

Université du Québec  
Institut national de la recherche scientifique  
Centre Eau Terre Environnement

**Analyse et caractérisation d'un événement important de  
l'histoire météorologique récente du Québec : l'ouragan Irène  
(2011)**

Par

Imen GHANNEM

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de

Maître ès sciences (M.Sc.)

en sciences de l'eau

**Jury d'évaluation**

Examineur externe	Daniel Nadeau	École Polytechnique de Montréal
Examineur interne	Karem Chokmani	INRS Centre ETE
Directeur de recherche	Alain Mailhot	INRS Centre ETE



## Résumé

Les catastrophes naturelles ont, de tout temps, représenté une menace pour l'homme. Les ouragans comptent parmi les catastrophes naturelles ayant d'importants impacts à l'échelle mondiale tant en terme environnemental que socio-économique. Au cours des derniers siècles, plusieurs ouragans ont frappé les régions du nord-est du continent américain. Les États-Unis figurent parmi les régions les plus menacées par ce type d'événements. Parmi ces événements, figure l'ouragan Irène 2011 qui a été l'un des ouragans majeurs à avoir récemment frappé la côte nord-est de l'Amérique du Nord de façon générale et le Québec de façon particulière. Il est important, dans un contexte de vulnérabilité de nos sociétés face à de tels événements, d'analyser et de mieux caractériser ce type d'événement.

L'objectif principal de la présente étude est de mieux caractériser l'ouragan Irène 2011 lors de son passage au Québec. Cette caractérisation repose sur une analyse des séries pluviométriques aux différentes stations sur le territoire et par l'utilisation des sorties du modèle *Global Environmental Multiscale - Limited Area Model* (GEM-LAM) d'Environnement Canada. L'analyse des séries de pluies a été réalisée sur la base des données historiques enregistrées aux stations météorologiques réparties dans cinq états des États-Unis et au Québec. La comparaison des séries de pluies observées et simulées a également permis de déterminer dans quelle mesure ces ensembles sont cohérents et de voir comment les prévisions météorologiques issues du modèle étaient en mesure de fournir des informations sur le caractère extrême de l'ouragan Irène 2011 à l'échelle de l'ensemble du territoire touché.

Les résultats de l'analyse ont montré que le modèle GEM-LAM reproduit de manière acceptable le déplacement de la trajectoire d'Irène. Ce modèle présente donc une information utile et pertinente sur le caractère extrême d'Irène, information qui pourra être utile dans un contexte de modélisation hydrologique des impacts de cet événement notamment en milieu urbain. Ces résultats montrent également que l'événement Irène a entraîné des pluies extrêmes de périodes de retour très élevées (de plus de 100 ans dans plusieurs régions) pour les durées de 12 et 24 heures.

**Mots clefs** : ouragan Irène, histoire météorologique, pluie intense, intensité de pluie, Québec, Global Environmental Multiscale - Limited Area Model (GEM-LAM)

« Each time I think I've reached a limit there's a door, it opens,  
and the limit is gone »

**HERBERT NITSCH**



## REMERCIEMENTS

Je souhaite adresser tout d'abord mes remerciements les plus sincères à mon directeur de recherche, Alain Mailhot, pour son encadrement stimulant et très valorisant. Poursuivre mon projet de maîtrise en compagnie d'un professeur si compétent, ingénieux et consciencieux était pour moi une opportunité inouïe. Alain Mailhot, je te suis particulièrement reconnaissante de l'engagement dont tu as fait preuve avec moi. Merci.

Je tiens également à remercier chaleureusement les membres de mon jury, Monsieur Karem Chokmani et Monsieur Daniel Nadeau d'avoir accepté d'évaluer mon travail de maîtrise.

Un remerciement particulier à Monsieur Jean-Pierre Villeneuve et Madame Sophie Duchesne, professeurs à l'INRS –ETE, pour leurs encouragements, leur gentillesse et leur soutien moral.

Bien sûr, c'est grâce à mes très chers parents, Mohamed et Zakia, et à leur soutien infailible que j'ai eu la chance de me rendre jusqu'ici. Du fond du cœur, je vous remercie. Vous êtes ma fierté, que Dieu vous protège. Merci également aux plus belles sœurs au monde : Arwa, Rahma, Amal et Meniar. Je vous aime beaucoup et je vous souhaite de réussir sur tous les plans.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude envers mes amis, mes voisins et collègues de l'INRS (Anas Elalem, Jimmy Poulin, Jean-Daniel Bourgault, Jeremy Panthou, Guillaume Talbot, Mouna Doghri, Sampa Maiti, Issam Bakari, Hamdi Messaoued, Maher Nasr, Mohamed Dkhil, Malik Chtara, Bilel Ben Mbarek, Karine Guinard, Khalid Oubennaceur, Dhouha Ouali, Dhouha Ayed, Jihene Zaiem, Parvin Kalantari, Guillaume Sena, Anne-Gaëlle Elin, Éloïse Lemaire, Bouchra Nasiri, Marie-Ève Leclerc et Jean-Dominique Lebrun), pour leur soutien moral, leur aide et pour les moments de joie qu'on a partagés ensemble. Je souligne la belle amitié que j'ai développée avec Mouna.

Finalement, j'aimerais également très sincèrement remercier Monsieur Vincent Fortin d'Environnement Canada qui nous a gracieusement fourni les séries du modèle GEM-LAM.



## TABLE DES MATIÈRES

Résumé .....	iii
REMERCIEMENTS.....	vii
TABLE DES MATIÈRES .....	ix
LISTE DES TABLEAUX .....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES .....	xiv
1. Introduction .....	1
2. Ouragans : concepts de base et cadre théorique .....	3
2.1 Description physique.....	3
2.2 Type d'ouragans et classification .....	6
2.3 Conditions de formation et de développement des ouragans.....	8
2.4 Formation de la pluie dans les ouragans.....	9
2.5 Mécanismes associés aux ondes de tempêtes .....	11
2.6 Facteurs influençant l'évolution d'un ouragan .....	13
3. Ouragans et changements climatiques .....	15
3.1 Tendances historiques de l'activité cyclonique dans l'Atlantique nord.....	15
3.2 Impacts potentiels des changements climatiques sur la fréquence et l'intensité des ouragans .....	18
4. Ouragan Irène.....	21
4.1 Description générale : formation et durée de vie .....	21
4.2 Trajectoire et intensités des vents.....	22
4.3 Cumuls de pluies enregistrés.....	23
4.4 Dommages matériels et pertes de vies .....	24
5. Matériel et méthodes.....	27
5.1 Zone d'étude.....	27
5.2 Données pluviométriques utilisées.....	29
5.3 Simulation des champs de précipitations de l'Ouragan Irène .....	31
5.3.1 Modèle <i>Global Environmental Multiscale – Limited Area Model</i> (GEM-LAM).....	31
5.3.2 Données simulées utilisées .....	32
5.4 Comparaison des séries de précipitations observées et simulées.....	33
6. Résultats et discussions.....	37
6.1 Comparaison des séries de pluie observées et simulées.....	37

6.1.1 Cumuls de pluie.....	37
6.1.2 Hauteurs horaires maximales de pluie.....	41
6.1.3 Séries temporelles de pluie .....	44
6.1.4 Trajectoire de l'ouragan Irène.....	52
6.2 Estimation des périodes de retour simulées et observées.....	53
7. Conclusion et perspectives .....	61
8. Liste bibliographique .....	65
9. ANNEXES.....	69
ANNEXE A : .....	69
ANNEXE B : .....	71
ANNEXE C : .....	81

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Classification des cyclones tropicaux de l'Atlantique nord proposée par Elsner <i>et al.</i> (1999).....	7
Tableau 2.2 : Échelle originale des ouragans de Saffir-Simpson (Neely, 2006).....	8
Tableau 6.1 : Liste des stations retenues dans les différentes zones (voir Figure 6.6b) et valeurs correspondantes des coefficients de Nash-Sutcliffe, du biais et du RMSE.....	48
Tableau 6.2 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 1 heure. Le nombre de stations disponibles est de 229. ....	57
Tableau 6.3 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 2 heures. Le nombre de stations disponibles est de 226. ....	58
Tableau 6.4 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 6 heures. Le nombre de stations disponibles est de 226. ....	58
Tableau 6.5 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 12 heures. Le nombre de stations disponibles est de 226. ....	59
Tableau 6.6 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 24 heures. Le nombre de stations disponibles est de 221. ....	59

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Différentes parties d'un ouragan.....	5
Figure 2.2 : Processus physiques pour la formation de la pluie dans un ouragan.....	10
Figure 2.3 : Coupe verticale d'un ouragan illustrant des mécanismes associés aux ondes de tempête .....	12
Figure 3.1 : Fréquences des tempêtes tropicales en Atlantique nord de 1900 à 2005...	16
Figure 3.2 : Évolution historique du nombre des ouragans dans l'Atlantique Nord (1878 - 2011).....	17
Figure 3.3 : Évolution de la température moyenne globale à la surface de la mer de 1850 à 2005.....	19
Figure 4.1 : Trajectoire et intensité d'Irène 2011 du 21 au 29 août 2011 .....	23
Figure 5.1 : Carte de la zone d'étude délimitée par la bordure de la grille du modèle GEM-LAM .....	19
Figure 5.2 : Distribution historique de la moyenne des cumuls de précipitations entre 1 <sup>er</sup> avril et 31 octobre pour la période 1974 – 2003 au Québec .....	28
Figure 5.3 : Carte localisant les 224 stations pluviométriques utilisées dans le cadre de la présente étude .....	30
Figure 5.4 : Domaine et grille du modèle GEM-LAM (en noir) projetée sur la partie est du Québec .....	33
Figure 5.5 : Étapes des analyses effectuées .....	34
Figure 6.1 : Cartes des cumuls de pluie pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT.....	39
Figure 6.2 : Cumuls simulés de pluie en fonction des cumuls enregistrés aux différentes stations du territoire d'étude pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT. ....	40
Figure 6.3 : Histogramme des écarts entre cumuls simulés et observés aux différentes stations du territoire sous étude pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT ou heure de Greenwich.....	40
Figure 6.4 : Cartes des hauteurs horaires maximales de pluie pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT .....	41
Figure 6.5 : Hauteurs de pluies horaires maximales simulées en fonction des hauteurs de pluies horaires maximales observées aux différentes stations du territoire sous étude pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT. ....	43
Figure 6.6 : Histogramme des écarts entre hauteurs de pluies horaires maximales simulées et observées aux différentes stations du territoire sous étude pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT.....	44
Figure 6.7 : Histogrammes des valeurs des estimateurs comparant les séries horaires de pluie simulées et observées aux divers couples stations/tuiles pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT .....	45
Figure 6.8 : Valeurs des estimateurs de Nash-Sutcliffe comparant les séries horaires de pluie simulées et observées aux divers couples stations/tuiles pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT. ....	46

Figure 6.9 : Séries de pluie horaire simulées et observées aux stations de la zone 1 (voir Figure 6.6b).....	48
Figure 6.10 : Séries de pluie horaire simulées et observées aux stations de la zone 2 (voir Figure 6.6b).....	49
Figure 6.11 : Séries de pluie horaire simulées et observées aux stations de la zone 3 (voir Figure 6.6b).....	49
Figure 6.12 : Séries de pluie horaire simulées et observées aux stations de la zone 4 (voir Figure 6.6b).....	50
Figure 6.13 : Histogrammes : a) des coefficients de Nash-Sutcliffe; et b) des écarts entre les coefficients de Nash-Sutcliffe avant et après décalage des séries simulées d'une heure pour chaque couple station/tuile.....	50
Figure 6.14 : Trajectoires simulée et observée de l'ouragan Irène.....	51
Figure 6.15 : Périodes de retour estimées à partir des séries simulées pour les durées : a) 1 h., b) 2 h., c) 6 h., d) 12 h. et e) 24 h. ....	56
Figure 6.16 : Périodes de retour estimées à partir des séries aux stations pour les durées : a) 1 h., b) 2 h., c) 6 h., d) 12 h. et e) 24 h.....	56

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

SSHWS : Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale

SSHS : Saffir-Simpson Hurricane Scale

NHC : National Hurricane Center

UTC : Universal Time Coordinated (Temps Universel Coordonné)

USD : United States Dollar

CNRTL : Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales

Kt : Knot

OECD : Organization for Economic Cooperation and Development

NWS : National Weather Service

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

HRDPS : High Resolution Deterministic Prediction System

GEM : Global Environmental Multiscale

HURDAT : HURricane DATabase

C2ES : Center for climate and energy solutions (Centre de solutions énergétiques et climatiques)

T.obs : Période de retour estimée à partir des données observées

T.simul : Période de retour estimée à partir des données simulées

Delta I : Différence entre les intensités maximales observée et simulée

Delta T : Décalage horaire entre les maximums d'intensité

cumul\_obs : Total de pluie cumulée observée

cumul\_simul : Total de pluie cumulée simulée

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat - GIEC)

RMSE : Root Mean Square Error (Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne)

# 1. Introduction

Les cyclones tropicaux sont des phénomènes météorologiques majeurs qui peuvent avoir des conséquences importantes sur l'environnement et les sociétés. Parmi ces cyclones tropicaux, les tempêtes les plus intenses, appelées souvent ouragans ou bien typhons, sont parmi les phénomènes géophysiques les plus spectaculaires et meurtriers (Korty 2013; Emanuel 2003; Galiano 2000).

Les événements météorologiques extrêmes ont toujours eu de graves impacts en milieu urbain. Parmi ces événements, les ouragans sont parmi les plus importants et les plus dommageables (Korty, 2013). La fréquence et l'intensité de ce type d'événement risquent par ailleurs d'augmenter au cours des prochaines décennies à cause de l'aggravation de l'activité cyclonique conséquence des changements climatiques (IPCC, 2007b). Plusieurs queues d'ouragans ont récemment frappé les régions est du Canada entraînant des dommages importants. Parmi ces ouragans, Irène 2011 représente un événement important de l'histoire météorologique récente du Québec puisqu'il a été classé au 6<sup>ème</sup> rang du bilan des 20 sinistres les plus coûteux dans le monde de l'année 2011 (Bevere *et al.*, 2012). Malgré son importance, cet événement a été peu documenté et analysé au Québec jusqu'à maintenant. Une meilleure caractérisation de cet événement pour le territoire québécois paraît utile et pertinente dans une optique où ce type d'événement sera possiblement appelé à se produire plus souvent dans un contexte de changements climatiques.

L'objectif principal de ce projet vise à documenter et à analyser sur le plan pluviométrique l'ouragan Irène 2011 pour la partie nord de sa trajectoire. Cet objectif peut être scindé en quatre sous-objectifs :

- a) Documenter les conditions météorologiques ayant prévalu lors du passage d'Irène aux États-Unis et au sud du Québec;
- b) Caractériser le caractère extrême d'Irène en fonction des données disponibles aux stations;
- c) Comparer les données aux stations aux sorties du modèle météorologique *Global Environmental Multiscale-Limited Area Model* (GEM-LAM) d'Environnement Canada afin de vérifier la cohérence des séries simulées et enregistrées aux stations;

d) Utiliser les sorties du modèle pour caractériser l'ouragan Irène sur l'ensemble du territoire.

Le présent mémoire résume l'ensemble des travaux effectués dans le cadre de ce projet. Le premier chapitre porte sur les concepts de base des phénomènes d'ouragans (Chapitre 2) qui englobent une description physique des ouragans, une présentation du système de classification et des conditions de leur apparition, une description des différents stades de développement d'un ouragan, ainsi qu'une description des mécanismes associés aux ondes de tempêtes et des facteurs influençant l'évolution d'un ouragan. Le Chapitre 3 est consacré à une revue de littérature portant d'abord sur l'évolution récente du nombre et de l'intensité des ouragans sur la côte est de l'Amérique du Nord et ensuite sur les effets potentiels des changements climatiques sur le nombre et l'intensité de ce type de phénomène. Le Chapitre 4 s'intéresse plus spécifiquement à l'ouragan Irène 2011 et fournit diverses informations sur sa formation, sa trajectoire, les dommages matériels et pertes de vie que son passage a entraînées. Le Chapitre 5 dresse la liste et donne une description des données utilisées dans le cadre de ce travail puis explique la méthodologie utilisée. Le chapitre suivant est consacré aux résultats et discussions (Chapitre 6) et présente, dans sa première section, une comparaison détaillée des séries de pluie en climat historique (données observées) aux séries d'un modèle météorologique (modèle GEM-LAM). La deuxième section aborde l'estimation des périodes de retour observées (aux différentes stations) et simulées (aux différentes tuiles) afin d'évaluer le caractère extrême d'Irène 2011. Finalement, la synthèse de l'ensemble des travaux est présentée sous forme de conclusion au Chapitre 7.

## **2. Ouragans : concepts de base et cadre théorique**

Le Chapitre 2 présente une revue de la littérature de certaines études pertinentes réalisées sur les phénomènes climatiques extrêmes. La première section s'attarde sur les caractéristiques générales d'un ouragan et sa description physique. Les types d'ouragans et leur classification sont présentés dans la deuxième section. Dans la troisième section, certaines études traitant des conditions de formation des ouragans sont présentées. La section suivante (Section 2.4) aborde la formation de la pluie dans les ouragans. Ensuite, l'avant-dernière section porte sur les mécanismes associés aux ondes de tempêtes et un aperçu de l'évolution des ouragans lorsqu'ils touchent terre est présenté à la dernière section.

### **2.1 Description physique**

Selon Kerty (2013), un ouragan est issu d'un cyclone tropical puisqu'il en représente le stade final de son évolution. Il s'agit d'un système de basse pression qui se forme sur les eaux chaudes de l'océan. Les ouragans sont à leur naissance des événements ponctuels qui occupent rapidement un territoire immense au cours des phases ultérieures de leur développement. On compte environ 90 ouragans qui se forment chaque année dans le monde entier (Oliver, 2005). Bien que ceux-ci se forment principalement dans les basses latitudes, ils peuvent affecter aussi bien les zones subtropicales que les zones de plus hautes latitudes.

Selon l'administration nationale américaine de l'aéronautique et de l'espace (NASA), les ouragans sont de grandes tempêtes dont les vents sont minimalement de l'ordre de 119 km/h (ou 74 mph). Ces ouragans peuvent parfois toucher le continent. Il est important de préciser que lorsqu'un ouragan atteint la côte, il entraîne avec lui une élévation du niveau de la mer attribuable à la dépression et aux vagues. Cette élévation est souvent appelée une onde de tempête, qui peut entraîner de fortes pluies et des inondations. Une fois que l'ouragan se forme, les météorologues sont généralement en mesure de prédire sa trajectoire et sa force et, par conséquent, sa classe. Ces renseignements sont utiles pour aider les populations des zones qui pourraient être affectées à se préparer à l'arrivée de la tempête<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> What are hurricanes?, <http://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/what-are-hurricanes-58.html> (consulté le 24 décembre 2013)

Le développement d'un ouragan se fait en plusieurs étapes. D'abord, les températures à la surface de la mer (à environ 10 mètres de profondeur) doivent être de plus de 27°C sur une vaste zone de l'océan. Ces eaux très chaudes de l'océan accompagnées d'une atmosphère chargée d'humidité vont permettre la naissance d'un ouragan (Barry *et al.* 2010, 2014; Ahrens 2009). Ces conditions sont favorables à la montée de la vapeur d'eau dans la colonne d'air qui se refroidit et se condense pour former des gouttelettes d'eau. Cette condensation va libérer par la suite de la chaleur dans l'atmosphère. La succession de ces événements mène à un enroulement nuageux stimulé par des vents violents. L'air situé dans les basses couches de l'atmosphère subit un mouvement par le biais du flux d'air existant vers les hautes altitudes de l'atmosphère<sup>2</sup>.

En raison de la force de Coriolis, un ouragan formé dans l'hémisphère nord tourne toujours dans le sens antihoraire alors que celui formé dans l'hémisphère sud tourne dans le sens horaire (Barry *et al.* 2014; Perez-Peraza *et al.* 2012; Neely 2006).

Une fois formé, un ouragan est composé de trois parties à savoir l'œil, le mur de l'œil et les bandes de pluie (Figure 2.1). L'œil de l'ouragan se trouve au centre de la tempête. Les vents sont légers et le ciel est partiellement nuageux à cet endroit. Le mur, quant à lui, représente la paroi de l'œil qui est un anneau d'orages tourbillonnant autour de ce dernier. C'est à ce niveau que se situent les vents les plus puissants et la pluie la plus intense. Finalement, les bandes de nuages en spirale générant pluies et orages se prolongent à partir de la paroi de l'œil de l'ouragan. Ces bandes s'étendent sur des centaines de kilomètres et peuvent parfois être génératrices de tornades<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Environment Canada, <http://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=En&n=9FDFBF2C-1> (consulté le 9 janvier 2014)

<sup>3</sup> Hourly/Sub-hourly observational data, <http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=clim&cfg=cdo&theme=hourly&layers=001&node=gis> (visité le 12 janvier 2014)

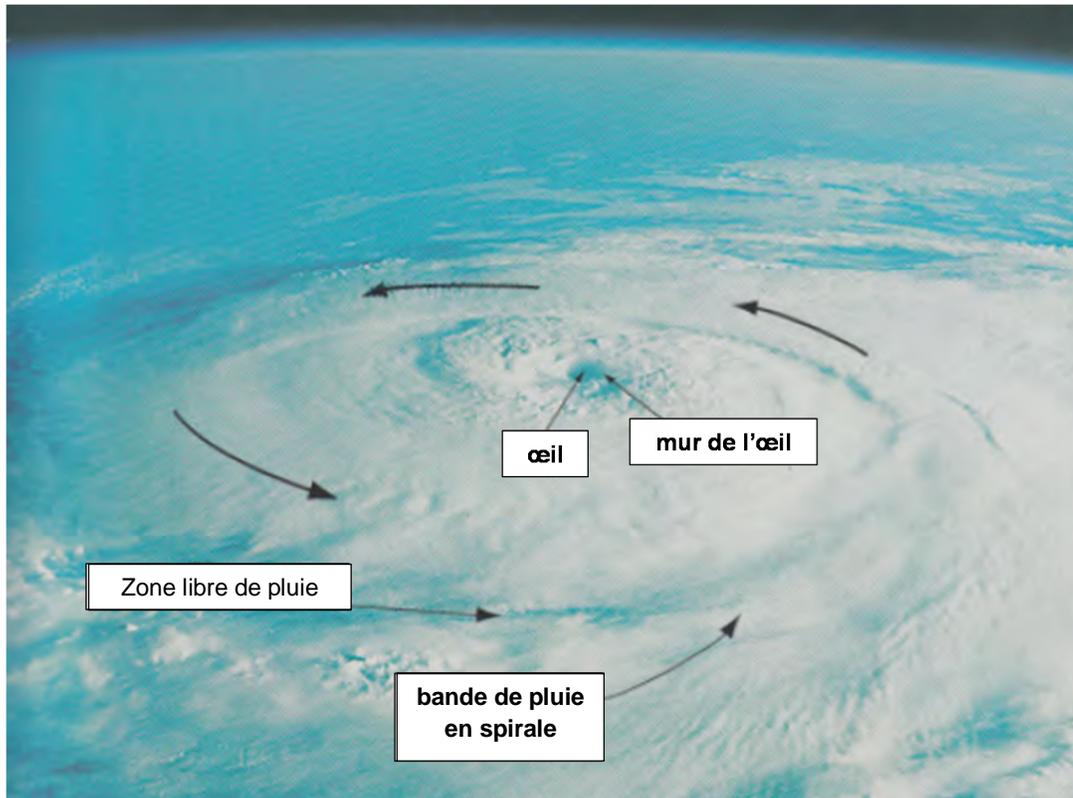


Figure 2.1 : Différentes parties d'un ouragan (Le sens de rotation est indiqué par les flèches en gras; (Ahrens, 2009)

Un ouragan est décrit comme un système de basses pressions de nature cyclonique et tropical. C'est un système de basse pression parce que l'œil d'un ouragan est toujours une zone de basse pression, *tropical* lorsqu'il se produit au niveau des régions tropicales de l'océan et il est dit *cyclonique* lorsque les vents de l'ouragan qui s'affaiblissent en altitude tourbillonnent autour d'un œil central. La principale source d'énergie pour les ouragans est la chaleur latente issue de la condensation.

Les ouragans possèdent plusieurs caractéristiques importantes qui varient selon son âge, sa taille et sa position. Les principales caractéristiques d'un ouragan sont l'intensité maximale ( $I_{max}$ ) et l'intensité minimale ( $I_{min}$ ) des pluies, la durée de vie appelée aussi longévité, l'aire et la taille du système, la pression atmosphérique minimale et la vitesse du vent maximale soutenu (Hoffman *et al.* 2012; Klotzbach 2006).

## 2.2 Type d'ouragans et classification

De nombreuses catégories et de nombreux systèmes de classification des ouragans ont été proposés dans la littérature. Selon Kerty (2013), les cyclones tropicaux peuvent être classés en fonction de leur intensité en utilisant une nomenclature qui varie d'une région à l'autre.

Kislow (2008) mentionne que les cyclones tropicaux peuvent être classés en deux grandes catégories. La première, appelée dépressions tropicales (ou tempêtes tropicales selon Kerty 2013), est caractérisée par des vents maximums soutenus inférieurs à 61 km/h. Une fois que le maximum des vents soutenus atteint 61 km/h, ils sont désignés comme tempêtes tropicales. Neely (2012) et Kislow (2008) précisent que les tempêtes tropicales dont les vents soutenus atteignent minimalement 118 km/h peuvent être désignés de cinq façons différentes : 1) **ouragan** dans les régions de l'océan Atlantique Nord, de l'océan Pacifique nord-est et de l'océan Pacifique sud ; 2) **typhon** dans l'océan Pacifique nord-ouest ; 3) **cyclone tropical sévère** dans les régions de l'océan Pacifique sud-ouest et de l'océan Indien sud-est ; 4) **tempête cyclonique sévère** dans les régions nord de l'océan Indien ; et 5) **cyclone tropical** dans le sud-ouest de l'océan Indien. Une particularité qui permet de distinguer les ouragans des autres types de système de tempête à basse pression est que les ouragans sont des systèmes à 'cœur chaud', ce qui signifie que le système de tempête entier est composé d'air chaud (Neely, 2012).

Dans leurs études sur les ouragans de l'océan Nord Atlantique, Elsner *et al.* (1999) ont proposé une classification détaillée des cyclones tropicaux basée principalement sur les critères d'intensités et d'évolution des cyclones tropicaux (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Classification des cyclones tropicaux de l'Atlantique nord proposée par Elsner *et al.* (1999).

Classe	Caractéristiques
Onde tropicale	Petite baisse de la pression le long de la latitude. À l'ouest de la surface du creux de l'onde, les vents sont divergents et l'air n'est pas accompagné de nuages, alors qu'à l'est du creux de l'onde, il y a une nébulosité accrue.
Dépression tropicale	Premiers stades d'un cyclone tropical dont les vitesses soutenues maximales des vents de surface sont inférieures à 64 km/h.
Tempête tropicale	Cyclone tropical à cœur chaud dont les vitesses soutenues maximales des vents de surface varient entre 64 et 118 km/h.
Ouragan	Cyclone tropical à cœur chaud dont les vitesses soutenues maximales des vents de surface sont supérieures à 118 km/h.
Ouragan majeur	Ouragan dont les vitesses soutenues maximales des vents sont supérieures à 180 km/h. Il est appelé aussi ouragan intense.

Il est important de signaler qu'au début des années 70, un système de classification des ouragans a été proposé par Herbert Saffir, un ingénieur-conseil, et Robert Simpson, directeur du *National Hurricane Center* (NHC) aux États-Unis. Le but de cette classification est de quantifier le niveau des dommages et des inondations associé à un ouragan. Il s'agit de l'échelle d'intensité des ouragans de Saffir-Simpson. Cette échelle définit différents seuils pour la pression au centre d'un ouragan, les vitesses soutenues des vents et la hauteur de vagues produites par la tempête<sup>4</sup>. Selon Neely (2006), l'échelle des ouragans de Saffir-Simpson est utilisée uniquement pour décrire les ouragans qui se forment dans l'océan Atlantique et l'océan Pacifique Nord. Le Tableau 2.2 montre les différents types d'ouragans selon l'échelle de Saffir-Simpson (SSHS).

<sup>4</sup> Hurricanes : The greatest storms on Earth, [http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Hurricanes/hurricanes\\_2.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Hurricanes/hurricanes_2.php) (consulté le 25 décembre 2013)

Tableau 2.2 : Échelle originale des ouragans de Saffir-Simpson (Neely, 2006).

Catégorie (niveau de l'échelle)	Pression au centre (mbar = hPa)	Vitesse des vents (km/h)	Onde de tempête (m)	Dommages
1	≥ 980	119-153	1 à 1,7	Minimes
2	965 à 979	154-177	1,8 à 2,6	Majeurs
3	945 à 964	178-208	2,7 à 3,8	Étendues
4	920 à 944	209-251	3,9 à 5,6	Très étendues
5	< 944	> 252	≥ 5,7	Catastrophiques

Sources : Hurricanes : Saffir-Simpson Scale, <http://climatecenter.fsu.edu/topics/112-topics> (consulté le 7 janvier 2014); National Weather Service, [http://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws\\_table.pdf](http://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws_table.pdf), (consulté le 8 janvier 2014).

D'autres études comme celles de Russell *et al.* (2013) propose de classer les ouragans tropicaux selon cinq types sur la base des intensités de vents soutenus. Ces auteurs soulignent qu'un cyclone est classé comme ouragan une fois que les vents atteignent une vitesse maximale soutenue supérieure ou égale à 119 km/h, ce qui représente la catégorie 1 des ouragans selon l'échelle de classification des vents et des ouragans de Saffir-Simpson (SSHWS). Ils ajoutent que la classe la plus dangereuse selon l'échelle de classification correspond à la catégorie 5 des ouragans dont les vents dépassent 249 km/h. Korty (2013) précise que l'échelle originale de Saffir-Simpson a été récemment modifiée (en 2012) afin de corriger certaines imprécisions relativement aux conversions des vitesses des vents entre les différents systèmes d'unités.

### 2.3 Conditions de formation et de développement des ouragans

D'après Kieffer (2013), les principaux facteurs qui contribuent à la formation des ouragans et qui déterminent leur force sont la position et l'abondance de l'eau chaude, la structure de l'atmosphère au cours de la saison des ouragans et la proximité de l'équateur. Ces facteurs sont complexes et font souvent intervenir des informations telles que les profils de températures de l'océan qui demeurent encore mal compris. Suite au

développement et à l'amélioration des outils de prédiction des ouragans tels que les modèles numériques de prévisions météorologiques, les radars et les satellites météorologiques, l'identification des facteurs et conditions favorables au développement des ouragans sont mieux compris et mieux prédits.

Trois conditions fondamentales sont nécessaires pour qu'il y ait formation d'un ouragan à savoir : 1) des eaux chaudes en surface des océans; 2) des conditions élevées d'humidité de l'air; et 3) des configurations des vents cycloniques favorables *c.-à-d.* que le cisaillement vertical du vent doit être faible, ce qui se traduit par des vitesses ou des directions des vents presque uniformes entre les différentes altitudes (Ahrens 2009; Neely 2006). La formation d'un ouragan nécessite premièrement que l'air soit en contact avec des eaux chaudes de l'océan. Cet air chaud et humide engendre un système de basse pression propice à la génération d'orages et de vents violents cycloniques à la surface de la mer. Le mouvement de ces vents, tirant l'air chaud et humide vers le haut et vers l'intérieur dans un mouvement circulaire, favorise la formation d'orages en haute mer (Galiano, 2000).

D'après Ahrens (2009) la formation d'un ouragan nécessite la présence de deux groupes de conditions favorables qui englobent, d'une part, des conditions de surface telles que les eaux chaudes, l'humidité de l'air, les vents convergents et, d'autre part, des conditions météorologiques favorables. L'auteur indique que ces conditions sont complémentaires du fait que l'absence de conditions météorologiques favorables en altitude peut inhiber le développement de l'ouragan même si les conditions de surface semblent favorables. Un autre facteur important qui intervient aussi dans l'inhibition de la formation des ouragans est le comportement très puissant des vents en hautes altitudes *c.-à-d.* que le cisaillement vertical du vent doit être fort. Ce cisaillement des vents favorise la perturbation du mode de convection et tend à dissiper la chaleur et l'humidité considérées comme des éléments indispensables au développement d'un ouragan.

## **2.4 Formation de la pluie dans les ouragans**

D'après Ahrens (2009), le diamètre moyen d'un ouragan peut généralement varier entre 640 et 800 km. Au niveau du mur de l'œil, il existe des orages intenses qui tourbillonnent

autour du centre de la tempête sur une hauteur pouvant atteindre 18 km au-dessus du niveau de la mer.

La formation de la pluie dans un ouragan est due à la succession de certains processus physiques déclencheurs. Tout d'abord, le ciel se couvre de nuages lorsqu'on se rapproche de l'ouragan et de son œil (Figure 2.2.a). De même, la pression atmosphérique diminue progressivement au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'œil du système. Par conséquent, les vents soufflent dans les directions du nord et du nord-ouest avec une vitesse de plus en plus élevée près de l'œil. Cette vitesse atteint sa valeur maximale au niveau du mur de l'œil avant de subir une chute au niveau de l'œil (Figure 2.2.b).

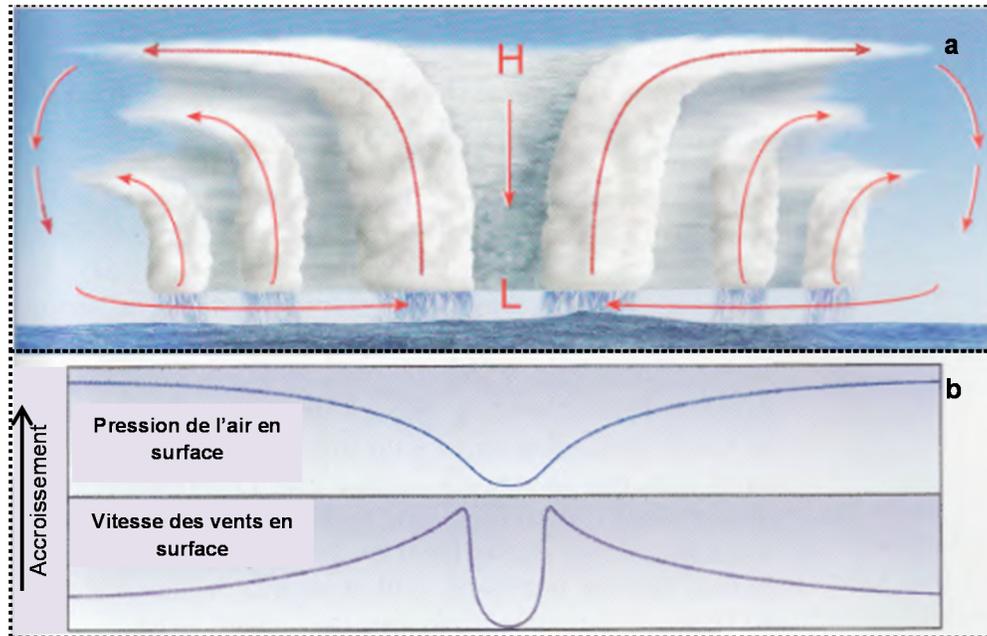


Figure 2.2 : Processus physiques pour la formation de la pluie dans un ouragan (Ahrens, 2009)

Les pluies sont la conséquence de la montée de l'air humide et chaud. Une énorme quantité de chaleur latente (symbole L sur la Figure 2.2.a) est relâchée au sein des nuages lors de la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes d'eau. Cela entraîne le réchauffement de l'air en altitude et la formation d'une zone de haute pression. Par

conséquent, l'air migre selon un mouvement vers l'extérieur (flèches rouges sur la Figure 2.2.a). Il est important de préciser que le réchauffement de l'air provoque un abaissement de sa densité qui induit par la suite une diminution de la pression de l'air en surface. Les vents de surface (flèches rouges horizontales sur la Figure 2.2.a) extraient la chaleur latente (L), la chaleur sensible (H) et l'humidité de la surface de l'océan.

La convergence des vents de surface est considérée comme un facteur indispensable pour le développement des orages caractérisés par de grandes quantités de pluies lors du passage de la tempête. La distribution de la pluie formée dans un ouragan n'est pas aléatoire. Dans un ouragan, plus la pluie tombée se concentre dans la partie interne autour du mur de l'œil, moins abondante est la pluie dans les bandes pluvieuses extérieures. À titre d'exemple, les études statistiques de Gray (1981) montrent que la production moyenne de pluie par un ouragan de rayon 665 km est de l'ordre de 1,5 cm/jour à l'intérieur du système ce qui correspond à un volume de pluie de l'ordre de  $2,1 \times 10^{16} \text{ cm}^3/\text{jour}^5$ .

## **2.5 Mécanismes associés aux ondes de tempêtes**

Plusieurs processus météorologiques sont en jeu lors du développement d'un ouragan. Selon Emanuel (2003), ces processus sont fonctions d'un ensemble de variables météorologiques telles la température de l'air et la vitesse des vents.

La source d'énergie pour alimenter un cyclone tropical est le transfert de chaleur de l'océan vers l'atmosphère. Certaines études ont montré que l'intensité des ouragans est sensiblement dépendante des interactions physiques à l'interface air-mer (Emanuel, 2003). Les mécanismes météorologiques associés aux ondes de tempêtes sont illustrés à la Figure 2.3.

---

<sup>5</sup> Hurricane Research Division, <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/D7.html> (consulté le 2 décembre 2014)

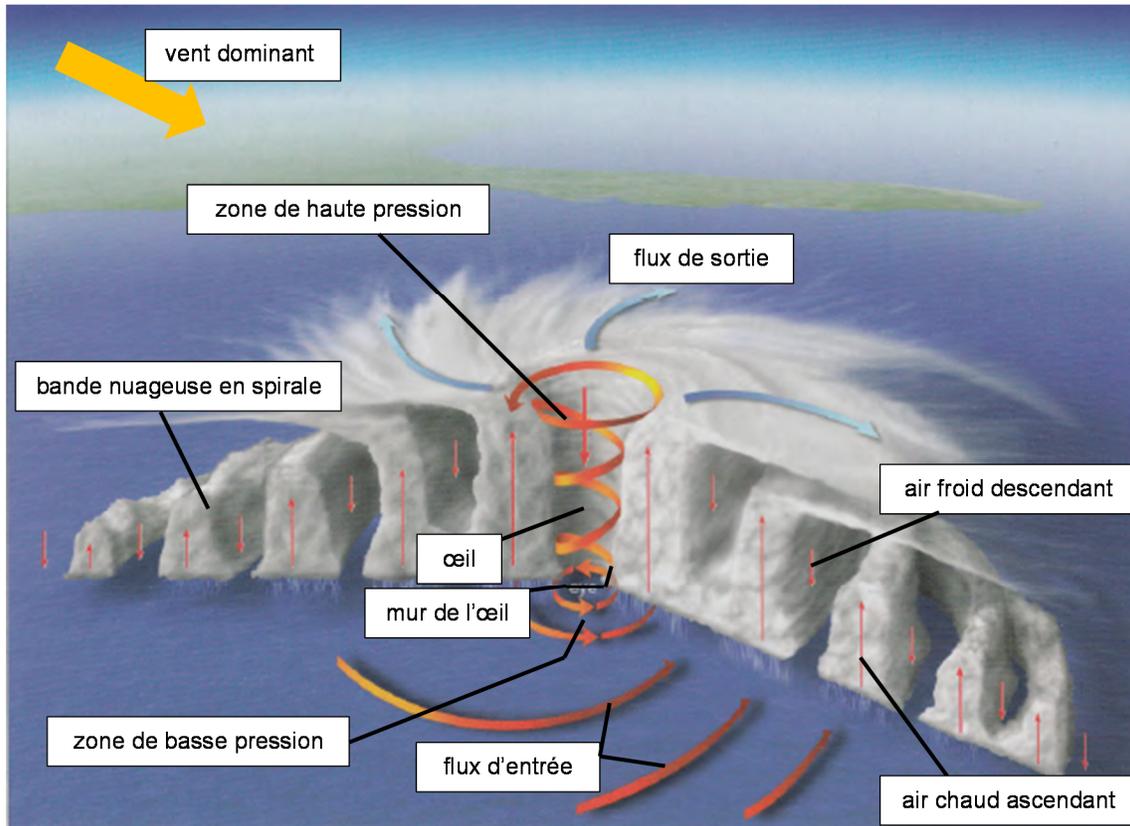


Figure 2.3 : Coupe verticale d'un ouragan illustrant des mécanismes associés aux ondes de tempête. (Source : inspiré et modifié de Ahrens (2009))

Cette figure montre une colonne d'air qui s'élève de l'océan vers l'atmosphère tout en provoquant une chute de pression au niveau de la surface de l'océan. Cette montée s'explique par le fait que l'air qui s'élève est plus chaud que l'air ambiant, et donc plus léger. Les nuages dont la base se situe dans les basses altitudes et qui s'étalent en hauteur se développent par la suite verticalement en formant une bande nuageuse en spirale. L'œil constitue le centre du cyclone et se caractérise par des vents très faibles avec peu de nuages. À partir de l'œil, il y a de l'air chaud ascendant qui se dégage du système ; c'est une colonne d'air chaud constituée suite au réchauffement de la couche superficielle de l'océan sous l'effet du soleil (Barry *et al.*, 2010).

Tous ces événements sont accompagnés d'une forte pluie. Près du centre de l'ouragan, on observe le mur de l'œil qui est une épaisse couche nuageuse rotationnelle qui entoure l'œil. Au niveau du mur de l'œil, les vents sont très forts et les précipitations sont très abondantes. La zone de haute pression est une colonne d'air montant qui s'est

formée et qui entraîne une élévation de la pression en altitude au niveau de la tête des nuages les plus développés.

Comme l'indique la Figure 2.3, les zones de basse et de haute pression, ainsi que la bande nuageuse en spirale ne sont pas accompagnées uniquement de fortes pluies, mais aussi d'un vent dominant. Ce dernier assure une vitesse importante au système pour faire déplacer l'ouragan. Le mouvement rotatif de l'ouragan est associé à la force de Coriolis. Elle agit perpendiculairement à la direction du mouvement de tout corps se déplaçant dans un système en rotation uniforme. Dans l'hémisphère nord, la force de Coriolis fait donc en sorte que les ouragans tournent dans le sens antihoraire.

## **2.6 Facteurs influençant l'évolution d'un ouragan**

Plusieurs facteurs peuvent influencer la trajectoire de l'ouragan et le conduire ultimement à toucher terre. Ahrens (2009) présente une synthèse de l'ensemble des conditions qui peuvent entraîner une diminution d'apport d'énergie. À titre d'exemple, cet auteur indique que le passage au-dessus d'eaux froides dans l'océan entraîne une perte d'énergie. De même, une perte de la source d'énergie peut s'expliquer par un refroidissement de l'ordre de 2,5°C de la couche des eaux de la mer qui se trouve au-dessous du mur de l'œil de la tempête ou bien lorsque cette couche devient peu profonde, ce qui implique une légère baisse de sa température.

Lorsqu'un ouragan s'approche d'une côte, le système peut être influencé par la circulation extérieure qui commence à introduire de l'air terrestre plus frais et plus sec. En raison de l'importance du frottement du système en contact avec la terre par rapport à celui de la mer, la portion de l'air terrestre, plus frais et sec, est concentrée vers le centre de l'ouragan. Ceci cause une variation dans le flux entrant qui peut contribuer à la création de zones de convergences fortes de l'air dans la partie inférieure de la troposphère<sup>6</sup>. La présence de ces zones de convergences fournit un environnement

---

<sup>6</sup> Une troposphère est la couche atmosphérique la plus proche à la surface du globe terrestre qui va jusqu'à une dizaine de kilomètres d'altitude.

favorable permettant aux bandes de pluie extérieures d'engendrer de graves catastrophes et ceci avant que le centre de la tempête traverse la côte<sup>7</sup>.

Ahrens (2009) ajoute qu'une fois que l'ouragan touche une grande masse continentale, il subit un ralentissement rapide. À ce niveau, s'ajoute à la perte de contact avec les eaux chaudes de l'océan, sa principale source d'énergie, un phénomène de frottement accru avec la surface de la terre qui entraîne une élévation rapide de la hauteur des vagues d'eau au premier contact. Ce frottement entraîne aussi une diminution des vents de surface et un soufflage des vents de manière plus directe dans la tempête et cela tend à entraîner une hausse de la pression centrale de l'ouragan. Ce phénomène de frottement est considéré comme contributeur à la dissociation de l'ouragan<sup>8</sup>.

D'après Barry *et al.* (2014), durant son déplacement sur la terre, un ouragan est sensiblement influencé par les climats des zones terrestres traversées. Ces climats peuvent être caractérisés à partir de plusieurs facteurs variables tels que la latitude, la distance à partir de l'océan, la présence des chaînes montagneuses, la couverture végétale, etc. En fonction de l'augmentation de cette distance, les quantités de précipitations dues à l'ouragan se réduisent et par conséquent l'air devient sec, ce qui fait que la base des nuages subit une élévation pour répondre à l'assèchement de l'air. La succession de ces événements peut avoir une influence sur l'évolution de l'ouragan sur terre.

Enfin, un ouragan évite de traverser les chaînes montagneuses qui représentent un facteur propice au ralentissement du système. Ainsi, l'ouragan suit au mieux le chemin des faibles altitudes tout en étant accompagné par de fortes pluies et par des inondations qui sont provoquées par l'onde de tempête.

---

<sup>7</sup> Hurricanes : Science and Society, Interaction between a hurricane and the land, <http://www.hurricanescience.org/science/science/hurricaneandland/> (consulté le 26 novembre 2014)

<sup>8</sup> Hurricane Preparedness, What happen when a hurricane makes landfall? <http://www.rutherfordord.com/index.cfm/page/Hurricane-Preparedness/cdid/11094/pid/10280> (consulté le 26 novembre 2014)

### 3. Ouragans et changements climatiques

Le comportement des ouragans de l'océan Atlantique Nord est profondément lié au climat (Lugo, 2000). De nombreuses études telles que celles présentées dans les rapports de l'IPCC (2007a, 2013) ont abordé le sujet des effets du changement climatique sur le comportement des ouragans dans le but de mieux comprendre et analyser l'interaction étroite entre les deux. Dans ce cadre, le présent chapitre expose une revue de littérature sur la question relative aux ouragans et aux changements climatiques. Dans la première section, il s'agit de donner un aperçu de l'évolution passée du nombre et de l'intensité des ouragans durant les dernières décennies pour la côte est de l'Amérique du Nord. La deuxième section vise à expliquer les effets possibles des changements climatiques sur la fréquence et l'intensité des ouragans.

#### 3.1 Tendances historiques de l'activité cyclonique dans l'Atlantique nord

De nombreuses études indiquent qu'en moyenne 90 tempêtes tropicales se forment chaque année dans le monde entier (Barry *et al.* 2014; Oliver 2005; Smith 2013). Selon le quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2007a) et les travaux d'Emanuel (2005), il n'y a pas de tendance propre à l'échelle mondiale en ce qui concerne la fréquence annuelle des cyclones tropicaux pour la période d'étude de 1975-2005. Toutefois, une nette augmentation de la fréquence des tempêtes tropicales et des ouragans majeurs a été rapportée dans l'Atlantique Nord durant les dernières décennies (Chan *et al.*, 2010, U.S. Global Change Research Program, 2009). Une comparaison des données historiques des périodes 1850 à 1990 (140 ans) et 1998 à 2007 (neuf ans) montre que, durant la première période, le nombre moyen de tempêtes tropicales a été d'environ 10 tempêtes par an dont cinq ont atteint le niveau d'ouragan alors que durant la deuxième période, la moyenne est d'environ 15 tempêtes tropicales par an dont huit ont été classées comme ouragans<sup>9</sup>.

Ces résultats sont en accord avec les études antérieures, dont celle de Holland *et al.* (2007) qui soulignent que la fréquence annuelle des cyclones tropicaux, ouragans et tempêtes tropicales sur la côte est de l'Amérique du Nord a été plus élevée durant trois

---

<sup>9</sup> Center for Climate and Energy Solutions, Is the frequency of hurricanes increasing?  
<http://www.c2es.org/science-impacts/basics/faqs/hurricanes#freq> (consulté le 2 février 2014)

périodes de temps distinctes au cours du XXème siècle. Ces trois périodes sont séparées par des périodes de transition nettes durant lesquelles le nombre moyen d'ouragans et de tempêtes tropicales a augmenté fortement. Comme le montre la Figure 3.1, la première période, entre 1900 et 1930 (zone blanche), a connu une moyenne de six cyclones tropicaux par année dont quatre sont classés comme ouragans et deux comme tempêtes tropicales. De 1930 à 1995 (zone bleue), la moyenne annuelle s'est élevée à 10 cyclones tropicaux parmi lesquelles cinq tempêtes atteignent le niveau d'ouragan. Concernant la dernière période, de 1995 à 2005 (zone noire), la moyenne annuelle des cyclones tropicaux de l'Atlantique a atteint un nombre égal à 15, dont huit étaient des ouragans et sept, des tempêtes tropicales. Le nombre de cyclones tropicaux semble donc en hausse dans le bassin de l'Atlantique nord.

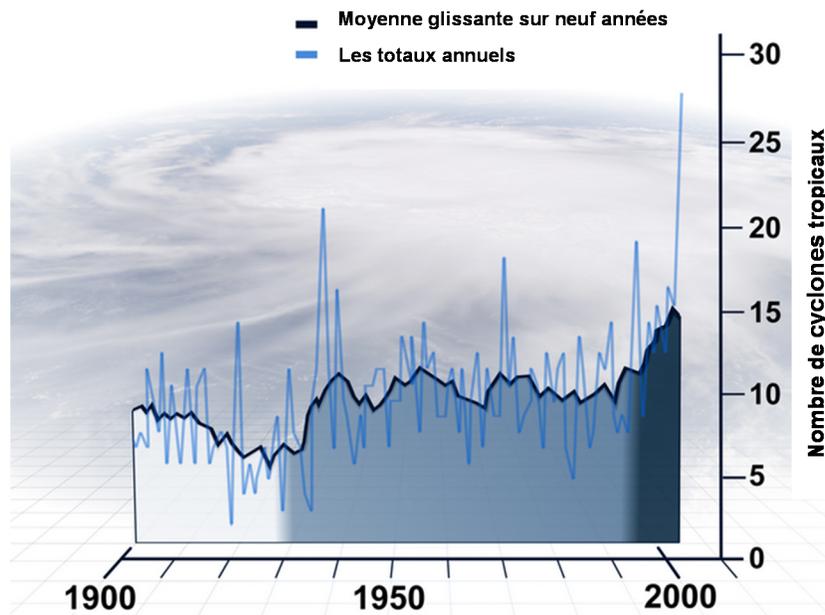


Figure 3.1 : Fréquences des tempêtes tropicales en Atlantique nord de 1900 à 2005 (tirée de <http://www.ucar.edu/news/releases/2007/hurricanefrequency.shtml>).

D'autres études sur des périodes de temps plus courtes ont aussi confirmé qu'il y a augmentation du nombre d'ouragans dans l'Atlantique depuis la fin des années 80. À titre d'exemple, l'étude de Lau *et al.* (2012) a analysé les tendances récentes observées dans les précipitations des cyclones tropicaux dans l'Atlantique Nord, et ces auteurs ont trouvé que le nombre d'ouragans durant la période allant de 1988 à 2007 montre une

tendance positive à la hausse de l'ordre de 29,9% par décennie. Cependant, il demeure difficile de statuer sur le caractère significatif ou non de cette tendance. Par ailleurs, l'examen de l'évolution passée de la fréquence des ouragans sur une période plus longue allant de 1878 à 2011 a montré que la tendance à la hausse de la fréquence des ouragans dans l'Atlantique Nord (voir Figure 3.2) est importante et significative à un seuil de confiance de 99% (Webster *et al.*, 2005). IPCC (2007b) ajoute par ailleurs que le nombre de ces ouragans a dépassé la moyenne durant la période d'étude allant de 1997 à 2007.

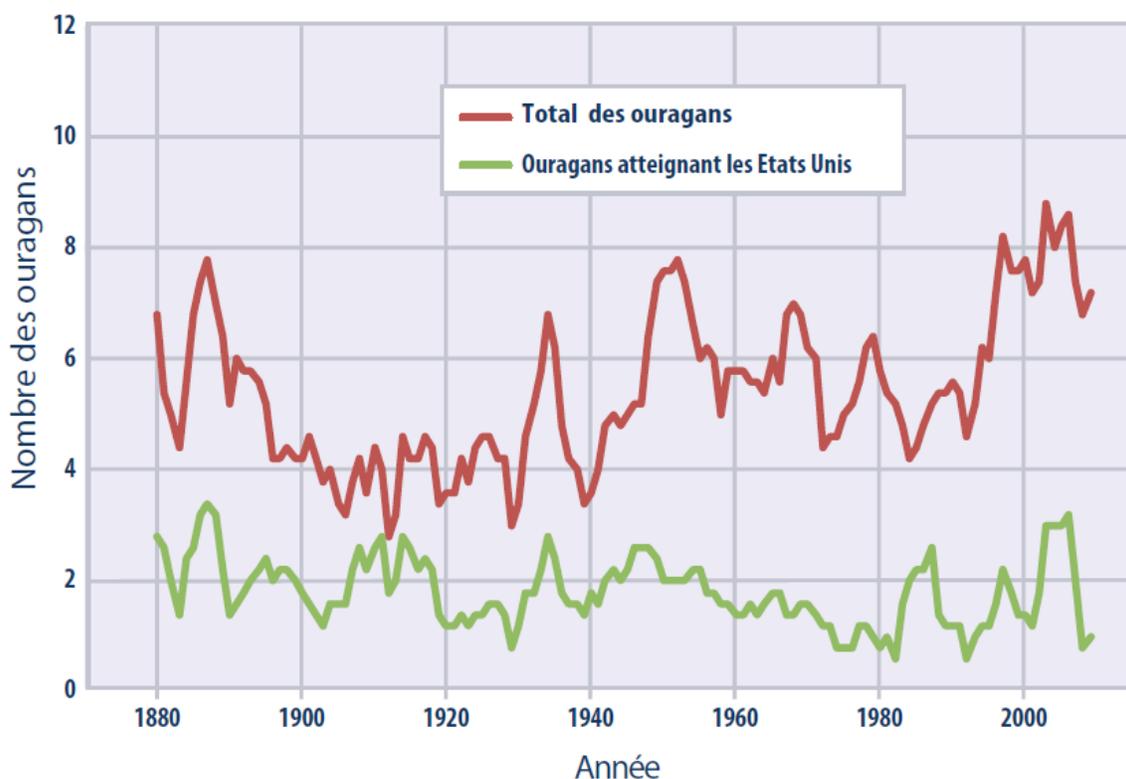


Figure 3.2 : Évolution historique du nombre des ouragans dans l'Atlantique Nord (1878 - 2011) (tirée de Tropical Cyclone Activity, [http://www.epa.gov/climatechange/pdfs/print\\_cyclones-2012.pdf](http://www.epa.gov/climatechange/pdfs/print_cyclones-2012.pdf); consulté le 15 avril 2014)

Sur la base des enregistrements standardisés de l'intensité des cyclones tropicaux, les analyses effectuées semblent indiquer que les ouragans sont devenus généralement plus intenses au cours de la période de 28 ans allant de 1977 à 2004 bien que le caractère statistiquement significatif de cette tendance n'ait pu être clairement établi compte tenu de la courte période considérée (IPCC 2007b; Arpe *et al.* 2009). Par contre,

l'examen de l'évolution passée de l'intensité des ouragans de catégorie 4 et 5 selon l'échelle de Saffir-Simpson pour une période pratiquement identique (1975 à 2004) a montré que l'intensité des ouragans de l'Atlantique Nord a augmenté de façon significative au cours de cette période (Elsner *et al.*, 2010). Webster *et al.* (2005) ont montré que le pourcentage des ouragans de catégories 4 et 5 selon l'échelle de Saffir-Simpson s'est élevé de 20% à 25% respectivement pour la période de 1975-1989 par rapport à la période de 1990-2004.

Pour parvenir à mieux caractériser la relation entre les ouragans et les changements climatiques, certains auteurs jugent indispensable d'augmenter le nombre de relevés d'observation des tempêtes tropicales et des ouragans afin de mieux comprendre le degré d'impact des changements climatiques sur les ouragans et aussi afin de mieux comprendre les effets du climat sur les ouragans (Vecchi *et al.*, 2008; U.S. Global Change Research Program, 2009). Après avoir examiné attentivement des rapports récents sur la base de données des tempêtes tropicales de l'Atlantique depuis la fin du dernier siècle, Vecchi *et al.* (2008), Landsea *et al.* (2009), et Vecchi *et al.* (2011) indiquent qu'il est possible que l'augmentation de la fréquence des ouragans de l'Atlantique soit principalement attribuable à l'amélioration de la qualité du suivi des cyclones tropicaux, conséquence du développement de nouvelles technologies permettant de mieux caractériser ce type d'événements. Malgré ceci, il apparaît dorénavant établi que les ouragans frappant la Côte Est de l'Amérique du Nord sont plus fréquents et plus intenses (IPCC, 2007b).

### **3.2 Impacts potentiels des changements climatiques sur la fréquence et l'intensité des ouragans**

Les possibles conséquences du changement du climat sur le comportement des ouragans a fait l'objet de nombreuses études (IPCC 2013; Elsner *et al.* 2010; Arpe *et al.* 2009). Kieffer (2013) mentionne toutefois qu'il est encore difficile de déterminer comment les ouragans seront affectés par les changements climatiques, du fait que plusieurs mécanismes sont en jeu dans la genèse et la dynamique des ouragans. Lugo (2000) ajoute que, malgré le changement apparent dans la fréquence et dans l'intensité

des ouragans au cours des dernières décennies, il est incertain d'un point de vue scientifique que ces changements soient le résultat du changement du climat.

Les différents rapports d'évaluation présentés par l'IPCC ont identifié la température à la surface de la mer comme une variable clé pour expliquer les effets du réchauffement climatique sur l'activité des ouragans (IPCC 2007a, 2013). En ce qui concerne l'accroissement des températures de surface de la mer durant les dernières décennies, Arpe *et al.* (2009) mentionnent que cette augmentation est une conséquence directe du réchauffement global. Ainsi IPCC (2007a) rapporte que la température de surface de la mer à l'échelle globale a augmenté d'environ 0,6°C depuis le milieu des années 70 (Figure 3.3).

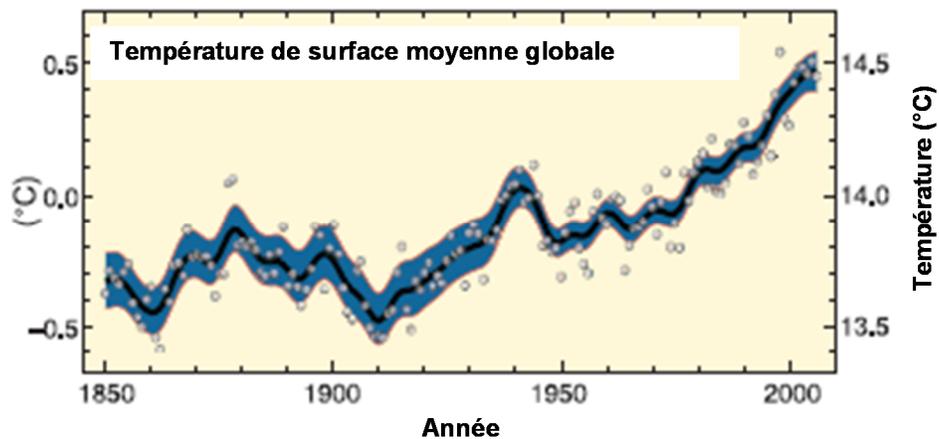


Figure 3.3 : Évolution de la température moyenne globale à la surface de la mer de 1850 à 2005 (tirée de IPCC 2007a).

Plusieurs études ont montré qu'il existe une forte relation entre l'augmentation de la température à la surface de la mer et l'activité cyclonique intense (IPCC, 2007b). Parmi ces études, celle d'Elsner *et al.* (2010) a montré que l'évolution de l'intensité des ouragans les plus forts de l'Atlantique est fortement corrélée aux augmentations de la température à la surface de la mer. Cette évolution peut également être influencée indirectement par le phénomène El Niño qui prend naissance dans l'Océan Pacifique. Par définition et d'origine naturelle, le phénomène El Niño présente une phase extrême de variations de la pression de l'air à la surface des mers du Pacifique. Ce phénomène entraîne un réchauffement de la couche superficielle des eaux du centre et de l'Est du

Pacifique en fonction de l'augmentation de la vitesse des vents. Les années où El Niño est faible, suite à la présence de vents faibles en altitude, l'activité cyclonique dans le Pacifique s'affaiblit et ceci peut engendrer un effet inverse dans la localisation et l'activité des ouragans de l'Atlantique Nord. Plus précisément, la direction des vents qui soufflent en altitude dans la région du Pacifique équatorial peut s'inverser allant de l'ouest vers l'est au lieu de la direction normale de l'est vers l'ouest. Cette inversion entraîne une augmentation du nombre d'ouragans dans l'Atlantique nord (AON Re Global, 2006).

Ces conclusions corroborent celles d'études antérieures, telle que celle de Arpe *et al.* (2009) qui montrent que les températures plus chaudes à la surface des mers sur le nord du bassin Atlantique favorisent une augmentation du nombre et de l'intensité des ouragans. Dans ce même contexte, Holland *et al.* (2007) ont proposé que cette augmentation résulte de l'effet combiné des températures océaniques plus chaudes et d'une modification du régime des vents. Ces mêmes auteurs soulignent que les études statistiques sur l'évolution des températures à la surface des mers de l'Atlantique nord ont montré que la température à la surface de la mer s'est élevée de 1,3°C au cours du XXème siècle.

Bien que le réchauffement des températures de surface des océans soit global, il a été démontré que la côte nord-est des États-Unis a connu les plus fortes augmentations de température de surface (Deodatis *et al.*, 2013).

En résumé, les relations observées entre les tendances du nombre des ouragans du nord Atlantique et de la température à la surface de la mer au cours des dernières décennies permettent de conclure que le changement climatique est très vraisemblablement un facteur essentiel contribuant à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des ouragans (Holland *et al.*, 2007).

## 4. Ouragan Irène

Le présent chapitre présente l'ouragan Irène 2011. La première section donne une description des caractéristiques générales d'Irène. La deuxième section décrit sa trajectoire et l'évolution des intensités des vents qui le caractérisent. La troisième section fournit une description des hauteurs de pluies générées lors du passage d'Irène alors que la dernière section s'intéresse à un aperçu des dommages causés suite au passage d'Irène 2011.

### 4.1 Description générale : formation et durée de vie

Selon les rapports fournis par le centre national américain des ouragans (National Hurricane Center) sur les cyclones tropicaux, la saison cyclonique du bassin Atlantique pour l'année 2011 a connu vingt cyclones tropicaux incluant des dépressions, des tempêtes et des ouragans (*Annexe A*). L'ouragan Irène est le neuvième cyclone tropical de la saison cyclonique 2011 dans l'océan Atlantique Nord et le premier à atteindre la catégorie d'ouragan. Avila *et al.* (2013) précisent que la saison 2011 dans l'Atlantique a été marquée par une activité cyclonique supérieure à la moyenne et a produit 19 tempêtes tropicales baptisées dont sept se sont transformées en ouragan et quatre parmi ceux-ci sont classés ouragans majeurs. Un seul de ces ouragans a touché terre en 2011 malgré le niveau élevé de l'activité cyclonique et il s'agit bien sûr de l'ouragan Irène.

Certaines études telles que celle de Noor Al-Deen *et al.* (2013) ont montré que l'ouragan Irène, classé catégorie 3 sur l'échelle de Saffir Simpson, s'est formé le 21 août 2011 et s'est dissipé totalement le 30 du même mois. Irène a causé d'importants dégâts matériels et des pertes humaines sur son passage. Il a causé de fortes inondations et étaient accompagnés de vents violents tout le long de sa trajectoire à travers les Caraïbes, la côte Est des États-Unis et l'Est du Canada<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> National Weather Service, *Hurricane Irene August 26-27, 2011*  
<http://www.weather.gov/mhx/Aug272011EventReview> (consulté le 13 mars 2014)

## 4.2 Trajectoire et intensités des vents

La trajectoire d'Irène 2011 s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres. La Figure 4.1 donne un aperçu de la trajectoire d'Irène. Irène était d'abord une onde tropicale dans l'Atlantique qui a quitté la côte africaine le 15 août 2011 pour commencer à s'organiser en dépression tropicale le 20 août 2011 à l'Est des petites Antilles avant de se transformer rapidement en tempête tropicale. Par la suite, Irène s'est renforcée lors de son passage aux îles Leeward le 21 août avant de passer près de l'île Sainte Croix dans les îles vierges américaines le 22 août. Le même jour, il se transforme en ouragan de catégorie 1. Il frappe Punta Santiago à Puerto Rico avec des vents soutenus estimés à 113 km/h (National Weather Service, 2012). Après un bref affaiblissement le 23 août 2011, Irène prend de la vigueur en traversant les Bahamas du sud-est, les 24 et 25 août et en poursuivant sa course vers le nord des Bahamas (Glenn *et al.*, 2012). À ce niveau, l'ouragan passe en catégorie 3.

Par la suite, Irène a subi un affaiblissement progressif pour atteindre le niveau d'une forte tempête de catégorie 1 en s'approchant de la côte Est de la Caroline du Nord<sup>11</sup>. À partir du 26 août, Irène devient un ouragan de catégorie 2 sur l'échelle de Saffir-Simpson avec des vents soutenus de l'ordre de 160 km/h au minimum. Le 27 août, Irène frappe l'Est de la Caroline du Nord et retourne ensuite de nouveau dans l'océan Atlantique avant de toucher terre la deuxième fois près de Little Egg Inlet au New Jersey (Datin *et al.*, 2013). Le 28 août Irène est une tempête post-tropicale lorsqu'elle frappe la ville de New York et la Nouvelle-Angleterre. À ce moment, la tempête est plus faible, mais encore dangereuse lorsqu'elle se déplace vers le Québec et le Labrador. La tempête est accompagnée de vents violents et génère de fortes pluies sur une grande partie de l'Est du Canada<sup>12</sup>.

---

<sup>11</sup> National Weather Service, *Hurricane Irene August 26-27, 2011*.

<http://www.weather.gov/mhx/Aug272011EventReview> (consulté le 13 mars 2014)

<sup>12</sup> Jet propulsion laboratory, Track Irene's progress on NASA Hurricane Websites <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2011-267> (consulté le 14 mars 2014)

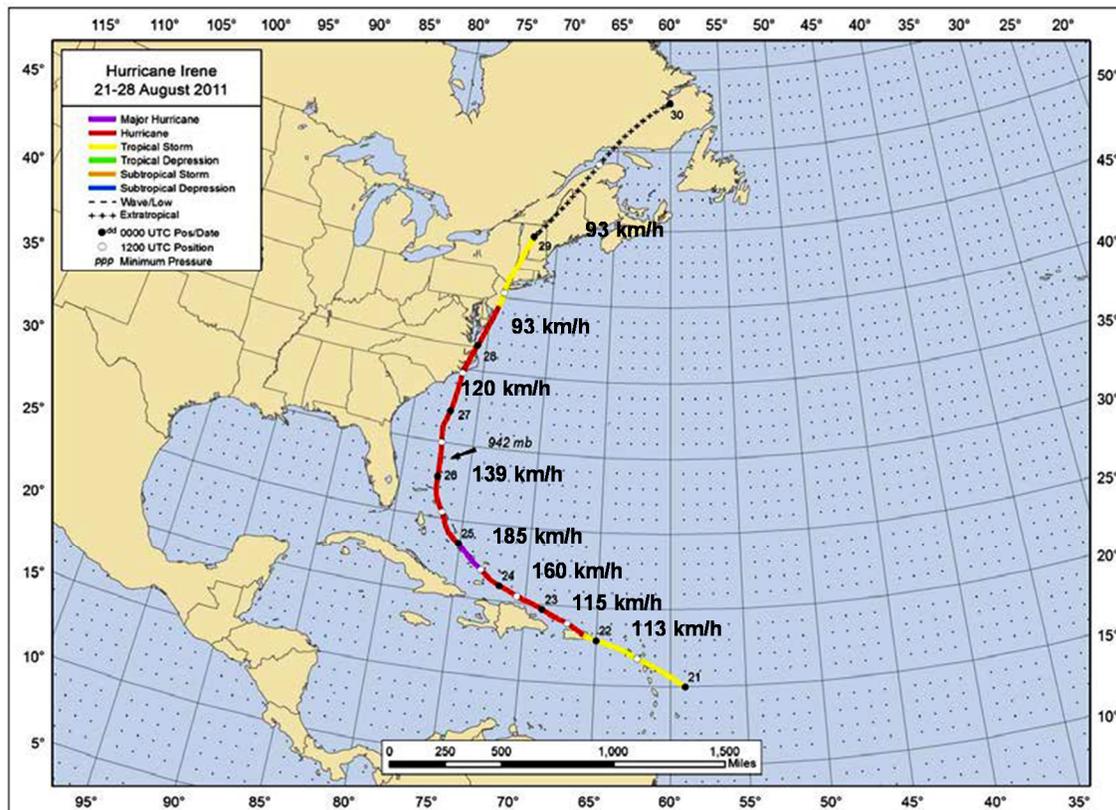


Figure 4.1 : Trajectoire et intensité d'Irène 2011 du 21 au 29 août 2011 (tiré de National Weather Service 2012).

### 4.3 Cumuls de pluies enregistrés

Irène a provoqué des inondations catastrophiques le long de sa trajectoire surtout dans le Nord-Est des États-Unis (Spaulding, 2012, Talbot *et al.*, 2012). Les hauteurs totales de pluies journalières ont été très élevées surtout pendant les journées du 28 et 29 août 2011. Selon le service météorologique national (*National Weather Service*) des États-Unis, les hauteurs totales de précipitations associées à cet ouragan variaient entre 5 pouces (127 mm) aux îles Outer Banks qui se trouvent le long des côtes de l'État de la Caroline du Nord à environ 15 pouces (381 mm) à Beaufort, ville située en Caroline du Sud. Le radar Doppler a estimé des totaux de plus de 17 pouces (432 mm) qui ont été signalés près de Beaufort (Caroline du Sud), Craven (Caroline du Nord) et Pamlico (Caroline du Nord). Ces pluies ont été généralement accompagnées de vents très violents. Ainsi, les rafales maximales de vent enregistrées étaient de 115 mph (330 km/h) au terminal de Cedar Island Ferry dans l'état de Caroline du Nord. Sous

l'effet de ces vents très violents, plusieurs arbres ont été déracinés partout dans l'Est de la Caroline du Nord et des milliers de personnes se sont trouvées sans électricité<sup>13</sup>. Les précipitations enregistrées à certaines stations des Cantons de l'Est au Québec sont de plus de 100 millimètres. De même, de forts vents sont enregistrés entre le 26 et le 29 août 2011, pouvant atteindre 139 km/h le 26 août, 120 km/h le 27 août et 93 km/h les 28 et 29 août<sup>14</sup>.

#### 4.4 Dommages matériels et pertes de vies

Selon le centre national des ouragans (National Hurricane Center), l'ouragan Irène 2011 a été directement responsable du décès de 49 personnes durant son passage sur le continent alors que le nombre total de décès attribuables aux cyclones tropicaux provenant de l'Atlantique en 2011 est de 80 (Avila *et al.*, 2013). Sur ces 49 décès, cinq sont survenus en République Dominicaine, trois à Haïti et 41 aux États-Unis. Paradoxalement, aucun décès n'a été signalé aux Bahamas là où Irène était à son paroxysme. Pour la région des États-Unis, parmi les cas de décès, six ont été attribués à des ondes et vagues de tempêtes ou bien aux effets des courants forts, 15 aux effets des vents violents incluant les chutes d'arbres et 21 aux inondations (Avila *et al.*, 2011). Plusieurs documents dressent un bilan des dommages causés par l'ouragan Irène. Certaines sources indiquent qu'Irène occupe le 6<sup>e</sup> rang des sinistres les plus coûteux de l'année 2011, avec des dommages assurés de 5,3 milliards de dollars USD<sup>15</sup>. Par contre, selon une autre étude, les dommages causés par l'ouragan Irène sont estimés à plus de 15 milliards de dollars USD (Ackerman *et al.*, 2013). Bien que l'ouragan Irène ne soit pas une tempête majeure en termes de vitesse des vents ou d'ondes de tempêtes, il a affecté environ 60 millions de personnes et certaines des régions les plus peuplées des États-Unis (Datin *et al.*, 2013). Bien que les régions de la côte Est des États-Unis sont considérées comme ayant subi plus de dommages suite au passage d'Irène, et ce par rapport au territoire canadien, le sud du Canada a néanmoins connu aussi des dommages importants. Certaines sources ont montré que les régions du sud du Québec

---

<sup>13</sup> National Weather Service, *Hurricane Irene August 26-27, 2011*, <http://www.weather.gov/mhx/Aug272011EventReview> (consulté le 12 janvier 2014)

<sup>14</sup> Environment Canada, <http://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=En&n=41C7AFC5-1#Irene> (consulté le 12 mars 2014)

<sup>15</sup> Sigma, [http://www.allianz-nos-engagements-durables.fr/IMG/pdf/sigma2\\_2012\\_1\\_-2.pdf](http://www.allianz-nos-engagements-durables.fr/IMG/pdf/sigma2_2012_1_-2.pdf) (consulté le 14 février 2014)

ont enregistré des hauteurs importantes de pluie allant jusqu'à 100 millimètres<sup>16</sup> entraînant de graves inondations<sup>17</sup>. Ces inondations ont été à l'origine de la destruction des routes et d'autres infrastructures et ont entraîné la mort d'une personne. De plus, la violence des vents a provoqué le déracinement de nombreux arbres et endommagés des lignes électriques avec comme conséquence des coupures d'électricité pour des dizaines de milliers de foyers du Québec et du Nouveau-Brunswick, dont 250 000 localisés au Québec. Le bilan des dommages matériels estimés sur tout le territoire canadien est de l'ordre de 130 millions de dollars USD<sup>18</sup>.

De façon générale, les événements récents ont mis en évidence la vulnérabilité des régions de la côte-Est de l'Amérique face aux cyclones tropicaux. En 2011, l'ouragan Irène a entraîné plus de 10 milliards de dollars US de dégâts seulement dans le nord-est des États-Unis, ce qui représente environ 67% de la totalité des dommages estimés sur toute la trajectoire de l'ouragan. À titre de comparaison avec d'autres ouragans, l'ouragan Sandy en 2012, qui a également frappé la côte nord-est, a causé plus de 65 milliards de dollars de dommages, tuant plus de 200 personnes et laissant des millions de personnes sans électricité. Katrina quant à elle en 2005, demeure l'ouragan ayant causé le plus de dommages, dépassant Irène et Sandy, avec plus de 80 milliards de dollars de pertes et plus de 1800 victimes (Deodatis *et al.*, 2013). La particularité de l'ouragan Irène 2011 demeure au niveau de l'étendue de sa trajectoire qui a évolué progressivement jusqu'à la côte Nord-Est du Canada après avoir traversé celle des États-Unis. Le circuit qu'il a parcouru à l'intérieur du territoire canadien en tant que tempête post-tropicale allant de l'Ontario dans le sud du pays, traversant la province du Québec pour arriver au Nouveau-Brunswick au nord, montre bien la particularité de cet événement.

---

<sup>16</sup> Météo Média, *Ouragan Irène : quels impacts pour le Québec?*  
[http://past.meteomedia.com/news/storm\\_watch\\_stories3&stormfile=ouragan\\_irene\\_quels\\_impact\\_260811?ref=twitternews](http://past.meteomedia.com/news/storm_watch_stories3&stormfile=ouragan_irene_quels_impact_260811?ref=twitternews) (consulté le 13 mai 2014)

<sup>17</sup> NASA, *Hurricanes/Tropical cyclones*  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/hurricanes/archives/2011/h2011\\_Irene.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/hurricanes/archives/2011/h2011_Irene.html) (consulté le 13 mai 2014)

<sup>18</sup> Daily News, *Hurricane Irene one year later : storm cost \$15.8 in damage from Florida to New York to the Caribbean*  
<http://www.nydailynews.com/new-york/hurricane-irene-year-storm-cost-15-8-damage-florida-new-york-caribbean-article-1.1145302> (consulté le 13 mai 2014)



## **5. Matériel et méthodes**

Le présent chapitre décrit la méthodologie de travail utilisée afin de répondre aux objectifs du projet. La première section définit la zone d'étude et explique les raisons de ce choix. La deuxième section décrit les séries de données provenant de différentes stations pluviométriques utilisées alors que la section suivante s'attarde à présenter les résultats de simulations météorologiques fournies par le modèle utilisé dans cette étude. La description des analyses effectuées est présentée dans la dernière section du chapitre.

### **5.1 Zone d'étude**

La zone d'étude correspond à la région traversée par l'ouragan Irène soit le Nord-Est des États-Unis et le Sud-Est du Canada et en particulier la portion de la trajectoire au Québec. Le secteur d'analyse est délimité par les latitudes 40 à 49°N et les longitudes 70 à 81°W. Ce secteur correspond à la région du domaine de simulation de GEM-LAM pour lequel la simulation était disponible. Il couvre les états de Maine, du Massachusetts, de New York, du New Hampshire et du Vermont aux États-Unis et la partie sud du Québec (Figure 5.1). Pour la région sud du Québec, la moyenne des cumuls de précipitations tombées durant la période du 1<sup>er</sup> avril et le 31 octobre varie entre 500 et 800 mm (Figure 5.2).

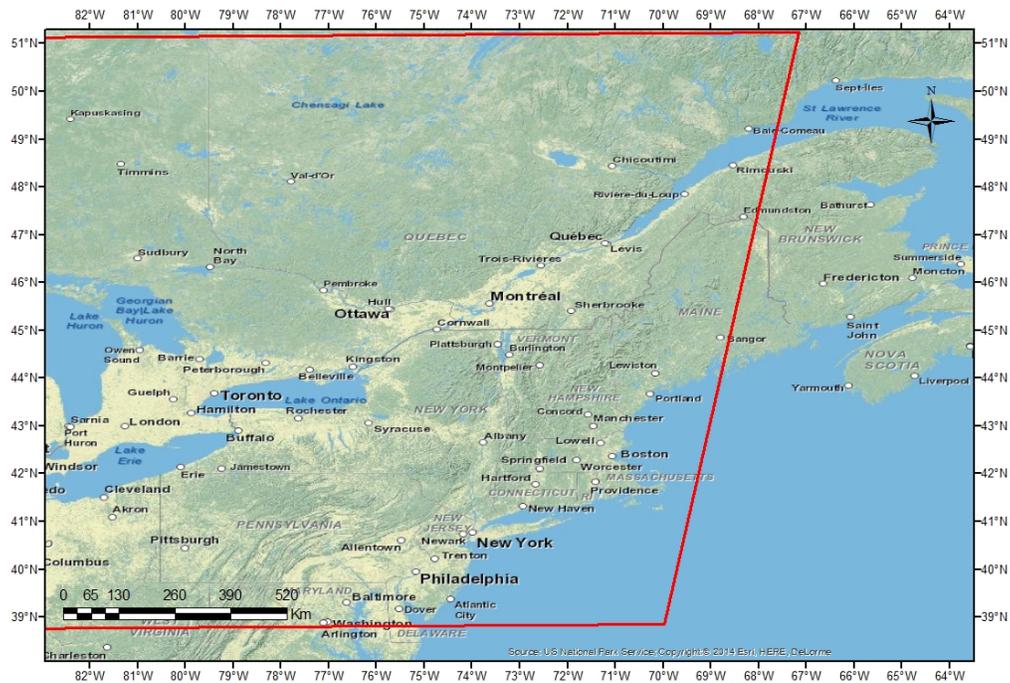


Figure 5.1 : Carte de la zone d'étude délimitée par la bordure de la grille du modèle GEM-LAM (cadre rouge)

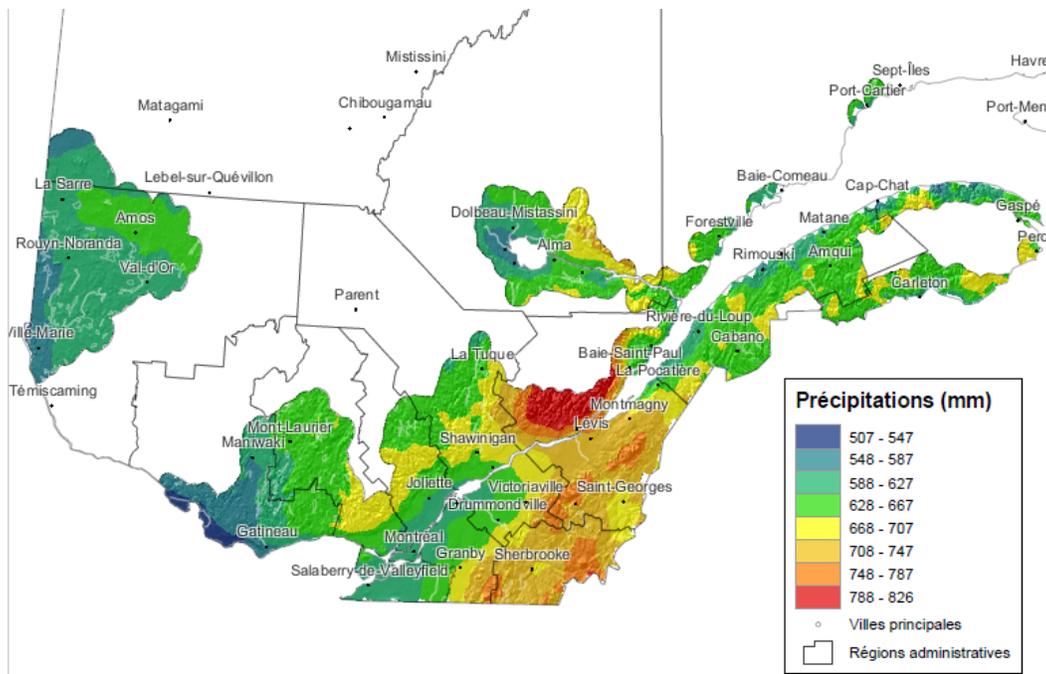


Figure 5.2 : Distribution historique de la moyenne des cumuls de précipitations entre 1<sup>er</sup> avril et 31 octobre pour la période 1974-2003 au Québec (Source : <http://www.agrometeo.org/atlas/category/precipitations/hyd/false#futur>)

## 5.2 Données pluviométriques utilisées

Les séries des données horaires de stations météo ont été collectées sur un ensemble de 331 stations localisées sur la côte nord-est des États-Unis et la côte sud-est du Canada. De cet ensemble, seulement 224 stations ont été considérées dans les analyses effectuées. Il faut noter que les stations qui n'ont pas été utilisées sont soit des stations comportant trop de données manquantes pendant toute la période d'analyse (du 27 au 30 août 2011), soit des stations qui se trouvent à l'extérieur de la zone d'étude. Des 224 stations pluviométriques retenues, 37 stations sont situées aux États-Unis (Maine, Massachusetts, New York, New Hampshire et Vermont). Les données à ces stations sont colligées par le *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Les 187 autres stations se trouvent en territoire canadien et principalement au Québec. Onze de ces stations sont opérées par Environnement Canada (EC) et 176 par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDEPLCC). Le Tableau à l'Annexe B dresse la liste et présente les caractéristiques des stations dont les données de précipitations horaires ont été utilisées dans le cadre de ce projet. Pour ces stations, le nombre d'heures de données disponibles pour la période d'étude du 27 au 30 août 2011 varie de 13 à 96 heures selon la station. L'examen des 224 stations pluviométriques retenues indique que 181 stations (80,8% des stations) présentent des séries complètes (durée totale de 96 heures) alors que 37 stations (16,5%) présentent des séries pour une durée totale de 73 heures. Les six autres stations (2,6%) présentent des séries incomplètes dont les durées sont de 13, 63, 72, 81, 93 et 94 heures.

La Figure 5.3 présente la carte des 224 stations retenues. Cette carte montre que la couverture des stations pluviométriques sur la côte Est des États-Unis est moins dense que celle couvrant la partie sud du Québec.



Figure 5.3 : Carte localisant les 224 stations pluviométriques utilisées dans le cadre de la présente étude.

## 5.3 Simulation des champs de précipitations de l'Ouragan Irène

### 5.3.1 Modèle *Global Environmental Multiscale – Limited Area Model* (GEM-LAM)

Les résultats de la simulation des champs de précipitations produits par le modèle *Global Environmental Multiscale – Limited Area Model* (GEM-LAM) de l'ouragan Irène ont été utilisés. GEM-LAM a été conçu pour les prévisions à aire limitée qui présente une version à haute résolution du modèle global environnemental de multi-échelles *Global Environmental Multiscale* d'Environnement Canada (Mailhot *et al.*, 2012, Yang *et al.*, 2010). De Elía *et al.* (2002) indiquent que les modèles du type GEM-LAM sont des outils de prévision des conditions météorologiques à différentes échelles spatiales et temporelles. L'utilisation de ce type de modèles dans divers domaines de recherche et dans un contexte opérationnel est maintenant très répandue.

Le système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) consiste en une série de grilles emboîtées pour les prévisions à aire limitée (LAM) provenant du modèle GEM<sup>19</sup>. Le SHRPD est piloté par le modèle GEM régional qui est un modèle de prévision déterministe (SRPD). À l'exception du domaine de l'ouest, le SHRPD est encore expérimental sur les cinq domaines suivants :

- ✓ L'Est du Canada : ouest du Québec et bassin des Grands Lacs.
- ✓ L'Ouest : deux tiers sud de l'Alberta et de la Colombie-Britannique.
- ✓ Maritimes : provinces maritimes et est du Québec.
- ✓ Arctique : Terre de Baffin sud et détroit d'Hudson.
- ✓ Lancaster : archipel arctique.

GEM-LAM offre une représentation assez fidèle des conditions locales (telles que l'orographie, la végétation), des processus physiques (tels que la microphysique des nuages, le rayonnement) et de l'organisation dynamique des systèmes météorologiques à toutes les échelles à partir de l'échelle synoptique (40 x 40 km) jusqu'à la méso-échelle (2,5 x 2,5 km)<sup>20</sup>.

---

<sup>19</sup> GEM LAM 2.5 km PROJECT, [http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product\\_guide/docs/gemlam2p5/e\\_gemlam2p5.htm](http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/gemlam2p5/e_gemlam2p5.htm) (consulté le 11 mars 2014)

<sup>20</sup> GEM LAM 2.5 km PROJECT, [http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product\\_guide/docs/gemlam2p5/e\\_gemlam2p5.htm](http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/gemlam2p5/e_gemlam2p5.htm) (consulté le 11 mars 2014)

Zadra *et al.* (2008) indiquent que la version GEM-LAM mise en opération dans le SHRPD est le noyau dynamique du modèle climatique régional Canadien (CRCM). Le modèle GEM-LAM utilise deux séries d'équations dépendant de l'échelle des applications. Dans le cas des applications à grande échelle, le modèle se base sur les équations hydrostatiques primitives, tandis qu'il repose sur les équations non hydrostatiques d'Euler quand il s'agit de simuler les conditions à petite échelle (Simjanovski, 2010).

Yang *et al.* (2010) ajoutent que la version GEM-LAM à 2,5 km de résolution considère quatre types de surfaces à savoir : l'eau libre, la glace de mer, les glaciers et la surface de végétation. Les détails techniques de ce modèle sont présentés dans Yang *et al.* (2010).

### **5.3.2 Données simulées utilisées**

Les données de base pour ce projet sont les sorties de simulations météorologiques de précipitations horaires produites par le modèle GEM-LAM d'Environnement Canada. Ces données nous ont été gracieusement transmises par M. Vincent Fortin d'Environnement Canada. Contrairement aux données horaires enregistrées aux stations pluviométriques, les simulations du modèle GEM-LAM couvrent une durée de 24 heures allant du 28 au 29 août 2011 de 12h à 12h pour un ensemble de 331 points de grille situés sur la côte est des États-Unis et la côte sud-est du Canada (Figure 5.4). Pour chaque période de simulations d'une heure, une carte a été produite pour un total de 24 cartes (*Annexe C*).

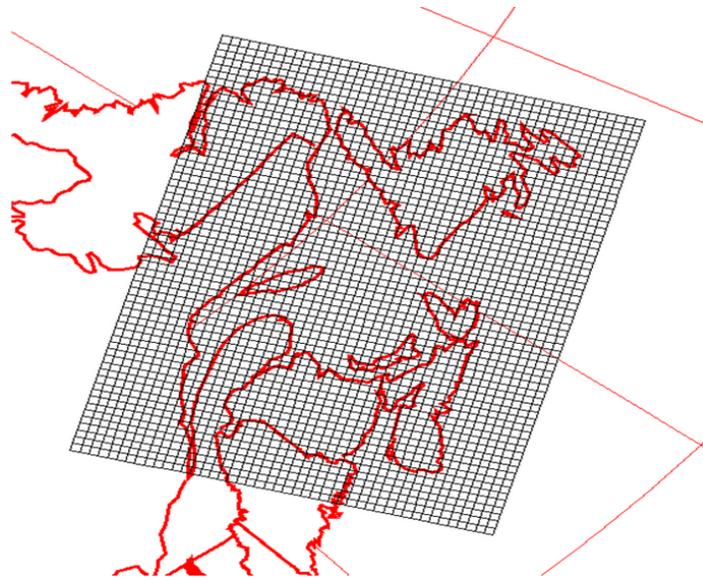


Figure 5.4 : Domaine et grille du modèle GEM-LAM (en noir) projetée sur la partie est du Québec (tiré du site d'Environnement Canada)

#### 5.4 Comparaison des séries de précipitations observées et simulées

L'examen de la trajectoire de l'ouragan Irène 2011 a montré que celle-ci a traversé le territoire Québécois les 28 et 29 août 2011. Les simulations des structures de précipitations disponibles couvrent plus spécifiquement la période comprise entre le 28 août 12h A.M et le 29 août 12h A.M soit une période de 24 h. La comparaison entre séries observées et simulées a donc été possible pour cette dernière période, désignée dans ce qui suit par période d'étude.

Les précipitations générées par l'ouragan Irène aux stations et simulées par le modèle ont été analysées à travers les variables suivantes : le cumul de précipitations tombées, la hauteur maximale horaire de pluie, la trajectoire d'Irène reconstituée, la période de retour associée à différentes durées. Trois critères de comparaison des séries de précipitation observées et simulées ont été considérés à savoir la différence entre les intensités maximales de pluies observées et simulées (désigné dans ce qui suit pas *Delta I* et exprimée en mm/h), la différence entre les totaux de pluies cumulées observées et simulées pendant la période d'étude (désigné dans ce qui suit pas *Delta cumul* et exprimée en mm) et le décalage temporel entre les maximums d'intensités

observées et simulées (*Delta T*, exprimée en heures). La Figure 5.5 donne un aperçu de la démarche utilisée pour comparer les séries simulées et observées.

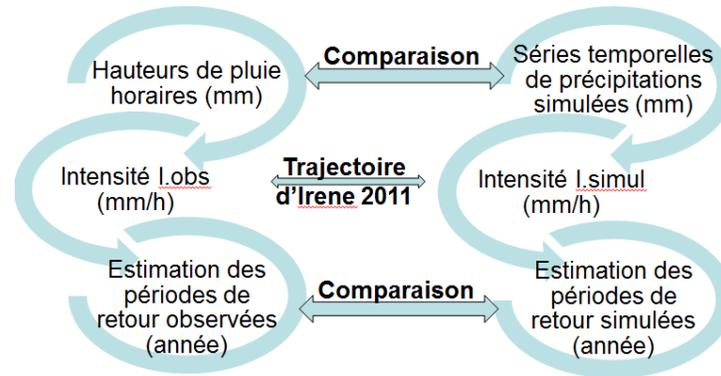


Figure 5.5 : Étapes des analyses effectuées

Plusieurs critères ont été proposés dans la littérature pour mesurer la qualité de l'accord entre deux séries (dans le cas présent la série à une station et la série correspondante à la tuile du modèle GEM-LAM) (Reusser *et al.* 2009). Dans le cadre de la présente étude, trois critères seront considérés à savoir le coefficient de Nash-Sutcliffe (S), le biais (B) et la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes (RMSE). Ces trois estimateurs sont définis par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
 S_i &= 1 - \frac{\sum_{t=1}^T [I_i^{(o)}(t) - I_i^{(s)}(t)]^2}{\sum_{t=1}^T [I_i^{(o)}(t) - \bar{I}_i^{(o)}]^2} \\
 B_i &= \sum_{t=1}^T [I_i^{(o)}(t) - I_i^{(s)}(t)] \\
 RMSE_i &= \sqrt{\sum_{t=1}^T [I_i^{(o)}(t) - I_i^{(s)}(t)]^2}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

où  $I_i^{(o)}(t)$  et  $I_i^{(s)}(t)$  représentent respectivement les valeurs observées et simulées à la station et la tuile correspondante  $i$  au temps  $t$  et  $\bar{I}_i^{(o)}$  la valeur moyenne observée à la station  $i$ . Le coefficient de Nash-Sutcliffe (S) est souvent utilisé en hydrologie d'où l'intérêt de le considérer ici. Une valeur de 1 de ce coefficient indique un accord parfait entre les deux séries alors qu'une valeur de zéro signifie que la série simulée a un

pouvoir prédictif équivalent à celui de la valeur moyenne de la série. Le biais,  $B$ , pour sa part, permet d'apprécier dans quelle mesure les valeurs simulées sous-estiment ou surestiment de façon globale les valeurs observées. Enfin, le RMSE donne une appréciation des écarts moyens entre valeurs simulées et observées.

Une comparaison des trajectoires simulées et observées a également été effectuée (le terme de trajectoire tel que défini ici réfère à la courbe créée par la succession de stations ou de tuiles où les maxima de précipitation horaire sont enregistrés pendant la période du 28 au 29 août 2011 de la zone d'étude. Par conséquent, la 'trajectoire' de l'ouragan est le lieu des points (ou des tuiles) correspondant aux maxima de précipitations horaires enregistrées ou simulées.

Le caractère extrême des précipitations est généralement établi en estimant la période de retour de durée donnée. Les périodes de retour aux différentes stations et tuiles du territoire sous étude ont été établies à partir des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) développées par Mailhot *et al.* (2011a,b). Les durées suivantes ont été considérées : 1, 2, 6, 12 et 24 heures. Ainsi les valeurs des hauteurs maximales de pluies pour chacune de ces durées ont été extraites des séries enregistrées à chaque station et des séries simulées à chaque tuile pendant le passage de l'ouragan Irène (période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT). Les valeurs aux stations et aux tuiles ont été comparées aux valeurs d'une seule station, la station de l'aéroport Pierre-Eliot-Trudeau (Montréal). Cette station présente l'avantage d'être assez centrale et de posséder une série des maxima annuels parmi les plus longues au Québec. Considérant le caractère très extrême des pluies associées à Irène, la relative homogénéité des quantiles de pluies extrêmes pour le territoire frappé par l'ouragan Irène au Québec et les incertitudes plus importantes associées aux quantiles de périodes de retour plus élevées, il est raisonnable de penser que le fait de prendre une seule station n'induit pas d'erreurs appréciables sur les périodes de retour estimées.



## **6. Résultats et discussions**

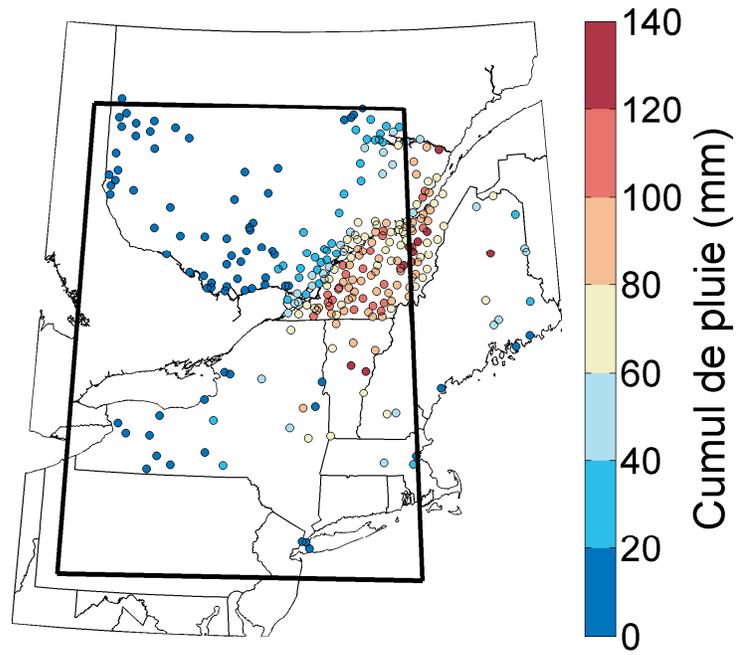
Le présent chapitre 6 présente les résultats obtenus. La première section s'intéresse plus spécifiquement à la comparaison des séries de pluie observées et simulées alors que la deuxième section est consacrée aux résultats sur les estimations des périodes de retour simulées et observées.

### **6.1 Comparaison des séries de pluie observées et simulées**

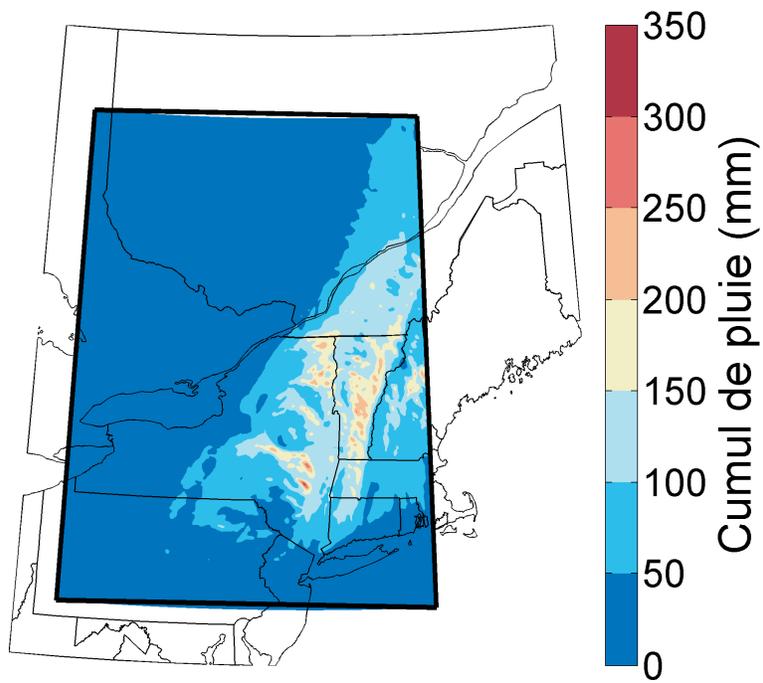
La comparaison a été effectuée selon trois étapes. Les sous-sections 6.1.1 et 6.1.2 regroupent les résultats des comparaisons des cumuls de pluie et des hauteurs de pluie maximales horaires simulées et observées pour la période d'étude (28 août 2011 à 13h00 au 29 août 2011 à 12h00 GMT) sont présentés. Ces deux variables, cumuls et hauteurs horaires maximales de pluies sont retenues puisqu'elles permettent de bien caractériser le caractère extrême des précipitations laissées dans le sillage de l'ouragan Irène 2011. La sous-section 6.1.3 présente les résultats des comparaisons des séries temporelles des différents couples stations/tuiles. Enfin, la sous-section 6.1.4 traite de la comparaison des trajectoires simulées et observées de l'ouragan Irène.

#### **6.1.1 Cumuls de pluie**

Les cumuls de pluie considérés sont ceux de la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT, ou heure de Greenwich. La Figure 6.1 montre les cartes des valeurs simulées et observées aux stations de même que la carte des différences entre ces valeurs pour les divers couples (stations, tuiles). Cette figure montre que globalement le modèle reproduit bien les cumuls de précipitations enregistrées aux différentes stations. Selon le modèle, les régions les plus affectées en termes de cumuls de pluie avec des valeurs de plus de 200 mm sont les états du Vermont et l'est de l'état de New York (Figure 6.1b). La densité des stations pour ces régions ne permet toutefois pas de valider de façon probante ce résultat.



(a)



(b)

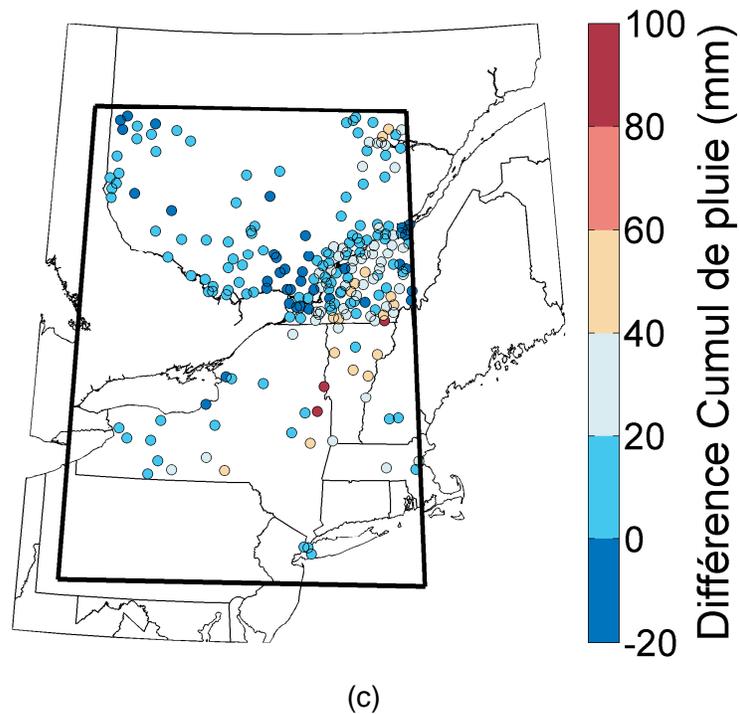


Figure 6.1 : Cartes des cumuls de pluie pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT : a) valeurs enregistrées aux stations; b) valeurs simulées; c) différences absolues entre cumuls de pluie simulée et enregistrée (simulées – enregistrées). Le quadrilatère délimite le domaine de simulation du modèle.

La Figure 6.2 montre ces résultats sous forme graphique. On constate que le modèle a globalement tendance à surestimer les cumuls enregistrés aux stations notamment pour les cumuls de pluie enregistrés les plus élevés. À noter que, pour deux stations (points de la Figure 6.2 sur l'axe des ordonnées), les cumuls de pluie simulés sont très appréciables (un peu moins de 100 mm et de 150 mm) alors que les cumuls de pluie enregistrés sont nuls. De même, certaines stations ont enregistré des cumuls non nuls (quoique relativement faibles) alors que le modèle n'a simulé aucune pluie en ces sites (points sur l'axe des abscisses de la Figure 6.2).

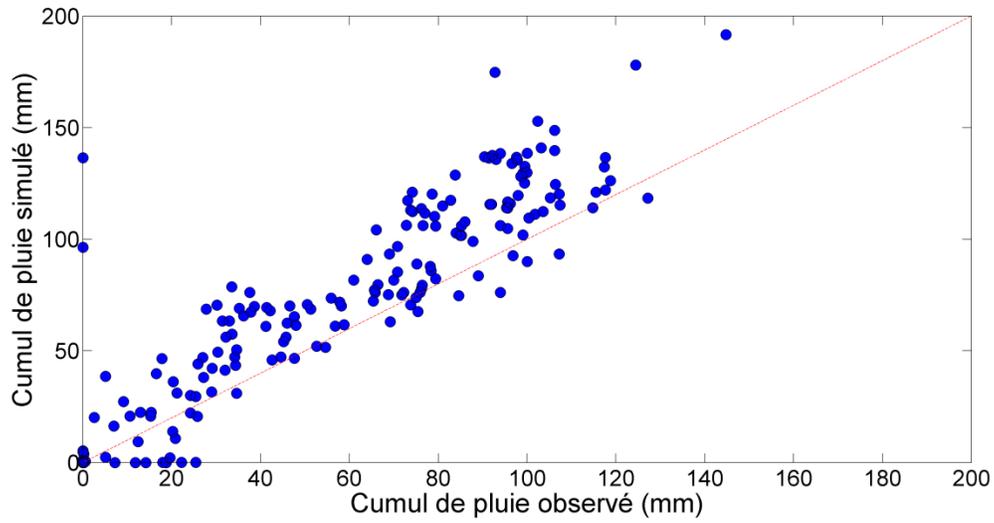


Figure 6.2 : Cumuls simulés de pluie en fonction des cumuls enregistrés aux différentes stations du territoire d'étude pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT.

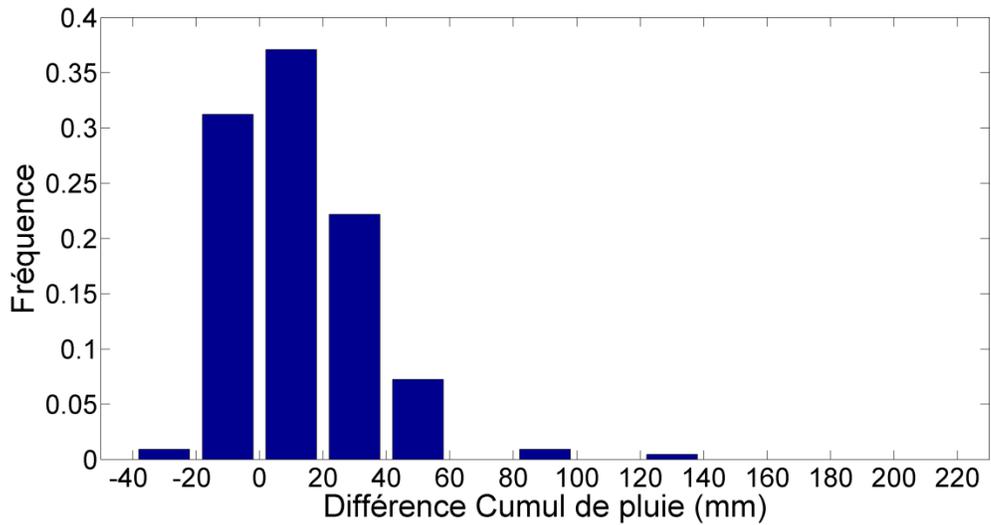
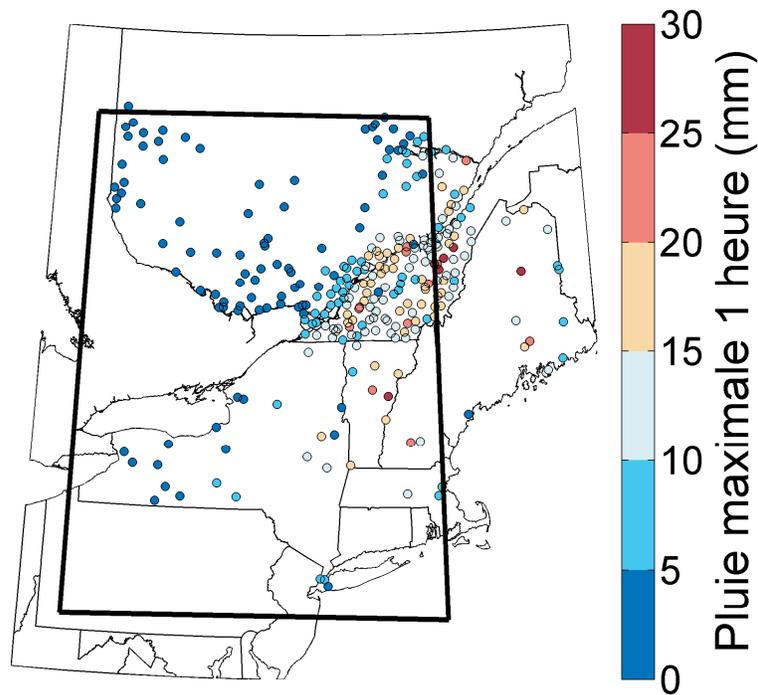


Figure 6.3 : Histogramme des écarts entre cumuls simulés et observés aux différentes stations du territoire sous étude pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT ou heure de Greenwich.

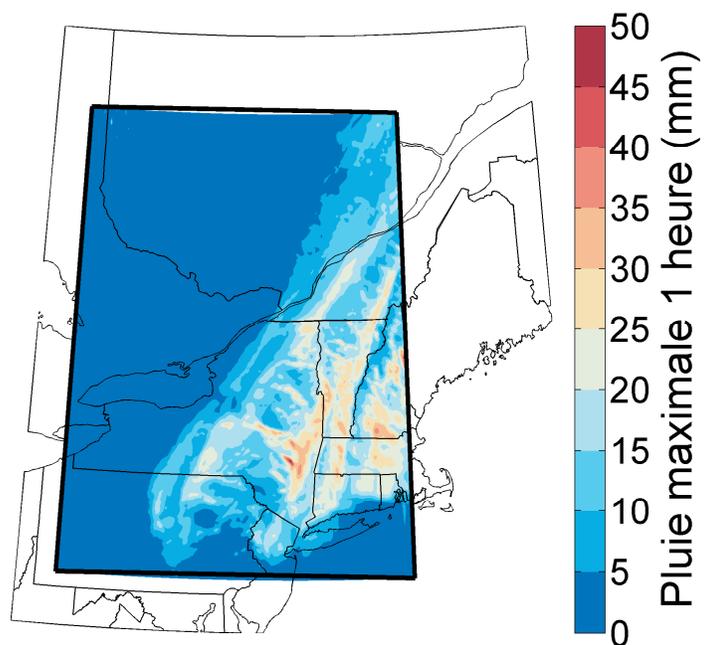
La Figure 6.3 présente l'histogramme des écarts entre cumuls simulés et observés pour l'ensemble des stations. Les écarts de cumuls se situent entre -20 et +20 mm pour près de 70 % des couples (stations, tuiles). L'histogramme présente une certaine asymétrie indiquant, tel que mentionné plus haut, que les cumuls simulés surestiment dans une majorité de cas les cumuls observés.

### 6.1.2 Hauteurs horaires maximales de pluie

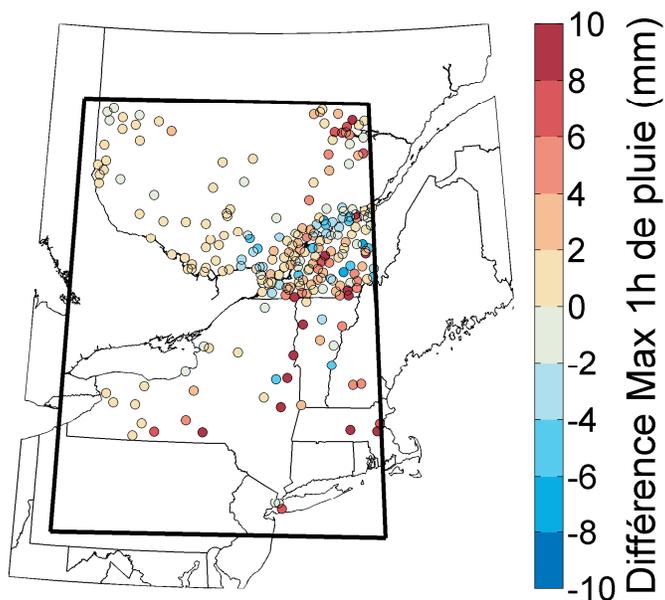
Une analyse similaire à celle présentée à la section précédente a été réalisée pour les hauteurs maximales de pluie simulées et enregistrées pendant la période d'étude. La Figure 6.4 montre les cartes des valeurs simulées et enregistrées aux stations de même que la carte des différences entre ces valeurs aux divers couples stations/tuiles. Les valeurs simulées des hauteurs horaires maximales de pluie montrent une structure spatiale très similaire à celle des cumuls de pluies (Figure 6.1b).



(a)



(b)



(c)

Figure 6.4 : Cartes des hauteurs horaires maximales de pluie pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT : a) valeurs enregistrées aux stations; b) valeurs simulées; c) différences absolues entre hauteurs horaires maximales de pluie simulées et enregistrées (simulées – enregistrées). Le quadrilatère délimite le domaine de simulation du modèle.

La Figure 6.5 reprend ces résultats et permet de comparer de façon globale les valeurs enregistrées aux valeurs simulées sous forme graphique. Les écarts entre valeurs enregistrées et simulées sont plus importants que pour les cumuls (dispersion plus grande des points), mais, globalement, le modèle ne présente pas de biais. La Figure 6.6 montre que pour près de 50% des couples stations/tuiles les écarts entre hauteurs maximales horaires simulées et observées se situent entre -2 mm/h et + 2 mm/h. Bien que plus symétrique que l'histogramme des écarts sur les cumuls de pluie, l'histogramme des écarts des maxima horaires de pluie montre que le modèle a tendance pour certaines stations à générer des maxima horaires beaucoup plus élevés que les maxima horaires observés.

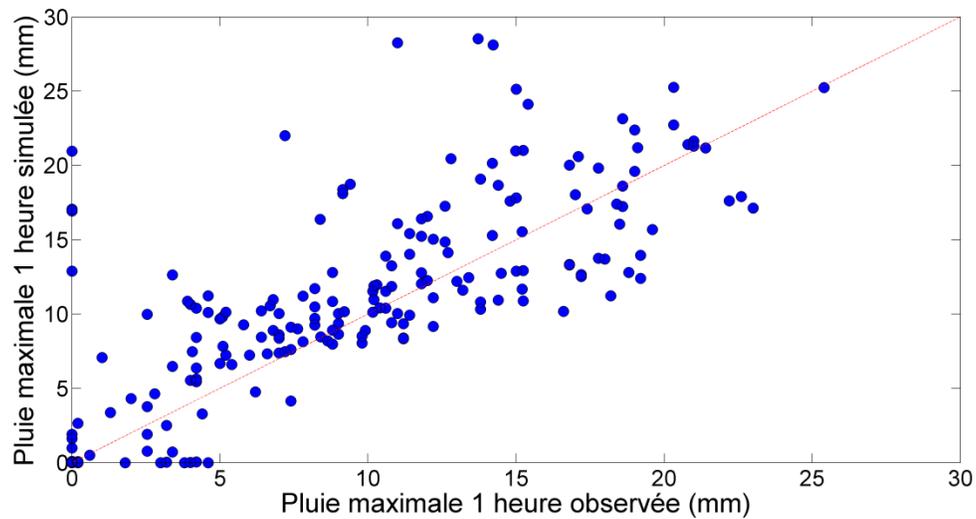


Figure 6.5 : Hauteurs de pluies horaires maximales simulées en fonction des hauteurs de pluies horaires maximales observées aux différentes stations du territoire sous étude pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT.

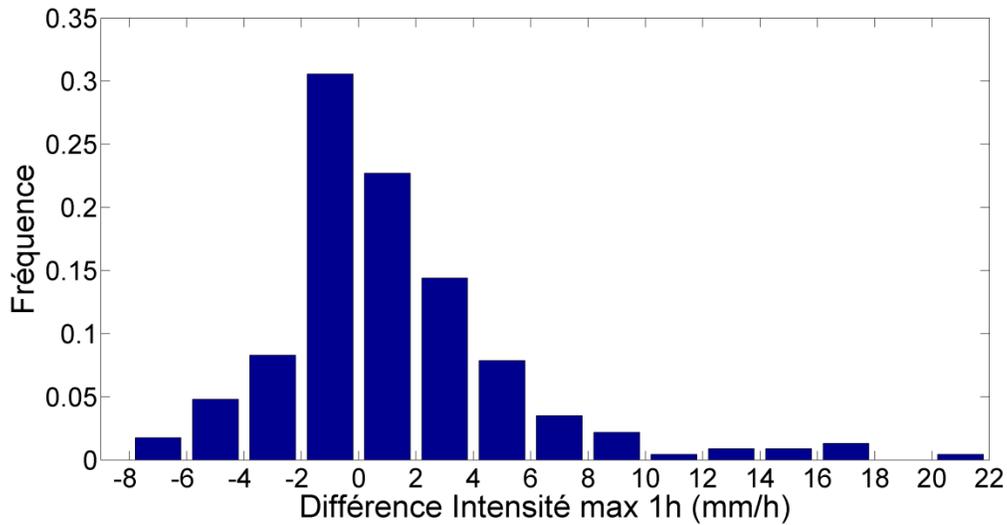
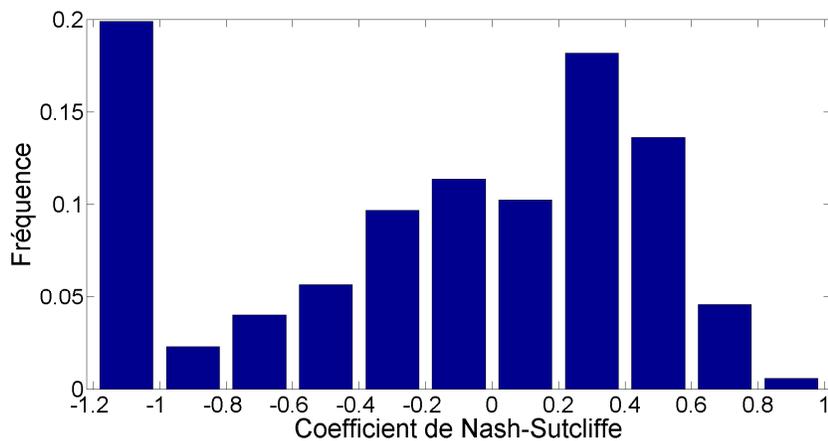


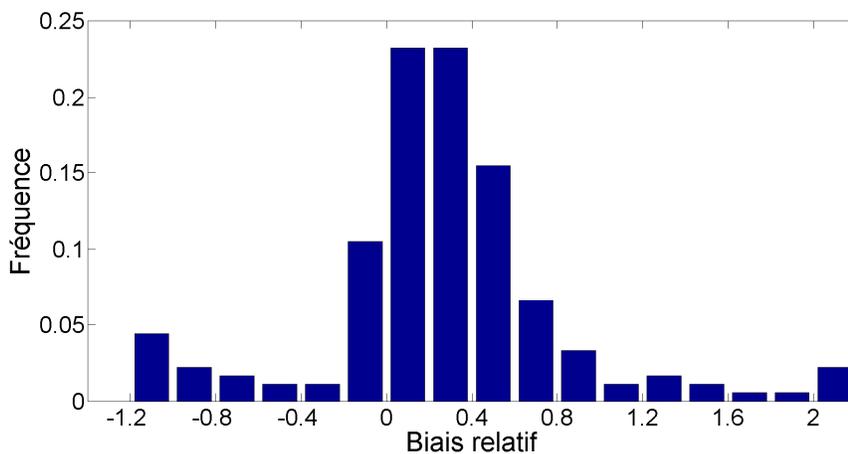
Figure 6.6 : Histogramme des écarts entre hauteurs de pluies horaires maximales simulées et observées aux différentes stations du territoire sous étude pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT.

### 6.1.3 Séries temporelles de pluie

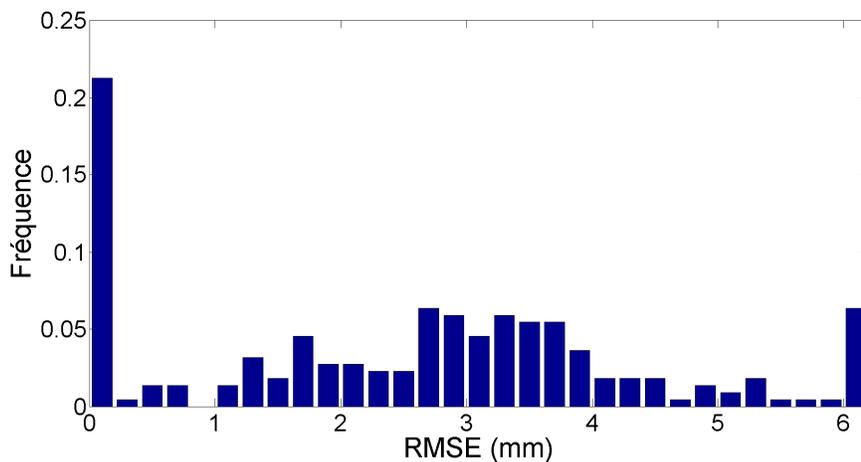
Les séries temporelles aux couples (stations, tuiles) ont été comparées en utilisant les trois estimateurs décrits à la section 5.4 à savoir le coefficient de Nash-Sutcliffe (S), le biais (B) et la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes (RMSE suivant l'acronyme anglais). La Figure 6.7 présente les histogrammes des valeurs de ces trois estimateurs pour les divers couples (stations, tuiles). L'historgramme des valeurs de S montre qu'une majorité des séries des couples (tuiles, stations) présentent des valeurs inférieures à -1 ce qui indique une mauvaise concordance entre valeurs simulées et observées. Il faut cependant préciser qu'une faible valeur de S peut résulter d'un décalage temporel entre valeurs simulées et observées.



(a)

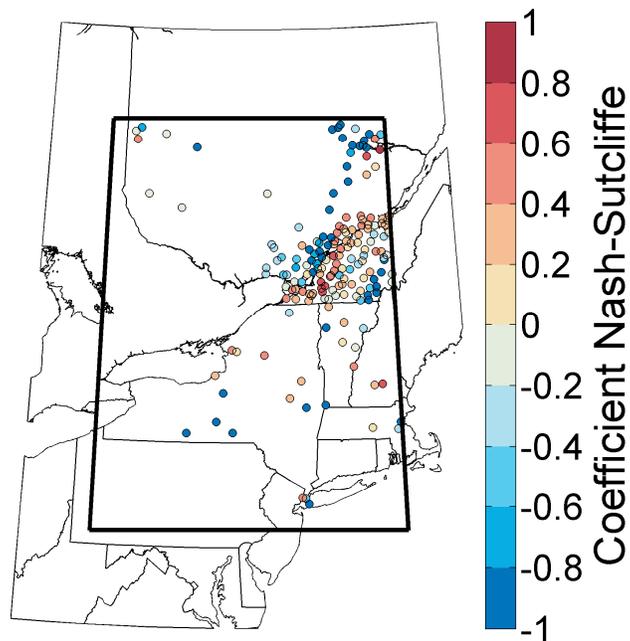


(b)

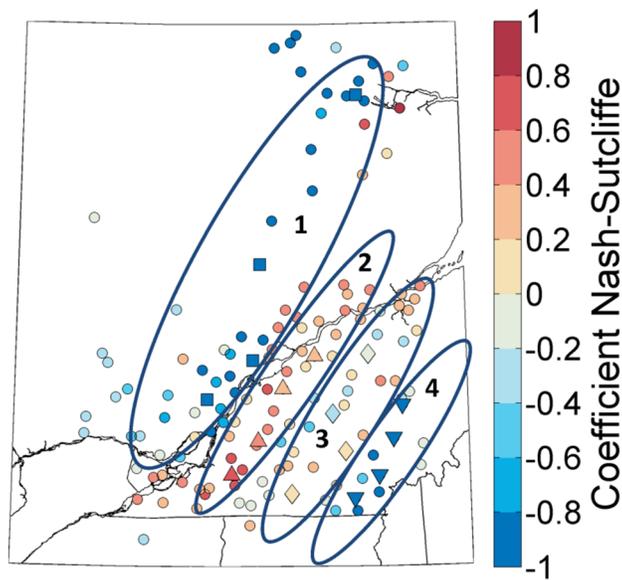


(c)

Figure 6.7 : Histogrammes des valeurs des estimateurs comparant les séries horaires de pluie simulées et observées aux divers couples stations/tuiles pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT : a) coefficient Nash-Sutcliffe; b) biais; c) RMSE. Le nombre de cas correspondant à la barre à l'extrême gauche pour l'indicateur Nash-Sutcliffe correspond aux cas où  $S \leq -1$ .



(a)



(b)

Figure 6.8 : Valeurs des estimateurs de Nash-Sutcliffe comparant les séries horaires de pluie simulée et observée aux divers couples stations/tuiles pendant la période du 28 août 2011, 13h00 au 29 août 2011, 12h00 GMT : a) totalité du domaine de simulation; b) zoom sur la partie sud du Québec. Les stations présentées au Tableau 3 sont identifiées par les carrés (zone 1), les triangles (zone 2), les losanges (zone 3) et les triangles inversés (zone 4). Le quadrilatère délimite le domaine de simulation du modèle.

Les cartes de la Figure 6.8 présentent la distribution spatiale des valeurs de S. On peut distinguer sur ces cartes quatre zones selon les valeurs de S calculées. Une première, la zone 1, localisée sur la rive nord du fleuve St-Laurent, correspond à des valeurs de S inférieures à -1. Une seconde, la zone 2, située au sud du fleuve St-Laurent, regroupe des stations où les valeurs des coefficients de N-S sont parmi les meilleures obtenues, généralement supérieures à 0,4. La zone 3, localisée un peu plus au sud-est, compte des stations avec des coefficients de S autour de zéro. Enfin la zone 4, située à l'extrémité sud-est du Québec selon un axe approximativement parallèle au St-Laurent, présente également des valeurs de S inférieure à -1.

Afin de mieux comprendre la nature des différences entre séries de pluie horaire simulées et observées, quatre stations ont été sélectionnées dans chacune des zones définies plus haut (Tableau 6.1) et les séries des valeurs horaires de pluie simulées et observées ont été comparées (zone 1 :Figure 6.9; zone 2 :Figure 6.10; zones 3 :Figure 6.11; zone 4 :Figure 6.12). Un premier constat s'impose à l'examen des Figures 6.9 à 6.12, à savoir que les pluies ont globalement débuté plus tôt que ce que le modèle suggère. En effet, dans tous les cas, un décalage existe entre les hauteurs de pluie enregistrées aux stations et les hauteurs de pluies simulées se traduisant, par exemple dans la zone 2 où ce décalage est le plus évident, par des décalages d'environ une heure dans les pics d'intensités maximales des pluies aux stations de cette zone.

Un examen zone par zone révèle par ailleurs que, pour la zone 1 (Figure 6.9), outre le décalage déjà mentionné, les intensités maximales simulées sont globalement plus élevées que les valeurs enregistrées aux stations. La zone 1 définit la frontière nord-ouest de la trajectoire d'Irène. La zone 2, quant à elle, définit en quelque sorte l'axe principal de la trajectoire d'Irène au Québec. L'accord entre séries horaires simulées et observées des hauteurs de pluie dans cette zone est excellent (Figure 6.10). Pour la zone 3, bien que les valeurs simulées et enregistrées soient comparables, le modèle semble générer trop de pluie à la fin du passage d'Irène alors que les pluies enregistrées s'amenuisent (Figure 6.11). Enfin pour la zone 4 qui définit en quelque sorte la frontière sud-est de la trajectoire d'Irène, le même effet que pour la zone 1 est observé à savoir une tendance à la surestimation des pluies horaires observées et une occurrence plus tardive des pics d'intensité (Figure 6.12).

Tableau 6.1 : Liste des stations retenues dans les différentes zones (voir Figure 6.6b) et valeurs correspondantes des coefficients de Nash-Sutcliffe, du biais et du RMSE.

Zone	Numéro de la station	Nom de la station	Coefficient Nash-Sutcliffe	Biais (mm)	RMSE (mm)
1	'7017380'	Saint-Jacques	-1,601	0,997	2,993
	'7014332'	Louiseville	-1,981	1,230	3,790
	'7072816'	Grande-Anse	-0,864	0,544	2,081
	'7063690'	Lac-Sainte-Croix	-1,830	1,305	2,817
2	'7023270'	Iberville	0,769	0,542	2,609
	'7024102'	La Providence	0,576	0,757	3,678
	'7029230'	Zéphirin	0,280	0,910	3,827
	'7020573'	Bécancour (Sainte-Gertrude)	0,284	0,878	4,498
3	'7020840'	Brome	0,010	0,330	4,052
	'7020860'	Bromptonville	0,086	0,386	4,289
	'7021954'	Danville	-0,369	1,416	3,753
	'7024250'	Laurierville	-0,074	1,293	3,456
4	'7021840'	Coaticook	-1,708	2,104	7,673
	'7027802'	Sawyerville-Nord	-1,955	1,780	7,681
	'7024320'	Lingwick	-1,485	1,558	7,164
	'7022002'	Disraeli-2	-0,900	1,571	6,083

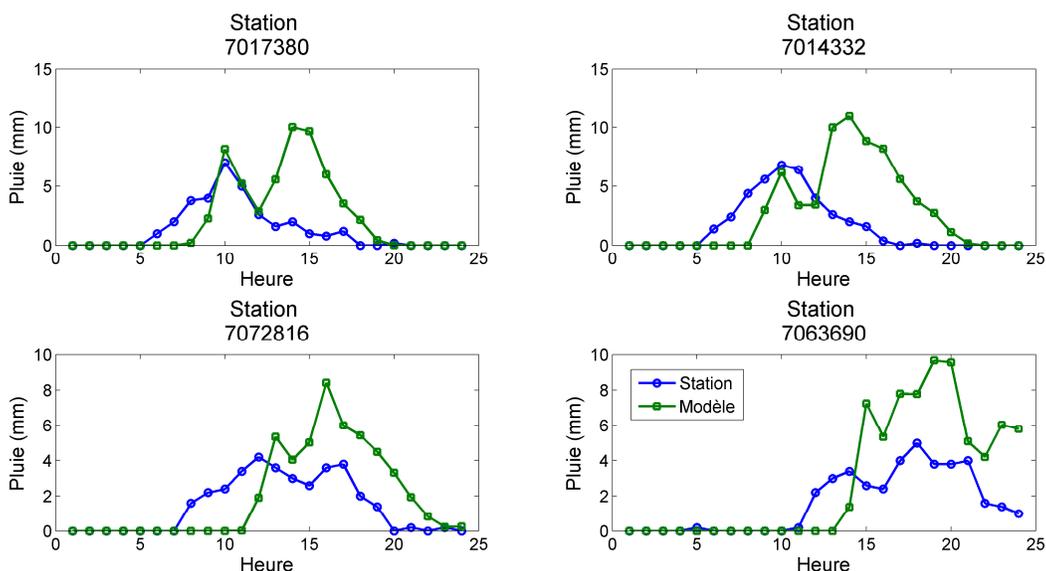


Figure 6.9 : Séries de pluie horaire simulées (courbes et carrés verts) et observées (courbes et cercles bleus) aux stations de la zone 1 (voir Figure 6.6b). L'heure 1 en abscisse correspond au 28 août 2011, 13h00 GMT.

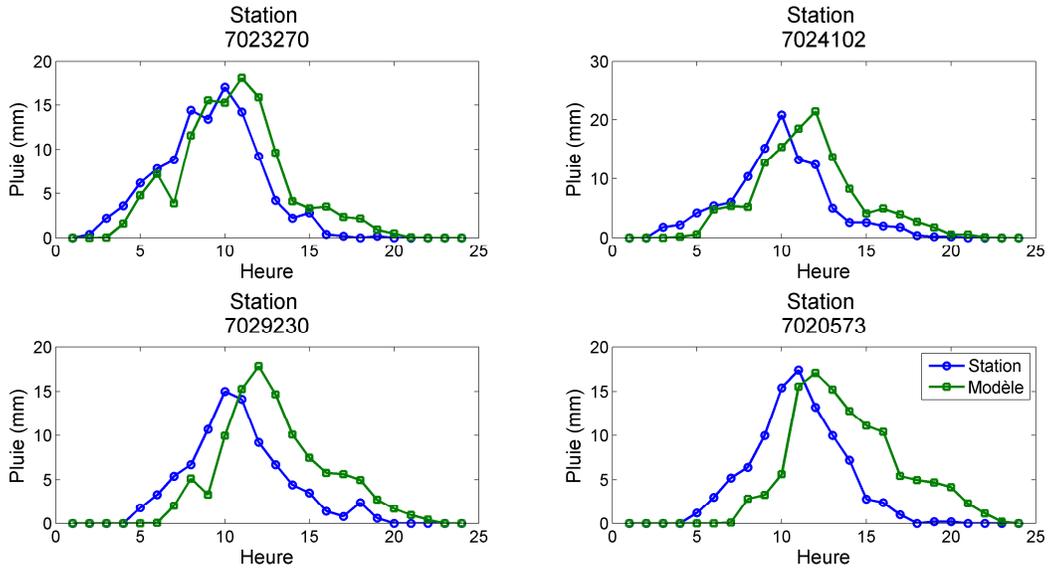


Figure 6.10 : Séries de pluie horaire simulées (courbes et carrés verts) et observées (courbes et cercles bleus) aux stations de la zone 2 (voir Figure 6.6b). L'heure 1 en abscisse correspond au 28 août 2011, 13h00 GMT.

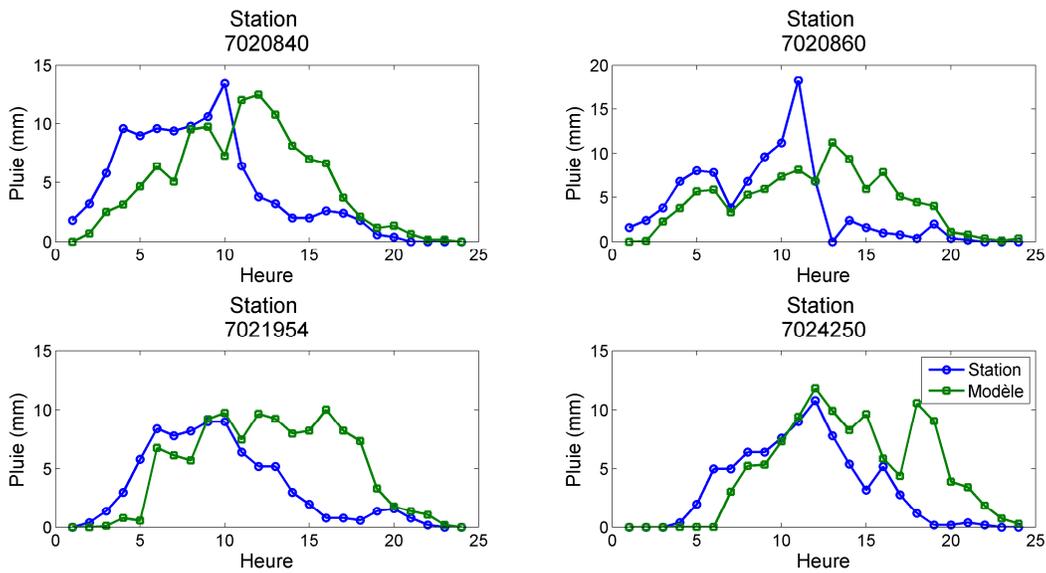


Figure 6.11 : Séries de pluie horaire simulées (courbes et carrés verts) et observées (courbes et cercles bleus) aux stations de la zone 3 (voir Figure 6.6b). L'heure 1 en abscisse correspond au 28 août 2011, 13h00 GMT.

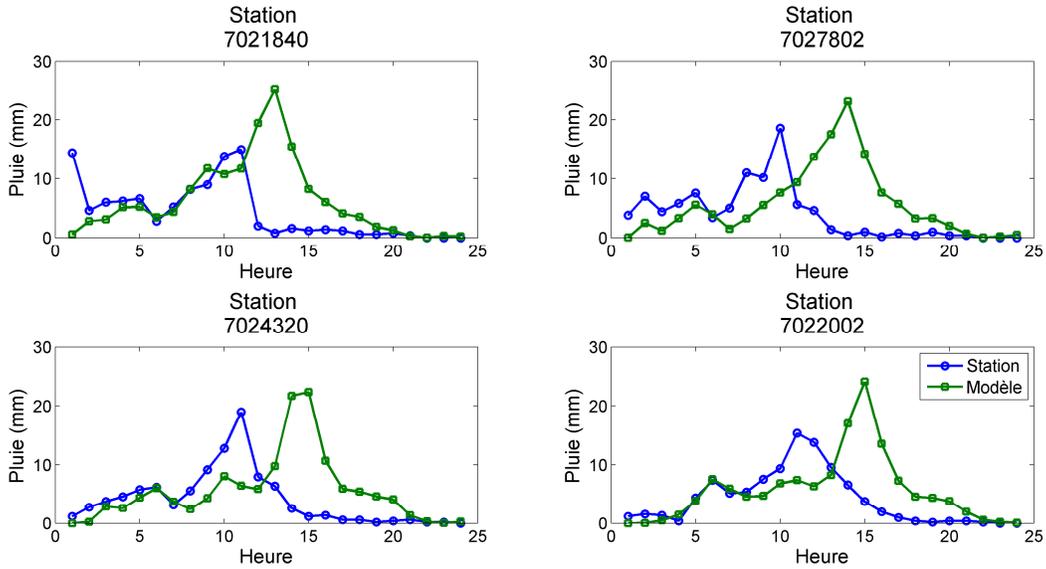
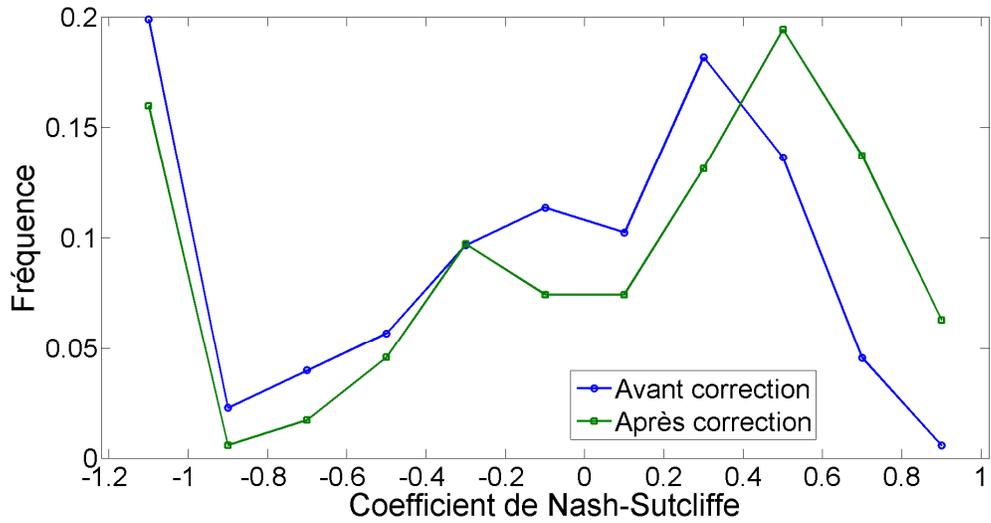
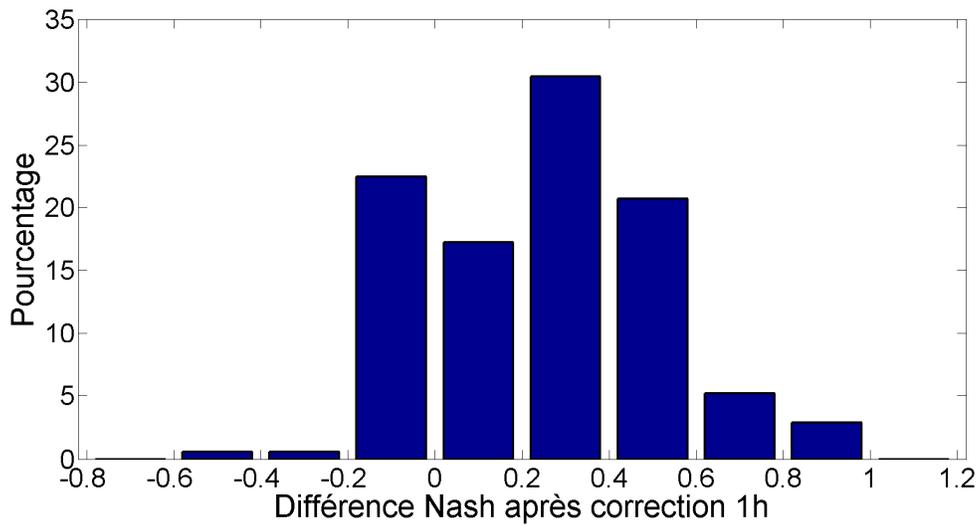


Figure 6.12 : Séries de pluie horaire simulées (courbes et carrés verts) et observées (courbes et cercles bleus) aux stations de la zone 4 (voir Figure 6.6b). L'heure 1 en abscisse correspond au 28 août 2011, 13h00 GMT.

Afin de voir si la correction du décalage que l'on observe aux Figures 6.9 à 6.12 permet d'améliorer sensiblement les résultats, toutes les séries simulées par GEM-LAM ont été décalées d'une heure et les différences entre le coefficient de Nash-Sutcliffe obtenu après application de cette correction et le même coefficient avant correction ont été estimées à chacune des stations. La Figure 6.13 montre l'histogramme de ces différences et les histogrammes avant et après correction du décalage. Comme on le voit très clairement la correction de ce 'biais' améliore le coefficient de N-S entre séries simulées et observées pour environ 77 % des stations, permet de réduire le nombre de couples stations/tuiles avec des valeurs de coefficients S inférieures à -1 et d'augmenter la fréquence de couples stations/tuiles avec des valeurs de coefficients S supérieures à 0,4.



(a)



(b)

Figure 6.13 : Histogrammes : a) des coefficients de Nash-Sutcliffe; et b) des écarts entre les coefficients de Nash-Sutcliffe avant et après décalage des séries simulées d'une heure pour chaque couple station/tuile. Une différence positive indique une amélioration de la valeur du coefficient S après correction du décalage.

### 6.1.4 Trajectoire de l'ouragan Irène

La trajectoire de l'ouragan Irène a été déterminée à partir des valeurs maximales de pluies enregistrées à toutes les stations et simulées sur tout le domaine de simulation à chaque heure. La Figure 6.14 présente les trajectoires ainsi obtenues.

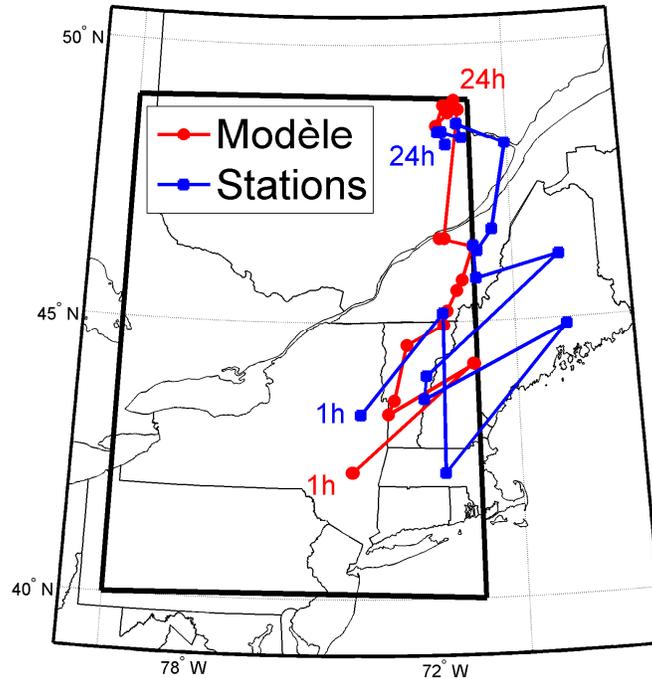


Figure 6.14: Trajectoires simulée et observée de l'ouragan Irène.

La trajectoire observée (en bleu sur la Figure 6.14) présente un caractère plus « erratique » essentiellement parce que la densité de stations ne permet pas de construire de façon précise la trajectoire d'Irène. Par ailleurs, la trajectoire établie à partir des données aux stations déborde du domaine de simulation à certaines heures suggérant qu'Irène a généré d'importantes précipitations en dehors du domaine de simulation (ici dans l'état du Maine; la Figure b tend d'ailleurs à suggérer qu'il en est ainsi puisque des hauteurs horaires importantes apparaissent à la frontière du domaine). Il est tout de même intéressant de noter une bonne concordance d'ensemble entre les trajectoires simulée et observée.

## **6.2 Estimation des périodes de retour simulées et observées**

Les analyses préliminaires dont les résultats sont présentés à la sous-section 6.1.2 montrent que les hauteurs maximales de pluie enregistrées sont souvent bien reproduites par la simulation. Un tel résultat suggère d'utiliser le modèle afin d'avoir une appréciation de la distribution spatiale des intensités maximales de pluie et de leur caractère plus ou moins extrême pour la région d'étude. Ce caractère extrême a été évalué en estimant les périodes de retour associées à différentes durées. La présente section rend compte de ces travaux et présente également les estimations des périodes de retour aux différentes stations et aux différentes tuiles où une comparaison des valeurs estimées à partir des séries simulées et observées a été également effectuée.

### **6.2.1 Périodes de retour simulées et observées**

Les périodes de retour ont été divisées en sept classes : 1) moins de 2 ans; 2) [2,5 ans[; 3) [5,10 ans[; 4) [10,20 ans[; 5) [20,50 ans[; 6) [50,100 ans[; 7) plus de 100 ans. Ces classes correspondent aux périodes de retour généralement considérées par les courbes IDF. La Figure 6.15 présente les périodes de retour estimées (en fonction des classes définies plus haut) en chaque point du domaine de simulation pour les durées 1, 2, 6, 12 et 24 h. La Figure 6.16 présente les valeurs équivalentes pour les données aux stations.

Plusieurs constats se dégagent de l'examen de ces cartes. Tout d'abord il apparaît clairement que la zone la plus durement frappée au Québec avec des pluies de périodes de retour supérieures à 100 ans pour les durées 6, 12 et 24 heures est celle comprise entre le fleuve St-Laurent et les états américains jusqu'à la hauteur de Québec. L'État du Vermont a également été durement frappé, de même que la partie est de l'État de New York. Les cartes des périodes de retour estimées à partir des enregistrements aux stations (Figure 6.16) montrent par ailleurs que des régions à l'extérieur du domaine de simulation ont également reçu des pluies de périodes de retour de plus de 100 ans pour les durées 6, 12 et 24 heures. Au Québec, ces régions se trouvent à l'est du domaine de simulation (région du bas du Fleuve, de Charlevoix et du Saguenay). Il faudrait noter que ces régions se trouvent dans la prolongation vers l'est des zones de pluies de

périodes de retour de plus de 100 ans simulées par le modèle situées à la frontière du domaine de simulation.

Les Figures 6.15 et 6.16 montrent par ailleurs très clairement que l'ouragan Irène a été un événement de faible envergure pour les courtes durées (contrairement par exemple à un orage de courte durée), mais de très grande envergure pour les longues durées. Ainsi pour les durées 1 et 2 heures, les périodes de retour sur une fraction du territoire du sud du Québec ont atteint 10 à 20 ans voire dans des régions très limitées 50 ans. Par contre, pour la durée 12 et 24 heures, une très large portion du sud du Québec a subi des pluies de périodes de retour de plus de 100 ans.

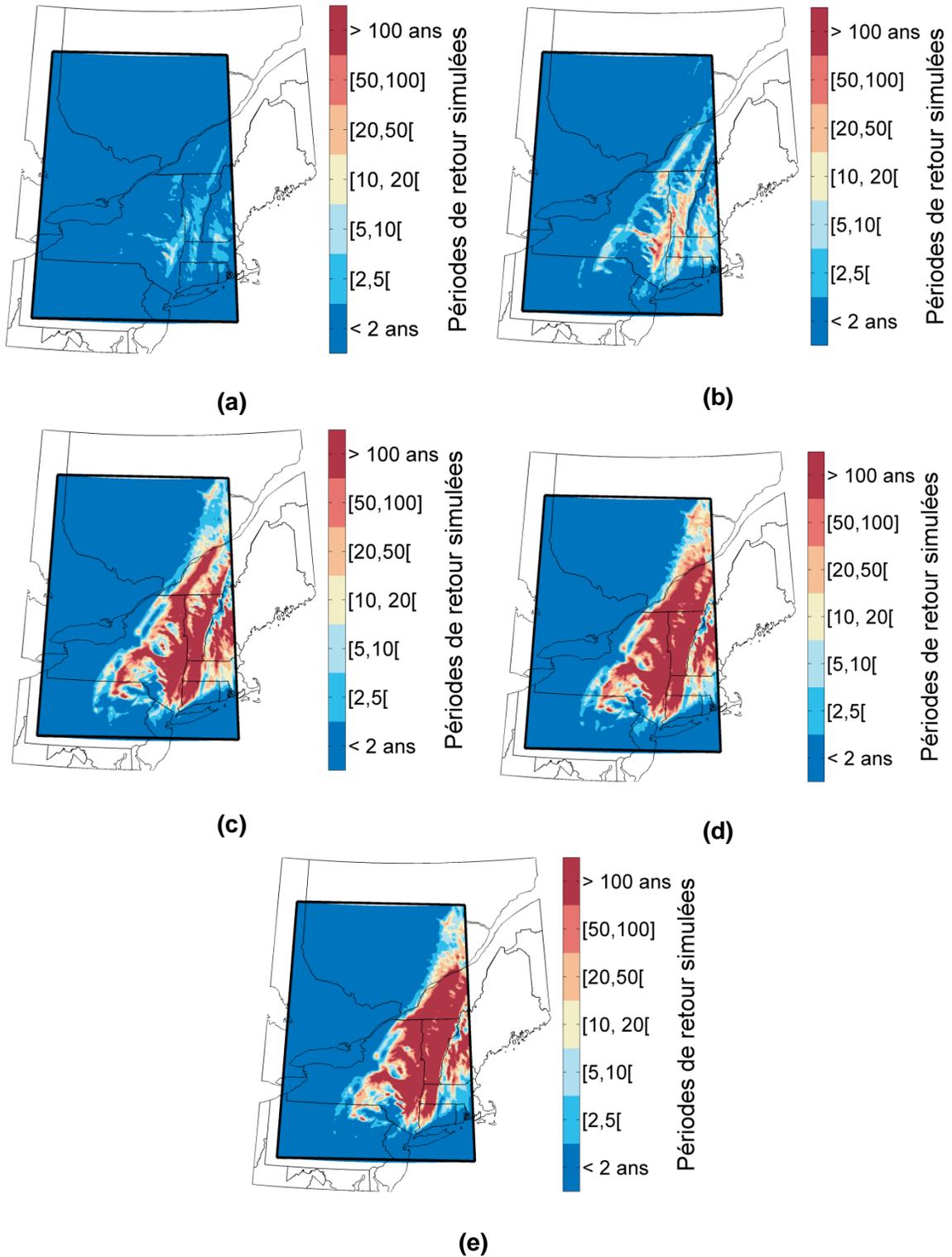


Figure 6.15 : Périodes de retour estimées à partir des séries simulées pour les durées : a) 1 h., b) 2 h., c) 6 h., d) 12 h. et e) 24 h. Le quadrilatère délimite le domaine de simulation du modèle.

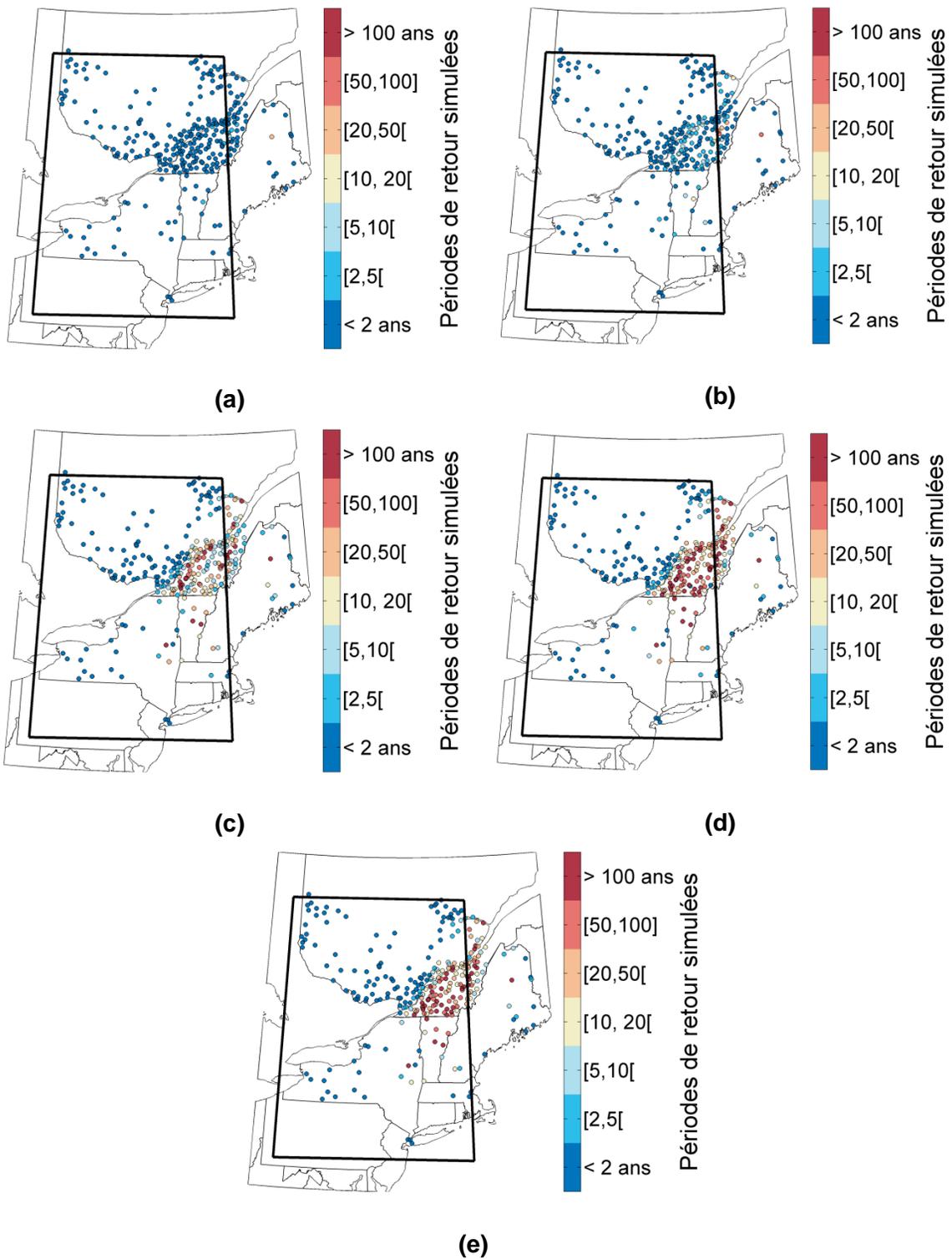


Figure 6.16 : Périodes de retour estimées à partir des séries aux stations pour les durées : a) 1 h., b) 2 h., c) 6 h., d) 12 h. et e) 24 h. Le quadrilatère délimite le domaine de simulation du modèle.

Les Tableaux 6.2 à 6.6 permettent de comparer les périodes de retour simulées aux périodes de retour estimées à partir des enregistrements aux stations pour les différentes durées. Pour la durée 1 heure, la très grande majorité des stations ( $\approx 98\%$ ) ont enregistré des pluies de période de retour de moins de deux ans. Pour la durée deux heures, le pourcentage de stations où les pluies sont de périodes de retour de moins de deux ans chute à 80 %. Les périodes de retour simulées sont généralement plus élevées que les périodes de retour enregistrées et cette tendance à la surestimation apparaît de plus en plus au fur et à mesure que la durée augmente. Globalement, on peut affirmer que le modèle reproduit de façon adéquate les périodes de retour estimées à partir des enregistrements aux stations. Il est important de noter que pour les stations qui sont comptabilisées dans les cases grises sur la diagonale, il y a concordance entre les périodes de retour simulées et observées.

Tableau 6.2 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 1 heure. Le nombre de stations disponibles est de 229.

		Périodes de retour simulées						
		< 2	[2,5[	[5,10[	[10,20[	[20,50[	[50,100]	> 100
Périodes de retour observées	< 2	217	9	0	0	0	0	0
	[2,5[	2	1	0	0	0	0	0
	[5,10[	0	0	0	0	0	0	0
	[10,20[	0	0	0	0	0	0	0
	[20,50[	0	0	0	0	0	0	0
	[50,100]	0	0	0	0	0	0	0
	> 100	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 6.3 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 2 heures. Le nombre de stations disponibles est de 226.

		Périodes de retour simulées						
		< 2	[2,5[	[5,10[	[10,20[	[20,50[	[50,100]	> 100
Périodes de retour observées	< 2	158	17	2	2	2	0	0
	[2,5[	11	12	6	3	0	0	0
	[5,10[	0	2	8	1	0	0	0
	[10,20[	0	1	0	1	0	0	0
	[20,50[	0	0	0	0	0	0	0
	[50,100]	0	0	0	0	0	0	0
	> 100	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 6.4 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 6 heures. Le nombre de stations disponibles est de 226.

		Périodes de retour simulées						
		< 2	[2,5[	[5,10[	[10,20[	[20,50[	[50,100]	> 100
Périodes de retour observées	< 2	82	16	10	1	1	1	1
	[2,5[	1	9	4	1	4	0	1
	[5,10[	0	7	4	8	4	0	1
	[10,20[	0	2	4	5	5	3	7
	[20,50[	0	1	2	3	4	5	6
	[50,100]	0	0	0	1	1	0	7
	> 100	0	0	0	1	4	1	8

Tableau 6.5 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 12 heures. Le nombre de stations disponibles est de 226.

		Périodes de retour simulées						
		< 2	[2,5[	[5,10[	[10,20[	[20,50[	[50,100]	> 100
Périodes de retour observées	< 2	81	10	3	6	5	0	3
	[2,5[	0	5	3	8	0	0	0
	[5,10[	0	0	1	1	3	0	0
	[10,20[	0	0	1	1	7	3	5
	[20,50[	0	0	1	6	5	3	13
	[50,100]	0	0	0	1	1	1	16
	> 100	0	0	0	0	0	3	30

Tableau 6.6 : Comparaison des périodes de retour (en années) simulées et observées pour la durée 24 heures. Le nombre de stations disponibles est de 221.

		Périodes de retour simulées						
		< 2	[2,5[	[5,10[	[10,20[	[20,50[	[50,100]	> 100
Périodes de retour observées	< 2	86	10	11	3	0	1	1
	[2,5[	0	3	5	5	0	0	0
	[5,10[	0	0	1	4	2	2	1
	[10,20[	0	0	1	6	6	1	9
	[20,50[	0	0	0	1	2	0	11
	[50,100]	0	0	0	1	0	1	19
	> 100	0	0	0	0	1	1	26



## 7. Conclusion et perspectives

La documentation et l'analyse des phénomènes météorologiques extrêmes présentent un sujet largement traité dans les domaines de l'hydrologie, l'hydraulique et l'environnement. Ces phénomènes sont conditionnés par plusieurs facteurs tels que les conditions climatologiques locales et les caractéristiques géographiques et topographiques de la région étudiée.

Les ouragans représentent l'un de ces phénomènes météorologiques extrêmes parmi les plus destructeurs. Les chroniques historiques montrent que les ouragans se formant dans l'Atlantique frappent souvent la côte est de l'Amérique du Nord causant de nombreux dommages. La vulnérabilité des infrastructures en place face aux ouragans est importante, ce qui demeure un enjeu crucial considérant que les ouragans risquent d'être plus fréquents et intenses en raison des changements climatiques. Dans un tel contexte, il s'avère important de bien documenter les ouragans passés qui ont marqué l'histoire météorologique récente de la côte est de l'Amérique du Nord de façon générale et du Québec en particulière.

L'ouragan Irène compte parmi les ouragans marquants de l'histoire récente du Québec. Bien que la côte est des États-Unis ait été la zone la plus durement frappée par Irène, cette dernière a tout de même terminé sa course affaiblie, mais encore dangereuse, au Québec causant des pluies abondantes et entraînant de nombreuses pannes d'électricité. L'ouragan Irène, ou plus exactement sa manifestation sur le sud du Québec, de par son caractère extrême, pourra très bien être utilisé comme pluie de conception ou pluie de référence pour l'évaluation de diverses mesures visant à améliorer le niveau de service des infrastructures existantes ou à construire dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques. On comprend dès lors l'intérêt de caractériser cet événement en terme pluviométrique.

Deux sources de données ont été utilisées. La première source regroupe les données pluviométriques des stations opérées par Environnement Canada, le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, et les données aux stations se trouvant dans les états du Maine, du Massachusetts, de New York, du New Hampshire et du Vermont aux États-Unis. La seconde source consiste en une simulation de la pluviométrie associée à Irène par le *Global Environmental Multiscale - Limited Area Model* (GEM-LAM) d'Environnement

Canada. L'Intérêt d'utiliser la simulation du GEM-LAM réside dans le fait que le champ de précipitation simulé couvre l'ensemble du territoire et permet donc de bien caractériser la structure spatiale des précipitations ce que ne permet pas (ou très imparfaitement) les séries aux stations.

L'utilisation des séries de précipitations simulées par GEM-LAM à titre de pluie de référence exige que ces séries soient d'abord comparées aux séries observées aux stations. Ce travail de validation, bien que partiel, est essentiel. Il permet d'apprécier dans quelle mesure le modèle, malgré les incertitudes et biais inhérents à ce type de modélisation, permet de reproduire les séries observées. Cette validation demeure toutefois partielle puisque les données aux stations n'offrent qu'une couverture fragmentaire du territoire, que ces données ne sont pas elles-mêmes exemptes d'incertitudes (en particulier pour les pluies extrêmes en raison du sous-captage) et qu'il existe une différence d'échelle importante entre la mesure aux stations (ponctuelles) et la valeur simulée par le modèle (interprétée comme la précipitation moyenne sur un point de grille).

Les résultats de ces comparaisons montrent d'une part que, de façon générale, le modèle GEM-LAM reproduit bien les séries aux stations. Les écarts entre cumuls aux stations et simulés aux points de grille pour toute la durée de l'événement se situent entre -20 et +20 mm pour près de 70 % des couples (stations, tuiles), les cumuls enregistrés aux stations variant de 0 à 150 mm. Le modèle tend à presque systématiquement surestimer les précipitations aux stations et ces surestimations tendent à être plus importantes pour les cumuls les plus élevés. Par ailleurs, pour les maxima horaires enregistrés sur la période d'étude, 50% des couples stations/tuiles présentent des écarts entre hauteurs maximales horaires simulées et observées entre  $\pm 2$  mm/h (la majorité des valeurs aux stations se trouvent entre 5 et 20 mm/h). Dans ce cas aucun biais n'est observé, mais la dispersion des valeurs simulées tend à croître lorsque les valeurs observées sont plus importantes. Il apparaît donc que le modèle donne une représentation adéquate des statistiques globales des précipitations (cumuls de pluie et intensités maximales) générées par Irène.

Les séries horaires de précipitations simulées et observées ont été comparées en estimant le coefficient de Nash-Sutcliffe (S), le biais et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). La distribution des valeurs de S aux différents couples

station-tuile est relativement dispersée. Un peu moins de 20 % de ces couples présente des valeurs de S de plus de 0,4 alors que plus de 50 % des couples présente des valeurs inférieures à zéro. Un examen des séries à différentes stations montre qu'il existe pour certaines zones un décalage entre la valeur simulée et la valeur enregistrée, les pluies simulées débutent plus tard que les pluies observées conduisant à des valeurs de S nettement moindres. La correction de ce décalage (post-traitement) d'une heure a permis d'améliorer les résultats des coefficients S. Après correction, près de 40 % des couples station-tuile ont des valeurs de S supérieures à 0,4 alors que le pourcentage de valeur de S inférieures à zéro diminue à un peu moins de 40 %. Un 'post-traitement spatial' est également envisageable, consistant en une translation du champ de précipitation simulée à chaque pas de temps. L'efficacité d'un tel post-traitement des séries simulées n'a toutefois pas été évaluée dans le cadre des présents travaux.

Les trajectoires simulée et observée de l'ouragan Irène ont également été comparées. La trajectoire a été définie comme la courbe liant les sites (stations ou tuiles) qui, à chaque heure, présente les intensités maximales les plus importantes. Dans le cas des stations, il convient de noter que la couverture spatiale du réseau de stations étant limitée, la 'trajectoire' ainsi définie risque d'être plus bruitée. De plus, la trajectoire observée déborde du domaine de simulation. Compte tenu des nombreuses limitations notamment en termes de densité de stations, la concordance entre trajectoire simulée et observée est relativement satisfaisante.

L'évaluation des périodes de retour associées aux précipitations de l'ouragan Irène montre que celui-ci a généré des précipitations très intenses pour les durées de 12 et 24 heures (périodes de retour de plus de 100 ans en plusieurs sites) alors que les intensités pour les durées de 6 heures et moins ont été beaucoup moins intenses. Ce type d'événement pose donc un défi particulier notamment en milieu urbain. Par ailleurs, les périodes de retour simulées par le modèle GEM-LAM concordent de façon globale avec les périodes de retour estimées à partir des séries observées.

L'ensemble de ces résultats montre donc que l'ouragan Irène est un événement majeur vraisemblablement représentatif des conditions typiques associées à une queue d'ouragan. Les analyses effectuées montrent par ailleurs que les champs de précipitation simulés par le modèle GEM-LAM aux différentes heures reproduisent de

façon générale très acceptable les données aux stations. Il faut bien comprendre cependant que cette validation est partielle puisque la couverture des stations est incomplète. Toutefois elle suggère que la simulation du modèle GEM-LAM de l'événement Irène est représentative c'est-à-dire que, sans donner une représentation exacte des séries de précipitations aux stations ou de la structure spatiale du champ de précipitation, elle en fournit une représentation plausible. L'application de divers post-traitements aux séries simulées (tel que le décalage temporel proposé dans le cadre de la présente étude) pourrait permettre d'en améliorer la représentativité et ultimement fournir une représentation spatiale et temporelle de l'ouragan Irène (ce que ne évidemment pas les séries aux stations).

Les séries de précipitations aux stations et les séries simulées par le modèle GEM-LAM peuvent très certainement être utilisées pour analyser les impacts hydrologiques d'événements extrêmes de ce type (queues d'ouragan) sur différents bassins du Québec et aussi en milieu urbain (les séries de précipitations aux 5 minutes devraient être considérées dans ce dernier cas, séries qui n'ont pas fait l'objet d'analyse dans le cadre du présent mémoire) sachant que ces événements pourraient être plus fréquents en climat futur. Diverses mesures d'adaptation pourraient également être évaluées à partir de cet événement de 'référence'.

## 8. Liste bibliographique

- Ackerman SA & Knox JA (2013). *Meteorology : Understanding the Atmosphere*. Jones & Bartlett Learning, Burlington, Massachusetts, USA. 564 p.
- Ahrens CD (2009). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment*. Brooks/Cole, Cengage Learning, Belmont, USA, Ninth edition. 549 p.
- AON Re Global (2006). Recent Atlantic Basin Hurricane Frequency Shift. in *Insurance Journal (AON Reinsurance Services, United States and United Kingdom)*, p 1/14-14/14.
- Arpe K & Leroy SAG (2009). Atlantic hurricanes—Testing impacts of local SSTs, ENSO, stratospheric QBO—Implications for global warming. *Quaternary International* 195(1-2):4-14. Doi: 10.1016/j.quaint.2008.06.003
- Avila LA & Cangialosi J (2011). Hurricane Irene: 21-28 August 2011. in *Tropical Cyclone Report (National Hurricane Center, Miami, Floride, USA)*, p 45.
- Avila LA & Stewart SR (2013) Annual weather summary atlantic hurricane season of 2011. *Monthly Weather Review* 141(8):2577-2596.
- Barry RG & Chorley RJ (2010). *Atmosphere, Weather, and Climate*. Routledge, New York, USA. 499 p.
- Barry RG & Hall-McKim EA (2014). *Essentials of the Earth's climate system*. Cambridge University Press, New york, USA. 255 p.
- Bevere I, Enz R, Mehlhorn J & Tamura T (2012). Catastrophes naturelles et techniques en 2011 : des dommages historiques suite à des séismes et des inondations record. in *Sigma Édit Re S (Compagnie Suisse de Réassurances SA, Economis Research & Consulting, Zurich, Suisse)*, p 1-43.
- Chan JCL & Kepert JD (2010). *Global perspectives on tropical cyclones : from science to mitigation*. World Scientific Publishing, Singapore. 409 p.
- Datin P, Cabrera C & Vojjala R (2013). Hurricane Irene : Damage observations along the eastern seaboard. *The ATC and SEI Conference on Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past*. (Miami, Floride, USA, 24-26 octobre 2012), B.V. E (Édit.) Risk Management Solutions, Inc., p 646-657.
- De Elía R, Laprise R & Denis B (2002). Forecasting skill limits of nested, limited-area models : A perfect-model approach. *Monthly Weather Review* 130(8):2006-2023.
- Deodatis G, Ellingwood BR & Frangopol DM (2013). *Safety, Reliability, Risk and Life-cycle Performance of Structures and Infrastructures*. CRC Press/Balkema, London, UK. 5690 p.
- Elsner JB, Hodges RE, Malmstadt JC & Scheitlin KN (2010). *Hurricanes and climate change, Volume 2*. Springer, Tallahassee, Floride, USA, illustrée. 255 p.
- Elsner JB & Kara AB (1999). *Hurricanes of the North Atlantic: Climate and society*. Oxford University Press, New York, USA. 489 p.

- Emanuel KA (2003). Tropical cyclones. *Annual review of earth and planetary sciences* 31(1):75-104. Doi: 10.1146/annurev.earth.31.100901.141259.
- Emanuel KA (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436(7051):686-688. Doi: 10.1038/nature03906.
- Galiano D (2000). *Hurricanes*. The Rosen Publishing Group, New York, USA. 46 p.
- Glenn S, Schofield O, Kohut J, Bowers L, Crowley M, Dunk R, Kerfoot J, Miles T, Palamara L, Roarty H, Seroka G, Xu Y, Titlow J, Brown W, Boicourt W, Atkinson L & Seim H (2012). Impact of ocean observations on hurricane forecasts in the Mid-Atlantic: Forecasting lessons learned from Hurricane Irene. OCEANS 2012 MTS/IEEE: Harnessing the Power of the Ocean. (Hampton Road, Virginia, USA, 14-19 october 2012, IEEE, Oceans, 2012, p 1-5.
- Hoffman RN & Gombos D (2012). Hurricane Irene (2011) “worst-case” estimates of wind damage to property from exigent analysis of ECMWF ensemble forecasts. *Geophysical Research Letters* 39(16):1/6-6/6.
- Holland GJ & Webster PJ (2007), Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: Natural variability or climate trend? *Philosophical Transactions of the Royal Society* 365(1860):2695-2716. Doi: 10.1098/rsta.2007.2083
- IPCC (2007a). Climate Change 2007: Synthesis Report. in Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. and Reisinger, A.] (GIEC, Genève, Suisse and Valencia, Spain), p 103.
- IPCC (2007b). Questions fréquentes. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, p 99-141.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. in Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley] (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA), p 1535.
- Kieffer SW (2013). *The dynamics of disaster*. W. W. Norton & Company, New York, USA. 273 p.
- Kislow PV (2008) *Hurricanes: Background, history and bibliography*. Nova Science Publishers, New York, USA, 267 p.
- Klotzbach PJ (2006). Trends in global tropical cyclone activity over the past twenty years (1986-2005). *Geophysical Research Letters* 33(10):1/4-4/4.
- Korty R (2013). Hurricane (Typhoon, Cyclone). *Encyclopedia of Natural Hazards, Encyclopedia of Earth Sciences Series*: Springer Netherlands, Texas, USA. p 481-493.
- Landsea CW, Vecchi GA, Bengtsson L & Knutson TR (2009). Impact of Duration Thresholds on Atlantic Tropical Cyclone Counts. *Journal of Climate* 23:2508-2519.

- Lau WKM & Zhou YP (2012). Observed recent trends in tropical cyclone rainfall over the North Atlantic and the North Pacific. *Journal of Geophysical Research* 117(D3):1-13. Doi: 10.1029/2011jd016510
- Lugo AE (2000). Effects and outcomes of Caribbean hurricanes in a climate change scenario. *The science of the total environment*:243-251.
- Mailhot J, Milbrandt JA, Giguère A, McTaggart-Cowan R, Erfani A, Denis B, Glazer A & Vallée M (2012). An Experimental High-Resolution Forecast System During the Vancouver 2010 Winter Olympic and Paralympic Games. *Pure and Applied Geophysics* 171(1-2):209-229.
- Mailhot, A & Talbot G (2011a). Mise à jour des estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) pour le sud-Québec, Tome I – Données et méthodes. Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec.
- Mailhot, A & Talbot G (2011b). Mise à jour des estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) pour le sud-Québec, Tome II – Résultats. Institut national de la recherche scientifique INRS-Eau, Terre et environnement, Québec.
- National Weather Service (2012). Hurricane Irene, August 21–30, 2011. National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Maryland, USA. 90 p. <http://www.nws.noaa.gov/om/assessments/pdfs/Irene2012.pdf>
- Neely W (2006). The major hurricanes to affect the Bahamas : personal recollections of some of the greatest storms to affect the Bahamas. AuthorHouse, Bloomington, Indiana, USA, illustrée. 252 p.
- Neely W (2012). The Great Hurricane of 1780: The story of the greatest and deadliest hurricane of the Caribbean and the Americas. iUniverse, Bloomington, Indiana, USA. 268 p.
- Noor Al-Deen HS & Hendricks JA (2013). Social media and strategic communications. The Palgrave Macmillan. 264 p.
- Oliver, JE (2005). *Encyclopedia of world climatology*. Dordrecht, Pays-Bas; New York, USA: Springer, 854 p.
- Perez-Peraza, JA et IY Libin (2012). *Highlights in helioclimateology : Cosmophysical influences on climate and hurricanes*, 1st edition. Waltham, Massachusetts, USA: Elsevier, 284 p.
- Reusser, DE, T Blume, B Schaefli et E Zehe (2009). Analysing the temporal dynamics of model performance for hydrological models. *Hydrology and earth system sciences* 13 (7): 999-1018. Doi: 10.5194/hess-13-999-2009.
- Russell J & Cohn R (2013). Saffir Simpson Hurricane Scale. Bookvika publishing, Bloomington, Indiana, USA. 74 p.

- Simjanovski D (2010). Évaluation des processus radiatifs et des nuages par le modèle GEM-LAM pour l'année Sheba en Arctique. Maître ès sciences (UQAM, Montréal, Canada). 88 p. (Consulté en mars 2010).
- Smith K (2013). *Environmental hazards assessing risk and reducing disaster*, Sixth Edition. New York, USA; Canada: Routledge, 471 p.
- Spaulding ML (2012). Estuarine and coastal modeling. Proceedings of the twelve international conference. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA. 585 p.
- Talbot CJ & Naghash M (2012). Hurricane Irene Effects on Urban Runoff Water Quality in Selected Northeastern U.S. Streams. World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries. USA, American Society of Civil Engineers, p 398-410.
- U.S. Global Change Research Program (2009). Global climate change impacts in the United States. Cambridge University Press, New York, USA, 193 p.
- Vecchi GA & Knutson TR (2008). On Estimates of Historical North Atlantic Tropical Cyclone Activity\*. *Journal of Climate* 21(14):3580-3600.
- Vecchi GA & Knutson TR (2011). Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878–1965) Using Ship Track Density. *Journal of Climate* 24(6):1736-1746.
- Webster PJ, Holland GJ, Curry JA & Chang HR (2005). Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science* 309:1844-1846.
- Yang D, Ritchie H, Desjardins S, Pearson G, MacAfee A & Gultepe I (2010). High-Resolution GEM-LAM Application in Marine Fog Prediction: Evaluation and Diagnosis. *Weather and Forecasting* 25(2):727-748.
- Zadra A, Caya D, Côté J, Dugas B, Jones C, Laprise R, Winger K & Caron L-P (2008). The Next Canadian Regional Climate Model. *La Physique au Canada* 64(2):75-83.

## 9. ANNEXES

### ANNEXE A :

Saison cyclonique Atlantique du 2011 (<http://www.nhc.noaa.gov/2011atlan.shtml>)

Les cyclones tropicaux du bassin Atlantique Nord en 2011				
Type/catégorie	Nom	Durée	Vents max (mph)	Pression min (mbar)
Tempête tropicale	Arlene	28 juin-1 juillet	65	993
Tempête tropicale	Bret	17 – 22 juillet	70	995
Tempête tropicale	Cindy	20 – 22 juillet	70	994
Tempête tropicale	Don	27 – 30 juillet	50	997
Tempête tropicale	Emily	2 – 7 août	50	1003
Tempête tropicale	Franklin	12 – 13 août	45	1004
Tempête tropicale	Gret	13 – 16 août	65	1000
Tempête tropicale	Harvey	19 – 22 août	65	994
<b>Ouragan-3</b>	<b>Irene</b>	<b>21 – 28 août</b>	<b>120</b>	<b>942</b>
Dépression tropicale	Ten	25 – 26 août	35	1006
Tempête tropicale	Jose	27 – 28 août	45	1006
Ouragan-4	Katia	29 août – 10 septembre	140	942
Tempête tropicale	anonyme	1 – 2 septembre	45	1002
Tempête tropicale	Lee	2 – 5 septembre	60	986
Ouragan-1	Maria	6 – 16 septembre	80	983

Ouragan-1	Nate	7 – 11 septembre	75	994
Ouragan-4	Ophelia	20 septembre – 3 octobre	140	940
Ouragan-1	Philippe	24 septembre – 8 octobre	90	976
Ouragan-3	Rina	23 – 28 octobre	115	966
Tempête tropicale	Sean	8 – 11 novembre	65	982

Cette annexe présente la liste des stations examinées, ainsi que leurs caractéristiques (224 stations au total).

**ANNEXE B :**

Liste des stations retenues

<b>Numéro de station</b>	<b>Nom de station</b>	<b>Source</b>	<b>Province/État</b>	<b>Pays</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>n° heure début</b>	<b>n° heure fin</b>	<b>Nombre d'heures disponibles</b>
701LEEH	Lac-aux-Sables	MDDEFP	Québec	Canada	46,87	-72,40	1	96	96
7010453	Barrage Saint-Didace	MDDEFP	Québec	Canada	46,33	-73,28	1	96	96
7011190	Catherine	MDDEFP	Québec	Canada	46,84	-71,62	1	96	96
7011307	Charrette	MDDEFP	Québec	Canada	46,44	-72,89	1	96	96
7011947	Coteau-du-Lac	MDDEFP	Québec	Canada	45,32	-74,16	1	96	96
7011982	Deschambault	MDDEFP	Québec	Canada	46,67	-71,92	1	96	96
7012080	Donnacona-3	MDDEFP	Québec	Canada	46,69	-71,71	1	96	96
7012307	Édouard	MDDEFP	Québec	Canada	47,65	-72,29	1	96	96
7013100	Hérouxville	MDDEFP	Québec	Canada	46,68	-72,63	1	96	96
7014060	Lanoraie	MDDEFP	Québec	Canada	46,01	-73,22	1	96	96
7014162	L'Assomption-2	EC	Québec	Canada	45,88	-73,39	1	96	96
7014290	Les Cèdres	MDDEFP	Québec	Canada	45,34	-74,06	1	96	96
7014332	Louiseville	MDDEFP	Québec	Canada	46,27	-73,01	1	96	96
701462Y	Marthe (Saint-Polycarpe)	MDDEFP	Québec	Canada	45,39	-74,36	1	96	96
7015610	Norbert	MDDEFP	Québec	Canada	46,15	-73,28	1	96	96
7015668	Notre-Dame-de-Lourdes	MDDEFP	Québec	Canada	46,10	-73,44	1	96	96
7015730	Oka	MDDEFP	Québec	Canada	45,50	-74,09	1	96	96
7016470	Rigaud	MDDEFP	Québec	Canada	45,50	-74,38	38	83	13
7016816	Saint-Alexis-des-Monts	MDDEFP	Québec	Canada	46,47	-73,15	1	96	96
7016840	Sainte-Anne-de-la-	MDDEFP	Québec	Canada	46,59	-72,23	1	96	96

	Pérade								
7016902	Sainte-Béatrix	MDDEFP	Québec	Canada	46,19	-73,60	1	96	96
7016960	Saint-Charles-de-Mandeville	MDDEFP	Québec	Canada	46,36	-73,35	1	96	96
7016971	Saint-Charles-Garnier	MDDEFP	Québec	Canada	46,80	-71,25	1	96	96
7017000	Sainte-Christine	MDDEFP	Québec	Canada	46,81	-71,89	1	96	96
7017080	Saint-Côme	MDDEFP	Québec	Canada	46,28	-73,83	1	96	96
7017380	Saint-Jacques	MDDEFP	Québec	Canada	45,95	-73,54	1	96	96
7017455	Saint-Léonard	MDDEFP	Québec	Canada	46,88	-71,93	1	96	96
7017585	Saint-Narcisse	MDDEFP	Québec	Canada	46,54	-72,43	1	96	96
7017698	Saint-Roch-de-l'Achigan	MDDEFP	Québec	Canada	45,85	-73,69	1	96	96
7017734	Saint-Séverin (Mékinac)	MDDEFP	Québec	Canada	46,63	-72,49	1	96	96
7017757	Saint-Thomas-de-Caxton	MDDEFP	Québec	Canada	46,36	-72,78	1	96	96
7018000	Shawinigan	MDDEFP	Québec	Canada	46,54	-72,71	1	96	96
7019000	Yamachiche	MDDEFP	Québec	Canada	46,30	-72,82	1	96	96
702FR30	Saint-Camille-de-Wolfe	MDDEFP	Québec	Canada	45,66	-71,73	1	96	96
7020M48	Barrage Jules-Allard	MDDEFP	Québec	Canada	45,95	-71,27	1	96	96
7020067	Adstock	MDDEFP	Québec	Canada	46,01	-71,18	1	96	96
7020305	Arthabaska	MDDEFP	Québec	Canada	46,02	-71,90	1	96	96
7020392	Auteuil	MDDEFP	Québec	Canada	45,65	-73,69	1	96	96
702056N	Beauharnois (Saint-Étienne)	MDDEFP	Québec	Canada	45,28	-73,83	1	96	96
7020566	Beaurivage	MDDEFP	Québec	Canada	46,41	-71,24	1	96	96
7020567	Beauséjour	MDDEFP	Québec	Canada	46,66	-71,17	1	96	96
7020572	Bécancour (Aréna)	MDDEFP	Québec	Canada	46,35	-72,43	1	96	96
7020573	Bécancour (Sainte-Gertrude)	MDDEFP	Québec	Canada	46,31	-72,29	1	96	96
7020828	Bonsecours	MDDEFP	Québec	Canada	45,40	-72,31	1	96	96

7020840	Brome	MDDEFP	Québec	Canada	45,19	-72,56	1	96	96
7020860	Bromptonville	MDDEFP	Québec	Canada	45,53	-71,93	1	96	96
7021313	Charny	MDDEFP	Québec	Canada	46,70	-71,27	1	96	96
7021840	Coaticook	MDDEFP	Québec	Canada	45,15	-71,83	1	96	96
70219JH	Cookshire-2	MDDEFP	Québec	Canada	45,31	-71,75	1	96	96
7021954	Danville	MDDEFP	Québec	Canada	45,84	-72,08	1	96	96
7022002	Disraeli-2	MDDEFP	Québec	Canada	45,90	-71,27	1	96	96
7022010	Ditton	MDDEFP	Québec	Canada	45,37	-71,25	1	96	94
7022015	Dixville	MDDEFP	Québec	Canada	45,05	-71,81	1	96	96
7022247	Dunham-2	MDDEFP	Québec	Canada	45,18	-72,83	1	96	96
7022320	Farnham	MDDEFP	Québec	Canada	45,29	-72,90	1	96	96
7022494	Fortierville	MDDEFP	Québec	Canada	46,48	-72,03	1	96	96
7022720	Georgeville	MDDEFP	Québec	Canada	45,14	-72,18	1	96	96
7022800	Granby	MDDEFP	Québec	Canada	45,39	-72,71	1	96	96
7023075	Hemmingford-Four-Winds	MDDEFP	Québec	Canada	45,07	-73,66	1	96	96
7023095	Henryville	MDDEFP	Québec	Canada	45,12	-73,17	1	96	96
7023130	Hilaire	MDDEFP	Québec	Canada	45,82	-70,86	1	96	96
7023270	Iberville	MDDEFP	Québec	Canada	45,34	-73,26	1	96	96
70233GH	Jules	MDDEFP	Québec	Canada	46,26	-70,90	1	96	96
7023677	Lac-Mégantic-2	MDDEFP	Québec	Canada	45,59	-70,89	1	96	96
7024102	La Providence	MDDEFP	Québec	Canada	45,62	-72,95	1	96	96
70242F0	L'Avenir	MDDEFP	Québec	Canada	45,73	-72,35	1	96	96
70242PR	Lemieux	EC	Québec	Canada	46,31	-72,08	1	96	96
7024250	Laurierville	MDDEFP	Québec	Canada	46,32	-71,66	1	96	96
7024254	Lauzon	EC	Québec	Canada	46,76	-71,09	1	96	96
7024320	Lingwick	MDDEFP	Québec	Canada	45,64	-71,37	1	96	96
7024440	Magog	MDDEFP	Québec	Canada	45,26	-72,05	1	96	96

7024627	Marieville	MDDEFP	Québec	Canada	45,39	-73,14	1	96	96
7024690	Mathias	MDDEFP	Québec	Canada	45,48	-73,27	1	96	96
7024920	Milan	MDDEFP	Québec	Canada	45,59	-71,03	1	96	96
7025440	Nicolet	MDDEFP	Québec	Canada	46,18	-72,61	1	96	96
7025670	Notre-Dame-des-Bois	MDDEFP	Québec	Canada	45,41	-71,07	1	96	96
7025745	Ormstown	MDDEFP	Québec	Canada	45,12	-74,05	1	96	96
7026040	Philipsburg	MDDEFP	Québec	Canada	45,10	-73,04	1	96	96
7026043	Pierreville	MDDEFP	Québec	Canada	46,04	-72,84	1	96	96
7026251	Princeville-2	MDDEFP	Québec	Canada	46,15	-71,85	1	96	96
7026612	Rivière-des-Prairies	MDDEFP	Québec	Canada	45,70	-73,50	1	96	96
7026729	Roxton	MDDEFP	Québec	Canada	45,53	-72,54	1	96	96
7026734	Sabrevois	MDDEFP	Québec	Canada	45,26	-73,22	1	96	96
7026818	Saint-Amable	MDDEFP	Québec	Canada	45,66	-73,29	1	81	81
7026836	Saint-Anicet	EC	Québec	Canada	45,14	-74,34	1	96	96
7026883	Saint-Antoine	MDDEFP	Québec	Canada	45,78	-73,22	1	96	96
7026916	Saint-Bernard-de-Lacolle	MDDEFP	Québec	Canada	45,03	-73,39	1	96	96
7027050	Sainte-Clotilde-2	EC	Québec	Canada	45,96	-72,30	1	96	96
7027083	Saint-Côme-de-Linière	MDDEFP	Québec	Canada	46,05	-70,51	1	96	72
7027118	Saint-Édouard	MDDEFP	Québec	Canada	46,60	-71,74	1	96	96
7027119	Saint-Édouard-de-Napierville	MDDEFP	Québec	Canada	45,24	-73,52	1	96	96
7027200	Saint-Éphrem	MDDEFP	Québec	Canada	46,06	-70,96	1	96	96
7027248	Saint-Ferdinand	MDDEFP	Québec	Canada	46,10	-71,51	1	96	96
7027259	Saint-Flavien	MDDEFP	Québec	Canada	46,47	-71,54	1	96	96
7027280	Sainte-Geneviève	MDDEFP	Québec	Canada	45,49	-73,86	1	96	96
7027283	Saint-Georges	MDDEFP	Québec	Canada	46,15	-70,71	1	96	96
7027302	Saint-Guillaume	MDDEFP	Québec	Canada	45,86	-72,77	1	96	96

7027315	Saint-Honoré	MDDEFP	Québec	Canada	46,06	-70,79	1	96	96
7027361	Saint-Hyacinthe-2	MDDEFP	Québec	Canada	45,59	-72,97	1	96	96
7027516	Saint-Ludger	MDDEFP	Québec	Canada	45,76	-70,67	1	96	96
7027520	Saint-Malo-dAuckland	MDDEFP	Québec	Canada	45,20	-71,56	1	96	96
7027540	Sainte-Martine	MDDEFP	Québec	Canada	45,23	-73,63	1	96	96
7027588	Saint-Nazaire	MDDEFP	Québec	Canada	45,76	-72,59	1	96	96
7027660	Saint-Prosper	MDDEFP	Québec	Canada	46,19	-70,49	1	96	96
70277H0	Sainte-Victoire-2	MDDEFP	Québec	Canada	45,96	-73,08	1	96	96
7027725	Saint-Sébastien	MDDEFP	Québec	Canada	45,77	-70,95	1	96	96
7027733	Saint-Séverin	MDDEFP	Québec	Canada	46,36	-71,00	1	96	96
7027736	Saint-Simon	MDDEFP	Québec	Canada	45,72	-72,84	1	96	96
7027750	Saint-Théophile	MDDEFP	Québec	Canada	45,92	-70,54	1	96	96
7027783	Saint-Wenceslas	MDDEFP	Québec	Canada	46,22	-72,39	1	96	96
7027802	Sawyerville-Nord	MDDEFP	Québec	Canada	45,34	-71,55	1	96	96
7027840	Scott	MDDEFP	Québec	Canada	46,50	-71,08	1	96	96
7028B81	Stanstead-Est	MDDEFP	Québec	Canada	45,05	-72,07	1	96	96
7028E0T	Tilly	MDDEFP	Québec	Canada	46,66	-71,50	1	96	96
7028145	Sherrington	MDDEFP	Québec	Canada	45,19	-73,57	1	96	96
7028284	Stukely	MDDEFP	Québec	Canada	45,37	-72,27	1	96	93
7028441	Thetford-Mines	MDDEFP	Québec	Canada	46,10	-71,34	1	96	96
70285G0	Upton-2	MDDEFP	Québec	Canada	45,61	-72,69	1	96	96
7028502	Tingwick	MDDEFP	Québec	Canada	45,91	-71,95	1	96	96
7028676	Vallée-Jonction	MDDEFP	Québec	Canada	46,36	-70,93	1	96	96
7028700	Verchères	MDDEFP	Québec	Canada	45,77	-73,36	1	96	96
7028904	Westbury	MDDEFP	Québec	Canada	45,50	-71,62	1	96	96
7029020	Barrage Choinière	MDDEFP	Québec	Canada	45,42	-72,61	1	96	96
7029230	Zéphirin	MDDEFP	Québec	Canada	46,04	-72,66	1	96	96

7030310	Arundel	MDDEFP	Québec	Canada	45,97	-74,62	1	96	96
7030867	Brownsburg-Chatham	MDDEFP	Québec	Canada	45,65	-74,42	1	96	96
7032362	Faustin	MDDEFP	Québec	Canada	46,03	-74,48	1	96	96
7033537	Labelle	MDDEFP	Québec	Canada	46,25	-74,71	1	96	96
7033650	Lachute	MDDEFP	Québec	Canada	45,66	-74,32	1	96	96
7033939	La Macaza	MDDEFP	Québec	Canada	46,32	-74,78	1	96	96
7035110	Montebello-Sedbergh	MDDEFP	Québec	Canada	45,67	-74,98	1	96	96
7035666	Notre-Dame-de-la-Paix	MDDEFP	Québec	Canada	45,81	-74,96	1	96	96
7037310	Saint-Hippolyte	MDDEFP	Québec	Canada	45,99	-74,01	1	96	96
7037400	Saint-Jérôme	MDDEFP	Québec	Canada	45,81	-74,04	1	96	96
704CBGH	Isle-aux-Coudres	MDDEFP	Québec	Canada	47,39	-70,38	1	96	96
704GC09	Saint-Hilarion	MDDEFP	Québec	Canada	47,60	-70,40	1	96	96
7040446	Baie-Saint-Paul	MDDEFP	Québec	Canada	47,42	-70,51	1	96	96
7041097	Cap-Éternité	MDDEFP	Québec	Canada	48,25	-70,40	1	96	96
7042557	François	MDDEFP	Québec	Canada	47,02	-70,86	1	96	96
7043713	La-Galette	MDDEFP	Québec	Canada	47,74	-70,72	1	96	96
7043960	La Malbaie	MDDEFP	Québec	Canada	47,66	-70,15	1	96	96
7046004	Petite-Rivière-Saint-François	MDDEFP	Québec	Canada	47,30	-70,57	1	96	96
7046010	Petit-Saguenay	MDDEFP	Québec	Canada	48,19	-70,05	1	96	96
7047441	Saint-Laurent-de-Îlle-d'Orléans	MDDEFP	Québec	Canada	46,86	-71,02	1	96	96
7047722	Sainte-Rose-du-Nord	MDDEFP	Québec	Canada	48,40	-70,58	1	96	96
7047763	Saint-Tite-des-Caps-2	MDDEFP	Québec	Canada	47,17	-70,75	1	96	96
7050241	Armagh-2	MDDEFP	Québec	Canada	46,72	-70,60	1	96	96
7052554	Frampton-2	MDDEFP	Québec	Canada	46,46	-70,76	1	96	96
7053141	Honfleur-2	MDDEFP	Québec	Canada	46,67	-70,91	1	96	96
7053981	Lamartine-2	MDDEFP	Québec	Canada	47,05	-70,38	1	96	96

705409F	La Pocatière-2	EC	Québec	Canada	47,34	-70,01	1	96	96
7055210	Montmagny	MDDEFP	Québec	Canada	46,98	-70,59	1	96	96
7055405	Notre-Dame-du-Rosaire	MDDEFP	Québec	Canada	46,85	-70,45	1	96	96
7056617	Rivière-du-Sud	EC	Québec	Canada	46,90	-70,64	1	96	96
7056930	Saint-Camille	MDDEFP	Québec	Canada	46,49	-70,21	1	96	96
7056947	Saint-Charles-de-Bellechasse	MDDEFP	Québec	Canada	46,72	-70,93	1	96	96
7057287	Sainte-Germaine	MDDEFP	Québec	Canada	46,43	-70,50	1	96	96
7057397	Saint-Jean-Port-Joli	MDDEFP	Québec	Canada	47,17	-70,26	1	96	96
7057515	Sainte-Lucie	MDDEFP	Québec	Canada	46,74	-70,03	1	96	96
7057523	Saint-Marcel	MDDEFP	Québec	Canada	46,93	-70,02	34	96	63
7057567	Saint-Michel	MDDEFP	Québec	Canada	46,83	-70,88	1	96	96
705765B	Saint-Philémon-2	MDDEFP	Québec	Canada	46,65	-70,49	1	96	96
706KC09	Falardeau	MDDEFP	Québec	Canada	48,65	-71,16	1	96	96
7060082	Albanel-2	MDDEFP	Québec	Canada	48,91	-72,47	1	96	96
7060086	Alma	MDDEFP	Québec	Canada	48,53	-71,71	1	96	96
7060225	Pikauba	MDDEFP	Québec	Canada	47,94	-71,38	1	96	96
7060234	Argentenay	MDDEFP	Québec	Canada	49,03	-72,21	1	96	96
7060405	Bagotville-2	EC	Québec	Canada	48,37	-70,99	1	96	96
7061286	Chambord	MDDEFP	Québec	Canada	48,44	-72,10	1	96	96
7061439	Chicoutimi	MDDEFP	Québec	Canada	48,31	-71,21	1	96	96
7062585	Frenette	MDDEFP	Québec	Canada	47,77	-71,68	1	96	96
7063042	Hébertville-2	MDDEFP	Québec	Canada	48,37	-71,64	1	96	96
7063560	Lac-Bouchette	MDDEFP	Québec	Canada	48,28	-72,17	1	96	96
7063647	Lac-Ha!Ha!	MDDEFP	Québec	Canada	47,98	-70,78	1	96	96
7063690	Lac-Sainte-Croix	MDDEFP	Québec	Canada	48,42	-71,75	1	96	96
7064893	Métabetchouan-2	MDDEFP	Québec	Canada	48,42	-71,86	1	96	96
7065641	Normandin-2	EC	Québec	Canada	48,85	-72,54	1	96	96

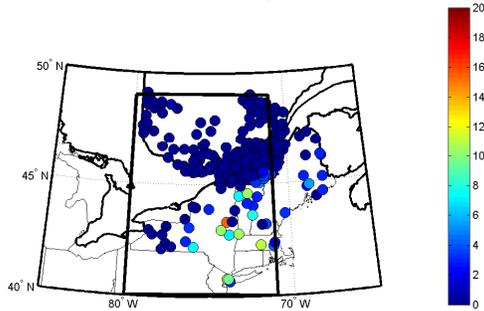
7065900	Pemouca	MDDEFP	Québec	Canada	48,81	-72,74	1	96	96
7065960	Péribonca	MDDEFP	Québec	Canada	48,81	-71,98	1	96	96
7066573	Aux Écorces	MDDEFP	Québec	Canada	48,18	-71,64	1	96	96
7066820	Saint-Ambroise	MDDEFP	Québec	Canada	48,57	-71,34	1	96	96
7067460	Saint-Léon-de-Labrecque	MDDEFP	Québec	Canada	48,67	-71,53	1	96	96
7067658	Saint-Prime	MDDEFP	Québec	Canada	48,62	-72,42	1	96	96
7071912	Commissaire	MDDEFP	Québec	Canada	47,98	-72,30	1	96	96
7072816	Grande-Anse	MDDEFP	Québec	Canada	47,05	-72,93	1	96	96
7074240	La Tuque	EC	Québec	Canada	47,41	-72,78	1	96	96
7077570	Saint-Michel-des-Saints	EC	Québec	Canada	46,68	-73,92	1	96	96
170100	ACADIA NATIONAL PARK ME US	NOAA	Maine	États-Unis	44,35	-68,27	1	73	73
170200	ALLAGASH ME US	NOAA	Maine	États-Unis	47,07	-69,08	1	73	73
171175	CARIBOU MUNICIPAL AIRPORT ME US	NOAA	Maine	États-Unis	46,87	-68,02	1	73	73
172878	FORT KENT ME US	NOAA	Maine	États-Unis	47,25	-68,60	1	73	73
173250	GRAND LAKE MATAGAMON ME US	NOAA	Maine	États-Unis	46,15	-68,78	1	73	73
173261	GRAND LAKE STREAM ME US	NOAA	Maine	États-Unis	45,18	-67,80	1	73	73
173944	HOULTON 5 N ME US	NOAA	Maine	États-Unis	46,20	-67,83	1	73	73
175347	MILO ME US	NOAA	Maine	États-Unis	45,27	-69,00	1	73	73
176435	ORONO 2 ME US	NOAA	Maine	États-Unis	44,88	-68,68	1	73	73
176905	PORTLAND INTERNATIONAL	NOAA	Maine	États-Unis	43,65	-70,32	1	73	73

	JETPORT ME US								
190736	EAST MILTON BLUE HILL OBSERVATORY MA US	NOAA	Massachusset	États-Unis	42,22	-71,12	1	73	73
190770	BOSTON LOGAN INTERNATIONAL AIRPORT MA	NOAA	Massachusset	États-Unis	42,37	-71,03	1	73	73
199923	WORCESTER REGIONAL AIRPORT MA US	NOAA	Massachusset	États-Unis	42,27	-71,87	1	73	73
271683	CONCORD MUNICIPAL AIRPORT NH US	NOAA	New Hampshire	États-Unis	43,20	-71,52	1	73	73
274218	HOPKINTON LAKE NH US	NOAA	New Hampshire	États-Unis	43,18	-71,75	1	73	73
300042	ALBANY AIRPORT NY US	NOAA	New York	États-Unis	42,75	-73,80	1	73	73
300687	BINGHAMTON GREATER AP NY US	NOAA	New York	États-Unis	42,22	-75,98	1	73	73
301708	CONKLINGVILLE DAM NY US	NOAA	New York	États-Unis	43,32	-73,93	1	73	73
304174	ITHACA CORNELL UNIVERSITY NY US	NOAA	New York	États-Unis	42,45	-76,47	1	73	73
305801	NEW YORK CENTRAL PARK OBS BELVEDERE TOWER NY	NOAA	New York	États-Unis	40,78	-73,97	1	73	73
305803	NEW YORK J F KENNEDY INTERNATIONAL AIRPORT NY US	NOAA	New York	États-Unis	40,65	-73,78	1	73	73
305811	NEW YORK LAGUARDIA AIRPORT	NOAA	New York	États-Unis	40,77	-73,87	1	73	73

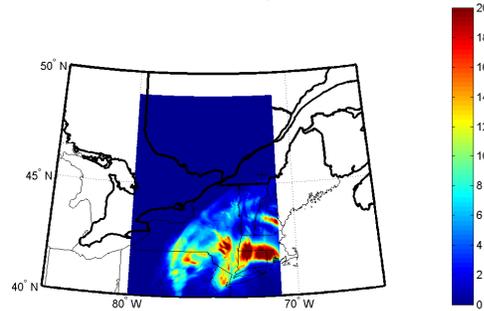
	NY US								
306314	OSWEGO EAST NY US	NOAA	New York	États-Unis	43,45	-76,52	1	73	73
308248	STILLWATER RESERVOIR NY US	NOAA	New York	États-Unis	43,88	-75,03	1	73	73
308383	SYRACUSE HANCOCK INTERNATIONAL AIRPORT NY US	NOAA	New York	États-Unis	43,07	-76,27	1	73	73
308498	THURSTON NY US	NOAA	New York	États-Unis	42,20	-77,33	1	73	73
308586	TRIBES HILL NY US	NOAA	New York	États-Unis	42,95	-74,28	1	73	73
309000	WATERTOWN NY US	NOAA	New York	États-Unis	43,97	-75,87	1	73	73
309072	WELLSVILLE NY US	NOAA	New York	États-Unis	42,10	-77,93	1	73	73
309374	WHIPPLEVILLE NY US	NOAA	New York	États-Unis	44,82	-74,27	1	73	73
431081	BURLINGTON INTERNATIONAL AIRPORT VT US	NOAA	Vermont	États-Unis	44,47	-73,15	1	73	73
431565	CORINTH VT US	NOAA	Vermont	États-Unis	44,02	-72,28	1	73	73
433914	HIGHGATE FALLS VT US	NOAA	Vermont	États-Unis	44,93	-73,05	1	73	73
435366	MORRISVILLE VT US	NOAA	Vermont	États-Unis	44,57	-72,60	1	73	73
435733	NORTHFIELD VT US	NOAA	Vermont	États-Unis	44,13	-72,67	1	73	73
435768	NORTH HARTLAND LAKE VT US	NOAA	Vermont	États-Unis	43,60	-72,35	1	73	73
437054	SAINT JOHNSBURY VT US	NOAA	Vermont	États-Unis	44,42	-72,02	1	73	73

# ANNEXE C :

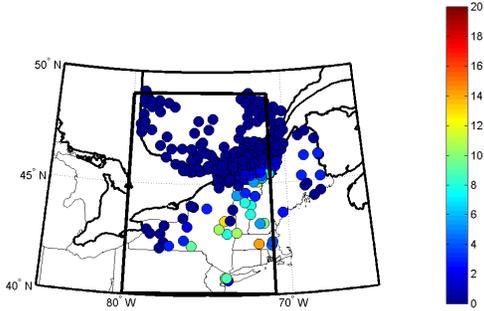
Stations - 28 Août 2011, 12:00



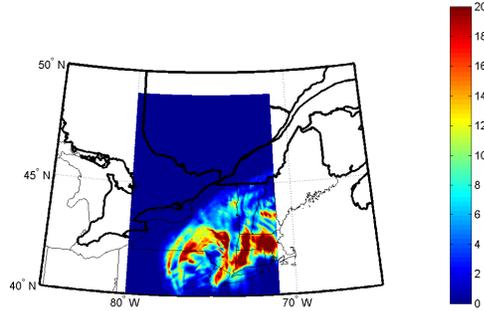
Modèle - 28 Août 2011, 12:00



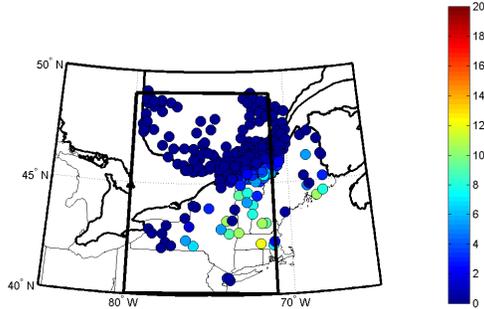
Stations - 28 Août 2011, 13:00



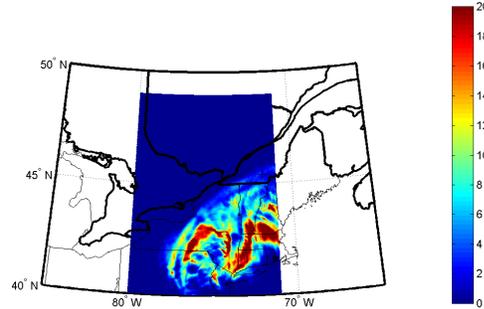
Modèle - 28 Août 2011, 13:00



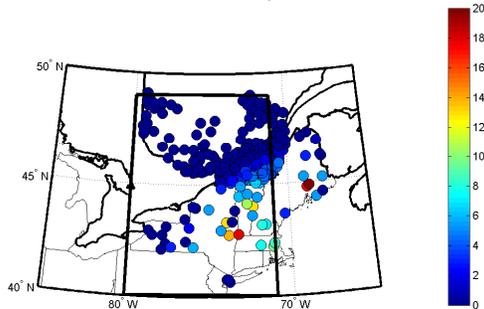
Stations - 28 Août 2011, 14:00



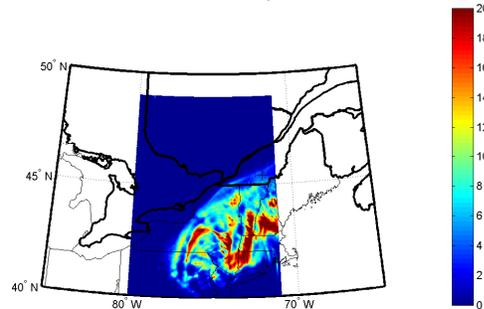
Modèle - 28 Août 2011, 14:00



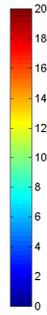
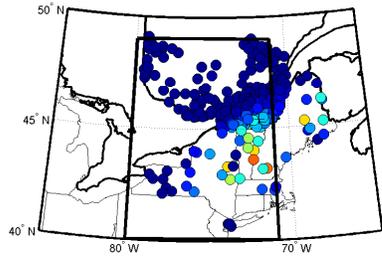
Stations - 28 Août 2011, 15:00



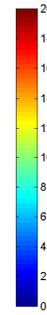
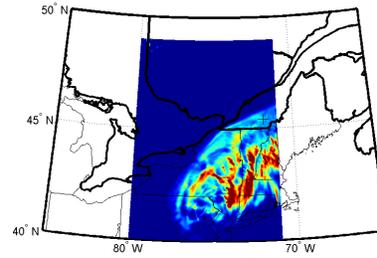
Modèle - 28 Août 2011, 15:00



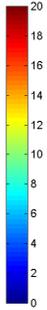
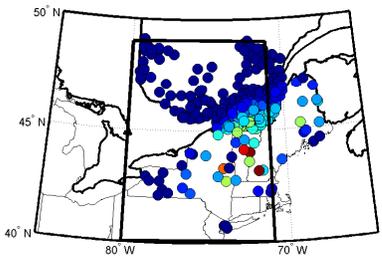
Stations - 28 Août 2011, 16:00



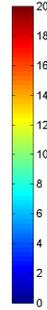
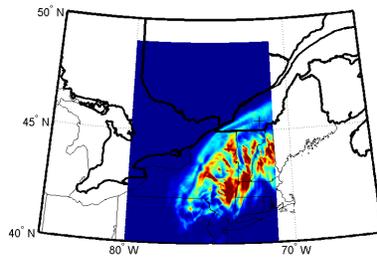
Modèle - 28 Août 2011, 16:00



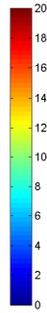
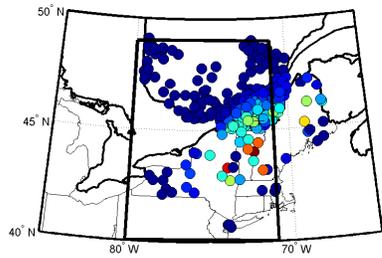
Stations - 28 Août 2011, 17:00



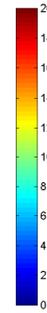
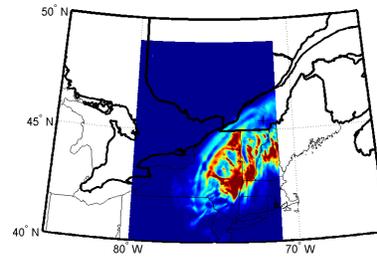
Modèle - 28 Août 2011, 17:00



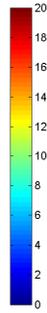
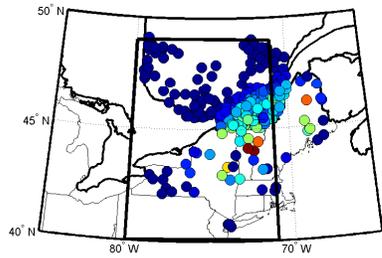
Stations - 28 Août 2011, 18:00



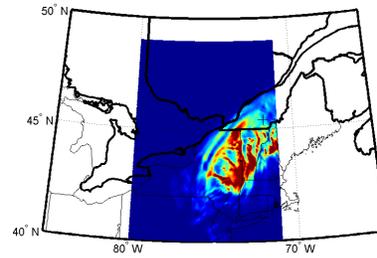
Modèle - 28 Août 2011, 18:00



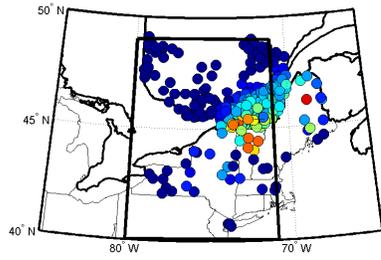
Stations - 28 Août 2011, 19:00



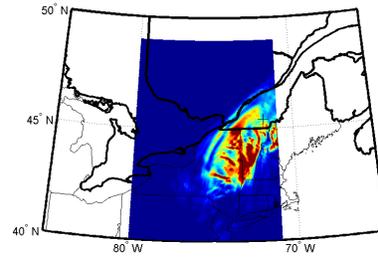
Modèle - 28 Août 2011, 19:00



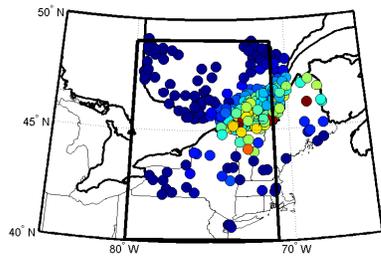
Stations - 28 Août 2011, 20:00



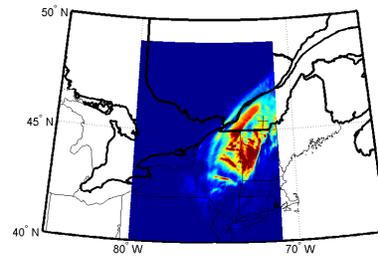
Modèle - 28 Août 2011, 20:00



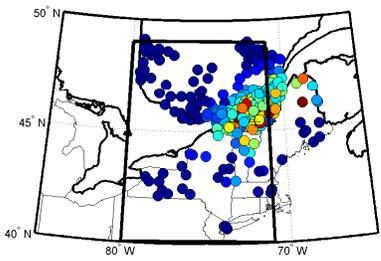
Stations - 28 Août 2011, 21:00



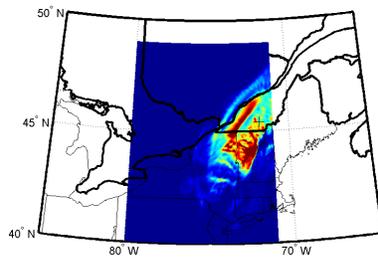
Modèle - 28 Août 2011, 21:00



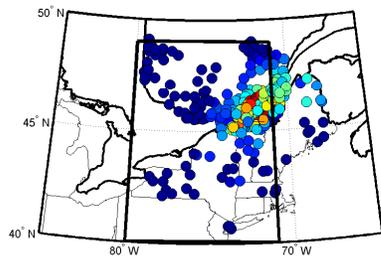
Stations - 28 Août 2011, 22:00



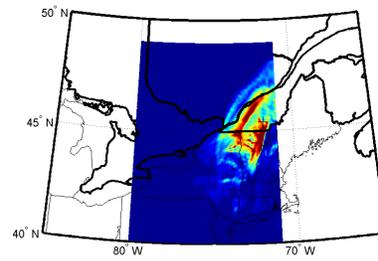
Modèle - 28 Août 2011, 22:00



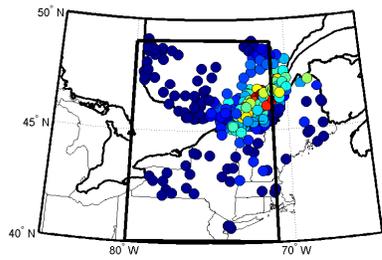
Stations - 28 Août 2011, 23:00



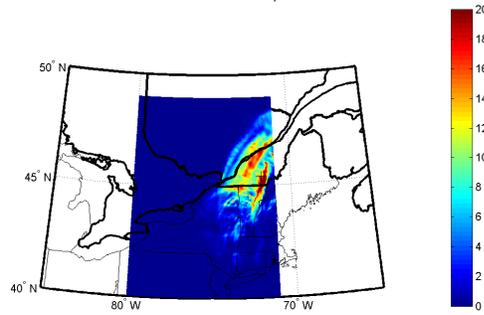
Modèle - 28 Août 2011, 23:00



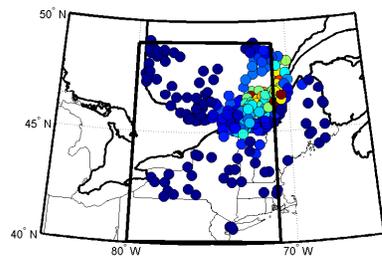
Stations - 29 Août 2011, 0:00



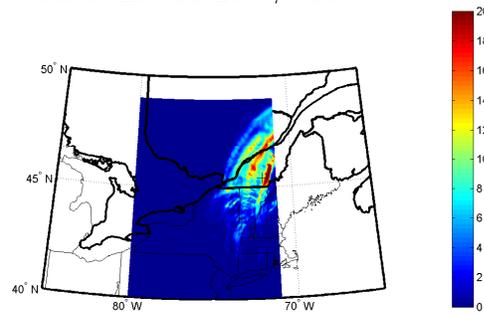
Modèle - 29 Août 2011, 0:00



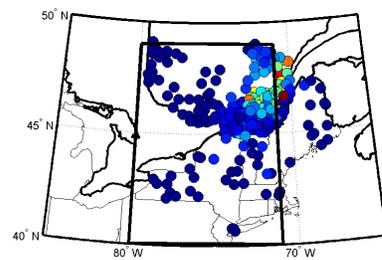
Stations - 29 Août 2011, 1:00



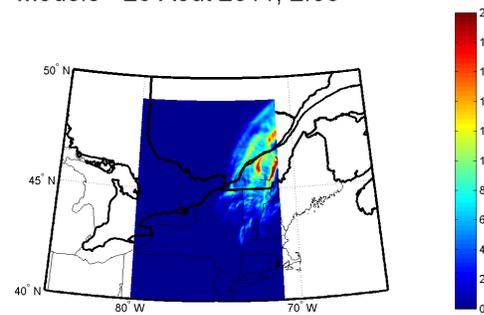
Modèle - 29 Août 2011, 1:00



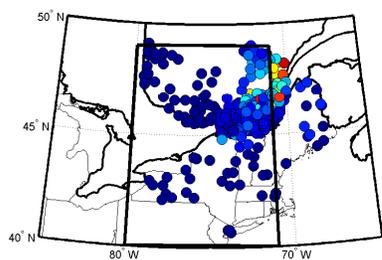
Stations - 29 Août 2011, 2:00



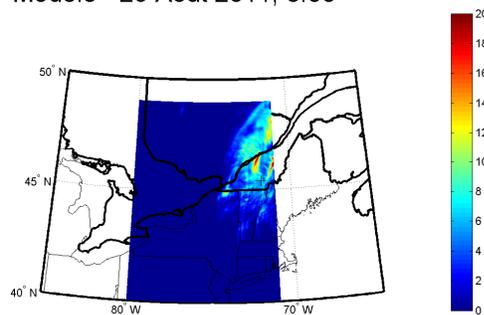
Modèle - 29 Août 2011, 2:00



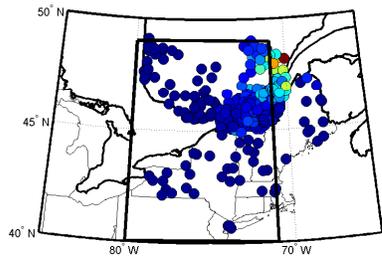
Stations - 29 Août 2011, 3:00



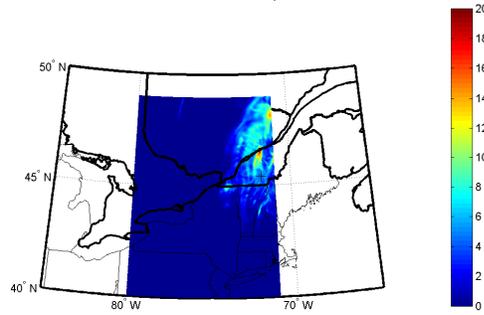
Modèle - 29 Août 2011, 3:00



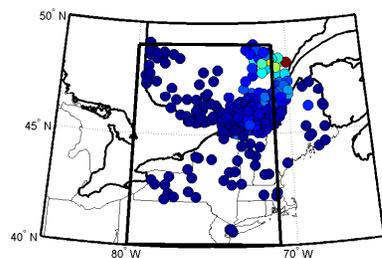
Stations - 29 Août 2011, 4:00



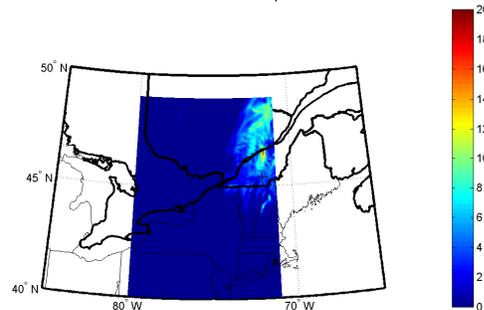
Modèle - 29 Août 2011, 4:00



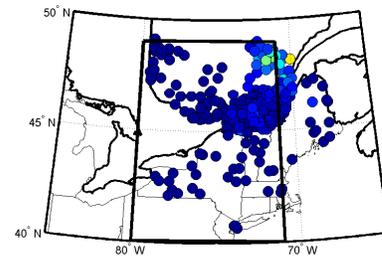
Stations - 29 Août 2011, 5:00



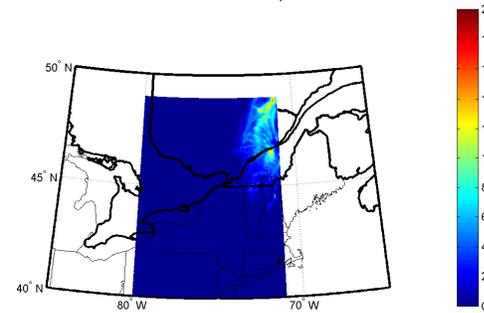
Modèle - 29 Août 2011, 5:00



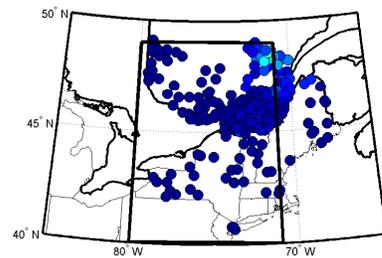
Stations - 29 Août 2011, 6:00



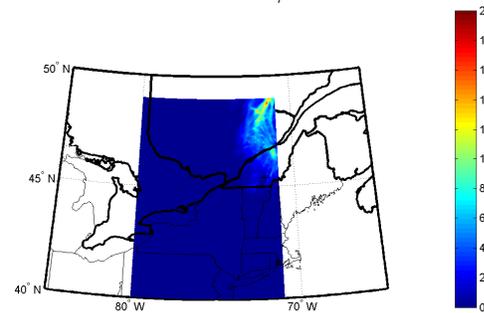
Modèle - 29 Août 2011, 6:00



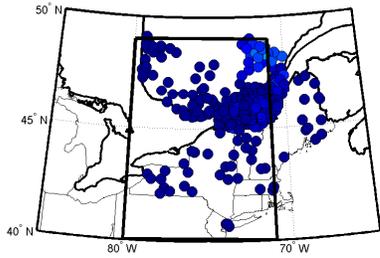
Stations - 29 Août 2011, 7:00



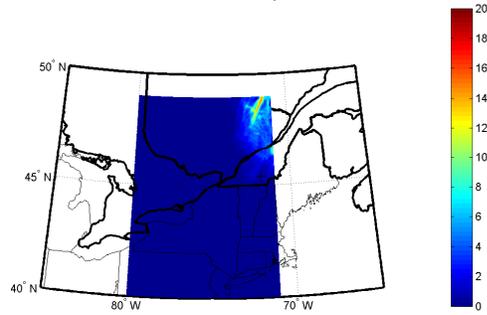
Modèle - 29 Août 2011, 7:00



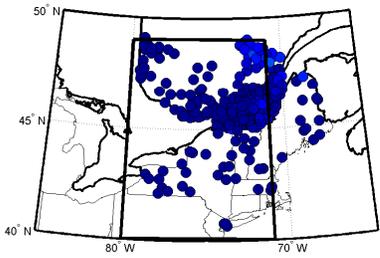
Stations - 29 Août 2011, 8:00



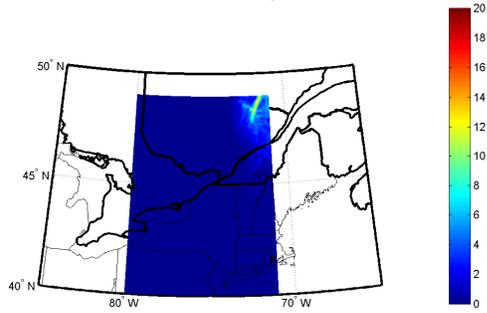
Modèle - 29 Août 2011, 8:00



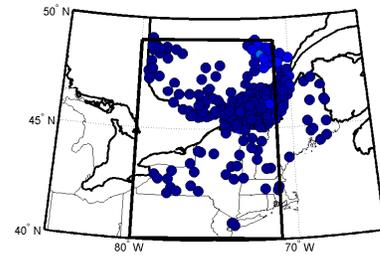
Stations - 29 Août 2011, 9:00



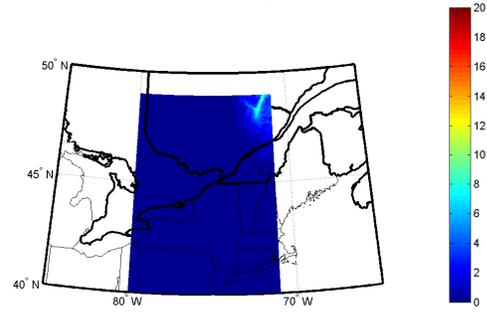
Modèle - 29 Août 2011, 9:00



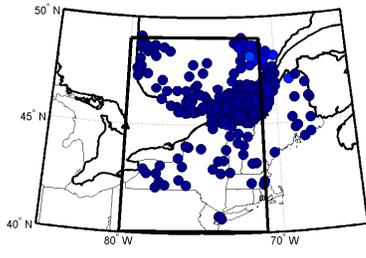
Stations - 29 Août 2011, 10:00



Modèle - 29 Août 2011, 10:00



Stations - 29 Août 2011, 11:00



Modèle - 29 Août 2011, 11:00

