

**VARIABILITÉ ET EXTRÊMES DE
TEMPÉRATURE ET DE PRÉCIPITATION
ENTRE 1941 ET 2000 : LE CAS DU GOLFE
DU FLEUVE SAINT LAURENT**

Rapport de recherche No R-805

MAI 2005

Référence

TRAMBLAY Y., GACHON P., SAINT-HILAIRE A., CHAUMONT D. (2005). Variabilité et extrêmes de température et de précipitation entre 1941 et 2000 : le cas du golfe du fleuve saint laurent. INRS-ETE, rapport de recherche R-805, 52 pages et 2 Annexes.
ISBN : 2-89146-218-1

**VARIABILITÉ ET EXTRÊMES DE TEMPÉRATURE ET DE
PRÉCIPITATION ENTRE 1941 ET 2000 : LE CAS DU GOLFE DU
FLEUVE SAINT LAURENT**

Yves Trambly¹

Philippe Gachon²

André Saint-Hilaire¹

Diane Chaumont²

¹Chaire industrielle Hydro-Québec/CRSNG en hydrologie statistique

INRS-ETE

490 rue de la couronne, Québec (Qc), G1K9A9

²Consortium OURANOS - Environnement Canada

550 Sherbrooke Ouest, Montréal (Qc), H3A 1B9

Rapport de recherche R-805

Avril 2005

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	2
Liste des figures.....	3
Liste des tableaux	4
1.0 Introduction	5
2.0 Description des données et stations utilisées.....	7
3.0 Tendances sur les indices	11
3.1 Méthodologie pour la détection de tendances:	11
3.2 Tendances par saisons :	15
3.3 Tendances par indices	19
4.0 Exploration des tendances pour l'automne et l'été	23
4.1 Analyse en composantes principales sur les tendances des indices et les variables de base.....	23
4.2 Résultats de l'analyse en composante principale des tendances sur les indices en Automne	25
a) Résultats sur les variables :	28
b) Résultats sur les individus (stations) :.....	31
4.3 Analyse en composante principale sur les tendances des indices en Été	36
Conclusion.....	38
Références :	39
Annexe A: Méthode de calcul des indices climatiques (CHAUMONT <i>et al.</i> 2005)	41
Annexe B: Analyse en composante principale sur les tendances des indices en Été.....	45
a) Résultats sur les variables :	47
b) Résultats sur les individus :.....	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des stations météorologiques utilisées	7
Figure 2. Tendances significatives (au seuil de 5 %) par saison sur chaque indice et pour toutes les stations (rouge = tendance positive, bleu = tendance négative)	14
Figure 3. Tendances sur 2 indices de précipitation et 3 indices de température en automne entre 1941 et 2000.....	16
Figure.4 Tendances sur deux indices de température a) TNAV (°C) et b) DTR (°C) en été entre 1941 et 2000.....	18
Figure. 5 : Pourcentage de stations présentant une tendance significative, positive (graphiques du haut) ou négative (graphiques du bas), par saison	20
Figure 6. Représentation des variables sur les 3 premiers axes factoriels tels que définis au tableau 7 en automne	30
Figure7. Représentation des individus sur les 3 premiers axes factoriels en automne.....	34
Figure.8 Représentation des variables sur les 3 premiers axes factoriels en été	48
Figure.9 Représentation des individus sur les 3 premiers axes factoriels en été.....	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Stations utilisées (données environnement Canada)	8
Tableau 2. Indices climatiques utilisés (issus de Chaumont et al. 2005)	10
Tableau 3. Nombre et pourcentage de stations avec des tendances significatives pour chaque indice et chaque saison (en rouge tendances positives observées dans plus de 3 stations, en bleu tendances négatives)	13
Tableau 4. Tendances sur les indices durant l'automne de 1941 à 2000 (valeur de la pente donnée par la méthode de Sen)	25
Tableau 5. Matrice de corrélation entre les variables (indices en automne)	26
Tableau.6 Valeur propres de l'ACP en automne.....	28
Tableau 7. Contribution, coordonnées et qualité de représentation (\cos^2) des variables sur les 3 premiers axes factoriels en automne	30
Tableau 8. Coordonnées, qualité de représentation et contribution des stations sur les 3 premiers axes en automne.....	32
Tableau.9 Données brutes – tendances sur les indices durant l'été.....	45
Tableau. 10 Matrice de corrélation entre les variables en été	46
Tableau. 11 Valeurs propres de l'ACP en été	47
Tableau.12 Coordonnées, qualité de représentation et contribution des variables sur les 3 premiers axes factoriels en été	49
Tableau.13 Coordonnées, qualité de représentation et contribution des stations sur les 3 premiers axes en été	51

1.0 INTRODUCTION

Ce travail s'inscrit dans le cadre des activités du groupe *Analyse du climat* d'Ouranos et a pour objectif de caractériser l'évolution du climat au cours des dernières décennies, en particulier la variabilité et les extrêmes de température et de précipitations. Des travaux récents ont déjà caractérisé la variabilité du climat au Canada au cours du vingtième siècle (ZHANG *et al.* 2000, FRICH *et al.* 2002, ROBESON, VINCENT *et al.* 2004, CHAUMONT *et al.* 2005). Dans notre étude, la région du golfe du fleuve Saint-Laurent située à l'est du Canada est analysée plus en détail, complétant ainsi l'étude récente réalisée par CHAUMONT *et al.* (2005). Les fluctuations du climat dans cette région du Canada peuvent avoir des implications majeures, notamment via des changements dans l'occurrence, l'intensité et la fréquence des tempêtes automnales et hivernales et leurs effets potentiels sur les phénomènes d'érosion côtière, surtout si elles se combinent à une augmentation temporaire ou à long terme du niveau marin. En effet l'augmentation des températures à l'échelle globale et régionale peut avoir pour effet le rehaussement du niveau de la mer, une réduction de la période d'englacement en hiver, une hausse potentielle des cycles gel dégel ainsi qu'une augmentation de l'activité cyclonique (MORNEAU, 2003). Ces facteurs pourraient être à l'origine d'une recrudescence de l'érosion côtière dans l'avenir, comme on a pu le constater au cours de la dernière décennie. C'est pourquoi il apparaît essentiel d'analyser la variabilité des conditions climatiques observées dans cette région, qui constitue une des zones d'intérêt pour le consortium Ouranos, afin de réduire la vulnérabilité des infrastructures et des populations et définir des stratégies d'adaptation face à la variabilité du climat, une fois les impacts majeurs des fluctuations climatiques appréhendés.

Les provinces atlantiques du Canada ont connu des fluctuations climatiques au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle différents de celles du reste du Canada (FRICH *et al.* 2000, CHAUMONT *et al.* 2005) aussi il peut être intéressant de l'étudier plus en détails. Par exemple VINCENT et MEKIS (2004) ont montré des changements dans la fréquence des précipitations sur une base saisonnière, particulièrement dans les provinces Atlantiques. CHAUMONT *et al.* (2005) ont également mis en évidence une augmentation du pourcentage de jours avec précipitation dans ces régions, sans qu'il y ait de tendance journalière nette à la hausse du cumul

des précipitations par jour humide. Au niveau des températures, CHAUMONT *et al.* (2005) montrent que les moyennes des températures maximales et la fréquence des jours les plus chauds ont une tendance à la baisse, surtout en automne, et confirme ainsi la tendance au refroidissement observée par ZHANG *et al.* (2000) en automne. Ces études suggèrent également que l'amplitude thermique diurne a diminué dans plusieurs stations.

Le but de notre étude est d'une part, de mettre en évidence les fluctuations du climat observées dans cette région via l'analyse des tendances de différents indices climatiques d'extrêmes et de variabilité tels que développés par CHAUMONT *et al.* (2005), et d'autre part d'analyser si il existe une cohérence ou une uniformité entre les changements des tendances sur les indices entre eux et d'un secteur à l'autre, depuis l'estuaire jusqu'à la marge Atlantique du Golfe du Saint-Laurent. Cette analyse complète celle réalisée par CHAUMONT *et al.* (2005) en incluant également le calcul des tendances pour d'autres stations, à partir des indices climatiques dont l'évolution est la plus significative au cours de la période 1941 à 2000. Dans l'analyse présentée dans la suite, les stations du réseau d'Environnement Canada ont été utilisées.

2.0 DESCRIPTION DES DONNÉES ET STATIONS UTILISÉES

La région du Golfe du fleuve Saint-Laurent constitue une zone de contraste, entre les des eaux froides du courant du Labrador dont une partie pénètre dans le Golfe et les eaux plus chaudes au sud du Gulf Stream, mais également une zone d'affrontement de l'air polaire du Nord dont l'influence commence à se faire sentir dès l'automne sur la partie septentrionale du golfe. D'intenses dépressions transitent et s'intensifient dans cette région en automne et en hiver, avant de migrer vers la mer du Labrador. On a retenu toutes les stations météorologiques pour lesquelles on dispose de séries chronologiques quotidiennes de température homogénéisées et de précipitation ajustées sur la période 1941 – 2000 (VINCENT et MEKIS, 2004) en bordure du Golfe du Saint-Laurent et jusqu'à la limite amont des eaux salées de l'estuaire du Saint-Laurent (cette limite eaux douces / eaux salées est localisée aux abords de l'île d'Orléans, proche de la ville de Québec, cf. Figure 1). 14 stations sélectionnées sont localisées depuis Québec à l'Ouest jusqu'à Terre Neuve et la Nouvelle Écosse à l'Est (cf. Tableau 1).

Figure 1. Localisation des stations météorologiques utilisées

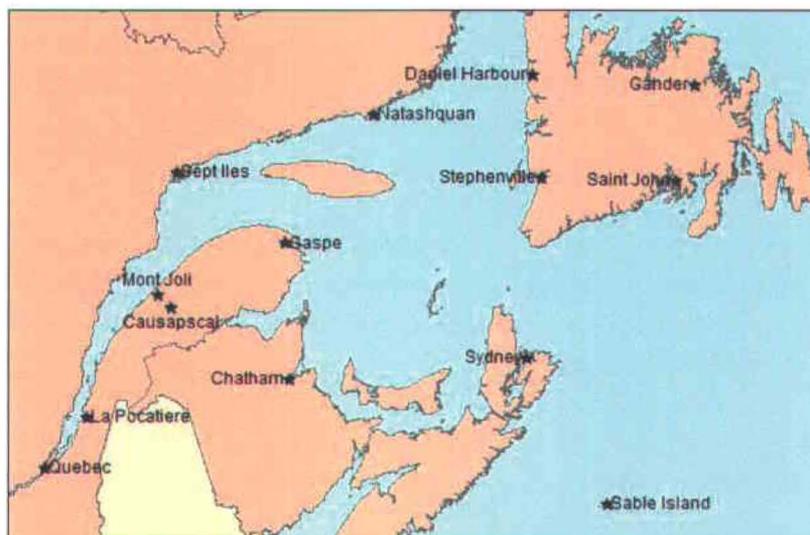


Tableau 1. Stations utilisées (données environnement Canada)

Nom de la station	Province	Latitude Nord	Longitude Ouest
Chatham	NB	47.03	-65.29
Gander Int A	NFLD	48.95	-54.57
St John's West CDA	NFLD	47.52	-52.78
Stephenville	NFLD	48.32	-58.33
Daniel Harbour	NFLD	50.23	-57.58
Sable Island	NS	43.93	-60.02
Sydney	NS	46.17	-60.05
La Pocatière	QUE	47.35	-70.03
Québec	QUE	46.48	-71.13
Natashquan	QUE	50.18	-61.82
Gaspé	QUE	48.47	-64.29
Sept-Îles	QUE	50.22	-66.27
Mont Joli	QUE	48.6	-68.22
Causapscal	QUE	48.37	-67.68

Pour cette étude on utilise les données brutes des séries quotidiennes de températures maximales, minimales et du total de précipitation, et on calcule 9 indices à partir de ces séries (cf. tableau 2), en plus des moyennes de températures minimales et maximales, le tout à l'échelle saisonnière. Ces indices ont fait l'objet d'une sélection parmi les indices utilisés dans plusieurs études : les DTRaux de VINCENT et MEKIS (2004), FRICH, *et al.* (2002), GROISMAN *et al.* (2003), EASTERLING *et al.* (2000), KLEIN et KÖNEN (2003), ZHANG *et al.* (2001), le projet STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions) et le groupe de DTRail ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices). Le détail des méthodes utilisées pour le calcul de tous ces indices est disponible en Annexe A. Les percentiles ont été calculés à partir de la formule empirique de Bloom pour la distribution des températures, et la formule de Cunnane (CUNNANE 1978) pour les précipitations (e.g. CHAUMONT *et al.* 2005). Pour l'indice de la durée de la vague de chaleur le seuil temporel a été fixé à 3 jours (CHAUMONT *et al.* 2005).

Dans notre étude on a choisi d'analyser les indices pour lesquels les DTRaux antérieurs avaient suggéré des changements significatifs au cours du vingtième siècle (ZHANG *et al.* 2000, FRICH *et al.* 2002, ROBESON, VINCENT *et al.* 2004, CHAUMONT *et al.* 2005). Parmi ceux-ci, on a retenu les indices qui présentaient les variations les plus significatives dans la région du Golfe. Cette sélection d'indices nous permet dans la suite à la fois de caractériser :

- les extrêmes, comme par exemple les 10^{èmes} et 90^{èmes} percentiles de température et de précipitation ou les vagues de chaleur
- la variabilité du régime de température via l'amplitude thermique diurne ou celle de précipitation comme par exemple la fréquence ou l'intensité de précipitation des jours humides,
- la climatologie moyenne via l'analyse des températures minimales et maximales moyennes.

Tableau 2. Indices climatiques utilisés (issus de Chaumont et al. 2005)

	Indice	Définition	Unité
Précipitations	R90p	% des jours avec précipitations au dessus du 90eme percentile par rapport à la valeur de référence 1961-1990	%
	SDII	Indice d'intensité de précipitation	mm/jours (jours avec précipitation)
	Prec90pc	90ième percentile des précipitations totales pour les jours avec précipitation	mm/jours
	CDD	Maximum de jours secs consécutifs	jours
	Prp1	Jours avec précipitations	jours
Température	DTR	Amplitude thermique diurne	°C
	Tmax90pb	90ième percentile de la température maximale	°C
	Tmax10pb	10ième percentile de la température maximale	°C
	HWDI3d	Durée des vagues de chaleur	jours
	TNAV	Moyenne des températures minimales	°C
	TXAV	Moyenne des températures maximales	°C

3.0 TENDANCES SUR LES INDICES

3.1 MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉTECTION DE TENDANCES:

Pour mettre en évidence l'existence de tendances dans les séries chronologiques, on a utilisé conjointement deux méthodes non paramétriques ; le test de Kendall d'une part pour vérifier ou non l'hypothèse de l'existence d'une tendance et la méthode de Sen pour leur quantification, le calcul des pentes lorsque des tendances ont été détectées (SEN, 1968, HIRSCH et SLACK, 1984). Cette dernière méthode est moins sensible à la non normalité des séries et les valeurs extrêmes que la méthode des moindres carrés (HUTH & POKORNA, 2004), couramment utilisée en climatologie. Le test de Kendall est un test d'indépendance et de la mesure de la dépendance entre 2 variables. Il est similaire au test de Spearman, mais le *tau* de Kendall teste l'hypothèse que la série présente une tendance. C'est un test non paramétrique qui peut donc être utilisé pour des séries présentant une distribution non normale. La méthode de Sen requiert une série temporelle avec des variables mesurées à intervalle régulier, elle permet de déterminer si la médiane des pentes est différente de zéro et de calculer un intervalle de confiance. Elle consiste à estimer une pente pour chaque intervalle de points :

$$(1) \quad Q = \frac{X_{i'} - X_i}{i' - i}$$

Où :

Q = pente entre deux points $x_{i'}$ et x_i

$x_{i'}$ = mesure au temps i'

x_i = mesure au temps i

On a suivi trois étapes pour la recherche de tendances :

1. Dénombrement des tendances significatives d'après le test de Kendall pour un seuil de signification de 5%
2. Pour les tendances mises en évidence par le test de Kendall, on vérifie la valeur médiane des pentes déterminée par la méthode de Sen ainsi que ses deux bornes : Si la médiane des pentes est égale à 0 ou si les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance de la pente sont de signe opposé, on considère que la tendance n'est pas significative.
3. Le signe de la tendance est déterminé par le signe de la médiane des pentes calculé par la méthode de Sen.

Dans un premier temps on ne cherche pas à quantifier l'amplitude des tendances observées pour les indices, qui sera étudiée en détail par la suite, mais simplement à identifier les indices pour lesquels une tendance positive ou négative est détectée entre 1941 et 2000. On dénombre les tendances par indices et par saison (tableau 3), puis pour chacune des stations (figure 2), et on calcule le pourcentage de stations présentant une tendance pour toutes les stations (tableau 3). Nous allons d'abord analyser les résultats des tendances observées pour chaque saison, puis plus spécifiquement pour chaque indice.

Tableau 3. Nombre et pourcentage de stations avec des tendances significatives pour chaque indice et chaque saison (en rouge tendances positives observées dans plus de 3 stations, en bleu tendances négatives)

SAISONS	PRECIPITATIONS									
	R90P		SDII		PRCP1		PREC90PC		CDD	
	>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0
DJF	4		3	2	4		2	1	1	1
MAM	2		3	2	4		3	2		3
JJA	1	1	3	1	2	3		1	1	2
SON	1	2	1	3	8		1	2		8
% des stations présentant une tendance (moyenne des saisons)	14%	5%	18%	14%	32%	4%	11%	11%	4%	21%
% des stations présentant une tendance (moyenne des saisons)	19,64%		32,14%		35,71%		21,43%		25,00%	

SAISONS	TEMPERATURE											
	DTR		TXQ9		TMAX10PB		TXHWD		TNAV		TXAV	
	>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0
DJF	2	3	3					1	1			1
MAM	1	5	2				1		1			
JJA	1	5	2	1	3				8		3	
SON		8		8		2		5				9
% des stations présentant une tendance (moyenne des saisons)	5%	41%	13%	14%	5%	4%	2%	11%	18%	0%	5%	18%
% des stations présentant une tendance (moyenne des saisons)	46,43%		26,79%		8,93%		12,50%		17,86%		23,21%	

Figure 2. Tendances significatives (au seuil de 5 %) par saison sur chaque indice et pour toutes les stations (rouge = tendance positive, bleu = tendance négative)

DJF	INDICES										
	PRECIPITATIONS					TEMPERATURE					
STATIONS	R90p	SDII	Prcp1	Prec90pc	CDD	DTR	Tmax90pb	Tmax10pb	HWDI3d	TNAV	TXAV
Chatham											
Gander	Red										
La Pocatiere							Red				
Quebec						Blue				Red	
Sable-Island											
St-John											
Stephenville	Red										
Sydney	Red										
Daniel-Harbour											
Gaspe		Blue				Red					
Causapscal		Blue									
Natashquan											
Sept-Iles											
Mont-joli											
MAM	PRECIPITATIONS					TEMPERATURE					
STATIONS	R90p	SDII	Prcp1	Prec90pc	CDD	DTR	Tmax90pb	Tmax10pb	HWDI3d	TNAV	TXAV
Chatham											
Gander	Red										
La Pocatiere											
Quebec						Blue					
Sable-Island											
St-John											
Stephenville	Red										
Sydney	Red										
Daniel-Harbour											
Gaspe		Blue									
Causapscal		Blue									
Natashquan											
Sept-Iles											
Mont-joli											
JJA	PRECIPITATIONS					TEMPERATURE					
STATIONS	R90p	SDII	Prcp1	Prec90pc	CDD	DTR	Tmax90pb	Tmax10pb	HWDI3d	TNAV	TXAV
Chatham											
Gander											
La Pocatiere											
Quebec											
Sable-Island											
St-John											
Stephenville	Red										
Sydney	Red										
Daniel-Harbour											
Gaspe											
Causapscal											
Natashquan											
Sept-Iles											
Mont-joli											
SON	PRECIPITATIONS					TEMPERATURE					
STATIONS	R90p	SDII	Prcp1	Prec90pc	CDD	DTR	Tmax90pb	Tmax10pb	HWDI3d	TNAV	TXAV
Chatham											
Gander											
La Pocatiere											
Quebec											
Sable-Island											
St-John											
Stephenville	Red										
Sydney	Red										
Daniel-Harbour											
Gaspe											
Causapscal											
Natashquan											
Sept-Iles											
Mont-joli											

3.2 TENDANCES PAR SAISONS :

L'automne (septembre, octobre, novembre) est la saison où l'on observe le plus grand nombre de tendances et ceci pour tous les indices (figure 2). On retrouve durant cette saison en moyenne une tendance sur l'un des indices dans 40% des stations. C'est surtout sur les six indices de températures que l'on retrouve le plus de tendances, toutes négatives (tableau 3). Durant cette saison on observe en particulier une tendance à la baisse de la moyenne des températures maximales (TXAV) et de l'amplitude thermique diurne (DTR), dans huit stations sur 14. On retrouve également une tendance à la baisse du 90^{ème} percentile des températures maximales (TMAX90PB) dans huit stations et de la durée de la saison chaude (TXHWD) dans cinq stations (figure 3). On voit ainsi dans cette saison que les températures maximales tendent à diminuer, tandis que les températures minimales varient peu, surtout dans l'estuaire et le Sud du Golfe.

Seuls deux des indices sur les précipitations montrent des tendances significatives (c.f. figure 2) ; une tendance à la hausse du nombre de jours avec précipitations (PRCP1) dans huit stations et une diminution concomitante du nombre de jours secs consécutifs (CDD) pour cinq stations.

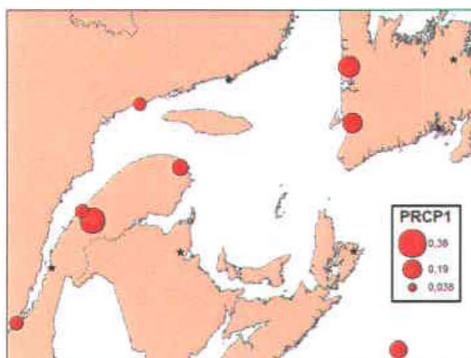
Pour les cinq stations de Chatham, Gander, Gaspé, Sydney et Québec on observe des tendances systématiques à la diminution pour les quatre indices de températures (TXAV, DTR, TMAX90PB et TXHWD) telles que suggérées au tableau 3, mais pas de tendances significatives sur les indices complémentaires de précipitation comme CDD et PRCP1 sauf pour Québec (figure 3). Pour les indices de précipitation, un autre groupe de 5 stations se distingue avec Sable Island, Mont Joli, Stephenville, Québec et Daniel Harbour où les tendances significatives à l'augmentation du nombre de jours de précipitations s'observent en même temps que le nombre de jours secs consécutifs diminue (figure 2). Parmi toutes les stations, seule celle de Sable-Island, la plus océanique, connaît une augmentation à la fois dans la fréquence du nombre de jours de précipitation de même que dans les intensités de précipitation et dans les précipitations extrêmes (90^{ème} centile). A l'inverse la station la plus continentale (i.e. Causapsal, la plus éloignée du littoral) enregistre également une augmentation concomitante du nombre de jours de précipitation mais avec une baisse de l'intensité et des extrêmes de précipitation. Dans l'ensemble, 8 stations

sur 14 enregistrent une augmentation du nombre de jour de précipitation et 6 stations sur 14 une diminution du nombre de jours secs consécutifs. Aucune station ne montre de tendance à l'augmentation des séquences sèches et/ou à la diminution des jours humides. De même, aucune station ne montre d'augmentation des températures ou des indices de température, avec plutôt une diminution sur plus de 2/3 des stations de l'amplitude thermique diurne, du 90e centile des températures maximales et de la température maximale moyenne. On voit donc de nombreux changements durant l'automne, qui fera l'objet d'une analyse plus approfondie en utilisant des méthodes d'analyse multivariées (ACP) dans la partie 4.

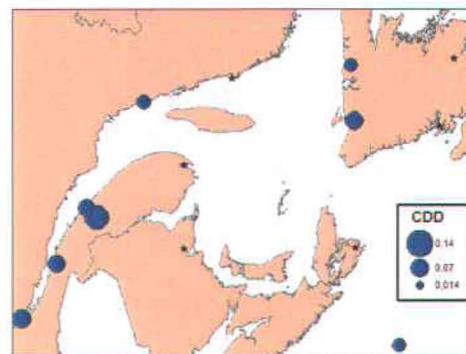
Figure 3. Tendances sur 2 indices de précipitation et 3 indices de température en automne entre 1941 et 2000 (cercles rouges, tendance positive, cercles bleus tendances négative, taille proportionnelle à la pente de la tendance)

Indices de précipitation a) PRCP1 (mm/j) et b) CDD (jours)

a)

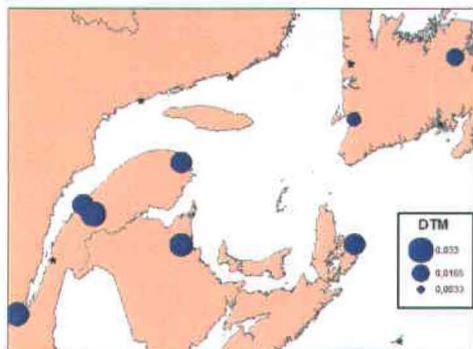


b)

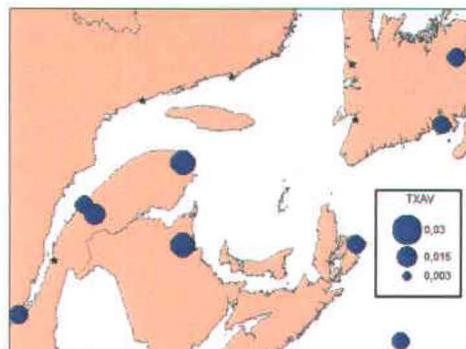


Indices de température c) DTR (°C), d) TXAV (°C) et e) TMAX90PB (°C)

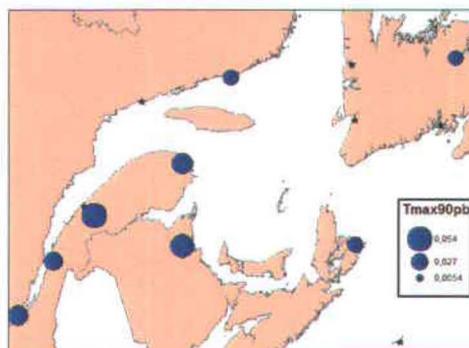
c)



d)

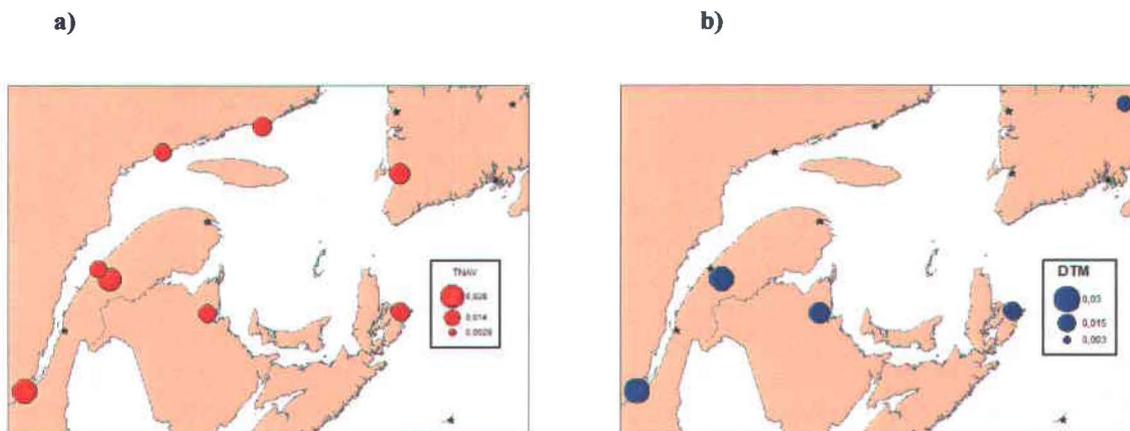


e)



Pour les autres saisons on voit moins les tendances significatives sont moins fréquentes et moins marquées pour l'ensemble des 11 indices retenus. L'été (JJA) est la seconde saison pour laquelle des tendances sur plusieurs indices sont observées, en moyenne dans 25% des stations. On y note une tendance à la hausse des températures minimales moyennes (indice TNAV) dans huit stations et une tendance à la baisse de l'amplitude thermique diurne (DTR) dans 6 stations (tableau 3 et figure 4). Ces tendances synchrones se retrouvent dans les stations de Chatham, Québec, Sydney, Causapsca et Natashquan. On dénombre peu de tendances sur les indices de précipitation, seule une ou deux stations pour chaque indice.

Figure.4 Tendances sur deux indices de température a) TNAV (°C) et b) DTR (°C) en été entre 1941 et 2000 (cercles rouges, tendance positive, cercles bleus tendances négative, taille proportionnelle a la pente de la tendance)



Les tendances sur les indices en hiver (décembre, janvier, février) et au printemps (mars, avril, mai) présentent des similitudes (figure 2). Durant ces deux saisons, seuls 25 % en moyenne des stations enregistrent des tendances. On ne retrouve que très peu de tendances sur les indices de température, mis à part l'amplitude thermique diurne (DTR) qui le plus souvent diminue, surtout au printemps (figure 2) dans cinq stations en hiver, six au printemps ; en particulier on retrouve pour les deux saisons des tendances positives pour Daniel Harbour, négatives pour Québec, Natashquan et Mont-joli. Pour les précipitations, on observe des tendances positives pour le pourcentage des jours qui dépassent le 90^{ème} percentile des précipitations par rapport à la moyenne climatologique 1961-1990 (R90P), pour l'indice d'intensité des précipitations (SDII) dans les stations de Chatham, Gander, Stephenville et Sydney pour les deux saisons (figure 2).

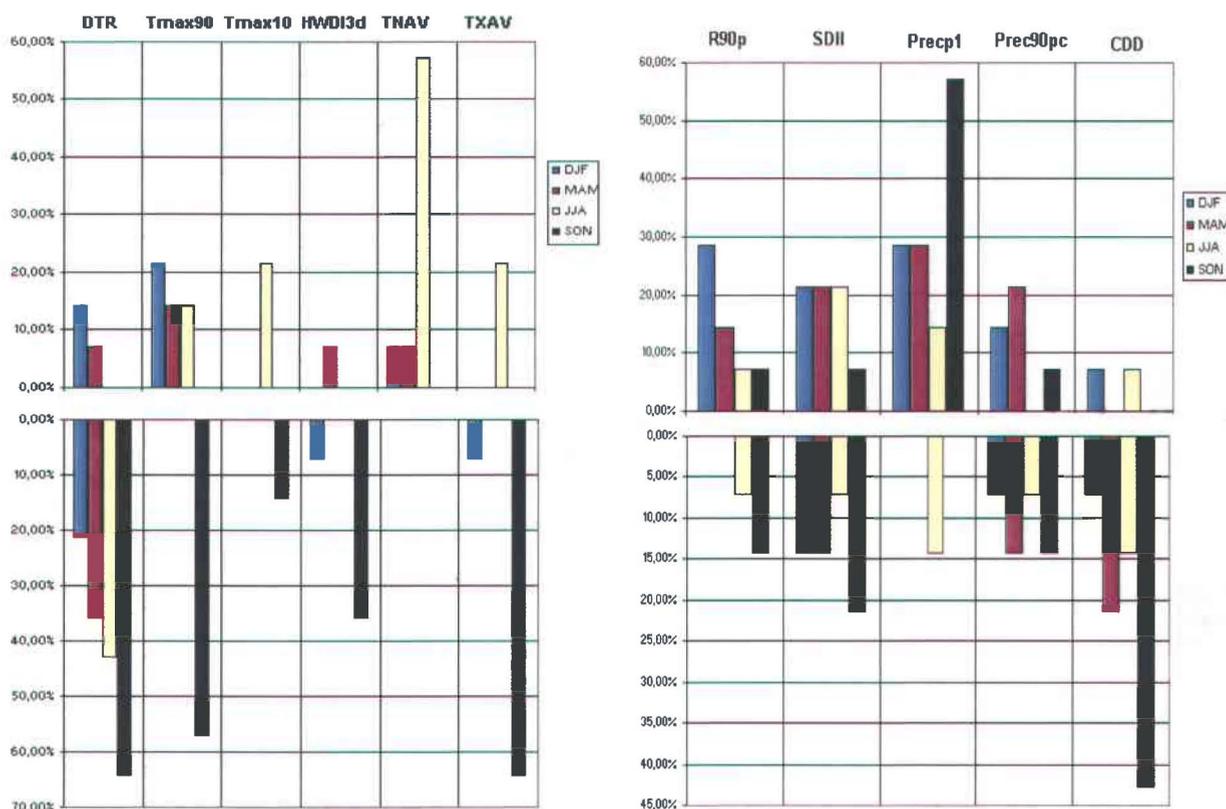
3.3 TENDANCES PAR INDICES

D'après la figure 5, on peut voir que les tendances observées sur les indices se répartissent différemment selon qu'il s'agit de la précipitation ou de la température : les tendances sur les 5 indices de précipitations s'observent de manière relativement uniformes selon les saisons et les indices, avec fréquemment 10% de stations avec des tendances positives pour la plupart des indices et sur les 4 saisons sauf pour CDD. Aucun indice de précipitation ne présente une tendance sur plus de 60% des stations, fréquence qui est dépassée dans les cas des tendances sur les indices de température. Les tendances sur les températures s'observent principalement durant l'automne et dans une moindre mesure l'été, et s'observent plus fréquemment dans un grand nombre de stations en particulier le fort pourcentage à l'automne sur tous les indices à part TNAV (Figure 5).

Précipitations :

Les indices sur les précipitations R90P, SDII et PRCP1 ont plus fréquemment des tendances positives que négatives, à l'inverse de CDD. On dénombre autant de tendances positives que négatives pour l'indice PREC90PC (tableau 3). Les indices qui présentent les tendances les plus marquées sont PRCP1 (nombre de jours avec précipitation) avec des tendances positives dans plus de 50% des stations) et CDD (nombre de jours secs consécutifs) avec des tendances négatives dans plus de 40% des stations) en automne (Figure 5). L'indice PRCP1 est celui pour lequel on retrouve le plus souvent une tendance, dans 35% des stations en moyenne sur toutes les saisons confondues, surtout positive (32% des stations). Vient ensuite SDII dans 32% des stations, mais avec une fréquence égale de tendance positives et négative (tableau 3). Le nombre de jours avec précipitations tend ainsi à augmenter dans près d'un tiers des stations, et les intensités de précipitations (mm/jours avec précipitations) montrent une tendance positive dans 18% des stations et négative dans 14% des stations (tableau 3). A l'inverse l'indice CDD (le nombre de jours secs consécutifs) montre une tendance à la baisse dans 21% des stations (tendance positive dans seulement 4% des stations).

Figure. 5 : Pourcentage de stations présentant une tendance significative, positive (graphiques du haut) ou négative (graphiques du bas), par saison



Températures :

De tous les indices, TMAX10PB (10eme percentile de la température maximale) est celui qui présente le moins de tendances : dans trois stations en été et deux en automne (tableau 3). On observe en particulier une tendance a la baisse dans plus de 50 % des stations pour les indices de l'amplitude thermique diurne (DTR), le 90^{ème} percentile des températures maximales (TMAX90PB) et les moyennes des températures maximales (TXAV) en automne (Figure 5). On voit également une tendance à la hausse des températures minimales moyennes (TNAV) en été dans plus de 55% des stations (Figure 5). L'indice DTR (amplitude thermique diurne) présente une tendance dans 46% des stations en moyenne sur les quatre saisons, et ces tendances sont majoritairement négatives (41%). L'indice TMAX90PB (90eme percentile de la température

maximale) présente une tendance dans 27% des stations, avec plus fréquemment des tendances négatives (15%). On retrouve aussi des tendances sur les moyennes de températures maximales (TXAV), à la hausse dans 18% des stations, et les moyennes de températures minimales (TNAV) dans 18% des stations également.

Résumé de la partie 3- principaux résultats sur les tendances

Sur l'ensemble des stations étudiées, les tendances les plus marquées sont la diminution de l'amplitude thermique diurne et l'augmentation du nombre de jours avec des précipitations. En regardant les séries brutes de précipitations totales mensuelles on retrouve une augmentation des quantités de précipitation sur presque toutes les stations (comme suggéré dans VINCENT, 2004). On retrouve le plus de tendances tous indices confondus durant l'automne et dans une moindre mesure l'été. Au cours de cette dernière saison, une nette augmentation sur la majorité des stations apparaît dans les températures minimales moyennes. Durant l'automne une nette diminution sur la majorité des stations du Golfe, surtout dans la partie Ouest et les stations situées dans l'estuaire, s'observent dans les températures maximales extrêmes (90^{ème} centile), les températures maximales moyennes et l'amplitude thermique diurne. Un tiers des stations environ enregistrent également une décroissance des vagues de chaleur. De plus, la baisse du nombre de séquences sèches concomitante avec l'augmentation du nombre de jours de précipitations s'observe également dans la majorité des stations. Cette évolution est beaucoup moins nette et homogène dans les autres saisons ne permettant pas de conclusions sur les tendances observées sur l'ensemble de la région comme dans le cas de l'automne. Le golfe du Saint-Laurent constitue une vaste région soumise à des régimes climatiques très différents ; depuis Québec avec un climat plutôt continental, jusqu'à Sable Island au large des côtes de la Nouvelle-Écosse, subissant plus directement les influences océaniques de l'Atlantique et l'effet des tempêtes qui y transitent régulièrement de l'automne au printemps. Cette diversité des influences est en partie responsable de la disparité dans les tendances observées, en particulier dans le régime des précipitations.

4.0 EXPLORATION DES TENDANCES POUR L'AUTOMNE ET L'ÉTÉ

Après avoir mis en évidence les tendances sur les différents indices dans la région du Golfe du Saint Laurent, on s'intéresse plus particulièrement aux deux saisons (l'été et surtout l'automne) où l'on observe les changements les plus marqués sur la période 1941-2000. On cherche pour ces deux saisons à voir si les tendances entre certains indices sont liées ou indépendantes, et si on peut identifier en particulier des groupes de stations présentant une évolution similaire ou dissemblable au cours de cette période.

4.1 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES SUR LES TENDANCES DES INDICES ET LES VARIABLES DE BASE

On a recours à des méthodes d'analyse factorielles dont la méthodologie est expliquée en détail dans plusieurs ouvrages récents (LEBART *et al.* 2000, BOUROCHE, SAPORTA 2002,). L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique qui vise à réduire le nombre de variables en les combinant en composantes principales orthogonales. Elle permet de mettre en évidence les interrelations entre les variables et les ressemblances ou oppositions entre les unités géographiques par exemple. L'ACP permet ainsi de retenir la partie structurée de l'information contenue dans un fichier de données, le reste de l'information étant considéré comme résiduel. En climatologie l'ACP peut permettre de constituer des régions enregistrant le même type de variations sur une période donnée (BELTRANDO, 1990).

Le but d'une ACP est de réduire un grand nombre de variables en un groupe de plus petite taille de composantes principales qui sont des combinaisons linéaires des variables originales (SAINT-HILAIRE *et al.* 2004). La $k^{\text{ème}}$ composante principale est la combinaison linéaire des variables originales standardisées, tel que suggéré dans l'équation ci-dessous :

$$(2) \quad PC_k = \sum_{i=1}^p a_{ki} \cdot x_i$$

Les poids a_{ki} doivent maximiser la variance de PC_k et respecter la contrainte :

$$(3) \quad \sum_{i=1}^p a_{ki}^2 = 1$$

Les résultats se présentent sous forme de composantes orthogonales qui tentent de différencier les individus statistiques correspondant à une association de variables. On dispose de trois types d'information, les coordonnées des variables et des individus sur les axes factoriels, la qualité de la projection et la part de variance pris en charge sur chacun des axes. La qualité de projection est donnée par le cosinus de l'angle entre le vecteur et son projeté sur le plan factoriel considéré : plus le \cos^2 est proche de 1 plus la qualité de la représentation sur l'axe est bonne.

On ne peut réaliser ces ACP que sur l'automne et l'été car le nombre d'occurrences des tendances significatives durant l'hiver et le printemps est trop faible et ne permet pas d'obtenir des résultats non fiables, biaisés par le manque de données.

4.2 RÉSULTATS DE L'ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE DES TENDANCES SUR LES INDICES EN AUTOMNE

Ces ACP sont réalisées sur les tendances significatives estimées par la méthode de Sen sur 10 indices durant l'automne et l'été pour la période 1941-2000. On a retenu comme tendances significatives celles pour lesquelles le test de Kendall était significatif, et où les pentes déterminées par la méthode de Sen étaient différents de 0. Le tableau des données brutes de cette analyse en composantes principales (Tableau 4) contient donc les valeurs de la pente calculées sur les différents indices, pour les 14 stations de la région du Golfe du Saint-Laurent. Aucune tendance n'a été observée sur l'indice TNAV durant l'automne, il a donc été retiré de cette analyse.

Tableau 4. Tendances sur les indices durant l'automne de 1941 à 2000 (valeur de la pente donnée par la méthode de Sen)

SON	R90P	SDII	PRCP1	PREC90PC	CDD	DTR	TMAX90PB	TMAX10PB	HWDI3D	TXAV
Chatham	0	0	0	0	0	-0,028	-0,048	0	-0,132	-0,029
Gander	0	0	0	0	0	-0,017	-0,023	0	-0,038	-0,017
La-Pocatiere	-0,153	-0,051	0	-0,148	-0,071	0	-0,033	0	0	0
Quebec	0	0	0,1221	0	-0,083	-0,03	-0,036	0	-0,133	-0,018
Sable Island	0	0,0468	0,1998	0,159	-0,048	0	0	-0,024	0	-0,015
St-John	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,015
Stephenville	0,0952	0	0,2389	0	-0,077	-0,012	0	0	0	0
Sydney	0	0	0	0	0	-0,025	-0,025	0	-0,1	-0,017
Daniel Harbour	0	0	0,2747	0	-0,045	0	0	0	0	0
Gaspé	0	0	0,1691	0	0	-0,026	-0,042	0	-0,232	-0,029
Causapscal	-0,143	-0,075	0,3747	-0,123	-0,133	-0,032	-0,054	0	0	-0,023
Natashquan	0	0	0	0	0	0	0,025	-0,028	0	0
Sept-Îles	0	0	0,1169	0	-0,051	0	0	0	0	0
Mont joli	0	-0,018	0,121	0	-0,069	-0,025	0	0	0	-0,017

Tableau 5. Matrice de corrélation entre les variables (indices en automne)

	R90P	SDII	PRCP1	PREC90PC	CDD	DTR	TMAX90PB	TMAX10PB	HWDI3D	TXAV
R90P	1	0,764	-0,078	0,697	0,419	0,063	0,492	-0,098	-0,152	0,088
SDII	0,764	1	-0,219	0,942	0,562	0,311	0,479	-0,433	-0,164	0,024
PRCP1	-0,078	-0,219	1	-0,012	-0,704	-0,161	-0,118	0,079	0,150	-0,005
PREC90PC	0,697	0,942	-0,012	1	0,388	0,201	0,456	-0,501	-0,077	-0,103
CDD	0,419	0,562	-0,704	0,388	1	0,186	0,215	-0,191	-0,369	-0,157
DTR	0,063	0,311	-0,161	0,201	0,186	1	0,730	-0,437	0,618	0,768
TMAX90PB	0,492	0,479	-0,118	0,456	0,215	0,730	1	-0,545	0,600	0,689
TMAX10PB	-0,098	-0,433	0,079	-0,501	-0,191	-0,437	-0,545	1	-0,258	-0,224
HWDI3D	-0,152	-0,164	0,150	-0,077	-0,369	0,618	0,600	-0,258	1	0,669
TXAV	0,088	0,024	-0,005	-0,103	-0,157	0,768	0,689	-0,224	0,669	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Le tableau 5 montre la matrice des corrélations entre variables permettant d'avoir les premiers éléments de description des associations entre les variables, mais l'analyse en composantes principales va permettre d'obtenir une synthèse plus globale de ces liaisons. D'après ce tableau, les tendances sur l'intensité des précipitations (SDII) sont très fortement corrélées positivement de manière significative avec les tendances sur le 90^{ème} percentile des précipitations (PREC90PC, $r = 0,942$), le pourcentage de jours dont l'intensité des précipitations dépasse le 90 centile (R90P, $r = 0,764$) et le maximum de jours secs consécutifs (CDD, $r = 0,562$).

Les tendances sur l'indice du maximum de jours secs consécutifs (CDD) sont corrélées négativement avec les tendances sur l'indice du nombre de jours avec précipitations (PRCP1, $r = -0,704$). Enfin les tendances sur le pourcentage de jours dont l'intensité des précipitations dépasse le 90^e centile (R90P) ainsi que le 90^e centile des précipitations (PREC90PC, $r = 0,697$).

Les tendances sur l'amplitude thermique diurne (DTR) sont corrélées positivement avec les moyennes des températures maximales (TXAV, $r = 0,768$), le 90^{ème} percentile des températures maximales (TMAX90PB, $r = 0,73$) et la durée de la vague de chaleur (HWDI3D, $r = 0,618$). Les tendances sur le 90^e centile des températures maximales (TMAX90PB) sont corrélées négativement avec les tendances sur le 10^{ème} centile des températures maximales (TMAX10PB, $r = -0,545$), positivement avec les moyennes des températures maximales (TXAV, $r=0,689$) et la durée de la vague de chaleur (HWDI3D, $r = 0,6$).

On note aussi des corrélations entre les tendances sur les moyennes des températures maximales (TXAV) et celles sur la durée de la vague de chaleur (HWDI3D, $r = 0,669$). En définitive, au cours de cette période de 60 ans, l'amplitude thermique semble diminuer surtout en raison d'une diminution des températures extrêmes chaudes. De même, la diminution des températures maximales moyennes durant cette saison semble également due à cette diminution des extrêmes chauds, alors que les extrêmes froids des températures maximales changent peu et ne sont pas statistiquement corrélés à l'évolution des températures maximales moyennes.

Ces relations entre les variables montrent que les tendances sur les indices des températures sont toutes corrélées entre elles de manière significative, tout comme les tendances sur les indices de précipitations (lorsque la tendance existe). Toutefois, l'intensité et la fréquence de ces liens varient selon les indices. On retrouve généralement plus de liens entre les tendances sur les indices de température (7) que sur les indices de précipitations (5). Mais la corrélation la plus forte entre deux indices est obtenue sur des indices de précipitation, soit entre l'intensité de la précipitation par jours humides et le 90^e centile de la précipitation ($r=0,942$).

Le premier résultat de l'ACP est constitué par la liste des valeurs propres et du pourcentage de variance expliquée (tableau 6). La somme des valeurs propres est égale au nombre de variables, ici 10. Les trois premiers axes expliquent plus de 80 % de la variance (81,7 %), les pourcentages de variance cumulés montrent une décroissance de la variance prise en compte pour chacun des axes, 90% de variance uniquement à partir du 4^{ème} axe. On a choisi de ne retenir que les 3 premiers axes car on observe une forte baisse de la part de variance prise compte entre le troisième et le quatrième axe (de 14 % à 8 %).

Tableau.6 Valeur propres de l'ACP en automne

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeur propre	3,945	2,809	1,416	0,855	0,354	0,311	0,209	0,063	0,037	0,001
% variance	39,451	28,094	14,163	8,545	3,541	3,108	2,089	0,630	0,367	0,013
% cumulé	39,451	67,545	81,708	90,253	93,794	96,902	98,990	99,620	99,987	100,000

a) Résultats sur les variables :

D'une manière générale sur les graphiques représentant les projections des variables sur les 3 premiers axes (figure 6) on voit que les indices de températures et ceux de précipitations ne sont pas proches les un des autres, surtout sur les deux premiers axes. Toutefois on retrouve de manière plus détaillée les relations entre les indices mis en évidence par la matrice des corrélations (tableau 5), avec des regroupements dans les deux premiers axes factoriels, d'une part des indices DTR, Tmax90pb, TXAV et HWDI et d'autre part les R90P, SDII, PRECP1 et CDD (Figure 6).

Sur le premier axe, qui représente 39,4 % de la variance totale (tableau 6), on observe deux regroupements de variables : les températures d'une part et des précipitations d'autre part (figure 6). D'une part les variables TMAX90PB, et DTR sont liés entre elles (figure 6 & tableau 7) et s'opposent à TMAX10PB (relativement mal représenté sur cet axe avec $\cos^2=0,4$ mais qui contribue à 10 % de la variance sur ce premier axe). D'autre part les variables SDII, PREC90PC et R90P sont aussi corrélés ensemble. L'indice TMAX90PB explique 19 % de la variance totale de ce premier axe, suivi de SDII (16 %), PREC90PC (14 %), et dans une moindre mesure DTR (12 %) et R90P (10%). La plupart des indices sont bien représentés sur le premier axe, les \cos^2 (tableau 7) sont les plus élevés pour TMAX90PB (0.759) et SDII (0.667). Ils sont un peu plus faibles pour PREC90PC (0.557), DTR (0.489) et R90P (0.417). Sur le premier axe on peut donc voir que les tendances sur le 90^{ème} percentile des températures maximales et l'amplitude

thermique diurne sont liées entre elles, et de l'autre les tendances sur les indices d'intensité des précipitations et le 90^{ème} percentile des précipitations. Ceci confirme donc que la diminution des amplitudes thermiques diurne est essentiellement causée par la diminution des extrêmes chauds, comme on l'avait suggéré en analysant la matrice des corrélations (tableau 5). De même la forte corrélation observée entre le 90^{ème} centile de précipitation et l'intensité des précipitations (tableau 5) se confirme dans la figure 6, i.e. la diminution ou l'augmentation des extrêmes de précipitation explique en partie la diminution ou l'augmentation des intensités moyennes de précipitation par jour humide observée en automne. En d'autres mots, tandis que la fréquence des jours de précipitation tend à augmenter dans la majorité des stations, les extrêmes de précipitation diminuent le plus souvent et sont responsables d'une diminution des intensités moyennes par jours pluvieux (lorsque la tendance s'observe).

Sur le deuxième axe factoriel, qui représente 28 % de la variance (tableau 6), les variables HWDI3D et TXAV contribuent respectivement à 25 et 19 % de la variance (tableau 7) avec une bonne qualité de représentation ($\cos^2 = 0,72$ et $0,559$). Les tendances sur la durée des vagues de chaleur et les moyennes des températures maximales sont corrélées entre elles et définissent ainsi ce second axe. La diminution de la durée des vagues de chaleur est donc en grande partie responsable de la diminution des températures maximales moyennes en automne.

Le troisième axe factoriel ne représente que 14 % de la variance totale (tableau 6), les indices PRCP1 et CDD prennent en charge respectivement 51% et 21 % de la variance de cet axe. PRCP1 est très bien représenté avec un \cos^2 de $0,73$, tandis qu'il n'est que de $0,304$ pour CDD (tableau 7). Les tendances sur le nombre de jours avec précipitations (PRCP1) s'opposent aux tendances sur le maximum de jours secs consécutifs (CDD). Cet axe nous informe donc surtout sur la fréquence des événements pluvieux.

Tableau 7. Contribution, coordonnées et qualité de représentation (\cos^2) des variables sur les 3 premiers axes factoriels en automne

	Coordonnées			Cosinus carrés			Contribution %		
	F1	F2	F1	F2	F3	F3	F1	F2	F3
R90P	0,646	-0,441	10,572	6,932	6,166	0,296	0,417	0,195	0,087
SDII	0,817	-0,491	16,900	8,580	2,577	0,191	0,667	0,241	0,036
PRCP1	-0,274	0,304	1,906	3,292	51,528	0,854	0,075	0,092	0,730
PREC90PC	0,746	-0,449	14,119	7,182	12,203	0,416	0,557	0,202	0,173
CDD	0,495	-0,596	6,223	12,637	21,443	-0,551	0,246	0,355	0,304
DTR	0,699	0,545	12,393	10,582	4,218	-0,244	0,489	0,297	0,060
TMAX90PB	0,871	0,367	19,241	4,793	0,034	0,022	0,759	0,135	0,000
TMAX10PB	-0,637	-0,114	10,289	0,461	0,461	-0,081	0,406	0,013	0,007
HWDI3D	0,315	0,849	2,512	25,636	0,138	0,044	0,099	0,720	0,002
TXAV	0,480	0,748	5,846	19,904	1,231	-0,132	0,231	0,559	0,017

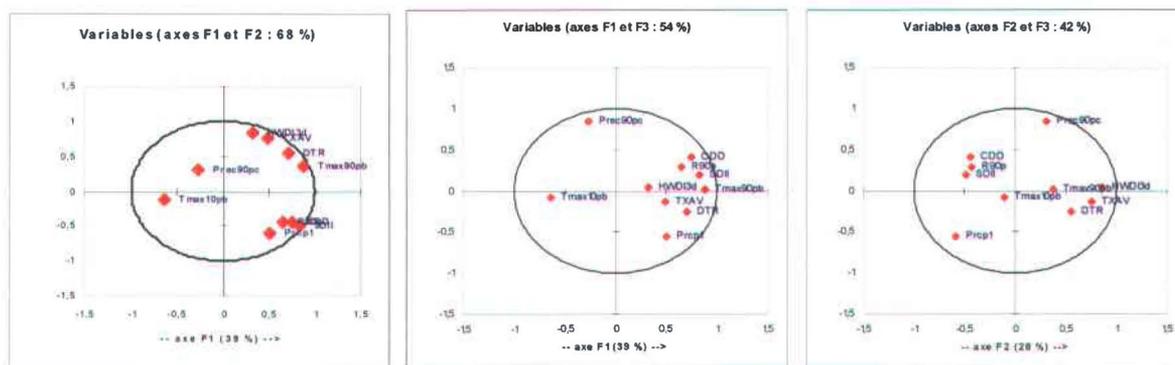


Figure 6. Représentation des variables sur les 3 premiers axes factoriels tels que définis au tableau 7 en automne

b) Résultats sur les individus (stations) :

Dans l'ensemble la projection des stations sur le plan factoriel ne permet pas de retrouver à première vue une structure spatiale cohérente d'un point de vue climatique dans les regroupements observés (figure 7) : la distribution des stations est fortement influencée par quelques individus. Sur le premier axe factoriel, Causapscal prend en charge près de 40 % de la variance de l'axe (tableau 8). Cette station de Causapscal présente un cas particulier. En effet elle s'individualise très nettement des autres stations, parce que d'une part 8 des 10 indices présentent une tendance durant la saison d'automne (plus de tendances qu'aucune autre station), et d'autre part sa position sur les axes factoriel la distingue très largement de la position de la station Mont-joli (figure 8). Pourtant les deux stations ne sont distantes que de 77 kilomètres. On peut sans doute expliquer cette singularité par le fait que cette station est la plus continentale et non située à proximité du littoral comme dans le cas des autres stations (hormis Québec qui marque le début de l'estuaire et qui n'est pas vraiment une station « maritime »). D'autre part elle se trouve dans une zone entourée de reliefs, à une altitude de 167 mètres dans une région où les sommets avoisinants atteignent plus de 700 à 800 mètres. Ces facteurs peuvent être à l'origine d'une exacerbation des changements observés, surtout pour le régime des précipitations fortement influencé par les effets orographiques. Cela peut donc fortement influencer sur les changements de précipitation, notamment la fréquence des jours de pluies qui augmente partout ailleurs et d'autant plus dans les zones à relief élevé, tandis que toutes les autres stations sont à des altitudes relativement faibles et subissent plus directement des influences maritimes.

Sable Island prend également en charge 18% de la variance de l'axe 1 (tableau 8) et se retrouve à l'opposé de la position de Causapscal sur les axes factoriels. Elle est également la seule station à connaître une augmentation concomitante de la fréquence des précipitations, de l'intensité des précipitations par jours humides et des extrêmes associés. Elle se retrouve à proximité du regroupement des indices PRCP1 et SDII, confirmant que ce secteur le plus maritime, situé dans l'atlantique, subit un changement marqué dans la fréquence et l'intensité des précipitations.

Tableau 8. Coordonnées, qualité de représentation et contribution des stations sur les 3 premiers axes en automne

	Coordonnées			Cosinus carrés			Contributions (%)		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Chatham	-1,066	-2,687	-0,726	0,124	0,786	0,057	2,057	18,352	2,657
Gander	0,198	-0,999	-0,954	0,015	0,390	0,355	0,071	2,540	4,589
La-Pocatiere	-1,932	2,777	-2,308	0,211	0,435	0,301	6,757	19,614	26,858
Quebec	-1,297	-1,258	0,881	0,310	0,292	0,143	3,043	4,025	3,917
Sable-Island	3,175	-0,264	1,837	0,557	0,004	0,187	18,250	0,177	17,016
St-John	1,232	-0,007	-1,205	0,343	0,000	0,327	2,749	0,000	7,319
Stephenville	1,034	0,961	1,528	0,135	0,117	0,295	1,936	2,346	11,771
Sydney	-0,182	-1,642	-0,868	0,009	0,704	0,197	0,060	6,853	3,800
DanielHarbour	0,992	1,462	0,804	0,172	0,373	0,113	1,782	5,435	3,263
Gaspe	-1,304	-3,015	0,213	0,134	0,715	0,004	3,077	23,119	0,228
Causapscal	-4,748	1,995	1,422	0,747	0,132	0,067	40,816	10,122	10,205
Natashquan	3,054	1,099	-1,139	0,596	0,077	0,083	16,888	3,068	6,546
Sept-Iles	1,140	1,272	-0,083	0,326	0,406	0,002	2,353	4,111	0,035
Mont-joli	-0,298	0,306	0,597	0,034	0,036	0,136	0,160	0,238	1,797

A l'inverse, la station de Saint John ne présente qu'une seule tendance sur un des indices durant la saison automnale, soit une tendance à la baisse sur les températures maximales moyennes. On se gardera donc d'interpréter la position de cette station sur les axes factoriels. De même, les stations de Sept Îles, Natashquan et Daniel Harbour ne présentent que 2 tendances sur les 10 indices retenus pour cette ACP, tandis que toutes les autres stations en comptent au moins deux fois plus.

On observe dans l'axe factoriel 2 les stations qui sont toutes situées sur la rive Sud de l'estuaire du Golfe, depuis La Pocatière, en passant par Gaspé, Causapscal et Chatham, soit depuis le Kamouraska, la péninsule Gaspésienne et l'Est du Nouveau Brunswick (tableau 8). On retrouve sur la projection des stations sur les axes 1 et 3 (figure 5) l'opposition déjà mise en évidence lors du premier examen des tendances à partir de la figure 2 ; d'un côté les stations du Sud du Golfe, Chatham, Gander, Gaspé, Sydney, et celles en amont de l'estuaire, La Pocatière et Québec avec une baisse des températures (tendances négatives sur les indices de températures TXAV, DTR, TMAX90PB et TXHWD) et aucune tendance sur les indices de précipitations. De l'autre les stations de Sable Island, Mont Joli, Stephenville, Sept-îles et Daniel Harbour où sont observées des tendances à la hausse de la fréquence des précipitations (tendance à la hausse du nombre de jours avec précipitation et une baisse du nombre de jours secs consécutifs).

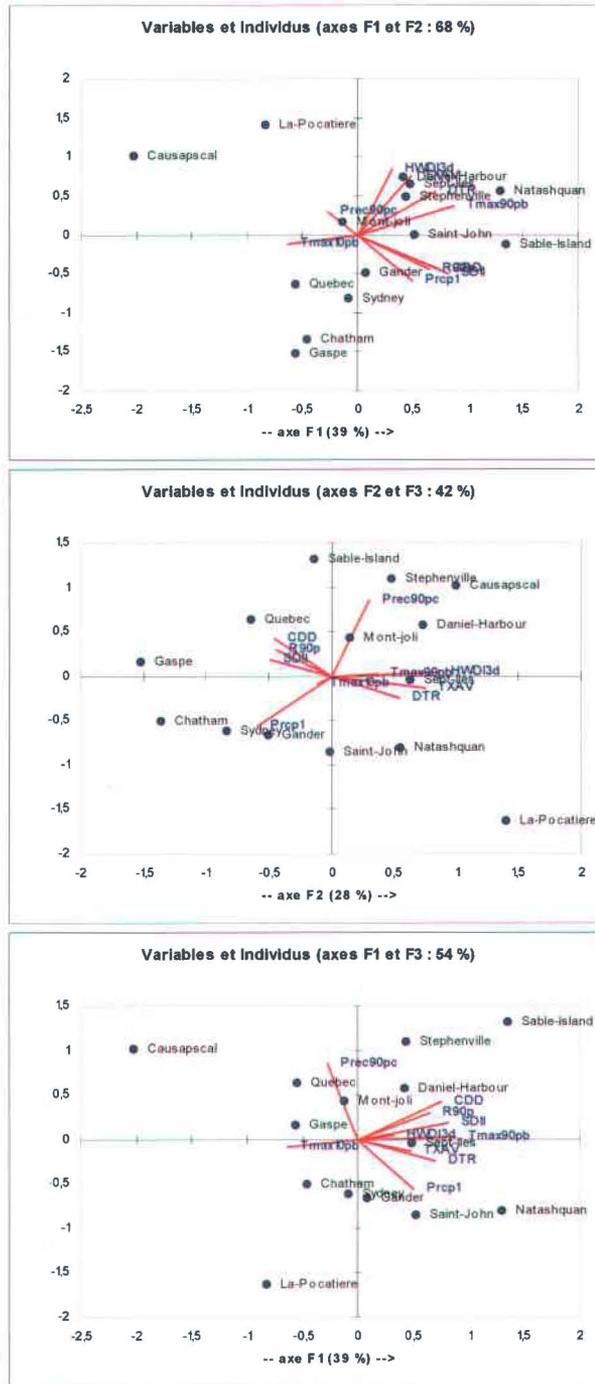


Figure 7. Représentation des individus sur les 3 premiers axes factoriels en automne

Les projections des individus - stations sur les axes 2 et 3 sont intéressantes pour tenter d'identifier des groupes de stations plus réduits ayant des comportements similaires (figure.7). Les axes 1 et 2 aussi sont intéressants car ils permettent de mettre en évidence le regroupement des stations de Daniel Harbour, Stephenville et Sept Îles qui ont les mêmes changements dans indices de température, puis Chatham et Gaspé pour les indices TMAX90 et TXAV.

On peut donc voir cinq grands groupes de stations :

1. Les stations de Stephenville, Daniel Harbour, Causapscal, Sable Island, Sept-îles, et Mont Joli enregistrent une augmentation de la fréquence des précipitations tout en ayant peu de tendances sur les températures
2. Chatham, Sydney et Gander présentent des tendances à la baisse des températures incluant une diminution des 90^e centiles, des amplitudes thermiques et de la durée des vagues de chaleur.
3. Québec et Gaspé présentent à la fois ces tendances de température, mais aussi une hausse de la fréquence des précipitations.
4. Natashquan et La Pocatière montrent également des tendances à la baisse sur la fréquence des précipitations mais avec des tendances positives sur les températures.
5. Enfin Saint John, Natashquan et La Pocatière s'individualisent, avec des tendances à la baisse sur tous les indices de précipitation sauf PRCP1.

Ces regroupements sont composés de stations qui peuvent être éloignées de plus de 100 kilomètres comme dans le cas de Gander qui se retrouve dans le même groupe que Chatham avec des changements synchrones dans les indices de température. D'autres stations comme Daniel Harbour, Stephenville et Sept-Îles qui ont subi les mêmes changements dans l'augmentation du nombre de jours de précipitations font partie des stations du nord du Golfe, se retrouvent dans un même regroupement bien que fortement éloignées également. D'autres facteurs autres que les effets locaux doivent permettre d'expliquer ces tendances et ces regroupements, soit ceux liés à des facteurs régionaux ou de plus grande échelle via par exemple la modification des trajectoires et de l'intensité des dépressions d'échelle synoptiques, qui redeviennent fréquentes et intenses en automne dans cette région (VAN WIJNGAARDEN, 2005). Les régions du Sud et l'Est du Golfe sont par exemple régulièrement influencées par les trajectoires des mêmes systèmes dépressionnaires qui transitent le long de la marge atlantique ou qui pénètrent dans le Golfe via la cote Est.

4.3 ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE SUR LES TENDANCES DES INDICES EN ÉTÉ

La seconde saison après l'automne durant laquelle un nombre important des tendances sur les indices est observé est l'été. On recherche de la même manière que durant l'automne à établir des liens entre les tendances observées durant cette saison et les éventuels regroupements entre les stations et le reste de l'analyse est proposée en annexe B, car elle est moins probante et les résultats obtenus sont plus nuancés que dans le cas de l'automne où les tendances étaient plus nombreuses et plus marquées. Un bref aperçu des principaux résultats est présenté par la suite.

Au niveau des indices le principal lien qui ressort de l'analyse est une corrélation très forte entre les tendances sur les indices de l'amplitude thermique diurne, le 10^{ème} percentile et le 90^{ème} percentile des températures maximales. La corrélation de TXAV avec TMAX10PB et TMAX90PB est très forte, ces deux indices correspondent aux deux extrémités de la distribution de la température et témoigne donc d'un déplacement de toute la distribution des températures (extrêmes et moyenne). On ne retrouve 90 % de la variance expliquée qu'à partir 5^{ème} axe seulement, ce qui indique que les données ne sont que peu structurées et il faut donc être très

prudent pour l'interprétation de ces résultats (LEBART, 2000). Le premier axe représente la variabilité des extrêmes de température (les percentiles des températures maximales et l'amplitude thermique diurne). L'axe 2 est défini par les extrêmes de précipitation ; le 90^{ème} percentile et le pourcentage de jours qui dépassent cette valeur par rapport à la normale 1961-1990. Enfin le troisième axe est caractérisé par l'occurrence et l'intensité des précipitations (CDD et SDII).

D'après les projections des individus sur les axes factoriels, deux principaux regroupements entre les stations sont suggérés :

- Saint John, Natashquan et Sept-îles montrent une hausse des températures très marquée, sur les indices de température minimale et maximale, associée à une tendance à la baisse du nombre de jours avec précipitations
- Daniel Harbour, Causapscal, Québec et Sydney présentent une hausse des températures minimales et des jours avec précipitations ainsi qu'une baisse de l'amplitude thermique diurne

Globalement pour cette saison il est délicat de distinguer des groupes de stations présentant une certaine homogénéité dans les tendances sur les indices, en raison notamment du faible nombre de tendances observées.

CONCLUSION

Cette étude sur des indices de variabilité et d'extrêmes climatiques sur des stations du Golfe du Saint Laurent met en lumière les mêmes changements climatiques observés que dans les travaux précédents. On observe en particulier que les températures minimales tendent à augmenter, surtout en été (CHAUMONT *et al.* 2005), tandis que l'amplitude thermique diminue dans la plupart des stations (ZHANG 2000). On enregistre également une augmentation de la fréquence des précipitations (CHAUMONT *et al.* 2005). Ce sont surtout durant les saisons d'automne, avec également une baisse importante des températures maximales, et dans une moindre mesure l'été que ces tendances sont observées.

L'analyse multivariée nous montre qu'en automne et en été certains groupes de stations enregistrent les mêmes tendances, mais d'une manière générale l'étude des tendances ne permet pas de définir des groupes de stations contigus. Certains regroupements de stations mis en évidence par l'analyse en composantes principales qui, à première vue semblent peu cohérents, pourraient être expliqués par la modification des trajectoires des systèmes dépressionnaires qui traversent la région. Un travail récent de VAN WIJNGAARDEN (2005) montre qu'en automne des changements de pression s'observent dans cette région (de 1953 à 2003), avec une diminution de la pression à l'Est du Golfe et une augmentation à l'Ouest. Une étude complémentaire serait donc nécessaire pour faire le lien entre les changements de pression, l'activité cyclonique et les changements de température et de précipitation mis en évidence dans notre étude.

On pourrait compléter cette analyse en incorporant plus d'indices climatiques tels que ceux sur les températures minimales, fortement conditionnées par les systèmes dépressionnaires en automne et en hiver. D'autre part, cette analyse s'est réalisée essentiellement sur les tendances des variables ou des indices, et non à une éventuelle composante cyclique au cours du temps ou liée à une variabilité de basse fréquence de certaines caractéristiques de l'atmosphère. Il serait par exemple sans doute utile de considérer les cycles, à différentes échelles de temps, et en particulier les liaisons avec l'Oscillation Nord – Atlantique (ONA) ou l'Oscillation Arctique (OA), tel que suggéré par WANG *et al.* (2000) et VAN WIJNGAARDEN (2005).

RÉFÉRENCES :

CUNNANE, C. (1978), Unbiased plotting positions - a review. *Journal of Hydrology* 37: 205–22.

BOUROCHE JM. & SAPORTA G. (2002), L'Analyse des données, *Que sais-je*, PUF n°1854

BELTRANDO G. (1990), Space – time variability of rainfall in April and October-November over east Africa during the period 1932 – 1983, *International journal of Climatology*, Royal Meteorological Society, n°10, p. 691-702

CHAUMONT D., NADEAU M., ROY P., GACHON P., MILTON J., LIN C., SLONOSKY V. (2005) Regional analysis of climate variability and extreme indices of daily temperature and precipitation over Eastern Canada for the second half of the 20th century, *rapport du consortium Ouranos* In *A first evaluation of the strength and weaknesses of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada*

FRICH P., ALEXANDER L.V., DELLA-MARTA P., GLEASON B., HAYLOCK M., KLEIN TANK, PETERSON, T. (2002) Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19: p.193-212.

HUTH R., POKORNA L. (2004), Parametric versus non-parametric estimates of climatic trends, *Theor. Appl. Climatol.* 77, 107–112

HIRSCH, R.M. and SLACK, J.R. (1984) : A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence, *Water Resources Research* 20, 727-732

LEBART L. & PIRON M. & MORINEAU A. (2000), Statistique exploratoire multidimensionnelle, *Dunod*, 439p.

ROBESON S.C. (2004), Trends in time-varying percentiles of daily minimum and maximum temperature over North America, *Geophysical Research Letters*, 31: L04203.

SEN, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association.* 63:1379-1389

ST-HILAIRE, A. , BRUN, G. , COURTENAY, S. , OUARDA, T. , BOGHEN, A.D , BOBÉE, B. (2004). Multivariate Analysis of Water Quality in the Richibucto Drainage Basin. *Journal of the American Water Resources Association* , 40:691-703.

STARDEX - Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions
<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/projects/stardex>

VAN WIJNGAARDEN, W. A. (2005) Examination of trends in hourly surface Pressure in Canada during 1953-2003 *non publié*

VINCENT L.A., MÉKIS É. (2004): Variations and trends in climate indices for Canada, 14th conference on Applied Climatology, *AMS Conference*, Seattle, WA

ZHANG X., VINCENT L.A., HOGG W.D., NIITSOO, A. (2000), Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere-Ocean*, 38:395-429.

ANNEXE A: MÉTHODE DE CALCUL DES INDICES CLIMATIQUES (CHAUMONT *ET AL.* 2005)

Précipitations :

- Days with precipitation (Prcp1) (% days)

P_{ij} being the daily total precipitation amount for day i in period j . The number of days is counted where :

$$P_{ij} \geq 1mm$$

The number of days is brought back in percentage to avoid having variations due to absentees

- Simple daily intensity (SDII) (mm/rainday)

P_{wj} being the daily total precipitation amount on wet days, w ($P \geq 1$ mm) during period j and W being the number of wet days in j . The intensity of precipitation is defined by:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W P_{wj}}{W}$$

- Maximum of consecutive dry days (CDD) (days)

P_{ij} being the daily total precipitation for day i during period j . The maximum number of consecutive dry days is defined by:

$$CDD_j = \max(P_{ij} \text{cons} \leq 1\text{mm})$$

- 90th percentile of the total precipitation (Prec90pc) (mm)

P_{wj} being the total daily precipitation amount for days with precipitation W ($P \geq 1$ mm) in period j . The values of P_{wi} are sorted out in increasing order then the rank of the percentile 90 is defined by the non - parametric Cunnane (1978) formula:

$$\text{rank90p} = (0,9 * (W + 0,2)) + 0,4$$

The Prec90pc value corresponding to rank90p is obtained by a linear interpolation between the two closest values. The ending c letter in the index name refers to Cunnane.

- Percentage of days with precipitation > 90th percentile (61-90 based period) (R90p) (% days)

Let P_{wj} be the daily precipitation amount at wet day w ($P \geq 1$ mm) of period j and let $P_{wn}90$ be the 90th percentile of precipitation at wet days in the reference period. The number of days is counted where:

$$P_{wj} > P_{wn}90$$

The number of days is brought back in percentage to avoid having variations due to absentees

Températures :

- Mean diurnal temperature range (DTR) (°C)

$T_{x_{ij}}$ and $T_{n_{ij}}$ being the maximum daily temperature and minimum in the day i for period j . The mean diurnal temperature range is defined by:

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (T_{x_{ij}} - T_{n_{ij}})}{I}$$

- Sum of days in sequences > 3 days where $T_{max} > \text{daily } T_{max} \text{ normal} + 3^\circ\text{C}$ (HWDI3d) (days)

Let $T_{x_{ij}}$ be the daily maximum temperature at day i of period j and let $T_{x_{inorm}}$ be the calendar day mean calculated on a 5 day window centred on each calendar day during the 1961-1990 base period. Then counted is the number of days per period where, in intervals of at least 4 consecutive days:

$$T_{x_{ij}} > T_{x_{inorm}} + 3$$

- Percentage of days with $T_{min} < 10^{\text{th}}$ percentile of daily minimum temperature (61-90 based period) (TN10p) (%days)

Let $T_{x_{ij}}$ be the daily minimum temperature at day i of period j and let $T_{x_{in}10}$ be the calendar day 10th percentile calculated on a 5 day window centred on each calendar day during the 1961-1990 base period. The number of days is counted where:

$$Tx_{ij} < Tx_m 10$$

The number of days is brought back in percentage to avoid having variations due to absentees

- Percentage of days Tmax > 90th percentile of daily maximum temperature (61-90 based period) (TX90p) (%days)

Let Tx_{ij} be the daily maximum temperature at day i of period j and let $Tx_m 90$ be the calendar day 90th percentile calculated on a 5 day window centred on each calendar day during the 1961-1990 base period. The number of days is counted where:

$$Tx_{ij} > Tx_m 90$$

The number of days is brought back in percentage to avoid having variations due to absentees

ANNEXE B: ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE SUR LES TENDANCES DES INDICES EN ÉTÉ

La seconde saison après l'automne durant laquelle un nombre important des tendances sur les indices sont observés est l'été. On recherche de la même manière que durant l'automne à établir des liens entre les tendances observées durant cette saison et les éventuels regroupements entre les stations.

Tableau.9 Données brutes – tendances sur les indices durant l'été

JJA	R90P	SDII	PRCP1	PREC90PC	CDD	DTR	TMAX90PB	TMAX10PB	TNAV	TXAV
Chatham	0	0,034	0	0	0	-0,024	-0,029	0	0,0162	0
Gander	0	0	0	0	0	-0,014	0	0	0	0
La-Pocatiere	-0,139	0	-0,041	-0,095	0	0	0	0	0	0
Quebec	0	0	0	0	-0,05	-0,03	0	0	0,0271	0
Sable-Island	0	0,0471	0	0	0	0	0	0	0	0
St-John	0	0	-0,091	0	0	0	0,0294	0,0273	0	0,0221
Stephenville	0,1115	0,0417	0	0	0,05	0	0	0	0,0191	0
Sydney	0	0	0	0	0	-0,017	0	0	0,0157	0
Daniel-Harbour	0	0	0,1763	0	-0,053	0	0	0	0	0
Gaspe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Causapsca	0	0	0,1976	0	0	-0,028	0	0	0,024	0
Natashquan	0	0	-0,084	0	0	0,0114	0,0271	0,0333	0,017	0,0292
Sept-Iles	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,0152	0,0194
Mont-joli	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0139	0

D'après le tableau 9 on voit que les tendances significatives sur les indices sont beaucoup moins nombreuses qu'en automne, et on ne dénombre aucune tendance pour la station de Gaspé ni pour l'indice THXWD qui seront donc retirés de l'analyse en composante principale. Le nombre important de cases vides (= pas de tendance) dans le tableau brut rend l'analyse en composantes principale sur ces données beaucoup moins fiable, le risque étant de produire des liens artificiels entre les variables qui ne correspondent à aucune réalité physique. On s'attachera surtout dans ce cas à comparer les résultats à ceux de l'automne, afin de voir si les relations entre les indices et les stations mises en évidence à cette saison lui sont propres ou bien s'ils sont identiques pour toutes les saisons.

Tableau. 10 Matrice de corrélation entre les variables en été

	R90P	SDII	PRCP1	PREC90PC	CDD	DTR	TMAX90PB	TMAX10PB	TNAV	TXAV
R90P	1	0,432	0,116	0,799	0,353	-0,024	0,006	0,022	0,373	0,021
SDII	0,432	1	-0,075	0,143	0,461	0,028	-0,395	-0,269	0,021	-0,265
PRCP1	0,116	-0,075	1	0,186	-0,342	-0,400	-0,369	-0,462	0,154	-0,487
PREC90PC	0,799	0,143	0,186	1	-0,045	-0,163	0,042	0,144	0,301	0,142
CDD	0,353	0,461	-0,342	-0,045	1	0,277	0,025	0,084	0,050	0,083
DTR	-0,024	0,028	-0,400	-0,163	0,277	1	0,531	0,483	-0,516	0,497
TMAX90PB	0,006	-0,395	-0,369	0,042	0,025	0,531	1	0,673	-0,168	0,725
TMAX10PB	0,022	-0,269	-0,462	0,144	0,084	0,483	0,673	1	0,037	0,990
TNAV	0,373	0,021	0,154	0,301	0,050	-0,516	-0,168	0,037	1	0,032
TXAV	0,021	-0,265	-0,487	0,142	0,083	0,497	0,725	0,990	0,032	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

A la lecture du tableau 10 on voit que par rapport à l'automne on retrouve moins de liens entre les variables. On retrouve néanmoins une corrélation très forte ($r = 0.99$) entre les indices TMAX10PB (10^{ème} percentile des températures maximales) et TXAV (moyenne des températures maximales). On retrouve aussi des corrélations entre les indices R90P et PREC90PC ($r = 0.799$) et TMAX90PB et TXAV ($r = 0.725$). La corrélation de TXAV avec en même temps TMAX10PB et TMAX90PB, ces deux indices correspondent à deux extrêmes opposés de température, montre un déplacement de toute la distribution des températures (extrêmes et moyenne).

Tableau. 11 Valeurs propres de l'ACP en été

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeur propre	3,443	2,280	1,744	0,986	0,540	0,428	0,284	0,229	0,060	0,006
% variance	34,426	22,801	17,444	9,860	5,398	4,281	2,838	2,292	0,602	0,058
% cumulé	34,426	57,227	74,671	84,530	89,929	94,210	97,048	99,340	99,942	100,000

Le premier axe ne prend en charge que 34 % de la variance (Tableau.11), et la décroissance des valeurs propres est régulière et lente avec les axes, on ne retrouve que 90 % de la variance expliquée à partir 5^{ème} axe seulement, ce qui indique que les données ne sont que peu structurées et il faut donc être très prudent pour l'interprétation (LEBART, 2000)

a) Résultats sur les variables :

Les variables les mieux représentées sur le premier axe factoriel sont TXAV ($\cos^2 = 0.834$), TMAX10PB ($\cos^2 = 0.797$) et TMAX90PB ($\cos^2 = 0.697$), qui prennent respectivement 24%, 23% et 20% de la variance de cet axe (Tableau.12). Les tendances sur les températures maximales et le 90^{ème} percentile des températures sont donc liées, mais aussi avec le 10^{ème} percentile des températures. Dans une moindre mesure, les tendances sur l'amplitude thermique diurne (DTR) représentent 15% de la variance de cet axe avec un $\cos^2 = 0.519$. Ce premier axe concerne donc la variabilité des extrêmes de température.

Sur le second axe, les variables R90P et PREC90PC sont les mieux représentées (\cos^2 de 0.877 et 0.627) et contribuent respectivement à 38% et 27% de la variance de cet axe. L'axe 2 est donc défini par les extrêmes de précipitation ; le 90^{ème} percentile et le pourcentage de jours qui le dépassent.

Sur le troisième axe les variables les mieux représentées sont CDD (27% de la variance de l'axe) et SDII (26% de la variance de l'axe) mais avec des valeurs du \cos^2 faibles, de 0.473 et 0.454. L'occurrence et l'intensité des précipitations caractérisent donc cet axe.

Figure.8 Représentation des variables sur les 3 premiers axes factoriels en été

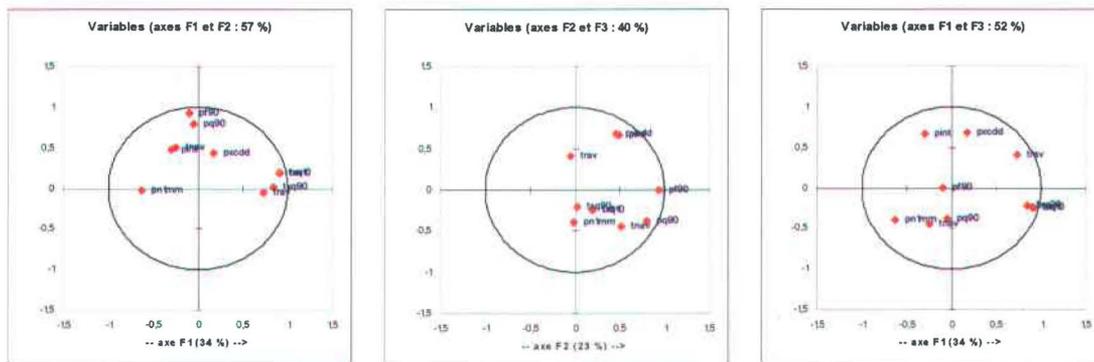


Tableau.12 *Coordonnées, qualité de représentation et contribution des variables sur les 3 premiers axes factoriels en été*

	Coordonnées			Cosinus carrés			Contributions (%)		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
R90P	-0,106	0,936	0,001	0,011	0,877	0,000	0,326	38,443	0,000
SDII	-0,298	0,486	0,673	0,089	0,236	0,454	2,573	10,353	26,001
PRCP1	-0,634	-0,021	-0,392	0,403	0,000	0,154	11,694	0,019	8,819
PREC90PC	-0,062	0,792	-0,380	0,004	0,627	0,144	0,110	27,508	8,259
CDD	0,165	0,445	0,688	0,027	0,198	0,473	0,792	8,692	27,114
DTR	0,720	-0,053	0,421	0,519	0,003	0,177	15,079	0,123	10,146
TMAX90PB	0,835	0,020	-0,205	0,697	0,000	0,042	20,260	0,018	2,401
TMAX10PB	0,893	0,196	-0,238	0,797	0,039	0,057	23,165	1,691	3,259
TNAV	-0,247	0,512	-0,436	0,061	0,262	0,190	1,779	11,481	10,898
TXAV	0,913	0,195	-0,233	0,834	0,038	0,054	24,221	1,672	3,102

b) Résultats sur les individus :

Les projections des individus sur les axes factoriels (figure.7) suggèrent deux regroupements entre les stations :

- Saint John, Natashquan et Sept-îles montrent une hausse des températures très marquée, sur les indices de température minimale (TMAX10PB et TNAV) et maximale (TMAX90PB et TXAV) mais aussi une tendance à la baisse du nombre de jours avec précipitations (PRCP1).
- Daniel Harbour, Causapscal, Québec et Sydney présentent elles une hausse des températures minimales (TNAV) et des jours avec précipitations (PRCP1) ainsi qu'une baisse de l'amplitude thermique diurne (DTR).

Globalement il est encore plus difficile et hasardeux pour cette saison de distinguer des groupes de stations présentant une certaine homogénéité dans les tendances sur les indices, du fait notamment du faible nombre de tendances.

Tableau.13 *Coordonnées, qualité de représentation et contribution des stations sur les 3 premiers axes en été*

	Coordonnées			Cosinus carrés			Contributions (%)		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Chatham	-2,345	0,777	0,739	0,522	0,057	0,052	11,412	1,889	2,237
Gander	-0,504	-0,430	0,176	0,104	0,076	0,013	0,527	0,580	0,127
La-Pocatiere	0,412	-4,312	1,807	0,007	0,771	0,135	0,352	58,239	13,377
Quebec	-1,564	-0,077	-2,270	0,220	0,001	0,464	5,078	0,018	21,107
Sable-Island	-0,508	0,422	1,951	0,035	0,024	0,522	0,536	0,558	15,591
St-John	3,509	0,151	-0,258	0,890	0,002	0,005	25,542	0,072	0,273
Stephenville	-0,662	3,071	2,264	0,026	0,570	0,310	0,908	29,539	20,981
Sydney	-0,814	0,125	-0,435	0,357	0,008	0,102	1,375	0,049	0,774
DanielHarbour	-1,037	-1,169	-1,312	0,095	0,121	0,152	2,232	4,278	7,047
Gaspe	-0,063	-0,470	0,538	0,002	0,089	0,117	0,008	0,692	1,183
Causapscal	-2,145	0,409	-1,755	0,403	0,015	0,270	9,547	0,524	12,612
Natashquan	4,118	0,864	-0,753	0,893	0,039	0,030	35,180	2,336	2,320
Sept-Iles	1,859	0,625	-0,758	0,517	0,059	0,086	7,167	1,224	2,353
Mont-joli	-0,254	0,014	0,066	0,046	0,000	0,003	0,134	0,001	0,018

Figure.9 Représentation des individus sur les 3 premiers axes factoriels en été

