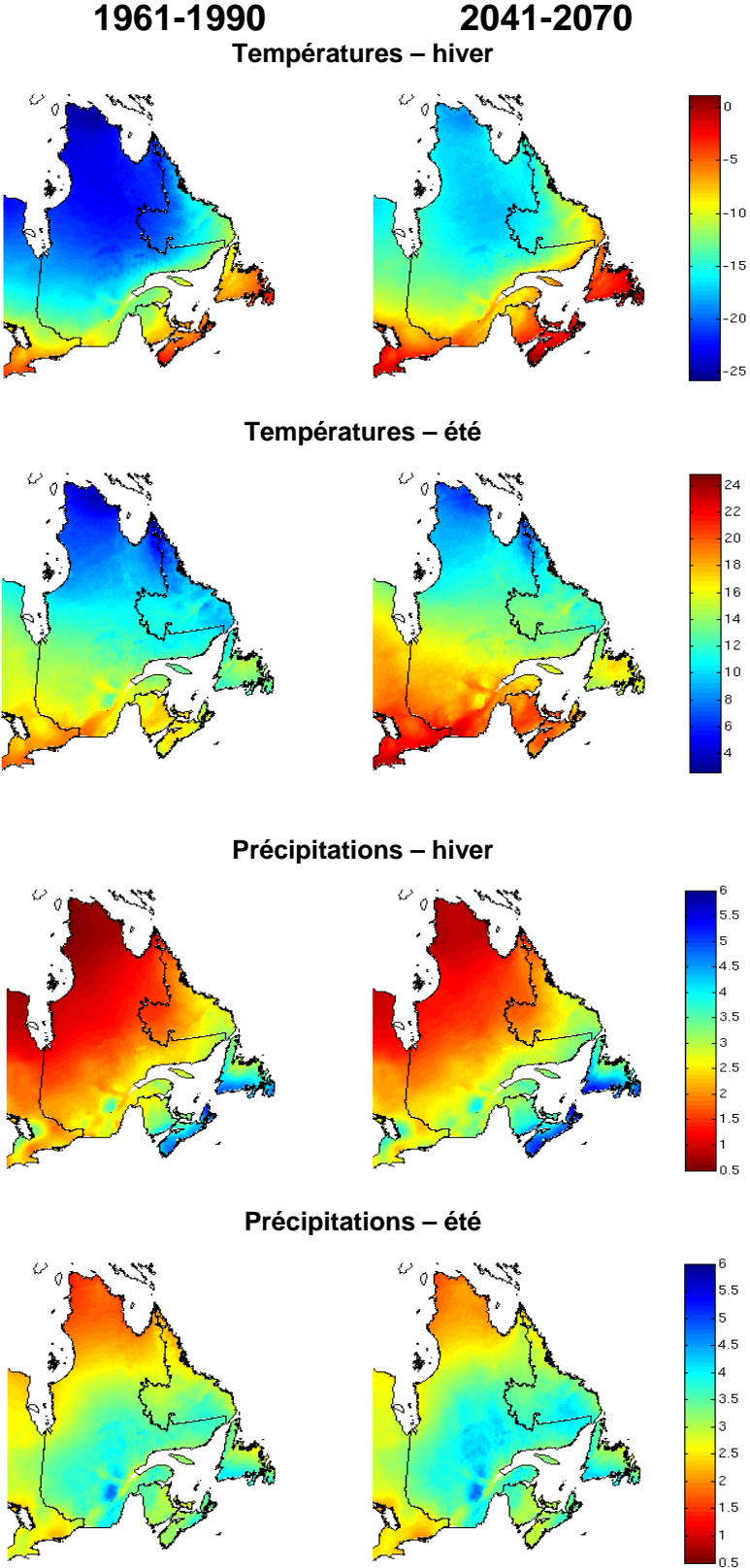


Figure 8 : Températures et précipitations moyennes estivales et hivernales sur le Québec pour le passé (1961-1990) et le futur (2041-2070)

Au tableau 1, les changements de température et de précipitation sont calculés pour 4 saisons, sur 3 horizons par rapport à la période 1961-1990, à partir de la moyenne de 126 simulations de MCG (20 modèles, plusieurs conditions initiales, et 3 scénarios d'émission: A1b, A2, B1)^{xxxvii}. Pour réaliser ces calculs, le Québec a été divisé en 4 grandes zones (voir figure 9) : nord, centre, maritime et sud.

Source : Ouranos, 2010

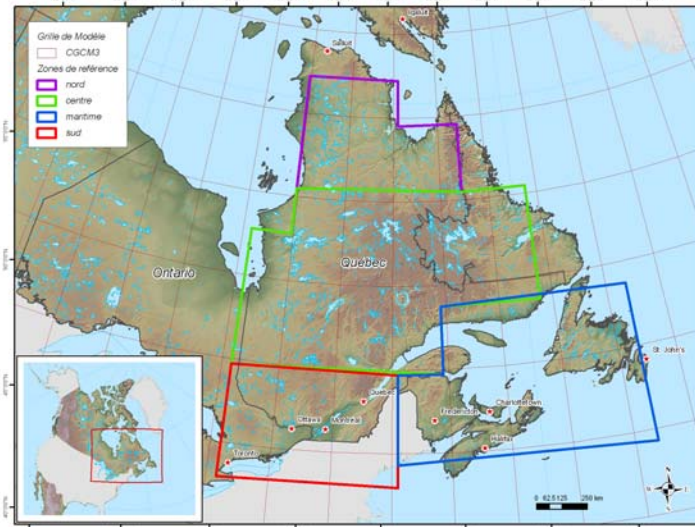


Figure 9 : Zones climatique du Québec ayant servi aux calculs du tableau 1

Source : Ouranos, 2010

Nord				
Saison	Variable	Changement		
		Horizon 2020	Horizon 2050	Horizon 2080
Hiver	Température	2,4 à 4,0 °C	4,5 à 6,5 °C	5,8 à 9,5 °C
	Précipitation	6,2 à 17,90 %	16,8 à 29,4 %	24,0 à 43,8 %
Printemps	Température	1,1 à 1,9 °C	1,9 à 3,3 °C	2,8 à 5,4 °C
	Précipitation	2,2 à 11,8 %	6,3 à 19,0 %	12,1 à 29,4 %
Été	Température	0,9 à 1,7 °C	1,6 à 2,8 °C	2,1 à 3,6 °C
	Précipitation	1,6 à 8,2 %	3,0 à 12,1 %	5,8 à 17,9 %
Automne	Température	1,2 à 2,3 °C	2,3 à 3,7 °C	2,8 à 4,6 °C
	Précipitation	5,5 à 12,0 %	9,8 à 20,1 %	16,2 à 29,5 %
Centre				
Saison	Variable	Changement		
		Horizon 2020	Horizon 2050	Horizon 2080
Hiver	Température	1,8 à 2,9 °C	3,5 à 4,9 °C	4,5 à 7,1 °C
	Précipitation	5,6 à 14,3 %	12,0 à 22,9 %	19,7 à 35,5 %
Printemps	Température	1,0 à 1,7 °C	1,8 à 3,0 °C	2,4 à 4,7 °C
	Précipitation	3,6 à 9,6 %	7,0 à 14,3 %	12,6 à 26,0 %
Été	Température	0,9 à 1,8 °C	1,8 à 3,0 °C	2,3 à 4,1 °C
	Précipitation	0,4 à 5,2 %	1,1 à 6,9 %	3,4 à 9,3 %
Automne	Température	1,1 à 2,0 °C	2,1 à 3,2 °C	2,6 à 4,3 °C
	Précipitation	1,5 à 7,6 %	4,5 à 13,1 %	9,7 à 18,5 %

Tableau 1 : Changements saisonniers moyens de température et de précipitation, calculés à partir de MCG, pour 4 régions du Québec, sur trois périodes futures, par rapport au climat de 1961-1990

Maritime				
Saison	Variable	Changements		
		Horizon 2020	Horizon 2050	Horizon 2080
Hiver	Température	1,4 à 2,2 °C	2,5 à 3,8 °C	3,4 à 5,0 °C
	Précipitation	2,8 à 9,7 %	6,5 à 15,4 %	12,6 à 22,9 %
Printemps	Température	0,8 à 1,5 °C	1,6 à 2,7 °C	2,2 à 4,1 °C
	Précipitation	0,3 à 8,1 %	3,1 à 11,5 %	8,8 à 18,5 %
Été	Température	0,9 à 1,6 °C	1,7 à 2,7 °C	2,2 à 3,8 °C
	Précipitation	-1,9 à 5,2 %	-1,4 à 5,7 %	-4,0 à 7,1 %
Automne	Température	1,1 à 1,6 °C	1,9 à 2,8 °C	2,3 à 4,1 °C
	Précipitation	-2,8 à 3,6 %	-2,0 à 7,1 %	-0,9 à 10,1 %
Sud				
Saison	Variable	Changements		
		Horizon 2020	Horizon 2050	Horizon 2080
Hiver	Température	1,3 à 2,3 °C	2,5 à 3,8 °C	3,6 à 5,7 °C
	Précipitation	3,7 à 11,1 %	8,6 à 18,1 %	14,5 à 27,6 %
Printemps	Température	1,0 à 1,7 °C	1,9 à 3,0 °C	2,7 à 4,3 °C
	Précipitation	2,0 à 8,6 %	4,4 à 13,1 %	8,9 à 22,2 %
Été	Température	1,1 à 1,7 °C	1,9 à 3,0 °C	2,6 à 4,4 °C
	Précipitation	-1,5 à 4,4 %	-1,8 à 5,4 %	-4,9 à 6,0 %
Automne	Température	1,2 à 1,9 °C	2,0 à 3,1 °C	2,7 à 4,5 °C
	Précipitation	-2,7 à 3,6 %	-0,7 à 7,7 %	0,4 à 12,8 %

Tableau 1 (suite)

Les données du tableau 1 indiquent que les températures augmenteront au fil du temps sur l'ensemble du territoire, mais le nord connaîtra les hausses les plus fortes. En été, c'est le sud qui se réchauffe le plus. Partout, les augmentations de température seront plus fortes l'hiver que l'été. Pour les précipitations, les régions nordiques connaîtront des changements plus prononcés, en particulier l'hiver. Les précipitations en été, dans le sud et sur les maritimes, indiquent peu ou pas de changement. Les régions côtières montrent des changements modérés en toutes saisons. Le printemps et l'automne présentent des changements intermédiaires entre ceux de l'hiver et de l'été.

Cette répartition des changements climatiques s'explique par le fait que la vapeur d'eau est un GES très efficace. Or, dans les régions où l'humidité est déjà très présente, l'effet de serre est déjà grand et l'ajout de CO₂ produira un effet relatif faible; alors que dans les régions froides et/ou sèches (ex : régions polaires ou en altitude), une légère augmentation de GES a un grand impact sur l'effet de serre local^{ix}. Le couvert de neige et de glace, dont la durée et l'étendue diminueront dans le futur (voir section 3.6.3), ont également une influence capitale sur les changements de température anticipés aux latitudes moyennes. En effet, en diminuant l'albédo au sol (la réflexion causée par la neige/glace), on capte davantage d'énergie solaire.

Le tableau 1 montre également que l'incertitude sur les projections augmente avec le temps. Les incertitudes sont plus grandes sur les précipitations que sur les températures. Les changements de températures hivernales sont moins certains que ceux d'été ; sur les précipitations, le contraire est observé. Les projections sont plus fiables dans le nord que dans le sud, sauf pour les températures d'été.

Outre les quantités totales de précipitations, leurs fréquences, durées et intensités changeront dans le futur. Le tableau 2 donne une indication sur ce dernier aspect : l'augmentation moyenne saisonnière des quantités maximales de précipitations quotidiennes. Les résultats (ratios entre la période de référence et la période future) proviennent de 7 simulations régionales^{xxxix} appliquées sur les régions socio-sanitaires du Québec. Un ratio de «1,3» indique par exemple une augmentation projetée de 30 % des quantités de précipitation maximales sur 24h. Les résultats en gras sont considérés plus robustes car ils ont dépassé la fourchette de réponses (incertitude) des 7 simulations.

	Hiver	Printemps	Été	Automne
Bas-Saint-Laurent	1,13	0,98	1,00	1,04
Saguenay–Lac-Saint-Jean	1,33	1,06	1,18	1,05
Capitale-Nationale	1,26	1,03	1,02	1,07
Mauricie et Centre du Qc	1,29	1,03	1,02	1,19
Estrie	1,07	1,05	1,00	1,13
Montréal et Laval	1,22	1,02	1,03	1,12
Outaouais	1,01	1,02	0,96	1,18
Abitibi-Temiscamingue	1,10	1,14	1,08	1,12
Côte-Nord	1,26	0,96	0,99	1,06
Nord-du-Québec	1,17	1,20	1,28	1,03
Gaspésie	1,13	0,97	0,93	1,02
Chaudière-Appalaches	1,22	1,02	0,98	1,13
Lanaudière	1,21	0,95	1,04	1,14
Laurentides	1,12	1,01	1,01	1,13
Montréal	1,25	1,08	1,02	1,19
Nunavik	1,12	1,01	1,20	1,10
Terres-Criées-de-la-Baie-James	1,21	1,19	1,14	1,09

Tableau 2: Changement des précipitations maximales sur 24h, par région et par saison, en 2010-2039 par rapport à 1961-1990 (ratio futur/passé)

Note : Les Îles-de-la-Madeleine ne sont pas perçues par le modèle et ne sont pas incluses dans la région gaspésienne.

Le tableau 2 permet d'anticiper davantage de tempêtes l'hiver. Dans la littérature, on confirme une augmentation de la fréquence des précipitations extrêmes pour le milieu du 21^e siècle sur le sud du Québec^{xl}. Or, les tempêtes d'hiver et les coupures de courant qu'elles provoquent, incitent à utiliser le chauffage au bois, une source notoire de particules, CO, HAP, NO_x et de COV. Le meilleur exemple est la tempête de verglas dans la région de Montréal en 1998, où les concentrations de particules fines ont dépassé par un facteur 2 à 3 le seuil acceptable^{lxxxii}.

3.6.2 Vents

Le vent est un paramètre important à considérer dans le transport et la dispersion des polluants. Or, les changements anticipés sur les vents sont mal connus pour 2 raisons : 1) la résolution actuelle des modèles de simulation ne permet pas de bien représenter ce paramètre qui est relié aux conditions de surface locales; 2) les mesures sur le vent sont peu répandues et souvent instantanées ce qui ne permet pas de valider les sorties des modèles. Les résultats du MRCC4, pour les vents moyens et maximum ne montrent pas ou peu de changement (moins de 5 %) sur l'horizon 2010-2039, et ce, quelles que soient la saison et la région^{xxxix}. La réalité locale pourrait être tout autre.

En effet, certaines études annoncent une migration des trajectoires de tempête tropicales vers le nord : les vitesses maximales des vents pourraient changer aux latitudes moyennes^{xi}, en particulier dans sud du Canada. Par contre, globalement, les vents moyens diminueraient car les pôles se réchaufferont davantage que l'équateur, ce qui diminue le gradient de température entre les deux et par conséquent l'intensité des vents^{xli}.

Par les observations au cours du 20^e siècle, aucune tendance significative du vent n'a été décelée. Dans le golfe du Saint-Laurent, sur la période de 1953 à 2002, on note une légère baisse de la vitesse moyenne des vents, des extrêmes et de la variabilité^{xlii xliii}.

3.6.3 Couvert de neige

Des hivers plus courts, moins froids, avec davantage de redoux et d'épisodes de pluie sont à prévoir avec le réchauffement climatique. Le couvert de neige en sera affecté. Ce paramètre influence les quantités de poussières dans l'air ambiant en hiver; en effet, la neige au sol retient les particules jusqu'à la fonte au printemps. La figure 10 montre le changement moyen de la quantité de neige au sol en mars pour la période 2041-2070 par rapport à 1961-1990, tiré de 5 simulations régionales du MRCC4^{xxxvii}.

Source : Ouranos, 2010

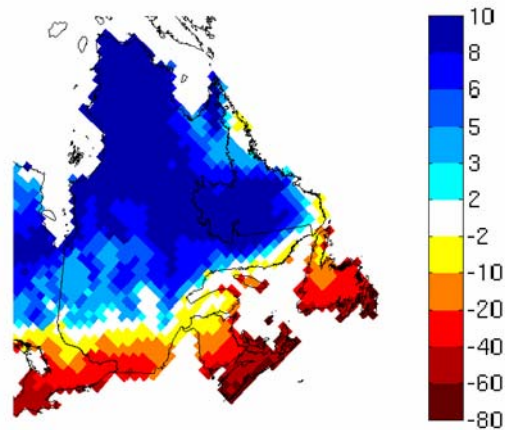


Figure 10 : Changement moyen du couvert de neige en mars sur le Québec (%)

Dans le sud de la province, la neige au sol en mars diminuera (environ -40 %). On s'attend ainsi à ce que les poussières soient libérées de la neige plus tôt au printemps dans le sud. Dans le nord, malgré le fort réchauffement prévu, le climat de mars restera assez froid pour que l'augmentation des précipitations (voir section 3.6.1) se traduise par une plus grande quantité de neige au sol (+10 %).

3.6.4 Humidité des sols

Les augmentations anticipées de température favoriseront une hausse de l'évaporation, ce qui diminuera l'humidité dans le sol, surtout aux endroits où les changements de précipitation sont faibles ou à la baisse. Les sécheresses sont sources de poussières par érosion éolienne. Les feux de forêt, qui détériorent aussi la qualité de l'air, pourraient être influencés par la sécheresse des sols. La décomposition organique, émettrice de méthane, serait également affectée par ce changement d'humidité dans le sol.

L'indice de sécheresse canadien^{xliv} (ISC) est une estimation empirique de la teneur moyenne en eau des sols forestiers. L'ISC, sans unité, est calculé à partir du cumul des températures et des précipitations quotidiennes, du 1^{er} avril au 31 octobre. La carte « a » de la figure 11 présente l'ISC de la période de référence (1971-2000), calculé sur la base des données quotidiennes, interpolées sur une grille régulière de 10 km de résolution, générées par le Service National d'Information sur les Terres et les Eaux^{xxxviii}. La carte « b » indique le changement moyen de l'ISC en 2041-2070, tiré de 18 simulations régionales^{xlv}.

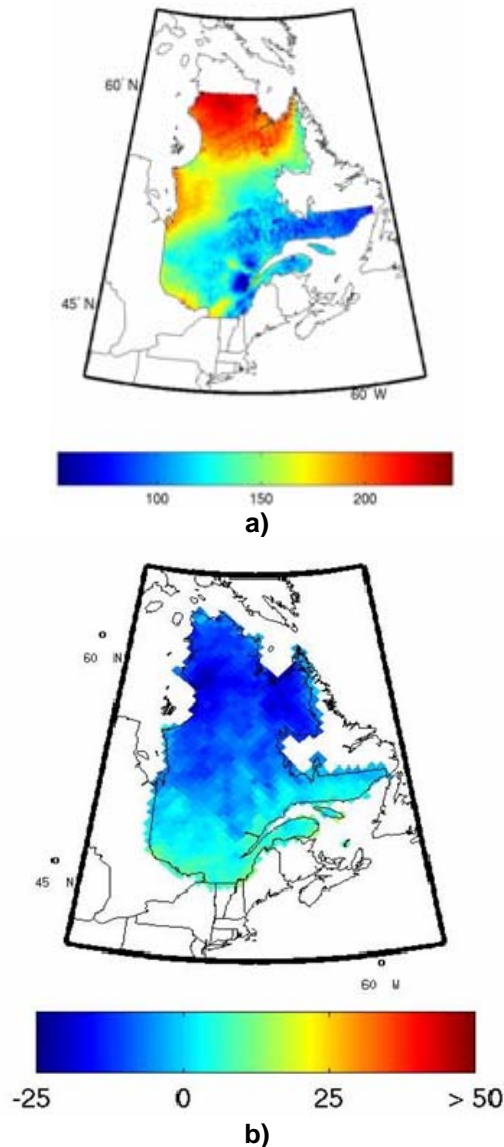


Figure 11 : Indice de sécheresse canadien pour la période 1971-2000 (a) et changement projeté de l'ISC pour la période 2041-2070 (b)

Les valeurs passées de l'ISC varient de 0 (très faibles) dans l'est de la province, jusqu'à plus de 400 (conditions extrêmement sèches) dans le nord. Au Québec, les valeurs couramment observées pour la saison de feu (avril à octobre) sont de 80 à 160 unités; le Québec se situe parmi les régions les plus sèches du Canada^{xlv}.

Selon la moyenne des 18 simulations régionales, le changement de l'ISC suivra un gradient nord-sud: une diminution au nord (-20 unités), et une augmentation au sud (environ 15 unités). Notez que le changement ne sera pas uniforme durant la saison de feu. Les maximums se produiraient en juillet et août^{xlv}.

En somme, les résultats indiquent un faible changement de l'humidité dans le sol et des feux de forêt pour le Québec. D'autres études avancent que les émissions issues des incendies de forêt augmenteront à l'échelle planétaire^{xi}.

3.6.5 Radiation solaire incidente

La radiation solaire incidente intervient dans les processus photochimiques de l'atmosphère. Elle gouverne en particulier la formation de l'ozone. Voici les changements appréhendés pour le Québec au milieu du 21^e siècle (2041-2070) par rapport au passé récent (1961-90). Sur la figure 12, la médiane de 12 simulations de MCG est présentée pour les quatre saisons et pour 2 régions de la province : le sud (sous le 49^e parallèle) et le nord (au dessus du 52^e parallèle). Le changement est exprimé en pourcentage. Une valeur inférieure à 0 signifie une diminution globale de la radiation solaire reçue au sol ou encore une augmentation de l'enneuagement moyen.

Source : Ouranos, 2009

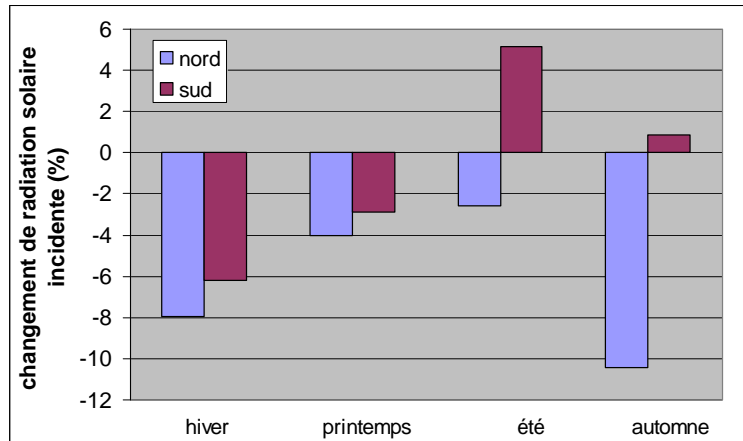


Figure 12 : Changement saisonnier médian de radiation solaire incidente entre 1961-1990 et 2041-2070, pour le nord et le sud du Québec, simulé avec 12 MCG

La figure 12 montre des changements modestes dans le sud Québec en toute saison ($\leq -6\%$). L'enneuagement l'été et l'automne serait en diminution; ce constat est cohérent avec les précipitations prévues (voir section 3.6.1). On peut ainsi s'attendre à un assèchement des sols et un accroissement des particules en suspension. De plus, la production d'ozone troposphérique serait favorisée. Dans le nord, l'automne et l'hiver indiquent une diminution de l'ensoleillement en toutes saisons (-3 à -10 %), concordant également avec les augmentations de précipitation annoncées.

Les résultats de la figure 12 ne sont pas très prononcés et robustes compte-tenu de l'incertitude sur les simulations (non illustrée), mais ils sont en accord avec d'autres études^{xi xivi}.

3.6.6 Vapeur d'eau dans l'atmosphère

La vapeur d'eau, en plus d'être un GES notoire, est l'ingrédient de base à la formation des nuages qui agissent aussi directement sur le bilan radiatif terrestre. L'eau gazeuse participe également à plusieurs réactions chimiques impliquées dans la qualité de l'air. Par exemple, l'augmentation de la vapeur d'eau favorise la destruction de l'ozone. La vapeur d'eau et la température déterminent la vitesse des réactions avec le radical hydroxyle ; ce dernier oxyde le CH₄ ce qui augmente la production d'aérosols^{xi}. L'humidité contribue évidemment à la croissance des végétaux qui eux-mêmes peuvent être des sources de polluants (COV) ou d'allergènes (pollen, champignons, spores)^{xvii}.

Une étude^{xxxix} impliquant 7 simulations du MRCC4, sur 1961-1990 et 2010-2039, a montré que la vapeur d'eau augmentera dans l'atmosphère, pour toutes les régions du Québec, en toute saison (voir tableau 3). Notez que ces résultats sont des ratios (futur/passé) exprimés en pourcentage. Donc, la même augmentation absolue de vapeur d'eau dans un climat de référence sec, par exemple au Nunavik, conduit à une réponse relative plus élevée que dans un climat plus humide, comme dans le sud du Québec.

Régions socio-sanitaires	Hiver	Printemps	Été	Automne
Bas Saint-Laurent	20,3	16,8	10,2	11,8
Saguenay - Lac-St-Jean	20,0	16,5	10,5	13,2
Capitale Nationale	19,2	17,8	10,8	13,0
Mauricie et Centre du Québec	18,6	17,4	10,5	12,0
Estrie	17,7	17,9	10,7	11,5
Montréal et Laval	18,6	17,2	10,9	10,9
Outaouais	18,4	17,3	10,7	10,6
Abitibi - Témiscamingue	21,9	16,6	10,8	12,6
Côte-Nord	21,5	16,4	9,6	12,7
Nord-du-Québec	30,5	17,1	9,1	14,8
Gaspésie	19,6	15,7	9,4	11,8
Chaudière-Appalaches	19,2	16,6	10,6	11,6
Lanaudière	18,8	16,6	10,8	10,9
Laurentides	18,4	18,2	10,3	10,9
Montérégie	17,0	17,9	10,8	10,9
Nunavik	37,3	13,3	8,3	17,0
Terres-Cries-de-la-Baie-James	20,0	13,3	8,6	11,5

Tableau 3: Augmentation de l'humidité spécifique (%) entre 1961-1990 et 2010-2039 pour les régions socio-sanitaires du Québec

Voir note du tableau 2 pour les Îles-de-la-Madeleine

Les augmentations relatives sont plus fortes l'hiver, en particulier dans le nord. Les augmentations l'été tournent autour de 10 % partout. Ces résultats sont robustes et confirmés dans la littérature^{xi}.

Notez que les modèles de simulation ne montrent aucun changement dans le futur sur l'humidité relative. Contrairement à l'humidité spécifique, qui quantifie l'eau dans l'air, l'humidité relative mesure la capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau. Cette capacité croît avec la température. Dans le contexte des changements climatiques, la température et le contenu en eau de l'air augmenteront, alors le rapport à la saturation (humidité relative) demeurera inchangé.

3.6.7 Saison de croissance

L'augmentation des températures dans le futur, entraînera un allongement de la saison de croissance : elle commencera plus tôt au printemps et se terminera plus tard à l'automne. Ce phénomène est déjà commencé et on constate ses effets : le taux de croissance ainsi que la biomasse des végétaux augmentent^{xiv}. La durée de la saison de croissance a des conséquences sur les gaz émis et captés par la photosynthèse et sur la production des pollens.

La carte « a » de la figure 13 illustre la durée de la saison de croissance observée sur la période 1971-2000. Les températures moyennes quotidiennes interpolées sur grille à 10km, du Service National d'Information sur les Terres et les Eaux^{xxxviii}, ont servi aux calculs. Selon la définition du ministère des Ressources Naturelles du Canada, la saison de croissance débute lorsque la température est égale ou supérieure à 5°C pendant 5 jours consécutifs à partir du 1^{er} mars; elle se termine quand la température quotidienne moyenne est inférieure à -2°C à partir du 1^{er} août.

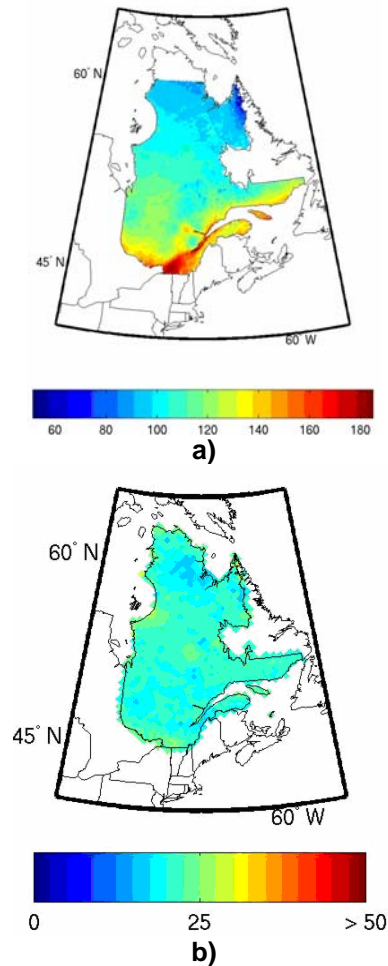


Figure 13 : Durée de la saison de croissance, en jours, observée pour la période 1971-2000 (a) et changement projeté pour 2041-2070 (b)

Sur la figure 13 b, le changement moyen de la longueur de croissance en 2041-2070 a été calculé à partir de 18 simulations régionales^{xiv}. Ainsi, pour le milieu du 21^e siècle, l'augmentation médiane projetée est d'environ 25 jours/an, pour tout le territoire du Québec. L'augmentation de la saison de croissance se fera surtout au printemps (non illustré).

3.6.8 Canicules

Les canicules sont propices à la formation d'ozone car elles sont associées à des températures élevées et à des vents faibles. La simultanéité des canicules avec les épisodes de pollution occasionnent des décès. Le meilleur exemple en est l'épisode de l'été 2003 sur l'Europe de l'ouest où l'excès de mortalité a été estimé à 30 000 personnes^{xvii}.

Selon une étude récente, les canicules au sud du Québec s'intensifieront dans le futur, en durée et en fréquence. Pour la période 2010-2039, par rapport à 1961-1990, avec 7 simulations du MRCC4, on prévoit, jusqu'à 2 canicules de plus par été^{xxxix}. Pour l'horizon 2050, les simulations du MRCC4 annoncent jusqu'à 3 canicules estivales à Montréal^{xlviii}. Les canicules sont définies par l'occurrence simultanée et la persistance de valeurs extrêmes la nuit et le jour: T_{min} >20°C et T_{max} >33°C, pendant au moins 3 jours consécutifs.

Il a également été démontré que les extrêmes chauds des températures maximales le jour augmentent davantage que les extrêmes chauds la nuit^{xlviii}. Ceci pourrait favoriser davantage la formation d'ozone produite grâce à la radiation solaire.

Les îlots de chaleur urbains aggraveraient localement les canicules. Par exemple, une étude pour la région de Montréal, basée sur 11 MCG, a montré que les îlots de chaleur augmenteront en intensité et en surface dans le futurⁱⁱ (figure 14).

Source Beaudoin et al., 2006

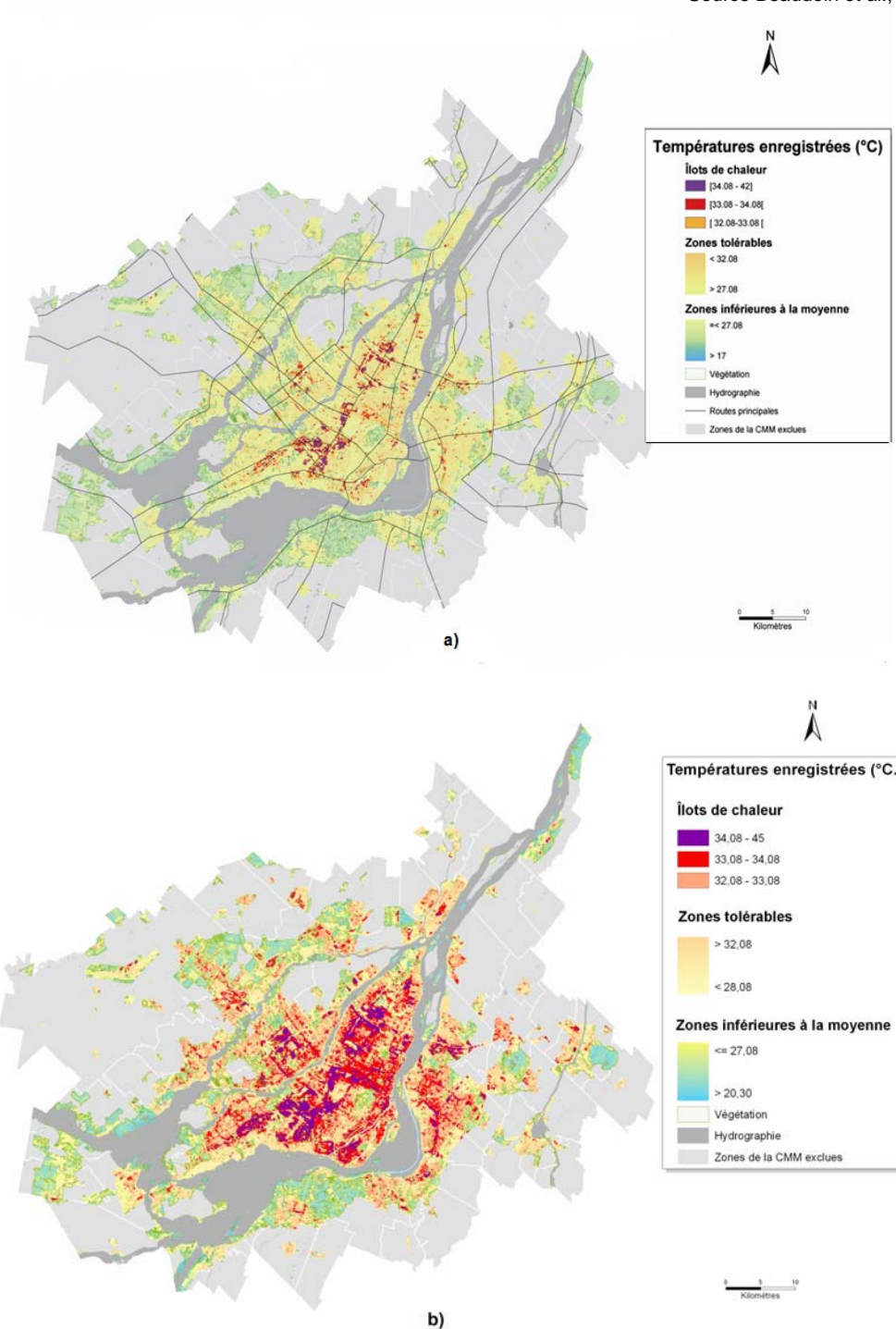


Figure 14 : Îlots de chaleur dans la Communauté Métropolitaine de Montréal en juin 2005 (a) et îlots de chaleur vers la fin du 21e siècle, avec le scénario médian de 11 MCG (b)

4 Impact des changements climatiques sur la qualité de l'air

Les prochaines sections traitent des récentes tendances observées sur les concentrations de polluants et des émissions anticipées pour le futur.

4.1 Ozone troposphérique

On a mesuré la concentration d'ozone dans la troposphère depuis le début de l'ère industrielle; elle a augmenté de plus de 35 % à l'échelle du globe et atteint aujourd'hui une moyenne d'environ 50 ppb^{xi 1}. Les causes sont multiples : L'ozone est produit dans la troposphère par oxydation photochimique du CO, du CH₄ et des COV, en présence des NO_x, qui sont les principaux facteurs limitant^{li lxvi lxvii}. Or, ces émissions de précurseurs sont globalement en hausse en raison de pratiques agricoles plus intensives, de l'utilisation des carburants fossiles et de l'augmentation de la combustion de la biomasse^{ix}.

Les concentrations d'ozone peuvent être différentes d'un endroit à l'autre en raison des émissions locales de précurseurs. Ainsi, en Amérique du Nord, la tendance des dernières années est plutôt à la baisse, en raison des politiques de réduction des émissions de précurseurs à l'ozone, en particulier sur les oxydes d'azote, et les COV^{lxxxix}. La figure 15 montre l'évolution des concentrations maximales sur 8 heures aux États-Unis entre 1978 et 2009. On a extrait la médiane, la moyenne, les 10^e et 90^e percentiles de 173 sites de mesure. Les valeurs actuelles s'étendent de 0,06 à 0,09 ppm, selon l'endroit, avec une moyenne correspondant à la norme dictée par le « *Environmental Protection Agency* » (ligne en tirets noirs). Les concentrations maximales d'ozone sur 8 heures ont diminué d'environ 28% en 30 ans aux États-Unis^{lxxxix}.

Source : EPA, 2010

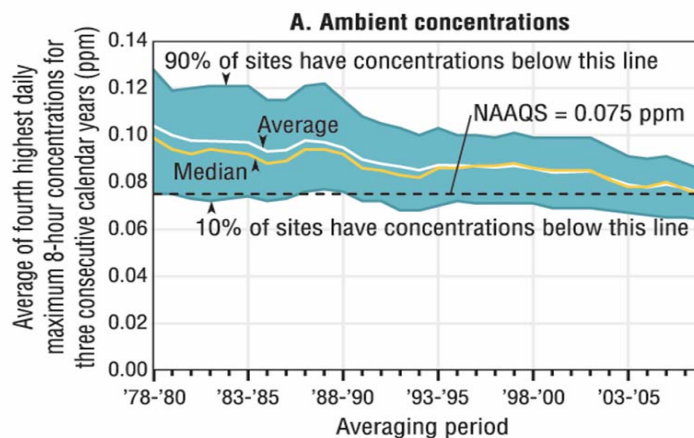


Figure 15: Évolution des concentrations maximales d'ozone au sol, sur 8 heures, aux États-Unis, entre 1978 et 2009

Le transport horizontal joue un rôle de premier plan dans les concentrations de surface. Par exemple, on attribue à l'Asie et à l'Amérique du Nord respectivement 10,9 % et 7,7 % des concentrations annuelles d'ozone mesurées en Europe. On note également une forte corrélation entre les phases de l'oscillation Nord-Atlantique (NAO) et l'ozone en Europe du nord^{lii}, et ce lien serait encore plus prononcé dans le futur^{xi}. El Niño, phénomène équivalent dans le Pacifique, expliquerait une partie de la variabilité de l'ozone au sol aux latitudes moyennes de l'hémisphère nord^{xi}.

Une autre explication de l'augmentation des niveaux de fond de l'ozone au sol est le refroidissement de la stratosphère dû aux émissions anthropiques de gaz halogénés comme les CFC. En effet, ces gaz détruisent l'ozone stratosphérique qui maintiennent normalement à cette altitude les températures à un niveau d'équilibre (autour de -38°C), en interceptant les UV solaires. Or, dans une stratosphère plus froide, la formation production d'ozone est également ralentie^{lxxxv}. Ainsi l'ozone entre 15 et 35 km d'altitude est réduite de 2 façons, ce qui permet aux rayons UV du soleil de pénétrer davantage jusqu'à la troposphère et d'y favoriser les réactions photochimiques qui produisent l'ozone troposphérique^l.

D'autres facteurs influenceraient à la hausse (▲) ou à la baisse (▼) les futures concentrations d'ozone :

- l'augmentation de la taille, du nombre et de l'intensité des îlots de chaleur urbains (▲)^{xvii liv. iv}.
- la diminution de la couverture nuageuse l'été dans le sud du Québec (voir section 3.6.5) (▲)^{xi}.
- L'usage de la climatisation par la hausse des températures (▲)^{viii}.
- la hausse de l'évaporation, asséchant les sols et favorisant les feux de forêt (▲)
- la hausse de la fréquence des éclairs qui génère des précurseurs à l'ozone. En effet, on anticipe que la zone d'orages fréquents migrera des tropiques vers les latitudes moyennes^{ix viii} (▲).
- dans les régions-sources de NO_x, la formation des nitrates particulaires qui bloque les UV et limite la production d'ozone dans la troposphère^{ix} (▼).
- la perte des forêts productrices de COV, précurseurs d'ozone^{ix} (▼)
- l'augmentation des dépôts secs qui sont des puits d'ozone troposphérique (▼)^{ix}.
- l'augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère qui réduit la durée de vie de l'ozone troposphérique^{liii ix} (▼).

Tous ces mécanismes sont complexes et non-linéaires. Alors, pour bien comprendre et anticiper les futures concentrations, des modèles tridimensionnels couplés de chimie et de transport sont nécessaires^{ix}. Dans le 4^e rapport du GIEC, on inventorie 25 modèles capables de simuler l'ozone troposphérique. Leurs résultats montrent des différences notables au niveau de l'estimation de la déposition et des flux entre la troposphère et la stratosphère^{ix xi}. Il semble que la contribution de cette dernière (basse stratosphère) soit le facteur déterminant dans la concentration de fond d'ozone troposphérique^{i liii}. Les changements dans la circulation à grande échelle expliqueraient les augmentations prévues sur l'Amérique du Nord^{xi}. Les autres facteurs explicatifs sont plus locaux et donc mal résolus par les modèles, il s'agit de la vapeur d'eau, de la vitesse du vent et de la hauteur de mélange^{lvi}.

Malgré leurs limites et leurs divergences, les modèles s'accordent sur certains constats : Les températures moyennes et extrêmes augmenteront, favorisant la production d'ozone troposphérique, en particulier dans le nord des États-Unis et en Europe^{viii li lvii}. Par exemple, durant la canicule mortelle d'août 2003 en Europe, bien que les températures extrêmes aient été la principale cause de décès, les niveaux d'ozone étaient anormalement élevés^{xv xi i.lxxxvi}. Ce genre d'événement exceptionnel aujourd'hui pourrait devenir commun vers 2040^{xi}.

Dans l'hémisphère nord, si la réglementation sur les émissions de précurseurs à l'ozone ne change pas, les modèles prévoient une augmentation des niveaux de fond de 5 ppb autour de 2025 par rapport à la période 1990-2000^{lviii}. Dans les prochaines décennies, pour les régions périurbaines, les concentrations d'ozone augmenteraient de 10 ppb durant les épisodes de pollution^{liii}.

Bien que les modèles actuels d'ozone troposphérique réussissent à décrire les principales caractéristiques de la distribution spatiale de l'ozone, leur capacité à reproduire les tendances actuelles est déficiente. Étant donné que la validité des modèles est basée sur leur capacité à bien représenter la réalité passée, il est donc nécessaire de résoudre au préalable cette faiblesse^{lix ix}. De plus, une étude américaine a montré que, pour le moment, le changement climatique avait beaucoup moins d'impact sur les concentrations d'ozone et de particules que le contrôle à la source des émissions régionales de SO₂ et de NO_x^{lv}.

4.2 Particules en suspension

La déforestation, les pratiques agricoles, l'incinération et l'augmentation de la consommation d'énergie changeront les émissions de particules à l'échelle mondiale; de même, les sécheresses anticipées favoriseront la remise en suspension de poussières; la hausse anticipée des feux de forêt émettrait des quantités accrues de particules de suie^{ix i xv vi}. Ainsi, dans le futur, les émissions directes (primaires) seront davantage en hausse que les émissions secondaires (ex : transformations des COV, SO₂, NO_x)^{xxiii}.

Le taux d'oxydation des COV et leur potentiel à former des particules, dépend de la température, de la pression partielle d'oxygène (qui varie avec l'altitude) et de l'abondance du radical OH. Des températures

plus élevées et une augmentation du CO₂ favoriseraient les émissions de COV biogéniques (ex : terpènes et isoprènes), précurseurs des aérosols organiques^{lxi lviix ix}. D'autres mécanismes mèneraient plutôt à une diminution de leurs concentrations (évaporation des COV semi-volatils)^{ix}. Les résultats des simulations sont particulièrement sensibles aux hypothèses entourant la formulation des processus physico-chimiques et aux inventaires d'émissions des polluants précurseurs comme les COV^{lxii}. Les concentrations de particules en milieu urbain, issues de sources anthropiques de COV, sont plus faciles à anticiper. Historiquement, elles ont augmenté avec la température^{lv}.

Les radicaux NO₃, issus de l'ozone et du NO₂, sont parmi les principaux oxydants de la troposphère^{ix}. Ils réagissent avec certains COV et participent à la conversion des NO_x pour conduire à la formation de plus de 50 % de l'acide nitrique (HNO₃) et des nitrates particulaires (NO₃⁻); ces derniers atteignent ensuite le sol par déposition sèche ou humide^{xviii}. Ces mêmes dépôts ont un effet fertilisant sur la végétation qui absorbe du CO₂, mais qui émet également des COV^{ix}.

Outre les particules secondaires à base d'azote, les composés soufrés (SO_x) contribuent de manière notable aux quantités de particules. Les sulfates issus des océans seraient en diminution dans le futur due à la disparition partielle du phytoplancton par le réchauffement climatique et les activités humaines^{xxv}. D'autres études affirment que la croissance du phytoplancton serait plutôt favorisée par les nutriments d'azote, de phosphore et de fer apportés par des particules provenant des continents^{ix}.

Il a été démontré que le changement climatique aura une influence sur la vitesse des réactions chimiques dans l'atmosphère. Ainsi, près des sources d'émission, la conversion accrue du SO₂ en sulfates est fort possible dans le futur^{lvii xx}. De même, les transformations des gaz azotés en acide nitrique ou en nitrates seraient accélérées dans un climat plus chaud^{lvii lix}.

Dans l'éventualité d'une augmentation des aérosols, la production de précipitation diminuerait. En effet, en augmentant le nombre de noyaux de condensation, on réduit la taille et le poids des gouttelettes qui, par conséquent, précipitent moins. En retour, une diminution de la précipitation augmente le temps de résidence des aérosols dans l'atmosphère, ce qui leur permet d'être transportés plus loin^{ix}. Le changement de régime des précipitations (fréquence, intensité, trajectoires des systèmes) aura un impact majeur sur les concentrations locales et régionales d'aérosols^{ix lviii vi}. De même, le changement des paramètres météorologiques dans le futur, comme la hauteur de mélange, la vitesse du vent, l'humidité, seront déterminants sur les concentrations locales de particules^{lvi lxiix liii}. Les modèles actuels n'ont toutefois pas la capacité d'anticiper les changements à cette échelle.

En considérant toutes ces influences et la résolution limitée des modèles, il y a de grandes disparités entre les projections de concentrations de particules^{viii}. Les résultats globaux de simulations des particules en suspension pour l'horizon 2100 varient d'une diminution de 60 % à une augmentation par un facteur 3,8 par rapport à la période actuelle^{ix}.

4.3 Dioxyde de soufre (SO₂)

Les émissions de SO₂ ont diminué d'environ 20 % dans les années '90. On estime que les politiques anti-pollution contribueront à réduire d'un autre 5 % d'ici 2020 en Europe et en Amérique du Nord. Cependant, en l'absence de contrôles plus sévères en Asie du sud-est, les émissions mondiales seraient de nouveau en hausse prochainement^{vii}. La figure 16 illustre la progression des émissions anthropiques mondiales de SO₂ (en millions de tonnes) selon le modèle RAINS, d'ici 2030^{xiii}.

Source : Cofala et al., 2006

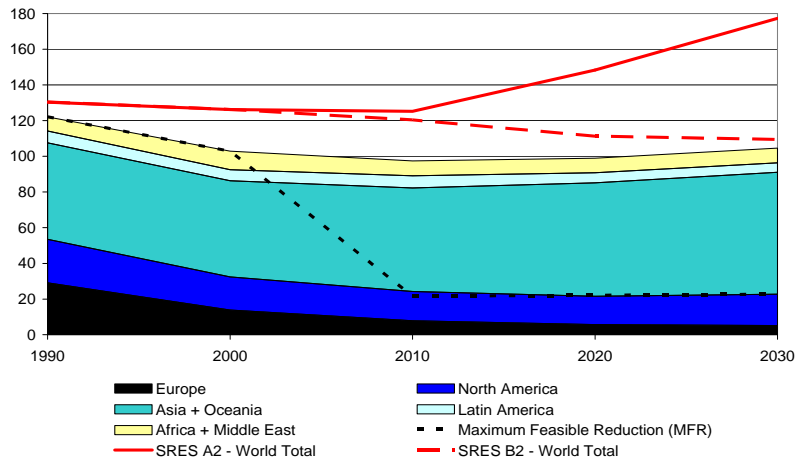


Figure 16: Évolution des émissions anthropiques mondiales de SO₂ selon le modèle RAINS (en millions de tonnes)

Les scénarios d'émissions A2 et B2 du GIEC (voir section 3.3) apparaissent en rouge sur la figure 16. Ceux du modèle RAINS sont plus récents et détaillés par continent, mais pas forcément plus justes. En effet, tous ces scénarios sont basés sur des hypothèses controversées de l'évolution de l'humanité.

La ligne noire hachurée indique le minimum des émissions possibles, si une réglementation sévère était appliquée à chaque source et si les technologies les plus propres étaient implantées dans tous les pays.

4.4 Radical hydroxyle (OH)

Le radical hydroxyle est un oxydant, mais il n'est pas considéré comme un polluant. Il est impliqué dans la plupart des processus photochimiques rapides de la troposphère et contribue à «nettoyer» l'air en diminuant la concentration des polluants primaires près des sources (ex : NO_x, SO₂)^{lii} ^{lxiv}. Par contre, il augmente la production de polluants secondaires (H₂SO₄, HNO₃)^{xi}.

À l'instar de l'ozone, le radical hydroxyle est dérivé de réactions chimiques. La concentration d'OH est influencée par les feux de forêt (émissions de CO et d'aérosols) et par El Niño^l. Ainsi, la variabilité spatiale et temporelle du radical OH est grande. La connaissance de la concentration du OH est primordiale pour la compréhension de la formation et de l'évolution des polluants^{lxxxii}.

On peut mesurer l'OH indirectement, mais les observations sont récentes et très partielles à l'échelle du globeⁱⁱ. En ce moment, selon les observations disponibles et le modèle chimique GEOS-Chem, la tendance serait à la hausse, malgré une diminution observée au dessus des océans^l (voir figure 17).

Source :NRC, 2001

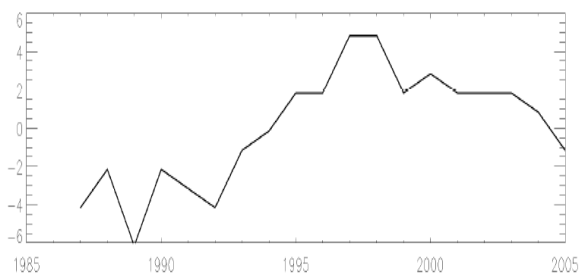


Figure 17 : Anomalies annuelles des concentrations d'OH planétaires (en molécules x10⁴/cm³) entre 1987 à 2005 par rapport à la moyenne sur la même période

Dans l'avenir, la tendance sera déterminée par le changement relatif des hydrocarbures par rapport aux NO_x et par l'abondance d'ozone. Les changements de température, de radiation solaire et de vapeur d'eau influenceront également les concentrations d' OH^{ix} $^{\text{lx}}$. Les influences chimiques et climatiques étant opposées dans ce cas-ci, on estime que les concentrations d' OH se maintiendront autour des niveaux actuels d'ici la fin du 21^e siècle, mais avec une grande variabilité spatiale $^{\text{ix}}$.

4.5 Gaz azotés

Malgré une diminution des émissions de NO_x d'origine industrielle depuis deux décennies en Europe et aux Etats-Unis, celles de l'Asie progressent. Par exemple, entre 1980 et 2005, les émissions chinoises de NO_x ont augmenté par un facteur 5. En somme, la croissance économique dépasse l'effet des mesures de réduction $^{\text{xxviii}}$. Le graphique de la figure 18 illustre les émissions moyennes de NO_x (en Teragrammes/an = 10^{12} g/an) sur 3 continents entre 1980 et 1997¹.

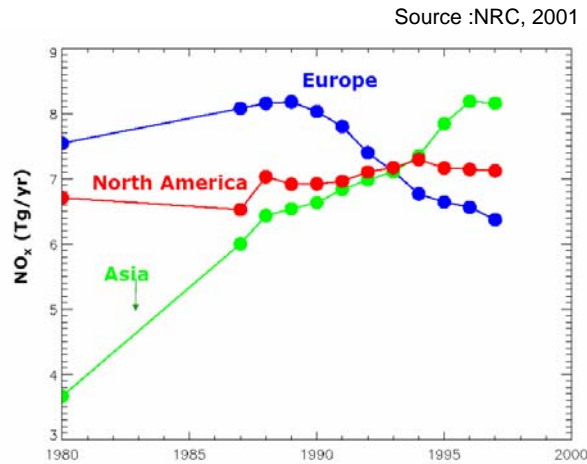


Figure 18: Récentes émissions moyennes de NO_x sur 3 continents entre 1980 et 1997 (en Teragrammes/an)

La plupart des processus de combustion émettent des oxydes d'azote. Par conséquent, l'industrie, le transport et les feux de forêt sont des sources importantes d'oxydes d'azote $^{\text{lxix}}$. Les activités agricoles seraient une autre grande source de gaz azotés : N_2O , NH_3 , N_2 et le NO ; ce dernier domine en zone tempérée. Les quantités émises dépendent de la météo (vent, température et précipitations), de l'activité microbienne, du type de sol, de la méthode et du moment de l'épandage de fertilisant $^{\text{xi}}$ $^{\text{lxv}}$. Les autres sources d'oxydes d'azote sont les éclairs et l'apport stratosphérique $^{\text{ix}}$ $^{\text{li}}$.

Parce qu'ils se forment à partir d'ozone et de NO_2 , les radicaux NO_3 «nettoie» ces polluants classiques de l'air $^{\text{ix}}$. On sait que le NO_3 est corrélé positivement à la température et négativement à l'humidité relative $^{\text{xviii}}$. Il est donc permis de supposer qu'il augmentera dans le futur car le premier paramètre est en hausse.

Dans un climat plus chaud, l'ammoniac (NH_3), provenant de l'épandage de fumier, se volatiliserait davantage $^{\text{xi}}$.

Les phénomènes de gels-dégels augmenteront dans les régions habituellement couvertes par le pergélisol. Or ces événements libèrent du N_2O à une vitesse et une amplitude encore inconnues $^{\text{lxv}}$.

L'augmentation des dépôts secs ou humides de nitrates particulières, issus de sources anthropiques de NO_x , fertiliserait la végétation, favorisant les émissions de NO et de COV biogéniques (à condition que l'irrigation ou les précipitations soient suffisantes) $^{\text{lxv}}$.

Les scénarios climatiques actuels prévoient ainsi que les N_2O , NH_3 , NO_x continueront d'augmenter dans l'atmosphère d'ici la fin du siècle^{xvii} ^{ix}. Le modèle RAINS estime que les émissions globales de NO_x auront augmenté d'environ 13 % en 2030 par rapport à 2000^{vii}, tel qu'illustré sur la figure 19^{xiii}.

Source : Cofala et al., 2006

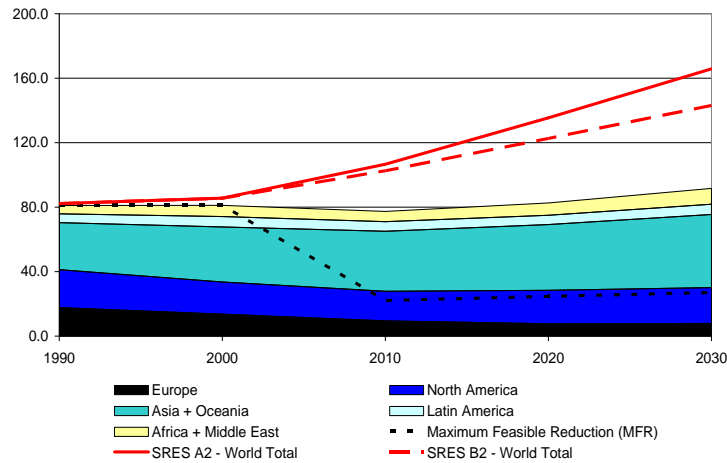


Figure 19: Évolution des émissions anthropiques mondiales de NO_x selon le modèle RAINS (en millions de tonnes)

Tel que décrit à la section 4.3, les lignes en rouge représentent les scénarios d'émission établis il y a environ 10 ans par le GIEC et qui sont encore utilisés aujourd'hui dans les projections climatiques. Les scénarios d'émission du modèle RAINS sont plus récents (2006) et permettent de distinguer la contribution de chaque continent. La ligne en tirets noirs représente un monde idéal où des efforts de réduction seraient appliqués partout (émissions réglementées et utilisation de la meilleure technologie disponible).

4.6 Monoxyde de carbone (CO)

Les sources de CO sont nombreuses: Il est produit naturellement par l'oxydation du méthane dans l'atmosphère (grâce au radical OH) et par photodissociation du carbone. Les autres sources naturelles de CO sont les océans, les feux de prairies et de forêts, les volcans, les gaz des milieux humides et les orages. Les émissions de CO anthropiques proviennent principalement du chauffage au charbon ou au bois, du transport et des industries, en particulier les pétrolières et les incinérateurs^{lxviii}.

Comme le CO₂, le monoxyde de carbone augmente avec l'activité humaine. En contrepartie, les contrôles sur les émissions du transport et la conversion des systèmes ou procédés vers des combustibles plus propres, devraient diminuer les émissions mondiales de CO. Le modèle RAINS prévoit une réduction d'environ 16 % vers 2030 par rapport à 2000^{vii}, dans la plupart des régions, tel qu'illustré à la figure 20^{xiii}.

Source : Cofala et al., 2006

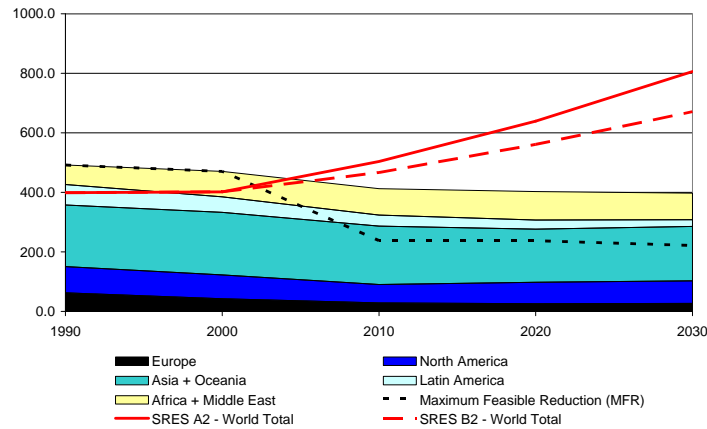


Figure 20: Évolution des émissions anthropiques mondiales de CO₂ selon le modèle RAINS (en millions de tonnes)
(Voir description au bas de la figure 16)

Notons que les concentrations de CO ont une grande variabilité spatiale et temporelle car elles sont contrôlées par la météo, par la disponibilité du radical OH et par la combustion de la biomasse. La figure 21 est un exemple de ces fluctuations pour 3 sites différents, sur une période récente de 18 ans. Aucune tendance claire ne se dégage de ces observations¹.

Source : NRC, 2001

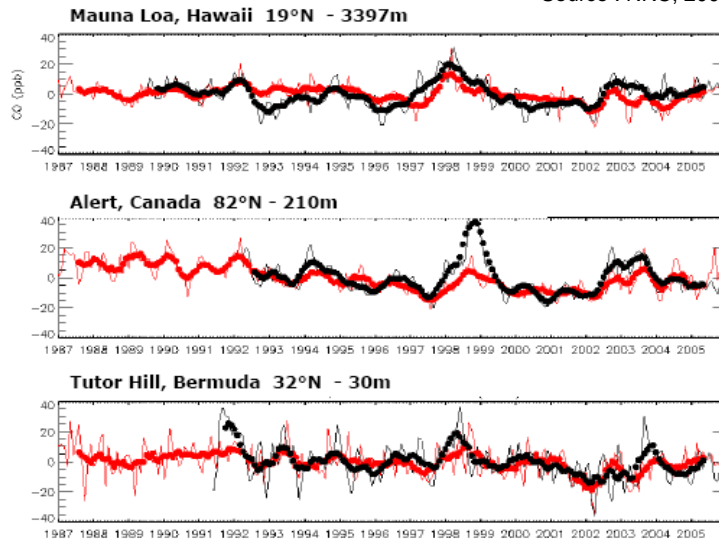


Figure 21: Concentrations de CO (en ppb) observées (en noir) et simulées par le modèle GEOS (en rouge), entre 1987 et 2005, pour 3 sites : à Hawaï, au Canada et aux Bermudes

4.7 Composés organiques volatiles (COV)

Les COV biogéniques sont difficiles à quantifier car les informations sur l'utilisation des sols (type de végétation) sont déficientes^{xi}. En plus les émissions suivent un cycle diurne et saisonnier qui change selon la température et l'ensoleillement^{xi}. Des températures plus élevées et une augmentation du CO₂ favoriseraient les émissions de COV biogéniques (ex : terpènes et isoprènes)^{ix} ^{xi} ^{lvii}. On sait aussi que les corrélations entre la présence de CO et de COV sont élevées^{vii}.

Les émissions biogéniques de COV, seraient en diminution par la perte de surfaces forestières^{ix}. Pour les forêts résiduelles, les émissions seraient contrôlées par l'ouverture/fermeture des stomates des feuilles,

elles-mêmes affectées par la disponibilité de l'eau dans le sol^{ix}. Un déficit d'eau pendant quelques heures ou quelques jours, diminuerait les COV biogéniques. Cependant, une sécheresse prolongée aurait l'effet contraire^{lxvi}. Les futures émissions de COV biogéniques sont donc compliquées à estimer et comportent de grandes incertitudes^{xi}.

Pour les COV d'origine anthropique (excluant le CH₄), les informations sur les sources sont trop partielles pour établir une bonne estimation des futures concentrations. On sait qu'ils sont dix fois moins abondants que les COV biogéniques^{lxx} et proviennent surtout de la combustion fossile et des industries utilisant ou fabriquant des solvants, des colles ou de la peinture. L'évaporation de ces substances aux points de vente est aussi une source non négligeable (ex : stations services pour l'essence)^{xi}. La hausse anticipée des températures augmentera nécessairement ces émissions, à moins d'avancées technologiques réduisant les fuites. Les tendances sur les COV dépendent aussi de la durée du boom économique de l'Asie du sud-est^{lxxi}. L'incertitude entourant l'abondance des COV dans un climat en changement est très grande^{lxxix lxx}.

4.8 Toxiques

Les changements de température pourraient agir sur l'activité biologique des océans et modifier ses émissions d'hydrocarbures halogénés (ex : bromure de méthyle) et de composés soufrés (ex : sulfure diméthyle)ⁱ.

Des températures élevées causeraient également une évaporation accrue de substances toxiques à partir des sédiments ou des zones où elles sont stockées; il s'agit par exemple du mercure, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des diphényles polychlorés (BPC)^{xvii}. Les vapeurs de mercure provenant du sol seront un enjeu important, particulièrement dans l'écosystème boréal^{liii}.

4.9 Allergènes

Il a été prouvé que des températures plus élevées et des niveaux élevés de CO₂ dans l'atmosphère favoriseraient la croissance des plantes, incluant celles qui sont nuisibles comme l'herbe à poux, grand producteur de pollen allergène^{ix}. Les changements climatiques prolongeraient également la saison de croissance (voir section 3.6.7), et, par le fait même, la saison pollinique^{xvii xi}. L'augmentation anticipée d'humidité dans l'atmosphère favoriserait la production de moisissures et de spores^{xvii}.

4.10 Mécanismes de transport/dispersion/déposition

On sait que le vent dilue les polluants et remet en suspension les particules (selon la vitesse du vent et la taille des particules). La question du vent de surface dans le futur reste irrésolue par les modèles de simulation actuels qui représentent mal ce paramètre local^{xi}.

Des approches «hybrides» tentent de contourner cette lacune des modèles climatiques, comme la mise à l'échelle statistique (« *statistical downscaling* ») ou la caractérisation des masses d'air (« *weather typing* »). Par exemple, une étude dans le sud de l'Ontario avance que la fréquence des masses d'air propices à la formation et l'accumulation de polluants pourrait être de cinq à huit fois plus élevée que maintenant avec les changements climatiques. Ces situations combinent les épisodes de chaleur accablante et de pollution atmosphérique^{lxxxviii xvii}.

Les modèles de simulation nous renseignent tout de même sur les phénomènes de dispersion à plus grande échelle; par exemple, les changements climatiques diminueraient l'occurrence des ondes cycloniques (dépressions) et leurs fronts associés, ce qui pourrait prolonger la durée des systèmes de hautes pressions stagnants et retarder l'arrivée de fronts froids qui chassent la pollution de l'air^{lv}.

Les modèles suggèrent aussi que les trajectoires des systèmes météo seront modifiées sous l'effet des changements climatiques. Ainsi le transport transfrontalier de polluants entre les États-Unis et le Canada pourrait s'accroître. En plus, les polluants que contiennent les masses d'air augmenteront dû à

l'inévitable progression de la démographie, de l'urbanisation et de l'industrialisation. La pollution au Québec s'étendra plus loin et les niveaux de base augmenterontⁱ.

On sait également qu'en relation avec la consommation d'énergie, la charge de polluants (gaz et particules) que le vent transportera des États-Unis vers le Canada risque d'augmenter l'été et diminuer l'hiver. En effet, le réchauffement climatique haussera la demande en climatisation, réfrigération, congélation l'été et baissera la demande en chauffage l'hiver^{xi lxxii}. Ce constat touchera en particulier le Québec méridional qui, par les vents dominants, est soumis aux émissions du nord-est des États-Unis où l'énergie est majoritairement produite par des centrales thermiques (gaz naturel, l'huile ou charbon)^{lxxiii}. Dans le sud de la Province, plus de 50 % de l'ozone et de ses précurseurs seraient attribuables à la pollution atmosphérique transfrontalière^{xvii}.

Les changements dans la structure verticale de la température (réchauffement de la troposphère et refroidissement de la stratosphère) affecteraient les échanges verticaux, la dispersion et le transport des polluants^{i xv}. On anticipe une diminution des inversions hivernales, en nombre et en intensité, ce qui favoriserait la dispersion des polluants^{xi}. La hausse des températures accentuerait la convection l'été, provoquant de la turbulence et une remise en suspension des poussières^{lxxix xi}.

Pour leur part, les précipitations participent au phénomène de déposition par lessivage des polluants, en particulier les aérosols^{xi i}. Les modèles de chimie atmosphérique qui considèrent le transport de l'azote et de ses dérivés ont montré une augmentation de la déposition par un facteur 2,5 d'ici la fin du siècle. Ce résultat provient principalement de l'augmentation prévue des émissions de NO_x. Une diminution des précipitations signifierait donc une disponibilité accrue des NO_x qui participent à la production d'ozone. Notez que la fiabilité de cette projection est limitée par l'incertitude entourant les changements des régimes et patrons des précipitations^{ix}.

5 Recommandations

5.1 Utilisation de modèles de simulation

Il est maintenant admis que la composition de l'air influence le système climatique planétaire. Les interactions entre la chimie et la physique dans l'atmosphère sont complexes et impliquent des couplages non linéaires. L'estimation des émissions actuelles et futures de polluants en particulier celles qui impliquent la biosphère est également un défi de taille. Tenir compte de toutes ces composantes et leurs liens pour prédire la future qualité de l'air est impossible sans le développement de modèles sophistiqués de chimie climatique et de transport atmosphérique^{xi}.

De plus, les modèles sont nécessaires pour bien situer les sites de mesure et pour faire le suivi à court et long terme des concentrations; les modèles peuvent aussi servir à intégrer les observations issues de différents instruments afin d'avoir une vue d'ensemble plus large de l'état de l'atmosphère^{lxxv}.

Pour le moment, les modèles sont déficients au niveau de leur résolution temporelle et spatiale (horizontale et verticale), par rapport aux échelles de certains mécanismes de transport et de plusieurs réactions chimiques déterminantes. Malgré cette faiblesse, les modèles de simulation constituent actuellement les outils les plus adéquats pour résoudre les liens entre les changements climatiques et la qualité de l'air^{li lxxiii}.

5.2 Ajouts de mesures

Le développement de modèles et leur validation nécessitent la mesure des émissions et des concentrations dans l'air à plusieurs échelles temporelles et spatiales^{viii lxxv i lxi xxviii}. Les mesures en altitude (avion, ballon-sonde, radar, lidar, satellite, tour) sont les plus déficientes^{i xi}. Par exemple, l'utilisation de satellites pour mesurer les émissions de COV (via leurs produits d'oxydation par le OH) pourrait servir à paramétrer l'influence des photo-oxydants sur le climat et nous informer sur le changement de réactivité de l'atmosphère.

Les mesures actuelles ne sont pas que déficientes spatialement; elles permettent rarement de dégager des tendances. Même les tendances mondiales observées ne font pas l'unanimité. De même, la variabilité temporelle, n'est pas assez bien quantifiée. Par exemple, on constate que les observations de NO_x et de COV ne sont pas assez précises et régulières pour permettre d'analyser la progression de l'ozone^{viii i}. Une meilleure spécification des différents COV serait aussi nécessaire pour estimer les futures concentrations d'ozone^{lxxv lix}.

L'impact des aérosols sur l'atmosphère est l'un des aspects les moins bien connus des changements climatiques. Les mesures des aérosols et de leurs précurseurs (concentrations et propriétés) sur de longues périodes, en milieu extra-urbain aiderait à comprendre le transport régional et intercontinental^{lxxvi}. De plus, l'évolution et la distribution des nitrates (aérosols) est un indicateur de la disponibilité de l'ammoniac (NH₃)^{lxxv}.

Il existe parfois de grands écarts entre les inventaires des émissions. Les résultats divergent encore davantage quand il s'agit des projections pour le 21^e siècle^{lix}. Les concentrations résultantes sont tout aussi incertaines. Autant pour le climat que pour la qualité de l'air, les liens entre les émissions et les concentrations sont importants. Ainsi, des mesures à la source et en milieu ambiant sont nécessaires pour les gaz et aérosols tels les NO_x, COV, CO, SO₂, O₃ et PM_{2,5}^{i lix}. Le contexte météorologique de la mesure des polluants doit aussi être établi pour bien évaluer les impacts du climat sur la qualité de l'airⁱ.

5.3 Politiques concertées de lutte aux émissions

Le changement climatique et la pollution atmosphérique sont principalement causés par les activités humaines. Ils sont également étroitement liés en exerçant une influence l'un sur l'autre. Dans la réalité, on trouve, d'une part, des lois et règlements qui s'intéressent à la qualité de l'air ambiant et excluent la dimension climatique et d'autre part, les plans d'actions sur les changements climatiques qui ignorent la pollution urbaine (contaminants classiques et toxiques). Or, les sources sont bien souvent communes, impactant directement la santé humaine et l'environnement aux échelles locale, régionale et même globale. La solution nécessite une approche coordonnée et des politiques de gestion cohérentes^{lxxvii xv lviii}.

Le « *International Institute for Applied Systems Analysis* » a démontré récemment le bénéfice des politiques intégrées, tant du point de vue des coûts de gestion que des effets positifs sur la qualité de l'air et le climat. Des modèles de simulation ont servi à estimer les impacts économiques des politiques de réduction, fournissant un argument stratégique aux décideurs^{xxviii}. Des travaux scientifiques sont actuellement menés afin d'établir les meilleurs compromis ; on vise à identifier les mesures de réduction gagnantes pour les deux problématiques et celles qui pourraient avoir des effets contraires^{xv}.

Par exemple, les niveaux actuels de sulfates et nitrates, par leurs effets refroidissant de l'atmosphère, contrebalancent en partie les effets climatiques des GES. Ainsi, en réduisant les émissions de soufre et d'azote, les impacts des GES pourraient apparaître plus rapidement. Par contre, en réduisant les émissions de particules de suie (« *black carbon* »), qui produisent un forçage radiatif positif, l'effet bénéfique est double : protéger la santé localement et limiter le changement climatique à grande échelle^{xiv}. La réduction des émissions de méthane serait aussi avantageuse pour le climat et la santé, car il contribue directement au réchauffement et à la formation d'ozone troposphérique^{lxxviii viii xiv}. La réduction de l'ozone, des particules de suie et du méthane, qui ont des durées de vie assez courtes, produirait des résultats rapides sur le climat, contrairement au contrôle du CO₂ qui prendrait plusieurs décennies avant de montrer des effets^{xiv}. Toutefois, les GES dont la durée de vie est courte sont souvent inhomogènes dans le temps et l'espace. Il faut alors garder en tête que l'effet des réductions serait dépendant du moment et de la région d'émission^{lxxix}.

Pour réduire les concentrations d'ozone, impliqué dans la détérioration de la qualité de l'air et le réchauffement climatique, une réduction simultanée du méthane, du CO, des NO_x et des COV serait efficace^{viii}. En effet, en réduisant seulement les deux derniers, on augmente le temps de résidence du méthane^{lviii}.

Les plus gros gains en matière de réduction d'émissions pour la qualité de l'air et le climat, proviendraient du secteur des transports, autant pour les gaz que les particules. Ces dernières découlent, entre autres,

de l'usure des voitures et des routes, de même que des produits nécessaires à leur entretien (sable, sel de déglacage). Si on ajoute les routes non asphaltées, on estime au Canada que 40 à 60 % environ des PM_{10} et 5 à 20 % des $PM_{2,5}$ sont attribuables au transport urbain^{xvii xiv}.

Attention, l'utilisation de carburants d'origine végétale («*biofuels*») à la place des dérivés de pétrole pour neutraliser les émissions de CO_2 n'est pas une solution adéquate pour freiner le changement climatique; les émissions de N_2O associées à la fertilisation contrecarreraient les bénéfices obtenus. Les biocarburants sont aussi émetteurs de particules de suie qui contribuent au réchauffement du climat^{lxxx}.

Il est nécessaire de nos jours que la pollution soit abordée de manière globale. Depuis les années '90, on constate une portée planétaire aux émissions locales^l. On peut relier désormais des épisodes de pollution en Asie aux concentrations d'ozone d'Amérique du Nord, grâce aux observations de surface et à l'analyse des rétro-trajectoires dans la haute troposphère. Par exemple, on a identifié l'origine africaine (Sahara) de certaines particules fines aux États-Unis. Les feux de forêts et les volcans émettent également des gaz et des poussières qui peuvent être détectés très loin de leur origine^l. En somme, la diminution des concentrations de fond de la plupart des polluants requerra des solutions planétaires à des problèmes actuellement considérés locaux ou régionaux^{lxxiv}.

6 Conclusion

Les activités humaines depuis le siècle dernier ont enclenché des changements climatiques qui sont désormais incontournables; même si les GES cessaient d'augmenter aujourd'hui, leurs effets se feraient sentir sur le climat pendant encore plusieurs décennies. Le climat influence directement ou indirectement toutes les composantes du système planétaire, incluant la qualité de l'air. La figure 22 résume les enjeux associés aux principaux constituants de l'air^{xi}.



Figure 22: Les principaux polluants de l'atmosphère, leurs effets physico-chimiques et leur distribution

Dans ce diagramme, la première ligne distingue les gaz qui participent à l'effet de serre (cases rouges) et ceux qui détériorent la qualité de l'air (cases vertes). L'ozone se retrouve dans les deux catégories. La 2^e rangée discrimine les substances qui contribuent au réchauffement (rouge) de celles qui refroidissent l'atmosphère (bleu). La vapeur d'eau et certaines particules possèdent les deux propriétés, dépendant de l'altitude où elles se trouvent et sous quelle forme. La 3^e ligne exprime le moyen d'action des polluants et

des GES sur le bilan radiatif : par la chimie (jaune) ou par la physique des nuages (gris). Essentiellement, les gaz sont associés à la première catégorie et les particules à la deuxième. La ligne suivante énumère les dérivés des GES et des polluants : comment les produits secondaires influencent la qualité de l'air ou l'effet de serre. Environ la moitié des substances se transforme en particules; plusieurs contribuent à produire de l'ozone. Finalement, la dernière rangée du tableau indique l'étendue spatiale des GES et des polluants: locale (vert), régionale (bleu) ou globale (mauve). Une catégorie supplémentaire (rouge) a été ajoutée pour signaler que certains CFC sont très persistants (durée de vie plus longue que le CO₂). La plupart des gaz sont répartis globalement, alors que la majorité des particules ont une portée régionale. L'ozone est considéré global et régional. Le CO et la vapeur d'eau agissent à toutes les échelles spatiales. Les polluants plutôt locaux sont les COV, les particules (autres que les sulfates/nitrates), les NO_x, le SO₂ et le NH₃.

La quantification des GES et des polluants dans l'air ambiant, la compréhension de leurs effets et de leurs interactions sont des tâches complexes qui requièrent des mesures et des modèles de simulation. Ni les uns, ni les autres ne sont adéquats actuellement pour tenir compte de tous les phénomènes et à toutes les échelles (spatiales et temporelles)^{xi}. Leur amélioration repose sur une meilleure connaissance des émissions, des processus qui les transforment et les transportent.

Malgré leurs limites, les outils actuels dégagent certaines tendances robustes, permettant d'anticiper la future qualité de l'air :

Malgré une grande incertitude sur la quantification des émissions, elles seraient en hausse pour la plupart des polluants classiques et toxiques, en raison de l'urbanisation, l'industrialisation, l'incinération, la consommation d'énergie, la climatisation, les pratiques agricoles et forestières, le réchauffement des océans, la fonte du pergélisol et la décomposition dans les milieux humides. De plus, les hausses de température accéléreront les réactions chimiques (ex : de NO_x à nitrates) et l'évaporation de produits volatils (ex :NH₃). La croissance des végétaux, favorisée par un supplément de CO₂ et d'humidité dans l'air, augmentera les émissions de COV, d'allergènes et de spores. À nos latitudes, on s'attend à une hausse des dépôts secs et humides à cause des étés plus longs et des fertilisants plus abondants.

Les études actuelles suggèrent que sur le Québec, le «nettoyage» de l'air sera favorisé l'hiver par l'augmentation des vents et des précipitations. Les conditions de mauvaise dispersion seront également moins fréquentes. Inversement, l'été, la qualité de l'air se dégradera en réponse à la hausse des températures, à l'augmentation de l'humidité spécifique, aux vents plus faibles, aux épisodes d'air stagnant, à l'augmentation du rayonnement solaire (UV), à l'occurrence accrue de canicules et d'îlots de chaleur urbains, ainsi qu'à l'assèchement des sols^{ix}. La littérature rapporte également un changement des trajectoires des systèmes météorologiques favorisant le transport transfrontalier des polluants.

Rappelons que, pour l'instant, les effets des changements climatiques sur la qualité de l'air sont bien inférieurs à ceux des émissions directes locales. C'est ce qu'indiquent les mesures de polluants dans l'air ambiant depuis environ 50 ans. Toutefois, les changements climatiques sont appelés à s'intensifier et leurs effets doivent être considérés dans le contrôle des émissions et la planification des réseaux d'observation^{xi}.

En somme, la gestion de la qualité de l'air en Amérique du Nord doit aborder 4 problématiques globales et multi-polluants :

- la quantification de la pollution d'origine humaine, actuelle et future;
- la modélisation de la chimie et du transport à grande distance (hémisphérique) des polluants et de leurs précurseurs;
- les changements dans la météorologie, la chimie et les émissions biogéniques (incluant les feux de forêt) résultant des changements climatiques;
- les changements dans les émissions résultant des actions prises pour contrer les changements climatiques^{lxxxiv}.

7 Vocabulaire, acronymes et notions de base

Aérosol : Particule ou gouttelette flottant dans l'air.

Albédo : L'albédo est la proportion de l'énergie solaire réfléchiée par une surface. On utilise une échelle de 0 à 1 pour qualifier l'albédo : 0 correspondant au noir (aucune réflexion), et 1 s'appliquant à un miroir (aucune absorption). L'albédo de la neige fraîche est d'environ 0,9.

Biomasse : La biomasse est la quantité totale de la matière organique d'origine végétale ou animale présente dans un milieu donné. Dans le domaine de l'énergie, la biomasse est l'ensemble des matières organiques pouvant servir de combustible : alcool de céréales, de sucre ou d'oléagineux, huiles usagées, bois et déchets.

Convection : Mouvement ascendant de l'air résultant de son réchauffement.

COV (composés organiques volatiles) : famille de substances formées de carbone et d'hydrogène pouvant se trouver sous forme gazeuse dans l'atmosphère. Ils incluent les hydrocarbures halogénés (ex : les CFC). Ils peuvent être d'origine anthropique (ex : pétrochimie, solvants, dégraissateurs, combustion, chauffage au bois) ou biogénique (végétaux, fermentation, décomposition). Les COV contribuent à la formation de l'ozone troposphérique et participent à l'effet de serre.

Déposition : Processus par lequel les particules sédimentent par gravité sur le sol ou les surfaces, réduisant ainsi leur concentration dans l'atmosphère. On distingue les dépôts secs des dépôts humides. Ces derniers sont liés aux précipitations de pluie ou de neige.

El Niño / La Niña : Aussi nommé ENSO (« *El Niño Southern Oscillation* »), ce phénomène climatique périodique est issu d'une perturbation dans la circulation atmosphérique générale qui change la position et la trajectoire des dépressions sur le Pacifique. El Niño influence donc les tempêtes, les vents, les zones de précipitation/sécheresse, le niveau et la température de la mer (localement) ainsi que les courants océaniques. Il apparaît 2 à 3 fois par décennie et dure environ 18 mois. Ses effets touchent l'ensemble du globe, dont l'Amérique du sud où El Niño se manifeste un peu après Noël, d'où son nom qui signifie «L'enfant» en espagnol. Les hivers québécois sous l'influence d'El Niño sont plus doux. La Niña est le climat normal entre deux épisodes d'El Niño.

Emissions biogéniques : Émissions gazeuses d'origine naturelle par opposition aux polluants émis par l'activité humaine (émissions anthropiques).

GES (gaz à effet de serre) : Constituants de l'atmosphère contribuant à augmenter le rayonnement infrarouge (chaleur) autour de la terre. Les principaux GES sont le dioxyde de carbone (CO₂), la vapeur d'eau, le méthane (CH₄), l'ozone et l'oxyde nitreux (N₂O). À ces substances naturellement présentes, s'ajoutent celles qui proviennent exclusivement de l'activité humaine, par exemple les hydrocarbures halogénés.

GIEC (groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) : Instance internationale issue du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et de l'Organisation Météorologique Mondiale. Le GIEC (IPCC en anglais) produit tous les 6 ans des rapports sur l'état des connaissances en climat ainsi que sur les causes et conséquence des changements climatiques. Le GIEC met aussi à la disposition des chercheurs des données de modélisation climatique se conformant à des standards de qualité établis.

Humidité spécifique : Vapeur d'eau contenue dans l'air humide, exprimée en g/kg.

Îlot de chaleur urbain : Secteur où la température près du sol est plus élevée qu'autour. Les causes sont : la densité de la population, les activités humaines, le drainage, l'exposition au soleil, la minéralisation ou le faible albédo des surfaces. Les îlots se produisent à l'échelle régionale (milieu urbain par rapport aux

zones rurales ou forestières voisines) ou à l'échelle locale (une surface minéralisée comparée à une zone végétale à proximité).

Inversion de température : Normalement dans la troposphère, la température de l'air décroît avec l'altitude. Quand ce gradient est inversé, la température est plus froide au sol qu'en altitude; la dispersion verticale des polluants est alors réduite au minimum.

MCG (modèle de circulation générale) : Simulateur reproduisant la dynamique de la plupart des processus qui régissent l'atmosphère, le sol, la glace, les océans et la végétation. Outil le plus répandu pour bâtir des scénarios climatiques. D'une résolution entre 200 et 400 km, les résultats d'un MCG couvrent l'ensemble du globe. Il existe une vingtaine de MCG dans le monde.

MRC (modèle régional de climat) : Simulateur dynamique semblable au MCG, mais couvrant seulement une partie du globe car sa résolution est de l'ordre de 50 km, ce qui demande une plus grande capacité informatique de calcul. Un MRC est nécessairement piloté à ses frontières par un MCG, afin d'assurer, à chaque pas de temps de calcul, une cohérence entre sa fenêtre et le reste de la météo planétaire.

MRCC (modèle régional canadien de climat) : Développé à l'UQAM, c'est l'outil le plus souvent utilisé à Ouranos pour bâtir des scénarios climatiques dans les études d'impact couvrant le Québec.

NAO (« *north atlantic oscillation*») : Indice qualifiant la position, la trajectoire et l'intensité des systèmes météorologiques influencés par les courants marins de l'Atlantique-nord. Un indice positif, signifie pour le Québec un hiver plutôt doux, venteux et humide. Par contre les hivers de phase négative, sont plus froids et neigeux. Dans le futur, l'indice NAO serait de plus en plus positif.

Ozone (O₃) : Gaz composé de 3 atomes d'oxygène que l'on retrouve principalement dans la stratosphère à l'état naturel. Il absorbe le rayonnement ultraviolet du soleil. La présence d'O₃ dans la troposphère découle principalement de l'activité humaine et est considérée néfaste pour la santé et l'environnement. L'ozone se forme avec un délai de quelques heures en présence de chaleur, de rayonnement solaire et de contaminants précurseurs (oxydes d'azote et composés organiques volatils). Principal constituant du smog photochimique, l'ozone est aussi un gaz à effet de serre et contribue à l'acidification des précipitations.

Radar/Lidar : Appareils de télédétection basés sur l'émission/réflexion d'une onde. Dans le cas du radar, une onde radio est utilisée. Le lidar est basé sur une onde optique (laser). On peut évaluer la distance, la vitesse de déplacement et les propriétés physiques de l'objet sur lequel l'onde émise est réfléchi. Les objets visés peuvent être des gouttes d'eau (pluie), de la neige, de la poussière, des gaz (pollution), etc.

Stratosphère : Seconde couche de l'atmosphère terrestre, entre 12 et 50 kilomètres d'altitude par rapport à la surface de la Terre; elle se situe au-dessus de la troposphère. La stratosphère est une région où surviennent d'intenses processus radiatifs, dynamiques et chimiques, notamment l'absorption des ultraviolets du soleil par l'ozone.

Troposphère : Couche inférieure de l'atmosphère terrestre. Près des pôles elle a une épaisseur d'environ 8 km. À l'équateur elle peut atteindre 15 km. La troposphère contient près de 80 % de la masse totale de l'atmosphère. On trouve dans cette couche la plupart des phénomènes météorologiques. C'est majoritairement dans cette couche que se concentrent les polluants atmosphériques issus de l'activité humaine.

8 Références

- ⁱ National Research Council, The National Academy Press, Global Air Quality: An Imperative for Long-Term Observational Strategies. USA, 2001. http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=10097&page=10
- ⁱⁱ Arndt, D.S., M.O. Baringer et M.R. Johnson, Eds., 2010. State of the climate in 2009. Bull. Amer. Meteor. Soc. Vol. 91, no 6, s1-s224.
- ⁱⁱⁱ IPCC-TGICA, 2007: General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the IPCC, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment. 66p.
- ^{iv} Ministère des transports du Québec, 2007, Effet de serre et changements climatiques. http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/ministere/ministere/environnement/changements_climatiques/effet_serre_changements_climatiques
- ^v Spokes, L. et al., 2004. Aerosols and climate. Environmental Science Published for Everybody Round the Earth Educational Network on Climate.
- ^{vi} Prospero, J.M., 2008. Global scale Dust Transport : Can We Detect the Impact of Climate Change and Land Use?. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 3. pp. 211-214.
- ^{vii} Cofala, J. et al. 2006. Scenarios of World Anthropogenic Emissions of Air Pollutants and Methane up to 2030. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Autriche, 23 p.
- ^{viii} Fiore, A.M., et al., 2010. Interactions between Climate and Air Quality. National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL), E-U. 9p.
- ^{ix} IPCC, 2007. Working Group I: The Physical Science Basis, chap.7-8.
- ^x Shindell et al. 2005. An emissions-based view of climate forcing by methane and tropospheric ozone. Geophysical Research Letters, Vol.32. 4 p.
- ^{xi} Food and Rural Affairs. 2007. Air Quality and climate change: a UK perspective, Air Quality expert group. Department for the Environment, London, UK. 272 p.
- ^{xii} Isaken, I.S.A., 2009. Impact of chemistry on climate, Dept. Geosciences, Univ. Oslo, conf: Atmospheric Composition Change – The European Network of Excellence (ACCENT)
- ^{xiii} Cofala, J. et R. Mechler. 2006. Medium-term global trends for air pollutants derived from RAINS model. IIASA. Presentation Power Point.
- ^{xiv} United Nations Economic Commission for Europe, 2003. http://www.unece.org/press/pr2003/03env_p02e.htm
- ^{xv} Fabregat, S., 19 sept. 2008. http://www.actu-environnement.com/ae/news/qualite_air_changement_climatique_5722.php4
- ^{xvi} Crutzen, P.J. et al. 2009. Atmospheric N₂O Releases from Biofuel Production Systems: A Major Factor Against "CO₂ Emission Savings": A Global View. Earth and Environmental Science. Twenty years of Ozone Decline. Proceedings of the Symposium for the 20th Anniversary of the Montreal Protocol. pp.67-70.
- ^{xvii} Service de l'urbanisme et de la gestion de la croissance. Division de la gestion et de l'environnement. Plan de gestion de la qualité de l'air et des changements climatiques, Initiatives en matière d'air et d'énergie. Ottawa jan.2005. 78 p
- ^{xviii} Vrekoussis, M. et al. 2008. Long-term Observations of Nitrate Radicals in the Marine Boundary Layer of a Remote Area. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 1. pp.138-141.
- ^{xix} Martin, S.T. et al., 2004: Effects of the physical state of tropospheric ammonium-sulfate-nitrate particles on global aerosol direct radiative forcing. Atmos. Chem. Phys., no. 4, pp.183-214
- ^{xx} Bell, N. et al. 2005. Impacts of chemistry-aerosol coupling on tropospheric ozone and sulfate simulations in a general circulation model. Journal of Geophysical Research. Vol.110, 12p.
- ^{xxi} Kulmala M., 2005, Chemistry and Biology of Atmospheric Composition and Climate Change: overview of recent results, Boreal Environ Research. Vol.10, pp. 459-477.
- ^{xxii} Feichter, J. 2008. Interaction between Particulate Matter in the Atmosphere and Climate. Project. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 3. pp. 194-197.
- ^{xxiii} Flossmann, A.I., Wobrock W., 2008. Air Pollution and Precipitation. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 3. pp.198-200.
- ^{xxiv} Quaas, J. 2007. Aerosol-cloud-climate interactions: Climate modelling and satellite observations. Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany. 2nd ACCENT Symposium.
- ^{xxv} Bates, T. et al., 1998. Oceanic Dimethylsulfide and Climate. NOAA. Pacific Marine Environmental Laboratory. Atmospheric Chemistry. U.S. Dept of Commerce. http://saga.pmel.noaa.gov/review/dms_climate.html
- ^{xxvi} GIEC, 2007, Résumé à l'intention des décideurs. Rapport du Groupe de travail 1. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm-fr.pdf>
- ^{xxvii} Déadreis, C. et al. 2007. Prediction s of the future impact of anthropogenic aerosols: sensitivity to climate change and to emission inventories. Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, France. 2nd ACCENT Symposium, Italie.
- ^{xxviii} Granier, C. et al., GEIA-ACCENT Conference. 2009. Emissions of Gases and Aerosols. Progress, Modeling Needs and Emerging issues. Norvège. 21 p.

- xxix Shindell, D. et al. 2010. Spatial scales of climate response to inhomogeneous radiative forcing. *Journal of Geophysical Research* no.115.
- xxx Nakicenovic N, S Swart et al 2000 IPCC special report on emissions scenarios : a special report of Working Group III of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599 p.
- xxxix Raupach, M. et al., Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. 2007. *Proceedings of the National Academy of Sciences. USA*.
- xxxii Murphy, James, et al. UK Climate Projections science report : Climate change projections. 2009. 192 p.
- xxxiii Mearns, L.O., F.Giorgi, P.Whetton, D.Pabon, M. Hulme, M. Lal. 2003. Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments. DDC of IPCC TGCI. 38p.
- xxxiv Music, B., and D. Caya, 2007: Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. Hydromet.*, Vol. 8, no.5. pp. 969-988.
- xxxv Versegny, D.L. 1996. "Local climates simulated by two generations of Canadian GCM land surface schemes". *Atmos.-Ocean*, 34, p. 435-456.
- xxxvi Scinocca, J.F. and N.A. McFarlane. 2004, The Variability of Modelled Tropical Precipitation. *Journ. Atmos. Sci.*, 61, 1993-2015.
- xxxvii Ouranos, 2010. S'avoir s'adapter aux changements climatiques. Montréal, 124p.
- xxxviii Hutchinson M.F. et al., 2009: Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum-Maximum Temperature and Precipitation for 1961-2003. *J. Appl. Met. and Climatol.*, no.48, pp.725-741. <http://www.agr.gc.ca/nlwis-snite>
- xxxix Corporation d'Hébergement du Québec, 2011, Changements climatiques – Vulnérabilité et adaptation des immeubles. Québec, 102 p.
- xl Yagouti, A. et al, 2008, Observed Changes in Daily Temperature and Precipitation indices for Southern Québec, 1961-2005, *Atmosphere-Ocean*, Vol. 46, No. 2, pp. 243-256
- xli Moyer M., 2009. The way the wind blows. *Scientific American*, vol. 301 no.4. pp.27-8.
- xliv Pryor, S. C. et al., 2006, Winds of change? : Projections of near-surface winds under climate change scenarios, *Geophysical research letters*, Vol. 33, No. 11
- xliii Diaconesco, R., P. Gachon, A. St-Hilaire, 2004, Analyse de la variabilité des vents dans le golfe du Saint-Laurent : tendances climatiques et non-climatiques, Affiche du premier symposium scientifique d'Ouranos.
- xliv Turner, J.A. et al. 1972. The drought code component of the Canadian Forest Fire Behaviour System. *Env. Can., Can. Forest Service Publication 1316*. Ottawa, 14p.
- xlvi Ouranos, 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise, Montréal, 125p.
- xlvi Gagen, M. et al. 2011. Cloud response to summer temperatures in Fennoscandia over the last thousand years. *Geophysical Research Letters*, vol 38, 5p.
- xlvi UNEP, 2004. Impacts of Summer 2003 – Heat wave in Europe. *Environment Alert Bulletin*. 4 p. http://www.grid.unep.ch/product/publication/download/ew_heat_wave.en.pdf
- xlviii Casati, B, Yagouti, A. 2010. Analysis of extreme temperature indices in nine Canadian communities using the Canadian Regional Climate Model projections for public health planning. Pour Ouranos et Santé Canada. 28p.
- il Baudoin, Y., T. Kosatsky. 2006. Identification des secteurs vulnérables à la chaleur dans une métropole canadienne en vue d'interventions et d'études ciblées en santé publique. Montréal, 74^e congrès ACFAS.
- i Bey, I., 2007. Interannual variations in tropospheric composition over the last two decades and implications for the global air quality. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, ACCENT Symposium, Italie.
- ii Grenfell, J.L., et al. 2003. Sensitivity studies of oxidative changes in the troposphere in 2100 using the GISS GCM. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol.3 pp.1267-1283
- lxvi Cape, J.N. 2008. Scaling Issues, with Particular Reference to Biogenic VOC Emissions. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 2. pp.144-148.
- lxvii Pilegaard, K. 2008. Influence of Climate on NO and N₂O Emission – Lessons from the NOFRETETE Project. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 2. pp.173-177.
- lii Tarasova, O.A. 2008. Impact of Changing Air Transport Patterns on Observed Trends of Surface Ozone in Europe. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 1. pp.128-134.
- liiv Giguère, M., 2009 Mesure de lutte aux îlots de chaleur urbains. INSPQ Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, 95p.
- lv Dickerson, R.R. et al. 2008. Climate Change and Air Quality for Baltimore and Washington. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 1. pp.112-117
- liii Jacob, D. J., et D. A. Winner. 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*. Vol 43(1). pp. 51-63.
- lvi Adams, P.J. et al. 2008. Impacts of Climate Change and Global Emissions on US Air Quality: Development of an Integrated Modelling Framework and Sensitivity Assessment. Project. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 2. pp.188-193.

-
- lvii Hedegaard, G.B. et al. 2008. Modelling the Impacts of Climate Change on Air Pollution Levels in the 21st Century. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 4. pp.227-232.
- lviii Dentener, F. et al., 2005. The impact of air pollutant and methane emission controls on tropospheric ozone and radiative forcing: CTM calculations for the period 1990–2030. *Atmos. Chem. Phys.* Vol.5, pp.1731-1755.
- lix Monks, P.S. 2009. Global and Regional Air Quality, Univ. Leicester. conf: Atmospheric Composition Change – The European Network of Excellence (ACCENT).
- lx Association pulmonaire, http://www.poumon.ca/protect-protegez/pollution-pollution/climate-climatique/index_f.php
- lxi Cox, R.A. 2008. Laboratory Kinetics Data for Climate – Atmospheric Chemistry Interactions – Some New Challenges for Data Evaluation. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 1. pp. 109-111.
- lxii Pun, B.K. et al., 2008. Response of atmospheric particulate matter to changes in precursor emissions: a comparison of three air quality models. *Environ. Sci. Technol.*, vol.42, pp. 831-837.
- lxiii Moussiopoulos, N. et al. 2008. Coupled Climate, Chemistry, Ecosystem Modelling for Assessing the Interactions between Air Quality and Climate. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 4. pp. 233-239.
- lxiv Rohrer, F., and H. Berresheim, 2006. Strong correlation between levels of tropospheric hydroxyl radicals and solar ultraviolet radiation, *Nature*, no. 442, pp.184-187.
- lxv Rolland, M.N. et al, 2008. Modelling NO Emission from Soils on a Regional Scale. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 2. pp.149-154.
- lxviii Centre Antipoisons, Netherlands, http://www.poisoncentre.be/article.php?id_article=610
- lxxi Reimann, S. et al. 2008. On the Usage of VOCs for Determination of Processes in the Background Atmosphere. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 1. pp.123-127.
- lxxix Lewis, A et al. 2008. Assessing the Future Impacts of Biogenic VOC Emissions on Air Quality. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 1. pp.118-120.
- lxxx Orlando, J. 2011. Hydrocarbon oxidation mechanisms in the lower part of atmosphere. Conference McGill Univ. Dept Chemistry.
- lxxii Lafrance, G et Desjarlais, C. 2006. Impact socio-économique du changement climatique – La demande énergétique; INRS et Ouranos, Montréal 79p.
- lxxiii EIA, Independent Statistics & Analysis, 2011. US Energy Information Administration. <http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epa/epates.html>
- lxxiv Pennell, W.T. et al. 2009. Global Change and Air Quality. Présentation à NARSTO.13p.
- lxxv ACCENT, 2008, The Impact of Climate Change on Air Quality. The 4th Barnsdale Expert Workshop, Urbino.102 p.
- lxxvi Laj, P., EUSAAR consortium, 2008. Need for Improved Standardization of Aerosol Species in Optimized Observation Strategies: First Results from EUSAAR I3 Project. Contribution to ACCENT CCAQ: Group 3. pp.208-210.
- lxxvii Richert, P., Qualité de l'air et changement climatique : un même défi, une même urgence. Ministère de l'écologie et du développement durable. FRANCE. Fév. 2007. <http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/074000137/0000.pdf>
- lxxviii Hicks K. et J.Kuylentierna. 2011. UNEP. Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone, and its Precursors: An overview of Progress by the Assessment Secretariat. Présentation au SEI et Global Atmospheric Pollution Forum.
- lxxix Bond, T.C., et al., 2011. Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse. *Atmos. Chem. Phys.*, no.11, pp.1505-1525.
- lxxx Jones, G.S., N. Christidis, and P.A. Stott. 2011. Detecting the influence of fossil fuel and bio-fuel black carbon aerosols on near surface temperature changes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, no.11. pp.799-816.
- lxxxI AIEM, 2003. La surveillance de la qualité de l'air – des années 60 à nos jours. *Journal Présent*, vol.1, 6p.
- lxxxii Schoemaeker, C. Calibrage et utilisation d'un dispositif mobile de mesure des radicaux OH et HO₂ – Application dans l'atmosphère et en cinétique de la combustion. Université de Lille1, PC2A, stage de recherche. 1 p. http://www.univ-lille1.fr/umr8522/theses_masters2/M2/CEE_PC2A1_2011-2012_CS.pdf.
- lxxxiv Pennell, W.T. et al. 2009. Global Change and Air Quality. Présentation à NARSTO.13p.
- lxxxv Urgelli, B. 2000. Ozone stratosphérique et émissions de chlorofluorocarbures. Éducscol_ENS-Lyon. Site Planet-Terre : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-ozone-et-cfc.xml>.

-
- ^{lxxxvi} Batenbaum, J.C., 2011. Canicule de 2003 : présentation du premier bilan de la pollution par l'ozone. Portail Environnement : <http://www.actualites-news-environnement.com/24886-Canicule-2003-presentation-premier-bilan-pollution-ozone.htm>
- ^{lxxxvii} MDDEP, 2000. Indice de qualité de l'air – les polluants. <http://www.iqua.mddep.gouv.qc.ca/contenu/polluants.htm>
- ^{lxxxviii} Peeples, L., 2011. Heat Wave and Air Pollution : A Double Whammy of Health Risks. The Huffington Post – Canada: http://www.huffingtonpost.com/2011/07/22/heat-wave-air-pollution-rise_n_907459.html
- ^{lxxxix} EPA, US. 2010. Report on the Environment, Ambient Concentrations of Ozone: <http://cfpub.epa.gov/eroe/index.cfm?fuseaction=detail.viewInd&lv=list.listByAlpha&r=231327&subtop=341>