

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

**ANALYSE DE LA VARIABILITÉ INTERANNUELLE DE SÉRIES TEMPORELLES
DES NIVEAUX D'EAU SOUTERRAINE DANS TROIS RÉGIONS DU CANADA**

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR
LYSANDRE TREMBLAY

NOVEMBRE 2009

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement n°8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Un merci spécial à ma directrice Marie Larocque pour sa dévotion exceptionnelle et la grande générosité de son temps.

Merci à ma codirectrice, Christine Rivard, pour ses conseils et ses bons mots d'encouragement toujours très appréciés.

Merci à mon codirecteur, François Anctil, de m'avoir ouvert au monde de l'analyse des séries temporelles et pour sa disponibilité même à l'autre bout du pays.

Merci aux professeurs Erwan Gloaguen et Enrico Torlaschi pour leur contribution lors de la révision du document.

Merci à Ouranos pour le soutien financier qui m'a permis de me consacrer à temps plein à ce projet pendant les deux dernières années.

Merci à ma famille, mes racines, pour leur soutien, leurs encouragements et leur amour inconditionnel.

Merci à Sylvain Gagné pour les précieux conseils apportés tout au long de ma maîtrise et pour le temps passé à discuter de tout et de rien. Merci aussi pour le café.

Merci à Catherine Goulet et Gaëlle Derrien pour leur amitié et pour avoir apporté de la vie dans notre grand bureau souvent vide.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
RÉSUMÉ	xi
CHAPITRE I	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Mise en contexte et objectif	1
1.2. État des connaissances	4
1.2.1. Indices ONA et OA	5
1.2.2. Indices PAN et ENSO3	7
1.3. Données disponibles et description des sites à l'étude	8
1.3.1. Données disponibles	8
1.3.2. Île-du-Prince-Édouard	12
1.3.3. Manitoba	14
1.3.4. Ile de Vancouver	16
1.4. Méthodologie	17
1.4.1. Analyse en ondelettes	17
1.4.2. Analyse de corrélation croisée	20
CHAPITRE II	
2.1. Introduction	22
2.2. Climatic indices	24

2.3. Study areas and datasets	26
2.3.1. Study areas	26
2.3.2. Datasets	29
2.4. Methodology	32
2.5. Results and Discussion	34
2.5.1. Correlations among climatic indices	35
2.5.2. Cross correlations between groundwater levels, climatic variables and climatic indices time series	36
2.5.3. Teleconnections between climatic indices, groundwater levels and climate variables	40
Acknowledgments	43
CHAPITRE III	
SYNTHÈSE ET CONCLUSION	45
BIBLIOGRAPHIE	48
ANNEXE 1	55

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Séries de niveaux piézométriques, précipitations et températures pour les régions de l'IPE, MB et IV. Le trait fin représente les séries individuelles de chaque station tandis que le trait gras correspond à la moyenne des stations.....	9
Figure 1.2 Séries temporelles des indices climatiques Oscillation Nord-Atlantique (ONA), Pacifique-Amérique du Nord (PAN), l'Oscillation Arctique (OA) et l'anomalie de température au-dessus de la zone Niño-3 (ENSO3).....	11
Figure 1.3 Région de l'Ile-du-Prince-Édouard (IPE)	12
Figure 1.4 Région du Manitoba (MB).....	15
Figure 1.5 Région de l'Ile de Vancouver (IV).....	17
Figure 1.6. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de température au Manitoba	20
Figure 2.1 Study areas and spatial distribution of stations in a) PEI, b) Manitoba (MB) and c) Vancouver island (VI)	28
Figure 2.2. Standardized time series of groundwater levels, precipitation and temperature from 1974 to 2005. The average of datasets (bold line) and the record at each station (fine line) are represented.	30
Figure 2.3 Times series of the North Atlantic Oscillation (NAO), the Pacific/North American pattern (PNA), Arctic Oscillation (AO) and the temperature anomaly over the Nino-3 region (ENSO3) from 1974 to 2005	31
Figure 2.4 Mean annual values of temperature in Southern Manitoba a) time series, b) wavelet spectrum	33
Figure 2.5. Scale-averaged wavelet power for selected series in the 2-3 year band of variability.....	36
Figure 2.6 Scale-averaged wavelet power for selected series in the 3-6 year band of variability.....	38

Figure A1 : a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de niveau piézométrique à l'Île-du-Prince-Édouard.....	55
Figure A2. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles de précipitation à l'Île-du-Prince-Édouard	55
Figure A3. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de température à l'Île-du-Prince-Édouard.....	56
Figure A4. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de niveau piézométrique au Manitoba	56
Figure A 5. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles de précipitation au Manitoba.....	57
Figure A 6. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de température au Manitoba.....	57
Figure A 7. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de niveau piézométrique à l'Île de Vancouver.....	58
Figure A 8. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles de précipitation à l'Île de Vancouver.....	58
Figure A 9. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de température à l'Île de Vancouver.....	59
Figure A 10. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de l'Oscillation Nord-Atlantique	59
Figure A11. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de l'indice Pacifique/ Amérique du Nord	60
Figure A12. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de l'Oscillation Arctique.....	60
Figure A13. a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de anomalie de température de surface marine au dessus de la zone Niño-3.....	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Résultat du test non-paramétrique de Mann-Kendall.....	11
Tableau 1.2 Données relatives aux puits sélectionnés dans les trois régions	13
Tableau 1.3 Données relatives aux stations météorologiques sélectionnées dans les trois régions	14
Tableau 2.1. Selected wells for the three study areas.....	27
Tableau 2.2. Maximum cross-correlation values for natural series, the 2-3 and the 3-6 year bands of variability for the four climatic indices	35
Tableau 2.3. Maximum cross-correlations for natural series and for the 2-3 and the 3-6 year bands of variability between climatic indices, precipitation, temperature, and groundwater levels for Prince Edward Island.	37
Tableau 2.4. Maximum cross-correlations for natural series and for the 2-3 and the 3-6 year bands of variability between climatic indices, precipitation, temperature, and groundwater levels for Manitoba time series	39
Tableau 2.5. Maximum cross-correlations for natural series and for the 2-3 and the 3-6 year bands of variability between climatic indices, precipitation, temperature, and groundwater levels for Vancouver Island.....	40

RÉSUMÉ

Les liens entre le climat et la dynamique des aquifères canadiens sont encore mal connus. L'analyse des phénomènes climatiques à grande échelle, qui s'est avérée utile pour comprendre les causes des fluctuations interannuelles des débits en rivière, pourrait également expliquer en partie les cycles observés dans les chroniques de niveaux piézométriques. Ce mémoire a pour objectif d'étudier les causes de la variabilité de ces chroniques. Les analyses en ondelettes et de corrélation sont appliquées sur des chroniques piézométriques, de précipitations et de températures dans trois régions du Canada. Des liens de cause à effet sont recherchés avec quatre indices climatiques : l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA), l'Oscillation Arctique (OA), l'indice Pacifique-Amérique du Nord (PAN) et l'anomalie de température au-dessus de la zone Niño-3 (ENSO3). Dans une optique de développement durable, l'étude vise à mieux comprendre le système hydrométéorologique dans son ensemble permettant éventuellement une meilleure gestion de la ressource en eau.

Les trois zones choisies sont situées à l'est, au centre et à l'ouest du Canada, pour tenter de représenter des conditions climatiques et géographiques très différentes, soit : l'Île-du-Prince-Édouard, le sud du Manitoba près de Winnipeg et l'extrême sud de l'Île de Vancouver en Colombie-Britannique. Chacune de ces régions compte trois puits de surveillance qui possèdent des séries de niveaux d'eau d'au moins 32 ans. Sept des neuf unités aquifères étudiées sont à nappe libre. Ces unités sont granulaires pour les sites à l'Île-du-Prince-Édouard, au Manitoba et en Colombie-Britannique. Les chroniques de 32 ans (1974-2005) permettent de décrire les fluctuations interannuelles de périodes de six années ou moins. Les analyses en ondelettes sont donc présentées sous forme de moyenne de périodicité pour des bandes temporelles spécifiques de 2-3 ans et de 3-6 ans.

Les résultats révèlent des liens entre certains indices climatiques et les niveaux piézométriques, et par extension avec la recharge, dans chacune des régions ciblées. Dans les trois régions, des corrélations significatives sont observées entre les indices climatiques et les séries piézométriques, surtout pour la bande 3-6 ans. Plus spécifiquement, pour l'Île-du-Prince-Édouard, l'indice ENSO3 est l'anomalie climatique correspondant le mieux à la variable hydrogéologique et ce, dans les deux bandes de variabilité. Dans les prairies, des interactions fortes sont présentes pour les deux bandes de variabilité avec l'indice PAN. À l'Île de Vancouver, les plus fortes relations concernent les indices PAN et l'indice ENSO3 pour la bande de 3-6 ans ainsi que l'ONA pour la bande 2-3 ans. De façon surprenante dans la plupart des cas, les corrélations observées entre les indices climatiques et les séries piézométriques s'avèrent plus fortes que celles obtenues avec les températures et les précipitations, ce qui pourrait provenir du fait que les séries piézométriques sont influencées par une combinaison de variables climatiques.

Ces résultats montrent que la variabilité interannuelle des chroniques piézométriques canadiennes peut être expliquée en partie par les phénomènes climatiques à grande échelle. Ils ouvrent la voie à l'intégration de séries d'indices climatiques dans les calculs de prévision des niveaux d'eau souterraine, améliorant ainsi la capacité de gestion de la ressource en eau souterraine. *Mots-clés : niveaux piézométriques, précipitations, températures, indices climatiques, analyse en ondelettes, variabilité interannuelle, Canada*

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Mise en contexte et objectif

L'eau souterraine est la source d'approvisionnement en eau potable de près de neuf millions de Canadiens (Environnement Canada, 2008). Malgré l'importance capitale de cette ressource, les caractéristiques des aquifères, telles que la conductivité hydraulique, l'emmagasinement et le taux de recharge, de même que les liens entre l'eau souterraine et le climat restent mal connus. À ce manque d'information s'ajoutent les incertitudes liées aux changements climatiques et à la variabilité naturelle du climat, ce qui complexifie davantage la relation entre les aquifères et le climat (Toews et Allen, 2009).

Le climat, via les variables météorologiques telles les précipitations et l'évapotranspiration, joue un rôle majeur dans la recharge des aquifères. Une étude récente de Nolan et al. (2007) utilisant des données réparties dans l'est américain a permis d'établir que parmi plus d'une centaine de variables étudiées, la température annuelle moyenne et les précipitations annuelles moyennes font partie des quatre variables ayant le plus d'influence sur la recharge annuelle avec le débit annuel moyen et l'indice topographique d'humidité.

Le climat canadien est appelé à devenir plus chaud et plus humide au courant du 21^{ème} siècle selon le GIEC (2007). L'impact de ces changements sur la recharge a fait l'objet de nombreux travaux. En bref, Rivard et al. (2009a; 2009b) ont observé des tendances à la baisse dans les Maritimes en utilisant des tests statistiques sur des

séries historiques de débits de base et de niveaux d'eau dans des puits de surveillances; Jyrkarma et Sykes (2007) ont quant à eux prévu une hausse de 53% de la recharge en moyenne dans le bassin versant de la rivière Grand en Ontario; Scibek et al. (2007) ont prédit une baisse de la recharge à la fin du printemps et pendant l'été dans l'aquifère Grand Forks au sud de la Colombie-Britannique.

Parallèlement, des liens de téléconnexion entre des variables hydro-climatiques et des indices climatiques connus ont été établis au Canada, notamment sur des séries de débits de rivières (Anctil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et Burn, 2004; Déry et Wood, 2004; St-George, 2007), de températures (Shabbar et al., 1997b; Bonsal et al., 2001; Stahl et al., 2006) et de précipitations (Shabbar et al., 1997a; Coulibaly, 2006; Stahl et al., 2006). Des cycles interannuels associés aux indices climatiques de même qu'une reproduction de ces cycles par des séries de niveaux d'eau souterraine ont également été observés par certains auteurs au Canada (Chen et al., 2004; Fleming et Quilty, 2006) et ailleurs dans le monde (Tanco et Kruse, 2001; Jones et Banner, 2003; Luque-Espinar et al., 2008). Ainsi, des relations ont été établies entre ENSO (El Niño- Oscillation australe) et les niveaux d'eau souterraine en Colombie-Britannique (Fleming et Quilty, 2006) et aux Barbades (Jones et Banner, 2003), entre l'Oscillation Nord-Atlantique et des niveaux piézométriques de l'aquifère Vega de Granada en Espagne (Luque-Espinar et al., 2008), entre un aquifère du sud manitobain et l'Oscillation décennale du Pacifique (Chen et al., 2004) ainsi qu'entre une anomalie de température océanique et l'aquifère La Pampa en Argentine (Tanco et Kruse, 2001).

Dans les contextes géo-climatiques du Canada méridional, il existe souvent des liens très marqués entre les processus hydrologiques de surface et l'écoulement de l'eau dans les aquifères, notamment via la recharge et l'émergence de l'eau souterraine dans les rivières (Hayashi et van der Kamp, 2009). Il est donc logique que des liens existent également entre les phénomènes climatiques à grande échelle et les processus liés à l'écoulement souterrain. Même si elles sont probables, ces interactions n'ont toutefois jamais été étudiées dans les régions visées par cette étude. On ne sait pas non plus si les liens mis en évidence ailleurs dans le monde seront également observés dans le contexte géo-climatique canadien. La mise en évidence de liens entre les niveaux des nappes et les fluctuations à long terme des

variations climatiques pourrait permettre d'intégrer les indices climatiques dans le calcul prévisionnel de la recharge des aquifères canadiens.

Ce projet de recherche a pour objectifs de vérifier 1) si les cycles interannuels associés aux indices climatiques sont observables dans les séries temporelles de niveaux d'eau souterraine au Canada et 2) si les périodicités visibles correspondent à celles d'indices climatiques connus. Pour ce faire, l'analyse en ondelettes et l'analyse de corrélation croisée sur des séries de niveaux piézométriques, de précipitations et de températures annuelles de trois régions canadiennes sont utilisées. Les régions visées couvrent une variété de conditions hydrogéologiques et climatiques : l'Île-du-Prince-Édouard (IPE), le sud du Manitoba (MB) près de Winnipeg et l'extrême sud de l'Île de Vancouver (IV). Les quatre indices climatiques sélectionnés pour cette étude sont : l'indice de l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA), l'Oscillation Arctique (OA), l'anomalie de température au-dessus de la zone Niño-3 (ENSO3) et l'indice Pacifique-Amérique du Nord (PAN). Ces indices climatiques ont été retenus en raison des nombreux liens observés avec des variables hydro-climatiques canadiennes rapportés dans la littérature.

Le présent mémoire se divise en trois chapitres. Le premier chapitre (Introduction générale) fait état des connaissances actuelles, présente les données utilisées, les sites à l'étude de même que la méthodologie employée. Le second chapitre est un article à soumettre à la revue *Journal of Hydrology* et qui résume l'ensemble des résultats découlant de l'application des analyses corrélatoires et en ondelettes. Enfin, le chapitre trois (Synthèse et conclusion) propose une réflexion sur les résultats obtenus, sur la méthodologie et sur les avenues prometteuses dans ce champs de recherche. Ce mémoire étant réalisé « par article », certaines informations des chapitres I et II se répètent et pourront paraître redondantes.

1.2. État des connaissances

Ce mémoire s'adresse à des spécialistes de différents milieux n'ayant pas nécessairement de connaissances préalables en sciences de l'atmosphère. Une brève description des indices climatiques, de leur fonctionnement et de leur raison d'être est d'abord présentée.

Les indices climatiques ont été développés dans le but de quantifier les patrons atmosphériques et/ou océaniques dominants et de suivre leur évolution dans le temps et dans l'espace. Ils permettent une meilleure compréhension des phénomènes climatiques en associant ces derniers à des chroniques temporelles. Dans la plupart des cas, ces chroniques correspondent à une mesure physique, telle qu'une anomalie de température de surface marine ou la différence de pression entre deux régions. Pour d'autres indices, le calcul est plus complexe, impliquant par exemple une analyse en composante principale (ACP) pour isoler le phénomène climatique à l'étude. Les phases positives/négatives de ces indices, auxquelles nous reviendrons plus tard, réfèrent au moment où un indice est au-dessus ou en-dessous de la normale pour une période donnée, ce qui s'explique généralement par un changement important ou une inversion dans le patron de circulation atmosphérique et/ou océanique qu'il représente. L'impact de ces indices sur des climats locaux est perceptible dans toutes sortes de variables hydro-climatiques allant des débits totaux de rivières (Ancil et Coulibaly, 2004) aux précipitations (Coulibaly, 2006) en passant par les dates de gel/dégel des lacs et rivières (Bonsal et al., 2006) et le couvert nival (Brown et Goodison, 1996). Parmi les indices climatiques considérés comme les plus influents dans l'hémisphère nord nous pouvons citer l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) et l'Oscillation Arctique (OA) (Marshall et al., 2001).

Un nombre limité d'études se sont penchées sur les liens entre indices climatiques et variables hydrogéologiques. Chen et al. (2004) abordent la question et décèlent un cycle d'une période de 60 ans dans un aquifère du sud manitobain. Les chercheurs suggèrent que ce cycle pourrait être lié à l'Oscillation décennale du Pacifique. Fleming et Quilty (2006) utilisent une méthode d'analyse composite pour investiguer le lien entre le phénomène ENSO et les niveaux d'eau d'un aquifère peu profond de la vallée Fraser en Colombie-Britannique.

L'influence d'ENSO est perçue de manière diffuse et essentiellement durant les saisons hivernale et printanière. Une étude de Luque-Espinar et al. (2008) a abordé le lien entre le climat et les variations de 53 niveaux piézométriques dans l'aquifère Vega de Granada en Espagne. L'emphase était mise sur la recherche de la variabilité des séries hydrogéologiques en utilisant l'analyse spectrale. Hormis la présence de cycles semi-annuels et annuels, des cycles entre 8 et 11 ans et de 38 mois ont été détectés dans la plupart des aquifères. Les auteurs ont par ailleurs établi un lien clair entre l'ONA et la variabilité de l'aquifère Vega de Granada. Tanco et Kruse (2001) ont proposé un modèle simple de prévision des niveaux de nappe phréatique d'un aquifère situé partiellement dans les régions de La Pampa et de Buenos Aires en Argentine en utilisant la température de surface marine comme variable représentative du climat. Le nombre de prédictions justes s'est vu augmenté de plus de 20% en utilisant la température de surface marine. Aux Barbades, Jones et Banner (2003) ont estimé la recharge en mesurant la composition en isotopes d'oxygène de l'eau souterraine et les séries historiques de précipitations. Celle-ci a ensuite été comparée avec la variation d'ENSO sur la période 1960-1998. Les auteurs suggèrent que ces variations dans la recharge sont reliées à l'indice ENSO, même si les corrélations calculées ne sont pas significatives.

Puisque la plupart des travaux de téléconnexion concernent le Canada en entier et non pas des régions spécifiques, cette revue de littérature abordera la problématique en fonction de l'indice climatique plutôt que par région. Étant donnée la similarité entre les indices ONA et OA de même que PAN et ENSO3, les liens seront analysés d'une part pour les indices reliés aux océans Atlantique et Arctique (ONA et OA), et d'autre part pour ceux reliés à l'océan Pacifique (PAN et ENSO3).

1.2.1. Indices ONA et OA

Les liens de causalité de l'ONA ont été investigués sur plusieurs séries environnementales dont la couverture neigeuse (Brown et Goodison, 1996), les débits de rivières (Anctil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et Burn, 2004), les précipitations (Coulibaly, 2006; Qian et al., 2008), la température (Bonsal et al., 2001; Qian et al., 2008) de même que la date de gel/dégel des glaces sur les rivières et les lacs (Bonsal et al., 2006). En rapport à la couverture

neigieuse, l'influence de l'indice ONA serait limitée au sud de l'Ontario et du Québec et au seul mois de décembre (Brown et Goodison, 1996). Pour la date de gel/dégel des glaces, de rares et faibles corrélations sont observées au Canada, tant avec le ONA qu'avec le AO, à l'exception de l'extrême est du Canada où une corrélation significative entre les valeurs printanières de l'ONA et la date du dégel a été trouvée (Bonsal et al., 2006).

Des liens entre l'ONA et la température sont soulignés par Qian et al. (2008) dans la partie est du Canada en général, tandis que Bonsal et al. (2001) identifient la zone d'influence de l'indice ONA au nord-est du pays, soit dans une partie du Québec et des maritimes. En utilisant la méthode des corrélations canoniques, Assani et al. (2008) associent l'influence de l'indice OA à des séries de température de stations situées au sud du Québec. L'impact de l'indice ONA sur les températures semble toutefois moins grand pour la période 1951-1999 que pour la période précédente s'échelonnant de 1914 à 1950.

Dans les travaux de Coulibaly (2006), portant sur la variabilité des précipitations, un changement de patron est observé autour de l'année 1940. Pour la période post-1940, les patrons de précipitation de l'est et même de l'ouest du Canada sont corrélés positivement à l'indice ONA, alors que les trois régions du Canada étudiées (est, centre et ouest) sont positivement corrélées à l'indice AO durant la même période.

Dans l'étude d'Anctil et Coulibaly (2004), les effets les plus perceptibles de l'indice ONA sur les débits de rivière du sud du Québec pour la période 1970-1999 sont observés dans la bande de variabilité de 3-6 ans avec les rivières situées à l'est, tandis que des corrélations significatives avec l'indice AO sont observées dans les deux bandes de variabilité (2-3 ans et 3-6 ans) tant pour les rivières de l'est que de l'ouest de la province. Pour la même période, mais pour l'ensemble du Canada, des corrélations négatives sont observées par Coulibaly et Burn (2004) entre l'indice ONA et les débits de l'est, du centre et de l'ouest du Canada pour la bande de 3-6 ans. Parallèlement, des liens sont établis entre l'indice OA et les débits de l'ouest canadien dans cette même bande de variabilité. Dans la bande 2-3 ans, des relations sont observées entre l'indice ONA et les débits de l'est du Canada et entre l'indice OA et les

débites du centre et de l'ouest. L'influence de l'indice ONA semble donc principalement concentrée au sud-est du Canada.

1.2.2. Indices PAN et ENSO3

Les indices reliés au Pacifique (PAN et ENSO), ont été pris en compte dans des travaux abordant des séries de températures (Bonsal et al., 2001; Stahl et al., 2006), de précipitations (Shabbar et al., 1997a; Stahl et al., 2006; Coulibaly et al., 2006), de débits de rivière (Anctil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et Burn 2004; St-George, 2007), de périodes de gel/dégel des glaces (Bonsal et al., 2006) et de la couverture nivale (Brown et Goodison, 1996). Dans l'étude de Stahl et al. (2006), la phase positive de l'indice PAN est associée à des périodes hivernales chaudes et sèches en Colombie-Britannique tandis que les liens entre l'indice ENSO et les séries hydro-climatiques de la Colombie-Britannique sont moins prononcés. Parallèlement, l'effet des phases positives (El Niño) et négatives (La Niña) associées à l'indices ENSO sur les températures canadiennes est perceptible surtout dans les parties occidentales et centrales du Canada (Bonsal et al., 2001). Des liens avec l'est ont également été trouvés, spécialement lorsqu'un événement El Niño survient durant une phase négative de l'ONA. L'impact de l'indice ENSO sur les températures hivernales, selon les résultats de Shabbar et al. (1997a), est plus évident dans la partie sud du Canada (s'étendant de l'extrême ouest jusqu'au Québec) lors d'anomalies positives ou négatives.

Une étude portant sur la variabilité des précipitations (Coulibaly, 2006) a recensé des corrélations significatives avec la variabilité de l'indice ENSO3 dans l'ouest et le centre du Canada. Par contre, des liens ont été observés entre la variabilité des débits de rivière au Québec, pour la période s'étendant de 1970 à 1999, avec l'indice PAN dans les deux bandes de variabilité (2-3 ans; 3-6 ans), mais également avec l'indice ENSO3 pour les rivières de l'ouest de la province dans la bande 3-6 ans. À l'échelle canadienne, les couplages les plus forts entre les indices associés à l'océan Pacifique et les débits de rivières ont été observés dans les parties orientales et occidentales du Canada pour la période 1970-1999 (Coulibaly et Burn, 2004). Dans les travaux de St-George (2007), des liens forts sont néanmoins révélés

entre l'indice PAN et le débit de la rivière Winnipeg (au centre du Canada). Des relations significatives avec les indices du Pacifique ont donc été trouvées pour l'ensemble du Canada.

Bonsal et al. (2006) ont également observé de fortes corrélations entre les dates de gel/dégel des glaces dans les rivières et lacs canadiens et les indices du Pacifique partout au Canada, en particulier durant les phases positives de l'indice PAN et de l'indice Oscillation Pacifique Décadaire et les phases négatives des indices Oscillation Australe et Pacifique-Nord. Par ailleurs, Brown et Goodison (1996) ont étudié l'influence des indices reliés à l'océan Pacifique sur le couvert nival avec et sans délai (corrélation simple versus corrélation croisée). En ne tenant pas compte de délais, son influence se limitait à l'ouest canadien. Par contre en tenant compte de la présence de délais, des corrélations significatives ont été trouvées dans l'ensemble du Canada.

Il semble que des indices liés à l'océan Atlantique ou Pacifique puissent avoir une influence significative sur des séries temporelles de stations situées à l'autre extrême du pays, parfois même plus forte que celle associée à l'océan le plus proche, en fonction du type d'analyse ou des bandes utilisés. Ceci est vraisemblablement dû au fait que ces courants océano-atmosphériques voyagent sur des milliers de kilomètres et que, avec un certain délai de quelques mois ou années, ceux-ci peuvent se mélanger entre eux et se cumuler, et ainsi accentuer l'effet sur certaines variables. Ces interactions entre les indices climatiques apparaissent comme étant non-linéaires et même chaotiques (Khokhlov et al., 2006) et sont donc difficiles à expliquer ou à prédire.

1.3. Données disponibles et description des sites à l'étude

1.3.1. Données disponibles

Comme l'intérêt de l'étude est d'étudier la variabilité interannuelle des séries temporelles de niveaux d'eau souterraine, les valeurs annuelles moyennes, permettant de déceler la présence de cycles biennaux, conviennent aux besoins des travaux. Le fait d'utiliser les moyennes annuelles ne permet toutefois pas d'observer les cycles de fréquence inférieure à une année.

Les analyses pour ce projet ont été menées sur la période de 1974 à 2005 (32 ans). Le seuil de rejet pour le nombre de données manquantes acceptées a été fixé à un maximum de 48 mois, dont pas plus de 12 données mensuelles manquantes consécutives. Les valeurs absentes ont été comblées en calculant une moyenne mobile avec les valeurs du même mois pour les cinq années précédentes et les cinq années subséquentes. Pour fins de représentation graphique, les séries temporelles ont été standardisées de façon à permettre la comparaison des fluctuations relatives:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1.1)$$

où Z est la variable standardisée, x est la variable brute, μ la moyenne de l'échantillon et σ son écart-type. Les séries temporelles choisies sont illustrées à la figure 1.1. Les indices climatiques sont représentés à la figure 1.2, et les stations piézométriques et météorologiques sont présentées aux figures 1.3 (IPE), 1.4 (MB) et 1.5 (IV).

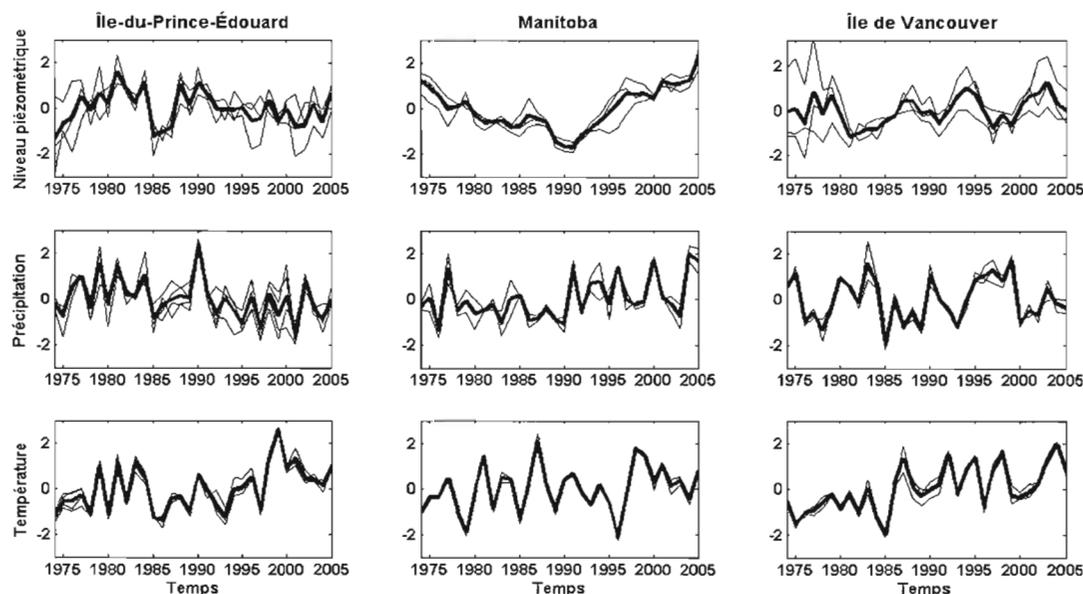


Figure 1.1 Séries de niveaux piézométriques, précipitations et températures pour les régions de l'IPE, MB et IV. Le trait fin représente les séries individuelles de chaque station tandis que le trait gras correspond à la moyenne des stations.

La présence de cycles de l'ordre de 2-3 ans peut être observée dans les trois régions, particulièrement pour les chroniques de précipitations et de températures. Dans les séries piézométriques, et plus spécifiquement pour les régions de la Colombie-Britannique et du Manitoba, des variations de fréquences élevées sont moins présentes que dans les chroniques météorologiques. Les cycles de ces séries semblent de plus longue période. La variation entre les séries à chacune des stations est moins grande pour la température que pour les précipitations. Les niveaux piézométriques, en plus d'incorporer à la fois l'effet des précipitations et des températures, reflètent également le contexte hydrogéologique propre à chaque puits (ex. : profondeur de la nappe, nappe captive ou libre, géologie du site). Ces variables montrent d'ailleurs la plus grande disparité entre la courbe moyenne et les valeurs à chaque station. Les données hydrogéologiques de la région de l'Île de Vancouver montrent les plus grands écarts intra-régionaux particulièrement pour la période 1974-1980.

L'aspect général des quatre chroniques d'indices climatiques (figure 1.2) est très similaire à la différence près que les chroniques temporelles des indices OA et ENSO3 montrent des cycles dont les périodes sont légèrement plus longues que celles des indices ONA et PAN.

Une analyse avec le test non paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) a permis de détecter la présence de tendances dans les chroniques temporelles étudiées (tableau 1.1). Seules les variables météorologiques ont montré des tendances significatives à plus de 95%. Plus spécifiquement, pour les séries dans la région de l'IPE, une baisse dans le régime de précipitations et une hausse des températures sont observées. Au Manitoba, une hausse des précipitations est décelée alors qu'à l'Île de Vancouver, les températures augmentent significativement.

Tableau 1.1 Résultat du test non-paramétrique de Mann-Kendall

<i>Série</i>	<i>n</i>	<i>Test S</i>	<i>Significatif</i>
Séries piézométriques IPE	32	2	Non
Précipitations IPE	32	-130	Oui
Température IPE	32	153	Oui
Séries piézométriques MB	32	64	Non
Précipitations MB	32	128	Oui
Température MB	32	92	Non
Séries piézométriques IV	32	-16	Non
Précipitations IV	32	-30	Non
Température IV	32	229	Oui

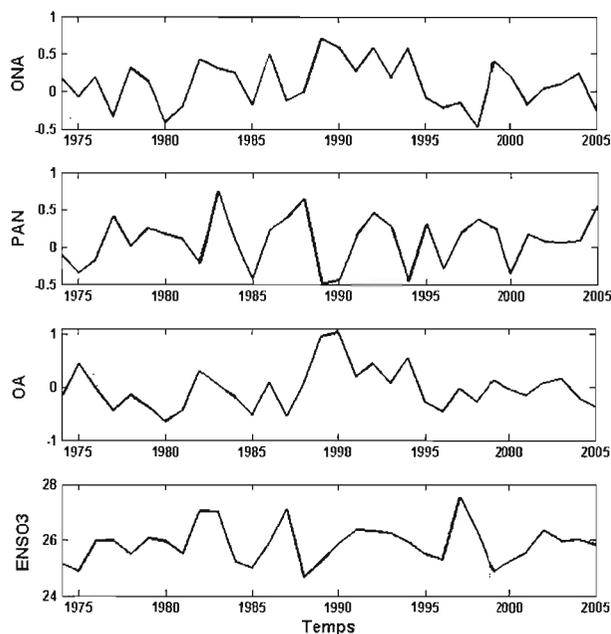


Figure 1.2 Séries temporelles des indices climatiques Oscillation Nord-Atlantique (ONA), Pacifique-Amérique du Nord (PAN), l'Oscillation Arctique (OA) et l'anomalie de température au-dessus de la zone Niño-3 (ENSO3)

1.3.2. Île-du-Prince-Édouard

L'Île-du-Prince-Édouard (IPE) (figure 1.3) est située dans le Bassin des Maritimes. L'aquifère régional est principalement composé de grès du Permien, où l'eau souterraine circule à travers les fractures et les plans de litage et, dans une moindre mesure, dans la matrice poreuse. Cet aquifère est généralement recouvert d'une mince couche (en moyenne 4 m) de till sableux (Rivard et al., 2008). Les puits de Bloomfield, Caledonia et New Dominion (voir figure 1.3 et tableau 1.2) utilisés dans l'étude sont forés dans le grès fracturé et interceptent une nappe libre. La variation interannuelle du niveau moyen de la nappe au cours de la période étudiée est de 2.19 m tandis que la fluctuation moyenne de la nappe pendant une année est de 3.66 m. L'IPE présente les plus grandes variations de niveau piézométrique des trois régions étudiées.

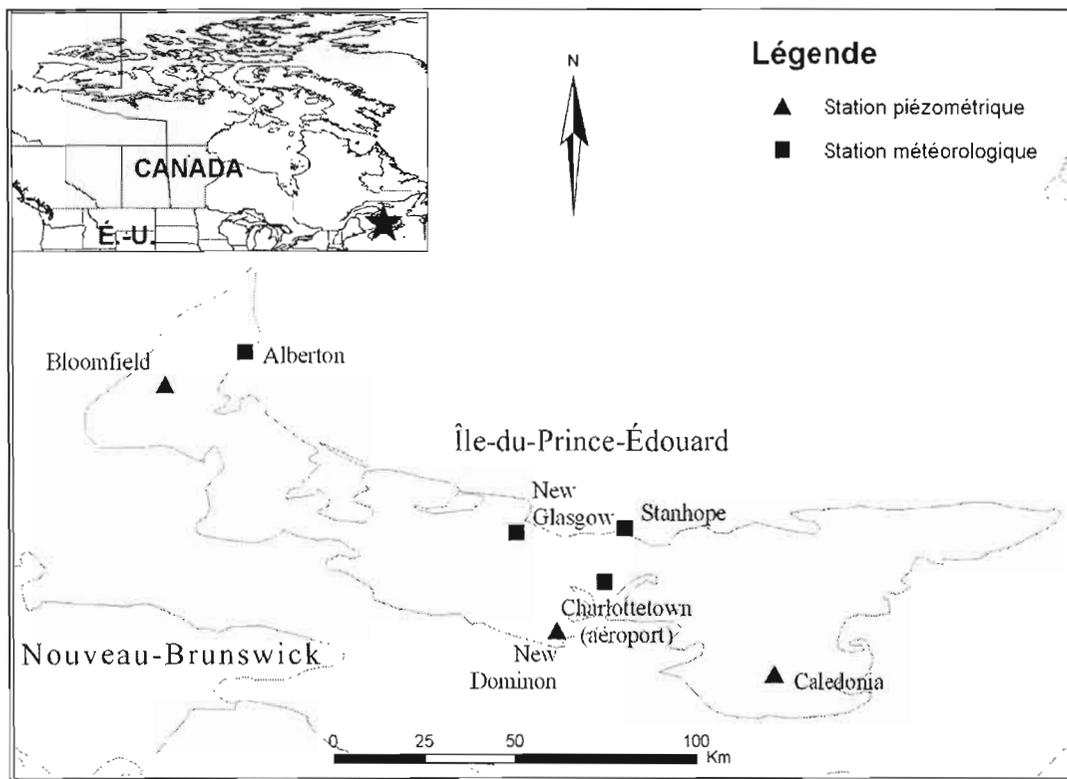


Figure 1.3 Région de l'Île-du-Prince-Édouard (IPE)

Le climat de l'IPE est fortement influencé par les eaux du Golfe du Saint-Laurent et du détroit de Northumberland. Les stations météorologiques situées à l'aéroport de Charlottetown, à Alberton, à Stanhope et à New Glasgow (tableau 1.3) font état de précipitations moyennes de plus de 1100 mm/an pour la période de 1974 à 2005. Les précipitations sont distribuées à peu près également toute l'année avec un pic d'octobre à janvier. Selon la classification climatique actualisée de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007) l'IPE possède un climat tempéré froid, sans saison sèche et avec des étés tempérés. Avec une température de -8°C en janvier et 19°C en juillet, les écarts de température sont moins grands qu'à l'intérieur du continent. Le relief peu accidenté de l'Île fait en sorte que toutes les stations météorologiques se situent entre le niveau de la mer et un peu plus de 50 m d'altitude.

Tableau 1.2 Données relatives aux puits sélectionnés dans les trois régions

<i>Région</i>	<i>Site</i>	<i>Latitude (°)</i>	<i>Longitude (°)</i>	<i>Profondeur (m)</i>	<i>Région hydrogéologique</i>	<i>Matériaux</i>
Île-du-Prince-Édouard	Bloomfield	46,77	-64,22	16,5	Bassin des Maritimes	Grès
	Caledonia	46,06	-62,71	29,3	Bassin des Maritimes	Grès
	New Dominion	46,17	-63,25	36,6	Bassin des Maritimes	Grès
Manitoba	Winkler #5	49,24	-98,00	14	Bassin sédimentaire de l'ouest canadien	Argile, Sable, Gravier
	Sandilands #1	49,38	-96,22	18	Bassin sédimentaire de l'ouest canadien	Sable
	M0-5	49,77	-97,30	44	Bassin sédimentaire de l'ouest canadien	Argile, Till, Shale, Roc
Île de Vancouver	Well #60	48,66	-123,43	16	Cordillère	Till, Sable
	Well #58	48,63	-123,42	15	Cordillère	Sable, Gravier
	Well #194	49,17	-123,84	76	Cordillère	Grès

1.3.3. Manitoba

La zone à l'étude (figure 1.4) se situe dans le bassin sédimentaire de l'ouest du Canada tout juste à l'est de l'escarpement du Manitoba. La stratigraphie de cette partie du bassin contient un substratum composé principalement de shale, de carbonate et de grès datant du Paléozoïque jusqu'au Cénozoïque. Ces roches sont recouvertes d'une couche de sédiments non consolidés d'épaisseur variable. Cette couche de Quaternaire, dont l'épaisseur peut atteindre plus de 100 m, est composée en grande partie de till glaciaire, mais des zones de sédiments glaciolacustres composées de limon, d'argile et de sable sont également présentes (Betcher et al. 1995). Les puits Winkler #5 et Sandilands #1 (tableau 1.2) sont situés dans des aquifères de sable et de gravier. Leur profondeur est de 14 m et 18 m, respectivement. Le puits d'observation MO-5, dont la profondeur est de 44,5 m est situé dans une formation rocheuse datant du Paléozoïque, composée de dolomie, calcaire, shale et grès. Les puits Winkler # 5 et MO-5 interceptent une nappe captive sous une épaisse couche d'argile. Le puits Sandilands #1 serait situé dans une nappe libre selon le log de forage disponible. La variation interannuelle du niveau moyen de la nappe est la plus faible des trois régions, avec 0,72 m/an alors que la fluctuation moyenne au cours d'une année est la plus élevée avec 3,27 m.

Tableau 1.3 Données relatives aux stations météorologiques sélectionnées dans les trois régions

<i>Région</i>	<i>Site</i>	<i>Latitude (°)</i>	<i>Longitude (°)</i>	<i>Précipitations (mm/année)</i>	<i>Température moyenne (°C)</i>
Île-du-Prince-Édouard	Charlottetown	46,29	-63,13	1150	5,4°
	Airport				
	Stanhope	46,42	-63,08	1035	6,0°
	New Glasgow	46,41	-63,35	1245	5,7°
	Alberton l	46,85	-64,02	1065	5,3°
Manitoba	Altona	49,10	-97,55	570	3,8°
	Winnipeg				
	Richardson Airport	49,92	-97,23	530	2,7°
Île de Vancouver	Victoria airport	48,65	-123,43	875	9,9°
	Shawnigan Lake	48,65	-123,63	1235	9,8°
	Nanaimo airport	49,05	-123,87	1155	10,0°

Le climat manitobain est continental et caractérisé par des grands écarts de températures et de précipitations d'une saison à l'autre. En effet, la température moyenne du mois de janvier pour les deux stations de Winnipeg et d'Altona (tableau 1.3) est de -17°C comparativement à 20°C pour le mois de juillet. L'écart entre les températures moyennes annuelles est également élevé ($4,8^{\circ}\text{C}$) relativement aux autres régions. Aussi, près du deux tiers des 550 mm de précipitations totales reçues annuellement tombent entre mai et octobre. Peel et al. (2007) classifient tout de même le climat manitobain comme froid, sans saison sèche et ayant des étés tempérés. L'altitude des stations météorologiques varie de 250 m à 350 m.

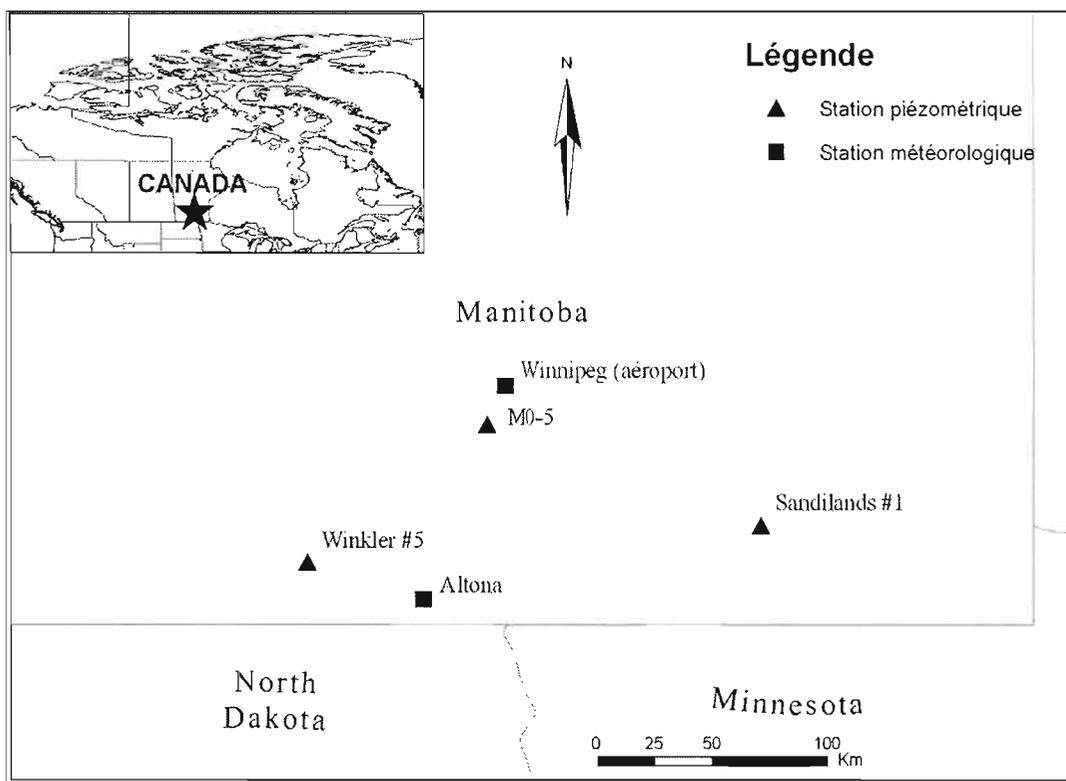


Figure 1.4 Région du Manitoba (MB)

1.3.4. Ile de Vancouver

La zone étudiée (figure 1.5) se retrouve dans la région physiographique des basses-terres de Nanaimo, qui consiste en une mince et longue bande de 280 km où l'élévation maximale ne dépasse pas 600 m. Les îles Gulf, où est situé le puits #194, font également partie de cette région physiographique. La plus grande partie du roc superficiel des basses-terres de Nanaimo provient du Crétacé supérieur et se compose de conglomérat, de shale, de grès et de charbon (Muller et Jeletzky, 1970). Des dépôts d'épaisseurs variables de matériaux non consolidés, surtout du sable et gravier, sont présents le long de la côte. Les puits #58 et #60 sont situés à de faibles profondeurs (15 et 16 m respectivement) dans ces matériaux alors que le puits #194 est situé dans le grès et atteint une profondeur de 76 m. Les trois puits seraient donc probablement situés dans une nappe libre d'après les données disponibles. La variation interannuelle du niveau moyen de la nappe est de 1,44 m, tandis que la fluctuation moyenne au cours d'une année est de 1,92 m.

Tout comme l'Île-du-Prince-Édouard, l'Île de Vancouver jouit d'un climat maritime fortement influencé par les masses d'eau environnantes, les détroits de Georgie, de Juan de Fuca, de la Reine-Charlotte et de Johnston, de même que l'océan Pacifique. En raison de ce climat maritime, l'écart entre les températures mensuelles est assez faible, variant de 3°C en janvier à 17°C en août pour les trois stations à l'étude situées à Shawnigan Lake, Victoria et Nanaimo (Tableau 1.3). Malgré des précipitations importantes, en moyenne de l'ordre de 1100 mm/année, plus de 75% surviennent entre les mois d'octobre et de mai ce qui fait que son climat est classé comme étant tempéré avec des étés chauds et secs (Peel et al., 2007). Les stations météorologiques sont à des altitudes variant de quelques mètres à 138 m (à la station météorologique de Shawnigan Lake).

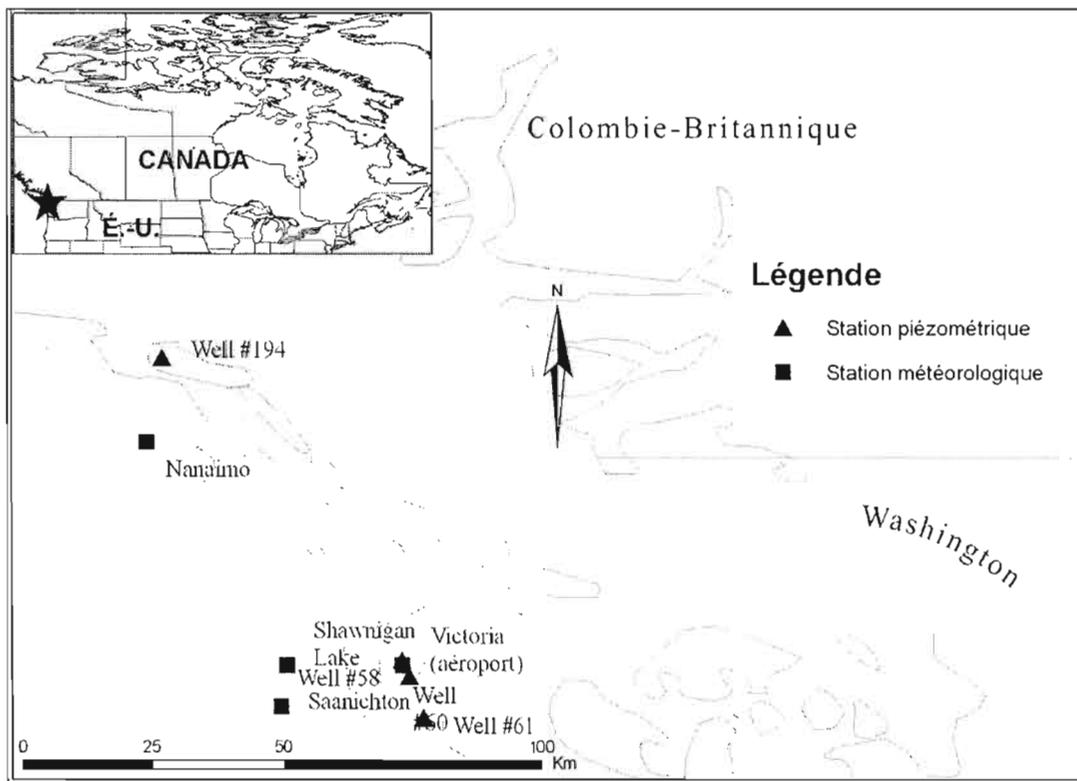


Figure 1.5 Région de l'Île de Vancouver (IV)

1.4. Méthodologie

1.4.1. Analyse en ondelettes

Plusieurs méthodes permettent d'étudier la variabilité de séries temporelles. La transformée de Fourier repose sur l'hypothèse de la stationnarité de la série. Comme beaucoup de séries environnementales sont non stationnaires, dont les séries d'indices climatiques, un des principaux arguments en faveur de l'analyse en ondelettes relève du fait que la stationnarité de la série temporelle n'est pas un pré-requis (Nakken, 1999). Aussi, contrairement à la transformée de Fourier, l'analyse en ondelettes propose une représentation temps-période de la variance de la série temporelle, de sorte que toute discontinuité dans la variabilité peut être identifiée. La description de la transformation continue en ondelettes décrite ici se limite aux besoins de l'étude. Pour une description plus détaillée de la méthode, le lecteur est référé au

guide pratique de Torrence et Compo (1998) ou à son application sur des séries de débits de rivière et de précipitations (Labat et al., 2000). La transformée continue en ondelettes W_n est la convolution d'une série temporelle x_n à l'aide d'une version dilatée ou compressée et translatée d'une ondelette-mère Ψ :

$$W_n^X(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \Psi * \left[\frac{(n'-n)\delta t}{s} \right] \quad (1.2)$$

où n représente le temps localisé, N la longueur de la série de données, s l'échelle de l'ondelette, δt l'intervalle d'échantillonnage des données et l'astérisque le conjugué complexe. Parce que sa forme s'adapte bien aux séries environnementales et hydrométéorologiques, et qu'elle offre une bonne définition dans le domaine fréquentielle (Naken, 1999), l'ondelette de Morlet est généralement préférée à d'autres candidates telles les ondelettes « Mexican Hat » ou Meyer. L'ondelette de Morlet, $\psi_0(\eta)$, est le produit de la superposition d'une fonction sinusoïdale et d'une distribution gaussienne; elle est définie par l'équation suivante :

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-0.25} e^{iw_0\eta} e^{-0.5\eta^2} \quad (1.3)$$

où w_0 est la fréquence et η le temps, tous les deux sans dimension. Pour une valeur de w_0 égale à -6 tel qu'utilisée dans cette étude, l'échelle de périodicité de l'ondelette de Morlet correspond directement à celle de Fourier.

À titre d'exemple, le spectre en ondelettes des températures au Manitoba obtenu avec l'ondelette de Morlet est présenté à la Figure 1.6. Les spectres de toutes les autres séries temporelles utilisées pour l'étude sont présentés en annexe. Le cône d'influence (en ligne pointillée) délimite les parties du spectre pour lesquelles les effets de bordure, induits par la technique du zéro-padding (consistant à prolonger la série de données de zéros) influence la variance représentée. Le spectre de puissance représente donc la variance normalisée, représentée par les différents tons de gris qui correspondent à des valeurs plus grandes que 1,

2 et 4. La noirceur du ton augmente de pair avec la variance normalisée. Puisque les pics observés s'étendent sur plusieurs fréquences, des bandes préférentielles correspondant à un intervalle entre deux périodicités sont utilisées. Les bandes de 2-3 ans et de 3-6 ans, employées dans des travaux similaires (Ancil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et Burn, 2004; Coulibaly, 2006) ont été utilisées dans ce mémoire. Les périodes de plus de six ans ne peuvent être étudiées puisque les effets de bordure deviennent trop importants après cette période pour les séries de données disponibles (32 ans). Un filtre passe-bas est utilisé pour traiter séparément les échelles visées. La série temporelle reconstruite correspond à la somme des parties réelles de la transformée en ondelettes et ce, pour toutes les échelles :

$$x_n = \frac{\delta_j \delta t^{1/2}}{C_\delta \psi_0(0)} \sum_{j=0}^J \frac{\Re\{W_n(s_j)\}}{s_j^{1/2}} \quad (1.4)$$

Le facteur $\psi_0(0)$ supprime l'échelle énergétique tandis que $s_j^{1/2}$ convertit la transformée en ondelettes en densité énergétique. La constante C_δ provient de la reconstruction d'une fonction δ à partir d'une transformée en ondelettes en utilisant la fonction $\psi_0(\eta)$.

Pour représenter graphiquement l'évolution de la puissance de l'ondelette en fonction du temps dans chacune des bandes, on emploie une moyenne de la puissance de l'ondelette entre deux périodes. La moyenne de la puissance de l'ondelette pour des échelles allant de s_1 à s_2 est définie par la somme pondérée de la puissance de l'ondelette :

$$\bar{W}_n^2 = \frac{\partial j \partial t}{C_\partial} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{|W_n(s_j)|^2}{s_j} \quad (1.5)$$

où ∂j est un facteur contrôlant la résolution de l'échelle (0,1 dans ce cas) et C_∂ est un facteur de reconstruction unique à chaque ondelette ($C_\partial=0,776$ pour l'ondelette Morlet).

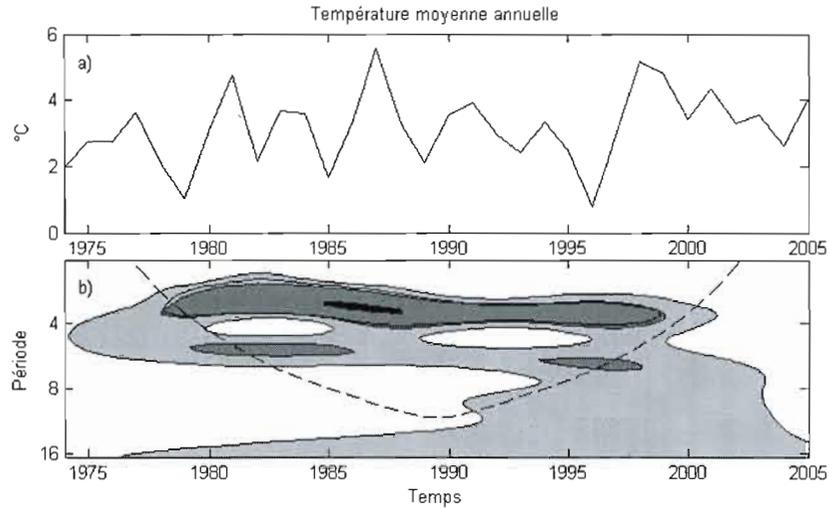


Figure 1.6 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de température au Manitoba

1.4.2. Analyse de corrélation croisée

Pour comparer les séries temporelles entre elles, l'analyse de corrélation croisée est utilisée. La corrélation croisée entre des séries x et y de longueur n est définie par :

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (1.6)$$

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1.7)$$

où C_{xy} est la corrélation croisée, r_{xy} le coefficient de corrélation et σ_x et σ_y sont les écarts-type respectifs des deux séries. L'usage de l'analyse de corrélation croisée sur les valeurs annuelles permet d'obtenir la corrélation maximale, même si celle-ci est décalée d'une ou plusieurs années.

CHAPITRE II

Teleconnections and Interannual Variability in Canadian Groundwater Levels

Le chapitre II présente l'ensemble des résultats des analyses corrélatoires et en ondelettes obtenus dans ce projet de maîtrise. Il est rédigé en anglais sous forme d'article scientifique et sera soumis à la revue *Journal of Hydrology*. Cet article a été rédigé en entier par l'auteur de ce mémoire, Lysandre Tremblay.

L. Tremblay¹, M. Larocque¹, F. Anctil², C. Rivard³

¹ Centre de recherche pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'échelle régionale. Département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère – Université du Québec à Montréal, Québec, Canada

² Chaire de recherche EDS en prévisions et actions hydrologiques. Département de génie civil, Pavillon Adrien-Pouliot, Université Laval, Québec, Québec, Canada

³ Commission géologique du Canada, Québec, Canada

Abstract

Little is known about the impact of climate change on groundwater. The analysis of large-scale climatic patterns such as the well-known El Niño Southern Oscillation Index could provide useful a better comprehension of the causes of recharge variations in regional aquifers and therefore provide a better comprehension of the processes behind the variability of piezometric time series. In this work, wavelet and correlation analyses are used to gain a broader understanding of the inter-annual dynamics of recharge through the use of piezometric records in three Canadian regions, namely southern Prince Edward Island (PEI), southern Manitoba in the vicinity of Winnipeg (MB) and Vancouver Island (VI). Cause and effect linkages between four climatic indices (the El Niño Southern Oscillation represented by the temperature anomaly over the Niño-3 region -ENSO3, the North Atlantic Oscillation-NAO, the Arctic Oscillation-AO and the Pacific-North American pattern-PNA), groundwater

level time series as well as precipitation and temperature time series are investigated. The length of the available historical records of groundwater levels at the three sites is 32 years (1974-2005). This allows variance characterization for periods up to six years. Specific temporal bands averaging the wavelet power spectra in the 2-3 and 3-6 year bands are thus selected. The three Canadian regions studied show drastically different patterns of variability evolution for the hydrogeological records. Groundwater level variability on PEI is mostly influenced by the sea surface anomaly over the ENSO3 in both preferential bands. The influences of the NAO and the AO are most visible in the 3-6 year band, with strong correlations with temperature. The variability of groundwater levels in the MB region is explained in part by precipitation in the 2-3 and 3-6 year bands. For this region, groundwater level variability in both time bands shows connection with the PNA, but is influenced mostly by precipitation. In the VI region, ENSO3 is the predominant pattern for groundwater variability in the 3-6 year band, whereas the NAO best describes it in the 2-3 year band.

2.1. Introduction

Groundwater is the main source of supply for drinking water (Environment Canada, 2008) of almost 9 million Canadians. Yet the characteristics of Canadian aquifers remain largely unknown despite recent efforts (Grasby et al. 2009; Côté et al. 2006; Kennedy and Woodbury 2003; Chen et al., 2004; Nastev et al. 2006; Rivard et al., 2008; Rivard et al., 2009a) and their links with climate even more so. Recent studies on Canadian aquifers have also focused on the potential impacts of climate change on groundwater and recharge through the identification of long-term trends of historical groundwater-related time series (e.g. Rivard et al., 2009b) or through the simulation of climate change scenarios with groundwater flow models (Allen et al., 2004; Scibek et al., 2007; Jyrkarma et Sykes, 2007). Nevertheless, processes affecting recharge over regional aquifers are still not well understood and fluctuation cycles are very difficult to predict. Large-scale climatic patterns such as the El-Niño Southern Oscillation have been shown to exhibit low-frequency fluctuations (Hurrel and Van Loon, 1997; Bonsal et al., 2001). These could provide useful insights in the dynamics of groundwater level fluctuations over time. The works of Coulibaly et al. (2000) and Karla and Ahmad (2009) are examples of mathematical models resorting to oceanic-atmospheric oscillations for long-range streamflow forecasts. Similar models could be

built for predicting groundwater fluctuations or be integrated into coupled atmosphere-surface water-groundwater models for the estimation of future recharge. In a climate change context, improving the understanding of linkages among different components of the hydrological cycle will allow better forecasting and adaptation abilities.

Many authors have identified teleconnections between hydroclimatic variables and global climatic patterns in Canada, focusing on streamflow (Anctil and Coulibaly, 2004; Coulibaly and Burn, 2004; Déry and Wood, 2004 St-George, 2007), temperature (Shabbar et al., 1997b; Bonsal et al., 2001; Stahl et al., 2006) and precipitation (Shabbar et al., 1997a; 1997b; Coulibaly, 2006; Stahl et al., 2006). Precipitation and temperature are key information in linking large-scale climatic patterns to hydrogeologic variables such as recharge. Along with extraterrestrial incoming radiation, temperature has a major effect on evapotranspiration (Oudin et al., 2005) and snow cover. Precipitation is an indirect component for the groundwater reservoir budget, through infiltration. It is therefore expected that the influence of climatic patterns on aquifer reservoirs would be visible on groundwater levels. Links between groundwater levels and climatic indices have been investigated in different parts of the world (Tanco and Kruse, 2001; Jones and Banner, 2003; Luque-Espinar et al., 2008) and in some parts of Canada (Chen et al., 2004; Fleming and Quilty, 2006). Chen et al. (2004) suggest a connection between a 60-year cycle found in a southern Manitoban aquifer and the Pacific decadal oscillation. Using composite analysis, Fleming and Quilty (2006) revealed linkages between ENSO and precipitation records in the lower Fraser Valley of British Columbia even though significant linkages could not be established with groundwater levels.

Variability of a time series can be assessed by numerous methods among which the Fourier and wavelet transforms. The Fourier transform is based on the assumption that the signal is periodic in nature and of infinite length (Nakken, 1999). The method is therefore inadequate to translate non-stationary finite time series, from the spatial domain to the frequency domain. For instance, Higuchi et al. (1999) and Nakken (1999) have shown that the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Southern Oscillation index (SOI) records are non-stationary, as the variance of the time series changes in intensity as a function of time. Likewise, Canadian interannual streamflow and precipitation records were also found to be

non-stationary (Anctil and Coulibaly, 2004; Coulibaly and Burn, 2004; Coulibaly, 2006). Moreover, unlike wavelet transforms, the Fourier transform does not allow the analysis of frequency as a function of time. Breaks, discontinuities, or trends in the time series therefore cannot be detected easily. Since the hydro-climatic and climate anomalies time series used in this study are non-stationary, the wavelet transform is hence privileged (Labat et al., 1998; Higuchi et al., 1999; Nakken, 1999).

The objective of this study is 1) to analyse if inter-annual cycles observed in large scale climatic patterns can be observed in groundwater level time series and 2) to determine if the visible periodicities correspond to those of known climatic indices. To do so, the variability of groundwater levels was linked to selected annual climatic indices, precipitation and temperature records in three Canadian regions: Prince Edward Island (PEI), south-central Manitoba in the vicinity of Winnipeg (MB) and the southernmost part of Vancouver Island (VI). The four climatic indices used in this study are the North Atlantic Oscillation (NAO), the Pacific/North American pattern (PNA), the Arctic Oscillation (AO) and the sea-surface temperature anomaly over the Niño-3 region (ENSO3). These indices are known to have a significant importance in the northern hemisphere and particularly in Canada. Both wavelet and correlation analysis are used to analyse the time series.

2.2. Climatic indices

The NAO is known to be one of the most predominant causes of variability in the northern hemisphere (Wallace and Gutzler, 1981; Barnston and Livezey, 1987; Marshall et al., 2001). It is a north-south oriented large-scale anomaly with two pressure centers of opposite signs, one located over southern Greenland, where a semi-permanent low-pressure system is present (Icelandic Low), and the other is situated across central latitudes of the North Atlantic between 35°N and 40°N (Azores High). When the NAO is in a positive phase, the Icelandic low is abnormally deep, resulting in cold arctic air moving southwards towards eastern Canada (Hurrell, 1995). Although it shows a predominance in the winter, where it accounts for approximately 37% of 500 hPa height variability over the Atlantic (Wallace and Gutzler, 1981; Barnston and Livezey, 1987; Marshall et al., 2001), the NAO is a leading pattern

throughout the year in the northern hemisphere (Barnston and Livezey, 1987; Bonsal et al., 2001). There is an ongoing debate whether the NAO is a regional expression of the AO (Wallace, 2000; Marshall et al., 2001), also known as the Northern Hemisphere Annular mode (NAM), or a different measure of the same phenomenon (Greatbatch, 2000). Since links between the AO and Canadian climate were also highlighted by several authors in regard to streamflow (Anctil and Coulibaly, 2004; Coulibaly and Burn, 2004; Déry and Wood, 2004 and precipitation (Coulibaly, 2006), and sometimes with even greater correlations than the NAO, the former index will also be considered independently in this study.

The PNA is believed to be the predominant mode of low-frequency variability over western Canada. During the cold season (positive phase), when the zonally-oriented atmospheric pattern is a dominant mode of variation, it features below-average geopotential heights south of the Aleutian Islands (Aleutian low) and over south-eastern United States and above-average heights over the mountainous region of western North America in the vicinity of the Canada/United States border (Barnston and Livezey, 1987). Its positive phase is associated with warmer temperatures in western Canada.

The ENSO3 phenomenon is considered one of the most influential teleconnection patterns on a global scale and was therefore included in the present study. ENSO consists of both an oceanic (El Niño/La Nina) and an atmospheric signature (Southern Oscillation) characterized as a periodic reversing of the surface air pressure pattern across the tropical Pacific Ocean. The index used herein to describe the phenomenon corresponds to the annual value of monthly mean equatorial Pacific sea surface temperature anomaly (SSTA) averaged over the Niño-3 region (5°N-5°S; 90°W-150°W).

ENSO3 events have been shown to influence hydro-climatic data variability mostly in western and central Canada (Bonsal et al., 2001) and to a lesser extent in the eastern part of the country (Anctil and Coulibaly, 2004; Coulibaly and Burn, 2004). The same phenomenon for indices related to the Pacific Ocean has also been associated with other environmental records such as the ice break/freeze-up date across Canada (Bonsal et al., 2006) and the snow

cover extent in western Canada (Brown and Goodison, 1996). The PNA is also principally associated with the western (Stahl et al., 2006 for precipitation) and central parts of Canada (St-George, 2007 for streamflow) although strong correlations were found as far as Eastern Québec (Anctil and Coulibaly, 2004) and Eastern Canada (Coulibaly, 2004; Bonsal et al., 2006) for streamflow. The effects of the NAO are believed to be observed mostly in eastern Canada (Qian et al., 2008), but significant linkages were also found in western and central Canada with both precipitation (Coulibaly, 2006) and streamflow (Coulibaly and Burn, 2004) records. The seasonal influence of the AO on air surface temperature was mapped by Buermann et al. (2003) revealing positive correlation in Ontario and Québec in fall, and negative relations in the spring. Summer temperatures in Alberta and parts of British Columbia and Saskatchewan were positively correlated with the AO. Annual assessments of variability across Canada showed the AO to impact mostly streamflow variability in western and central Canada (Coulibaly and Burn, 2004) and precipitation variability across Canada (Coulibaly, 2006).

2.3. Study areas and datasets

2.3.1. Study areas

The selection of regions investigated was driven primarily by the availability of the various datasets and by the desire to include zones in eastern, central and western Canada. The spatial distribution of piezometers and meteorological stations used in the work is shown in Figure 2.1. In Tableau 2.1, piezometric stations are classified by hydrogeological region accordingly with Natural Resources Canada's classification (Natural Resources Canada, 2007).

Tableau 2.1 Selected wells for the three study areas

<i>Location</i>	<i>Site</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Depth</i>	<i>Hydrogeological region</i>	<i>Material</i>
Prince-Edward Island	Bloomfield	46.77	-64.22	16,5	Maritimes Basin	Sandstone
	Caledonia	46.06	-62.71	29,3	Maritimes Basin	Sandstone
	New Dominion	46.17	-63.25	36,6	Maritimes Basin	Sandstone
Manitoba	Winkler #5	49.24	-98.00	14	Western Canada Sedimentary Basin	Clay, Sand, Gravel
	Sandilands #1	49.38	-96.22	18	Western Canada Sedimentary Basin	Sand
	M0-5	49.77	-97.30	44	Western Canada Sedimentary Basin	Clay, Till, Shale, Bedrock
Vancouver Island	Well #60	48.66	-123.43	16	Cordillera	Till, Sand
	Well #58	48.63	-123.42	15	Cordillera	Sand, Gravel
	Well #194	49.17	-123.84	76	Cordillera	Sandstone

PEI's climate is marked by the strong influence of the surrounding waters of the Gulf of St. Lawrence. Monthly temperatures range from -8°C in January to 19°C in July while precipitation averages 1100 mm annually. The Koppen-Geiger climate classification (Peel et al., 2007) categorizes the Island's climate as cold, with warm summers and without a dry season. PEI is enclosed in an area known as the Maritimes Basin. The hydrostratigraphy of the Island is divided into three sections, from base to top: a basement complex composed of low-permeability Precambrian rocks, fractured porous Permian rocks including mainly sandstone, and a thin Quaternary layer composed predominantly of sandy till (Rivard et al., 2008). Wells are completed into fractured sandstone overlain by sandy till. All wells are therefore under unconfined conditions.

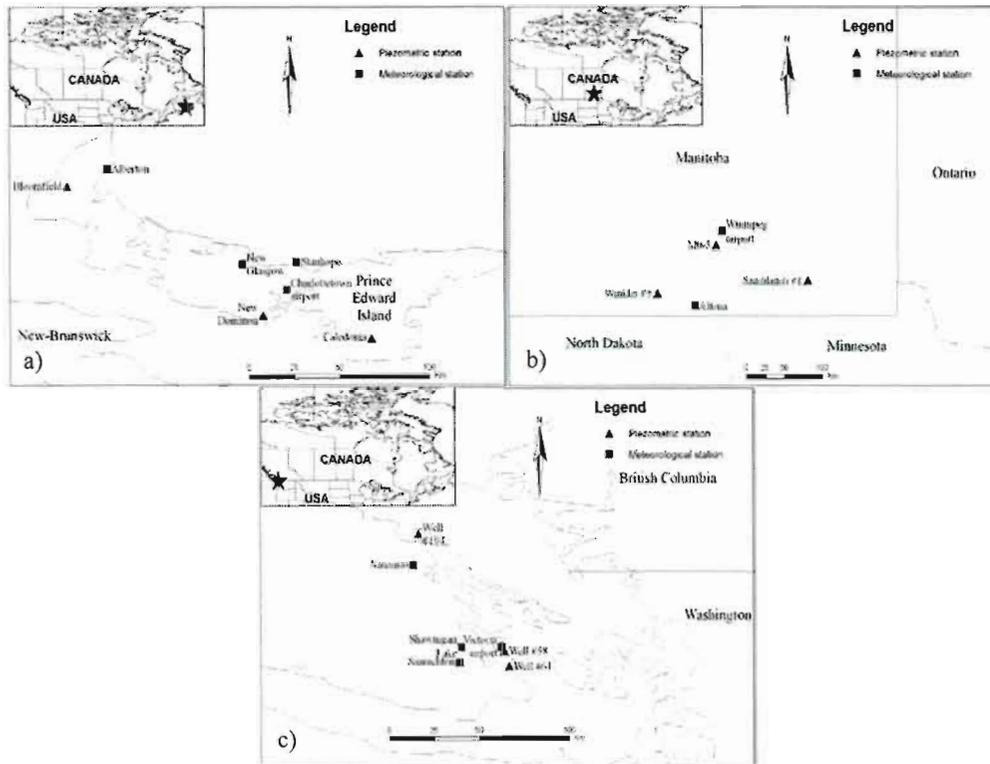


Figure 2.1 Study areas and spatial distribution of stations in a) PEI, b) Manitoba (MB) and c) Vancouver island (VI)

MB is characterized by a continental climate with large seasonal variations in both temperature and precipitation. The mean monthly temperatures average a low of -17°C in January and a high of 20°C in July. Total precipitation in the MB area is approximately 550 mm/year with roughly two thirds occurring between May and October. MB's climate is considered cold without a dry season and with warm summers by the Kopper-Geigen Climate classification (Peel et al., 2007). The study area, part of the Western Canada sedimentary basin, is located slightly to the east of the Manitoba escarpment. Cenozoic and Mesozoic sandstones and carbonates are overlain by variable thicknesses of Quaternary deposits (up to 100 m) that are mostly composed of glacial till. Sand and gravel aquifers are also common in south-central Manitoba, occurring mostly as lenses at the bedrock-till interface. Sand and gravel aquifers can also be overlain by thick glaciolacustrine clays, such as for two of the selected wells for this study (Betcher et al., 1995). The third taps water circulating into

limestone or dolomite and conditions would likely be confined. Well depths vary between 14 and 44 m.

The stations used for the VI study area lie in the Nanaimo Lowland physiographic region, which also includes the Gulf Islands in the western part of the Georgia Strait. The area surrounding the Georgia Strait between Vancouver Island and Mainland British Columbia benefits from a temperate climate with warm winters and dry summers (Peel et al., 2007). About 75% of the 1100 mm/year average precipitation falls between October and March, while monthly annual temperatures vary from 3°C in January to 17°C in August. The major rock type found in the Nanaimo Lowlands is the Upper Cretaceous carbonate-clastic sediments part of the Nanaimo Group composed of conglomerate, sandstone, shale and coal (Muller and Jeletzky, 1970). The three wells are likely under unconfined conditions based on available logs. The first two wells are shallow with depths ranging from 15 to 16 m, while the bedrock well is 76 m deep.

2.3.2. Datasets

Since interannual variability is sought, mean annual values which allow us to study variability from 2 years onward, fulfill the needs of this work. All analyses were conducted over a period of 32 years (1974-2005). A maximum missing period totalling four years was used as a rejection threshold for the data while consecutive absent monthly data could not exceed 12 months. Missing values were filled with a moving average, using the corresponding monthly values of the five previous and subsequent years; a minimum of six out of the ten entries had to be available in order to fill the gap. Figure 2.2 represents all the hydro-climatic records used in this study. The Mann-Kendall non-parametric test (Mann, 1945; Kendall, 1975) was used to detect trends in the datasets used. 4 out of the 9 environmental datasets used showed significant trends within a 95% confidence. The datasets illustrated have been standardized using standard scores, or z-values, for the sake of comparison:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2.1)$$

where z is the standardized variable, x the raw variable, μ the sample mean and σ its standard deviation.

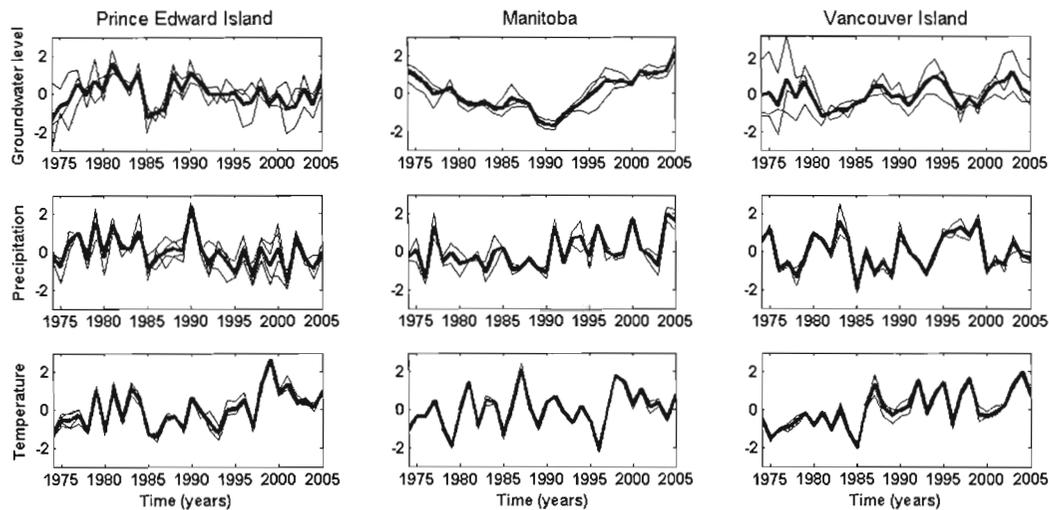


Figure 2.2 Standardized time series of groundwater levels, precipitation and temperature from 1974 to 2005. The average of datasets (bold line) and the record at each station (fine line) are represented

Groundwater level records originate from provincial monitoring well programs (Table 2.1). In addition to the selection criteria described in the present section, well datasets had to be exempt from drastic changes that could be imputed to pumping or instrumental changes in order to be retained. Mean interannual variations of monthly groundwater levels were calculated for each region. The largest inter-annual groundwater level amplitude is observed in MB with 3.27 m, compared to 2.19 m in PEI and 1.92 m in VI. MB also shows the smallest mean monthly variation within a year (0.52 m) compared to PEI (3.21 m) and VI (0.80 m).

Records from selected meteorological stations were retrieved from the National Climate data and Information Archive (Environment Canada, 2008). The selected stations records contain both mean monthly temperatures and mean monthly total precipitation. Inter-annual variation of precipitation is highest on VI with values differing by as much as 839 mm/y. In PEI, the

annual precipitation values also vary significantly (up to a 685 mm/y difference) while the variation is smallest in MB (less than 339 mm/y). The continental southern Manitoban climate shows the greatest range of annual temperature values over the 32 years record with 4.8°C, followed by the coastal climates of PEI (3.2°C) and VI (2.2°C).

Figure 2.3 illustrates the climatic anomaly datasets. In addition to links previously mentioned between the AO and the NAO, ENSO is thought to affect the NAO with a time delay averaging two years (Mokhov and Smirnov, 2006), as well as the AO (Khokhlov et al, 2006) with a 18 month lag. It is also believed to be correlated to the PNA (Shabbar, 2006). Figure 2.3 illustrates the temporal variability of the four climatic indices for the study period. The general aspect of the datasets is very similar among the climate indices. AO and ENSO3 show slightly longer periods than NAO and PNA.

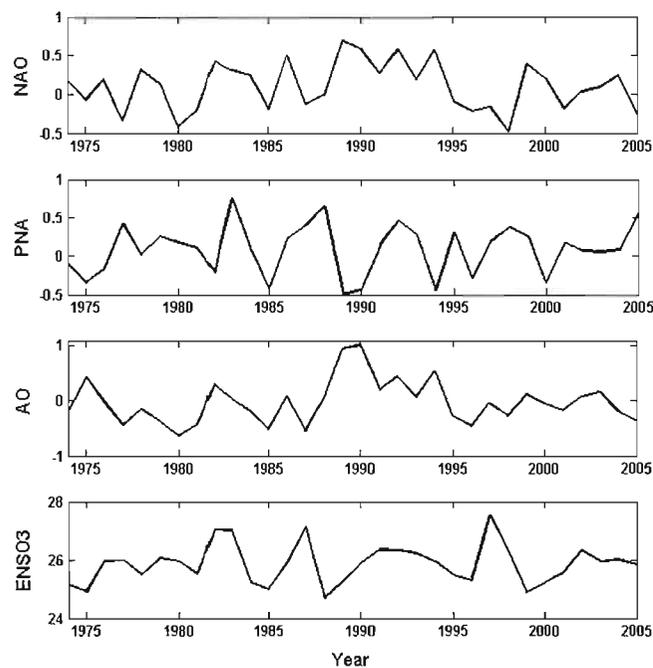


Figure 2.3 Times series of the North Atlantic Oscillation (NAO), the Pacific/North American pattern (PNA), Arctic Oscillation (AO) and the temperature anomaly over the Nino-3 region (ENSO3) from 1974 to 2005

2.4. Methodology

The wavelet analysis described herein is restrained to the needs of this study. For a detailed description of the wavelet analysis, readers are referred to the exhaustive work of Torrence and Compo (1998) on geophysical time series.

Continuous wavelet transform W_n consists of the convolution of the data sequence x_n with a scaled and shifted versions of the mother wavelet Ψ :

$$W_n^X(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \Psi * \left[\frac{(n'-n)\delta t}{s} \right] \quad (2.1)$$

where n is the localized time index, N is the data series length, s is the wavelet scale, δt is the sampling interval, and the asterisk represents the complex conjugate. The Morlet wavelet was favoured over other candidates due to its good definition in the frequency domain and its similarity with the signal pattern of the environmental time series used. Morlet, a complex wavelet defined as a product of superposition of a sine wave and a Gaussian distribution, is defined by the following equation:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-0.25} e^{iw_0\eta} e^{-0.5\eta^2} \quad (2.2)$$

where w_0 is the dimensionless frequency and η the dimensionless time variable. For $w_0 = -6$, as used herein, the Morlet wavelet scale is equivalent to the Fourier period.

As an example, the normalized local wavelet power spectrum of temperature for the MB study area is represented in Figure 2.4 using the Morlet wavelet. The cone of influence delimits parts of the power spectrum for which zero padding (i.e., extending the time series with zeros) may have influenced the reported variance. Contours of shades of grey represent incremented normalized variances in excess of 1, 2, and 4. Because the peaks of variances span multiple frequencies, the use of preferential bands is privileged. These bands correspond to the variability average between two periods and are referred to as year bands. The chosen

bands are the 2-3 and 3-6 year bands used in similar studies on hydrological and meteorological time series (e.g., Anctil and Coulibaly, 2004; Coulibaly and Burn, 2004; Coulibaly, 2006).

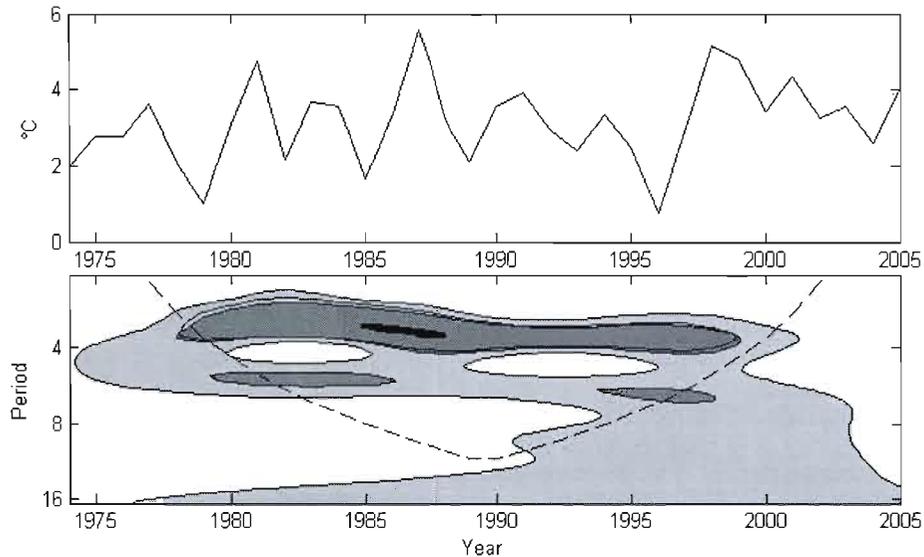


Figure 2.4 Mean annual values of temperature in Southern Manitoba a) time series, b) wavelet spectrum

The total record length of 32 years prevents the study of periodicities longer than six years, when edge effects become too important for results to be significant. A band-pass filter was used to single out the chosen year bands (Equation 2.3). The reconstructed time series correspond to the sum of the real part of the wavelet transform over all scales:

$$x_n = \frac{\delta_j \delta t^{1/2}}{C_\delta \psi_0(0)} \sum_{j=0}^J \frac{\Re\{W_n(s_j)\}}{s_j^{1/2}} \quad (2.3)$$

The factor $\psi_0(0)$ removes the energy scaling, while the $s_j^{1/2}$ converts the wavelet transform to an energy density. The factor C_δ is a constant coming from the reconstruction of a δ

function from its wavelet transform using the function $\psi_0(\eta)$. The scale-average wavelet power of scales ranging from s_1 to s_2 is defined as the weighted sum of the wavelet power:

$$\bar{W}_n^2 = \frac{\partial j \partial t}{C_\partial} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{|W_n(s_j)|^2}{s_j} \quad (2.4)$$

where ∂j is a factor controlling the scale resolution (0.1 in this case) and C_∂ is a reconstruction factor unique to each wavelet ($C_\partial=0.776$ for the Morlet). The scale-averaged wavelet power allowed the graphical representation of the wavelet strength in function of time.

To look for input-output links between the natural time series (i.e. time series of untransformed annual data) and band-passed time series, cross-correlation analysis was conducted in the study. Cross-correlation between time series x and y of length n is defined as:

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (2.5)$$

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.6)$$

where C_{xy} is the cross-correlogram, r_{xy} is the cross-correlation coefficient, σ_x and σ_y are the standard deviations of the time series and k the maximum lag. The chosen time series represent physical phenomena that can be delayed by several years. Cross-correlation provides information on the delays between time series and the maximum correlation value.

2.5. Results and Discussion

All the results for the 2-3 year band, the 3-6 year band and the natural series, the untransformed dataset, are presented in this section. Positive correlations between

groundwater levels and precipitation and negative correlations between groundwater levels and temperature are expected. We also expect linkages among groundwater levels of MB and VI and Pacific-related climate indices, and relations with hydrogeologic records of PEI and the NAO index.

2.5.1. Correlations among climatic indices

Table 2.2 shows the cross-correlation climatic indices for the natural series and for both the 2-3 and 3-6 variability bands. The NAO and the AO are strongly connected (from 0.76 to 0.77) for the period studied, as expected. The value is similar to the one of 0.69 calculated by Thompson and Wallace (1998) between the same indices but for a different time period of record. The analysis also reveals that the PNA exhibits a delay of one year with respect to ENSO3 to which it is strongly related (0.63). Similarly, the one-year delay was also reflected in the 2-3 (0.49) and 3-6 year bands (0.71). This linkage has also been reported by Yarnal and Diaz (1986) and Baldwin and O'Sullivan (1995). Two significant negative correlations were also observed: one linking ENSO3 and NAO in the 2-3 year band (-0.55) and the other the AO and PNA in the 3-6 year band (-0.5).

Tableau 2.2 Maximum cross-correlation values for natural series, the 2-3 and the 3-6 year bands of variability for the four climatic indices

	<i>PNA</i>	<i>AO</i>	<i>ENSO3</i>
Natural series			
NAO	-0.31	0.77	0.01
PNA	-	-0.40	0.63 ⁽¹⁾
AO	-	-	-0.01
2-3 year band			
NAO	-0.36	0.76	-0.55 ⁽¹⁾
PNA	-	-0.28	0.49 ⁽¹⁾
AO	-	-	0
3-6 year band			
NAO	-0.33	0.77	-0.09
PNA	-	-0.50	0.71 ⁽¹⁾
AO	-	-	-0.15 ⁽¹⁾

⁽¹⁾: Time delay in years between datasets.

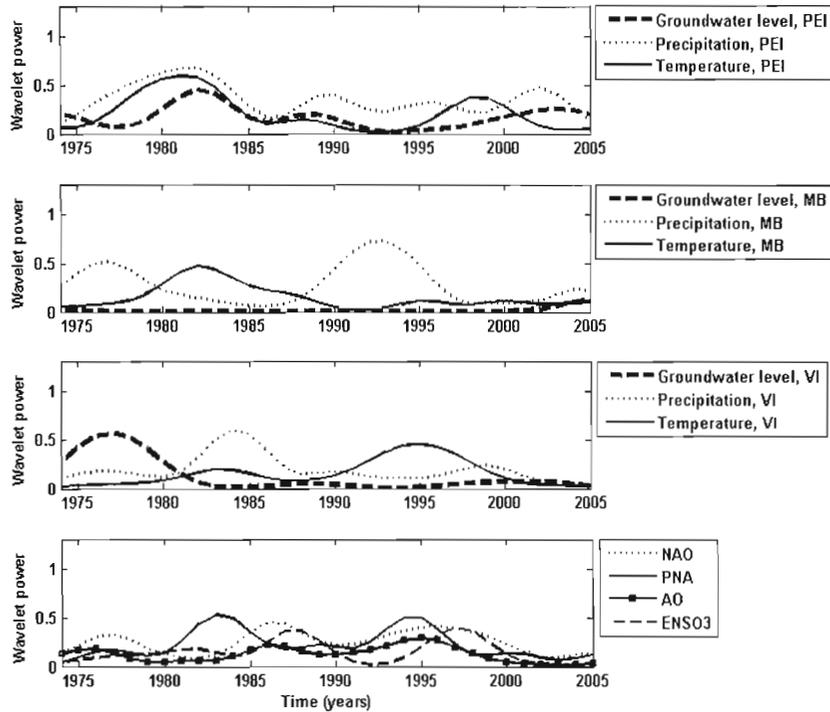


Figure 2.5 Scale-averaged wavelet power for selected series in the 2-3 year band of variability

2.5.2. Cross correlations between groundwater levels, climatic variables and climatic indices time series

For PEI, figures 2.5 and 2.6 illustrate a moderate level of variance of groundwater level in both bands with peaks in the early 1980s in the 2-3 year band and the mid-1980s in the 3-6 year band. Table 2.3 presents cross-correlations for natural series, the untransformed datasets, and for the 2-3 and the 3-6 year bands of variability between climatic indices, groundwater levels, precipitation and temperature. As expected, natural series of groundwater levels have a positive correlation with precipitation (0.48) while it also has a positive correlation with temperature (0.33). The interconnections of groundwater level records with climatic variables are complex, as reflected by the similar influence of precipitation and temperature in the 2-3 year band (0.39 and 0.37 correlation respectively); temperature also shows a similar correlation coefficient in the 3-6 year band (0.40). Thus, both variables appear to have a significant influence on groundwater level variability. The counterintuitive positive correlation between temperature and groundwater records could be explained by

precipitations events generally associated with warmer temperatures, thus the similarity in signs for the two climate variables. No delay is observed between groundwater levels and the climatic variables, probably because of the unconfined aquifer which transfers recharge within a one year period.

Tableau 2.3 Maximum cross-correlations for natural series and for the 2-3 and the 3-6 year bands of variability between climatic indices, precipitation, temperature, and groundwater levels for Prince Edward Island

	<i>Groundwater level</i>	<i>Precipitation</i>	<i>Temperature</i>
Natural series			
NAO	0.07 ⁽¹⁾	0.15 ⁽¹⁾	-0.13
PNA	0.23	-0.05	0.22
AO	0.16	0.19 ⁽¹⁾	-0.07
ENSO3	0.37 ⁽¹⁾	-0.24 ⁽²⁾	0.30 ⁽¹⁾
Groundwater level	-	0.48	0.33
2-3 year band			
NAO	-0.25	0.21 ⁽¹⁾	-0.08
PNA	0.26	0.15 ⁽¹⁾	0.28
AO	0.07	-0.25	-0.16
ENSO3	-0.34	-0.10	-0.42
Groundwater level	-	0.39	0.37
3-6 year band			
NAO	-0.13	0.06	0.51 ⁽¹⁾
PNA	0.40 ⁽¹⁾	-0.18	0.21
AO	0.07	0.44 ⁽¹⁾	0.71 ⁽¹⁾
ENSO3	0.54 ⁽¹⁾	0.11	0.38 ⁽¹⁾
Groundwater level	-	0.21	0.40

⁽¹⁾, ⁽²⁾: time delay in years between datasets. Significant correlations are highlighted in bold.

With approximately 550 mm/y of precipitation, the region of Manitoba is drought-prone and much dryer than the other two study areas. Table 2.4 shows that cross-correlation analysis values for both bands and for natural series are moderately high to low. Delays vary from zero to one year for temperature and precipitation. It is likely that for both cases, the effect of climatic variables on groundwater levels is of several months which could be explained by

the fact that two of the three MB wells are under confined conditions. Among natural series, a moderate positive correlation between precipitation and temperature similar to the one described in PEI is observed. The correlation values observed in the variability bands are weak except for the negative linkage (-0.36) between precipitation and groundwater level in the 3-6 year band. Figures 2.5 and 2.6 show that the periods of higher variability of temperature correspond to low variability periods for precipitation and vice-versa.

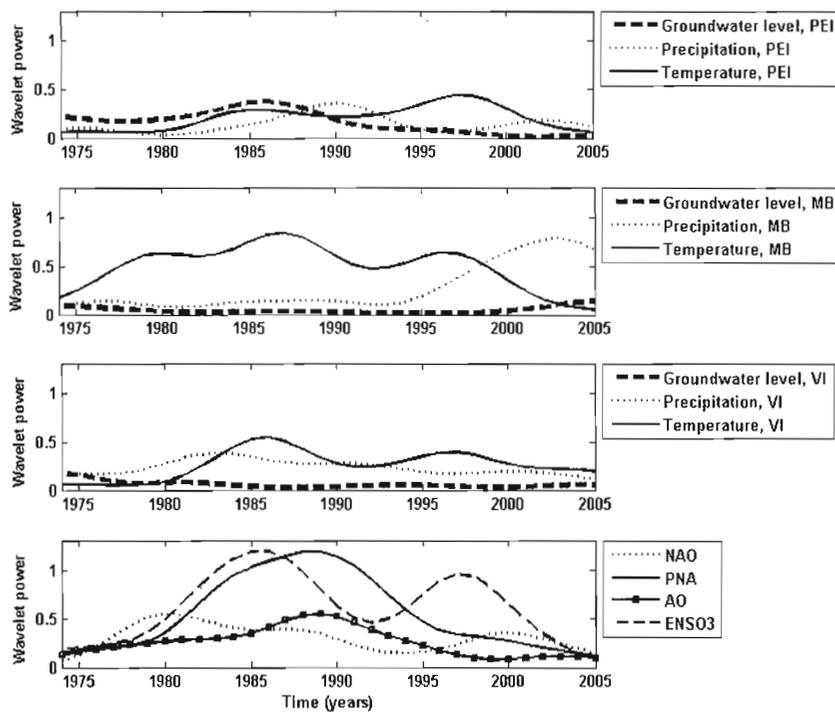


Figure 2.6 Scale-averaged wavelet power for selected series in the 3-6 year band of variability

Tableau 2.4 Maximum cross-correlations for natural series and for the 2-3 and the 3-6 year bands of variability between climatic indices, precipitation, temperature, and groundwater levels for Manitoba time series

	<i>Groundwater level</i>	<i>Precipitation</i>	<i>Temperature</i>
Natural series			
NAO	-0.43	-0.22	-0.19
PNA	0.12	-0.06	0.42
AO	-0.36	-0.25	-0.05
ENSO3	-0.08	0.20 ⁽²⁾	0.38 ⁽¹⁾
Groundwater level	-	0.36 ⁽¹⁾	0.07
2-3 year band			
NAO	-0.07	-0.30	-0.22
PNA	0.42	0.28 ⁽¹⁾	0.38
AO	-0.12	-0.25	0.07 ⁽¹⁾
ENSO3	0.13 ⁽¹⁾	-0.14 ⁽¹⁾	0.38 ⁽¹⁾
Groundwater level	-	0.18 ⁽¹⁾	0.13
3-6 year band			
NAO	0.19 ⁽¹⁾	0.35 ⁽¹⁾	-0.35
PNA	0.42	-0.09	0.46
AO	-0.17	-0.46	-0.26
ENSO3	0.26	-0.34	0.45 ⁽¹⁾
Groundwater level	-	-0.36	0.21 ⁽¹⁾

⁽¹⁾, ⁽²⁾: time delay in years between datasets.

The effect of climatic variables in the VI study area on groundwater levels (Table 2.5) is only significant in the 3-6 year band of variability, where temperature (-0.56) and precipitation (0.38) exhibits moderately high connections. The sign of both linkages are in accordance with the initial predictions. The groundwater level variability shows a lag of two years compared to temperature and a lag of one year with precipitation in the 3-6 year band. The variability of groundwater shows a peak from 1974 to the late 1970s in the 3-6 year band. Precipitation and temperature show a higher level activity in the mid-1980s in the 3-6 year band.

Tableau 2.5 Maximum cross-correlations for natural series and for the 2-3 and the 3-6 year bands of variability between climatic indices, precipitation, temperature, and groundwater levels for Vancouver Island.

	<i>Groundwater level</i>	<i>Precipitation</i>	<i>Temperature</i>
Natural series			
NAO	0.20 ⁽¹⁾	-0.10 ⁽¹⁾	0.11 ⁽¹⁾
PNA	-0.08 ⁽¹⁾	-0.23 ⁽¹⁾	0.43
AO	-0.07	-0.38 ⁽³⁾	0.21 ⁽¹⁾
ENSO3	-0.20	0.31 ⁽¹⁾	0.42
Groundwater level	-	0.15	-0.17
2-3 year band			
NAO	0.67 ⁽¹⁾	0.09	0.24
PNA	0.24	0.57	0.29
AO	-0.32	0.33	0.19
ENSO3	0.26 ⁽¹⁾	-0.38	0.35
Groundwater level	-	-0.24 ⁽²⁾	-0.12 ⁽¹⁾
3-6 year band			
NAO	0.40	0.47	0.08
PNA	0.46 ⁽¹⁾	-0.30 ⁽¹⁾	0.70
AO	0.38	0.72 ⁽¹⁾	0.24 ⁽¹⁾
ENSO3	0.56 ⁽¹⁾	0.21 ⁽¹⁾	0.63
Groundwater level	-	0.38 ⁽¹⁾	-0.56 ⁽²⁾

⁽¹⁾, ⁽²⁾ : time delay in years between datasets.

2.5.3. Teleconnections between climatic indices, groundwater levels and climate variables

The most striking feature of interconnections between groundwater levels and climatic indices in PEI is the fact that only ENSO3 (associated with the Pacific Ocean) shows a statistically significant link with groundwater level records (0.54 with a one-year delay for the 3-6 year band). Table 2.3 shows that the climatic anomalies most commonly associated with eastern Canada, the AO and the NAO, exhibit strong connections particularly in the 3-6

year band with temperature (0.51 with NAO, 0.71 with the AO). This was also reported by Coulibaly (2006).

Groundwater levels from the MB study area are characterized by very low variability in both bands (Figures 2.4 and 2.5) with both series revealing higher levels of activity in the mid-1970s and mid-2000s, i.e. at the beginning and end of the time series. A possible explanation resides in the low intra-annual groundwater level fluctuations and the fact that two of the three wells studied are completed in coarse superficial sediments, hence resulting in higher porosity and thus larger storativity that might dampen the effect of inter-annual fluctuations.

Nevertheless, groundwater levels show moderate correlation in both variability bands with the PNA (0.42 in both cases); see table 2.4. Temperature variability is governed by the PNA and ENSO3 (the ENSO3-temperature couple has a one-year delay) among the three time series with positive values of correlation averaging 0.41. On the other hand, precipitation is most accurately depicted through the AO in the 3-6 year band (-0.46) while no significant linkages were found in the 2-3 year band. The PNA index appears to be the most related to hydrogeological variability while the precipitation arises as the main climatic driver, although coefficients are always below 0.42.

In British Columbia, piezometric levels show low variability throughout the study period in both bands, except in the late 1970s where higher variance is observed in the 2-3 year band (Figure 2.4). The explanation provided in the case of MB would also be plausible here as two of the three wells were also completed in sand and gravel. Nevertheless, groundwater levels still exhibit a strong correlation with the NAO in the 2-3 year band (0.67 with a one-year delay), while in the 3-6 year band the PNA (0.46) and ENSO3 (0.56) are the most strongly linked indices. Temperature is linked with the PNA (0.70) and ENSO3 (0.63) in the 3-6 year band. Linkages with precipitation seem somewhat more complex as the 2-3 year band shows the greatest similarity with the PNA (0.57), while the NAO (0.47) and the AO (0.72) appear as having the strongest influence in the 3-6 year band. These findings are in contradiction to those of Fleming and Quilty (2006) who found linkages between precipitation and ENSO events in south-central British Columbia. As the authors note, ENSO-related phenomena are

complex and spatially highly variable such as adjacent regions may show strong inverse relationships. As mentioned previously, teleconnections between streamflow and precipitation in western Canada and the AO and the NAO have also been reported in other studies (Coulibaly and Burn, 2004; Coulibaly, 2006).

Even though the effects of El Niño have been reported before in Eastern Canada, the fact that ENSO3 shows the strongest correlation, over the NAO and the AO, in groundwater variability in PEI is unexpected. ENSO3's significant coupling with temperature might be partly responsible for this. MB is the only site for which the results are clear on which of the climatic variable has the most influence on the piezometric level variability. The fact that correlations between climatic indices and groundwater levels series are in the same range or even higher than those observed between groundwater levels and climatic variables is somewhat surprising as one would guess that the more direct influence of climatic variables on groundwater levels would have translated into higher correlation values.

2.6. Conclusion

This study has demonstrated that climatic indices have an influence on the inter-annual fluctuations of Canadian groundwater records. The groundwater level records expressed different variability patterns in the three study areas. They are shown to be correlated to climatic anomalies, especially in the 3-6 year band. PEI piezometric records revealed significant linkages with the ENSO3. In the MB study area, the PNA anomaly shows the most influence on recharge as shown by the larger correlations between the PNA index and groundwater level and its variability in both time bands.. The Pacific ocean anomalies, the PNA and ENSO3, are the major influences of groundwater level variances in the VI study area in the 3-6 year band, whereas the NAO is the best correlated index in the 2-3 year band. A significant ENSO3-temperature coupling is observed for all variability bands in the three investigated regions whereas the influence of ENSO3 on groundwater fluctuations appears more important in the coastal zones comparatively to southern MB.

One of the main limitations in this study was the relatively short 32 years time series available. Longer groundwater level records would also be preferable to assess decadal variations in climatic indices (Hurrell, 1995; Hurrell and Van Loon, 1997). They would provide the opportunity to study longer time bands and therefore highlight longer term effects of climatic anomalies. To study the effect of different hydrogeological contexts and sort out the impact of climate would require a more extensive network of piezometric stations. Other environmental time series such as minimum and maximum temperatures could also be used to provide complementary information on the groundwater-climate linkages.

Acknowledgments

Financial support was provided by Ouranos through a grant to the first author. Groundwater level series were provided by the Geological Survey of Canada. The NAO, PNA, AO, and ENSO3 values are available through NOAA Climate Prediction Center (CPC) at <http://www.cdc.noaa.gov/data/climateindices/List/>. Main Matlab wavelet analysis routines were provided by C. Torrence and G.P. Compo at <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>.

CHAPITRE III

SYNTHÈSE ET CONCLUSION

La présente étude avait pour objectifs de vérifier 1) si les cycles interannuels associés aux indices climatiques sont observables dans les séries temporelles de niveaux d'eau souterraine au Canada et 2) si les périodicités visibles correspondent à celles d'indices climatiques connus. Ce mémoire de maîtrise a permis d'atteindre ces objectifs en démontrant, au moyen d'analyses en ondelettes et d'analyses corrélatoires, l'existence de liens entre les phénomènes climatiques à grande échelle et la variabilité interannuelle des niveaux de nappe.

L'analyse en ondelettes a permis la description temps-période des fluctuations observées dans les séries piézométriques s'étalant sur 32 ans. Dans les deux bandes de variabilité étudiées (2-3 et 3-6 ans), la variabilité de ces séries s'est révélée plus faible que celle des séries de températures et de précipitations et ce, particulièrement dans les régions du Manitoba et de l'Île de Vancouver. L'utilisation des analyses en ondelettes et de corrélation croisée a également permis d'identifier des liens entre la variable des précipitations et températures et celle des séries hydrogéologiques. D'après les résultats obtenus, ce sont surtout les indices reliés à l'océan Pacifique (ENSO3, PAN) qui exercent une influence sur les niveaux d'eau souterraine dans les trois régions étudiées. Plus précisément, l'indice ENSO3 a montré les plus fortes corrélations avec les variations des niveaux piézométriques de l'IPE, l'indice PAN a montré une bonne corrélation avec la variabilité de l'eau souterraine au sud du Manitoba pour les deux bandes, alors que les niveaux d'eau au sud de l'Île de Vancouver ont montré une forte corrélation avec l'ONA pour la bande 2-3 ans et étonnamment de bonnes corrélations avec les quatre indices pour la bande de 3-6 ans. L'influence des indices reliés au

Pacifique sur des variables météorologiques au Canada avait déjà été signalée dans la littérature (Brown et Goodison, 1996; Bonsal et al., 2001; Bonsal et al., 2006). L'effet de l'indice PAN sur des variables du sud du Manitoba par exemple a également été rapporté par St-George (2007) pour des séries de débits des rivières. Une partie de l'étude visait également à souligner les liens existants entre les indices climatiques étudiés. Tel qu'attendu, les plus forts couplages ont été observés entre l'ONA et l'OA et entre le PAN et ENSO3. Ces résultats sont en accord avec la littérature sur le sujet (Greatbatch, 2000; Baldwin et O'Sullivan, 1995).

Les corrélations observées entre la variabilité des indices climatiques et celle des séries de températures et de précipitations se sont souvent avérées moins significatives qu'anticipé, malgré les liens importants présents entre ces variables et l'eau souterraine. En fait, ces corrélations étaient souvent plus faibles que celles entre les séries piézométriques et les indices climatiques. Ceci suggère que les séries de niveaux d'eau souterraine en englobant l'information météorologique y compris les interactions entre la biosphère et l'atmosphère via l'évapotranspiration sont des meilleurs indicateurs du climat d'une région que les variables météorologiques à elles seules.

Même si elle a permis d'atteindre les objectifs fixés, la méthodologie employée pourrait être améliorée. Il serait pertinent d'utiliser des données mensuelles plutôt qu'une moyenne annuelle pour les différentes variables pour analyser la variance interannuelle de même que la puissance des liens de téléconnexion en fonction de la saison. Des études (Wallace et Gutzler, 1981; Brown et Goodison, 1996; Shabbar et al., 1997a) suggèrent entre autres que les liens de certains indices avec le climat canadien seraient plus forts durant la saison hivernale. Le fait d'utiliser une moyenne annuelle a donc pu diminuer la force des corrélations observées. De plus, l'utilisation de valeurs mensuelles permettrait de déterminer les délais de manière plus précise. Des données météorologiques minimales et maximales pourraient également apporter une information complémentaire pertinente. D'autres variables influençant la recharge, comme par exemple l'évapotranspiration, auraient également avantage à être intégrées. Tel que mentionné précédemment, un réseau de puits de surveillance comprenant plus de puits possédant des séries de plus de 30 ans serait également un atout pour ce genre

d'études. En plus d'atténuer l'effet de contextes hydrogéologiques particuliers, un plus grand nombre de puits donnerait une mesure plus fiable de l'effet du climat sur un aquifère étudié. À notre connaissance, cette étude est la première analyse de variabilité de niveaux piézométriques dans les aquifères canadiens qui ait été réalisée à l'échelle interannuelle à l'aide de l'analyse en ondelettes. Une autre avenue intéressante serait de développer un modèle numérique de prévision intégrant des indices climatiques en complémentarité avec cette approche. De tels modèles ont déjà été expérimentés sur des débits de rivières (Coulibaly, 2000; Kalra et Ahmad, 2009) et dans un aquifère argentin (Tanco et Kruze, 2001) et ont donné des résultats très prometteurs, augmentant le taux de prévisions fiables de plusieurs dizaines de points de pourcentage dans chacun des cas. En tenant compte de la variabilité interannuelle de séries piézométriques, le développement de tels modèles permettrait d'améliorer les prédictions d'une année à l'autre ou sur des horizons plus lointains en utilisant des données simulées du climat. Ceci permettrait d'accroître notre capacité à gérer de façon durable la ressource d'eau souterraine.

BIBLIOGRAPHIE

- Allen, D.M., Scibek, J., Whitfield, P. et Wei, M. 2004. «Climate change and groundwater: summary report». Final report prepared for natural resources Canada, Climate Change Action Fund, March 2004, 404 pp, http://www.adaptation.rncan.gc.ca/projdb/index_e.php?class=118 Grand Forks
- Anctil, F. et Coulibaly, P. 2004. «Wavelet analysis of the interannual variability in southern Quebec streamflow». *Journal of Climate*, Vol. 17, p. 163–173.
- Assani, A.A., Lajoie, F., Vadnais, M. et Beauchamp, G. 2008. «Analyse de l'influence de l'oscillation Arctique sur la variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin versant de la rivière Saint-François (Québec, Canada) au moyen de la méthode des corrélations canoniques ». *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 21, No. 1, p.19-33.
- Baldwin, M.P. et O'Sullivan, D. 1995. «Stratospheric effects of ENSO-related tropospheric circulation anomalies». *Journal of Climate*, Vol. 8, p. 649-667.
- Barnston, A.G. et Livezey, R.E. 1987. «Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns». *Monthly Weather Review*, Vol. 115, p.1083–1126.
- Betcher, R., Grove, G. et Pupp, C. 1995. «Groundwater in Manitoba, hydrogeology, quality concerns, management». National Hydrology Research Institute Contribution CS-93017, Environment Canada, Saskatoon.
- Bonsal, B.R., Shabbar, A. et Higuichi, K. 2001. «Impacts of low frequency variability modes on Canadian winter temperature». *International Journal of Climatology*, Vol. 21, p. 95–108.
- Bonsal, B.R., Prowse, T.D., Duguay, C.R. et Lacroix, M.P. 2006. «Impacts of large-scale teleconnections on freshwater-ice break-up/freeze-up dates over Canada». *Journal of Hydrology*, Vol. 330, No. 1–2, p. 340–353.
- Brown, R. D. et Goodison, B.E. 1996. «Interannual variability in reconstructed Canadian snow cover, 1915– 1992». *Journal of Climate*, Vol. 9, p. 1299– 1318.
- Buermann, W., Anderson, B., Tucker, J. C., Dickinson, R.E., Lucht, W., Potter, C.S. et Myneni, R.B. 2003. «Interannual covariability in Northern Hemisphere air temperatures and greenness associated with El Niño –Southern Oscillation and the Arctic Oscillation», *Journal of Geophysical Research*, 108(D13), 4396, doi:10.1029/2002JD002630.

- Chen, Z., Grasby, S.E. et Osadetz, K.G. 2004. «Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada». *Journal of Hydrology*, Vol. 290, p. 44-62.
- Côté, M.-J., Lachance, Y., Lamontagne, C., Nastev, M., Plamondon, R. et Roy, N. 2006. «Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay [Atlas of the Châteauguay watershed]». Québec : ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 64 p
- Coulibaly, P. 2006. «Spatial and temporal variability of Canadian seasonal precipitation (1900-2000)». *Advances in Water Resources*, Vol. 29, p. 1846-1865
- Coulibaly, P. et Burn, D.H. 2004. «Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows». *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 3, p. 1-14.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Ramussen, P. et Bobée, B. 2000. «A recurrent neural networks approach using indices of low-frequency climatic variability to forecast regional annual runoff». *Hydrological Processes*, Vol. 14, No. 15, p. 2755-2777.
- Déry, S. J. et Wood, E.F. 2004. «Teleconnection between the Arctic Oscillation and Hudson Bay river discharge». *Geophysical Research Letter*, 31, L18205, doi:10.1029/2004GL020729.
- Environnement Canada. 2009. «The Nature of Water – Groundwater». 25 juillet 2008. http://www.ec.gc.ca/water/en/nature/grdwtr/e_sixmil.htm (27 mai 2009)
- Fleming, S.W. et Quilty, E.J. 2006. «Aquifer responses to El Nino-Southern Oscillation, southwest British Columbia». *Groundwater*, Vol. 44, No. 4, p.595-599.
- GIEC. 2007. «Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Relsinger, A.]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
- Grasby, S.E., Chen, Z., Hamblin, A.P., Wozniac, P.R.J. et Sweet, A. 2009. «Regional Characterization of the Paskapoo Bedrock Aquifer System, southern Alberta». *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 45, No. 12, p.1501-1516.
- Greatbatch, R.J. 2000. «The North Atlantic Oscillation». *Stochastic and Environmental Risk Assessment*, Vol. 14, p. 213-242.
- Hayashi, M. et van der Kamp, G. 2009. « Progress in scientific studies of groundwater in the hydrologic cycle in Canada, 2003-2007». *Canadian Water Resources Journal*, Vol. 34, p. 177-186.

- Higuchi, K., Huang, J. et Shabbar, A. 1999. «A wavelet characterization of the North Atlantic Oscillation variation and its relationship to the North Atlantic sea surface temperature». *International Journal of Climatology*, Vol. 19, p. 1119-1129
- Hurrell, J. W. 1995. «Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation». *Science*, Vol. 269, p. 676-679.
- Hurrell, J.W. et Van Loon, H. 1997. «Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation». *Climatic Change*, Vol. 36, p. 301-326.
- Jones, I.C. et Banner, J.L. 2003. «Hydrogeologic and climatic influences on spatial and interannual variation of recharge to a tropical karst island aquifer». *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 9.
- Jyrkama, M.I. et Sykes, J.F. 2007. «The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario) ». *Journal of Hydrology*, Vol. 338, p. 237-250.
- Kalra, A. et Ahmad, S. 2009. «Using atmospheric-oceanic for long lead time streamflow forecasting», *Water Resources Research*, Vol. 45, W03413, doi:10.1029/2008WR006855
- Kendall, M.G. 1975. «Rank correlation methods». Griffin, London.
- Kennedy, P.L. et Woodbury, A. 2003. «Regional Scale Flow and Transport Model of Carbonate and Sandstone Aquifers in Southern Manitoba» Proceeding of the 56th annual Canadian Geotechnical Conference and 4th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, Winnipeg, Manitoba, Canada, September 29-October 1 2003
- Khokhlov, V.N., Glushkov, A.V. et Loboda, N.S. 2006. «On the nonlinear interaction between global teleconnection patterns». *Q.J.R. Meteorological Society*, Vol. 132, p. 447-463.
- Labat, D., Ababou, R. et Mangin, A. 2000. «Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: Continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses». *Journal of Hydrology*, Vol. 238, p. 149-178.
- Luque-Espinar, J.A., Chica-Olmo, M., Pardo-Igúzquiza, E. et García-Soldado, M.J. 2008. «Influence of climatological cycles on hydraulic heads across a Spanish aquifer», *Journal of Hydrology*, Vol. 354, p. 33-52.
- Mann, H.B. 1945. «Nonparametric tests against trend». *Econometrica* 13, p. 245-259.
- Marshall, J., Kushnir, Y., Battisti, D., Chang, P., Czaja, A., Dickson, R., Hurrell, J., McCartney, M., Saravanan, R. et Visbeck, M. 2001. «North Atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms», *International Journal of Climatology*, Vol. 21, p. 1863-1898.

- Mokhov, I.I. et Smirnov, D.A.. 2006. «El Niño-Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear techniques from climatic indices», *Geophysical Research Letters*, Vol. 33.
- Muller, J.E. et Jeletzky, J.A. 1970. «Geology of the Upper Cretaceous Nanaimo Group, Vancouver Island and Gulf Islands, British Columbia», Geological Survey of Canada, Paper 69-25.
- Nakken, M. 1999. «Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns», *Environmental Modelling and Software*, Vol. 14, p. 283–295.
- Nastev, M., Lefebvre, R., Rivera, A. et Martel, R. 2006. «Quantitative Assessment of Regional Rock Aquifers, South-Western Quebec, Canada», *Water Resources Management*, Vol. 20, No. 1, p. 1-18.
- Natural Resources Canada. 2007. “Groundwater Mapping Program”. 27 décembre 2007. http://ess.nrcan.gc.ca/gm-ces/index_e.php (27 mai, 2009).
- Nolan, B.T., Healy, R.W., Taber, P.E., Perkins, K., Hitt, K.J. et Wollock, D.M. 2007. «Factors influencing ground-water recharge in eastern United States», *Journal of Hydrology*, Vol. 332, p.187-205.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. et Loumagne, C.. 2005. «Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2- Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfallrunoff modelling», *Journal of Hydrology*, Vol. 303, p. 290–306.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. et McMahon, T.A. 2007. «Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification», *Hydrological and Earth Systems Sciences Discussions*, Vol. 4, p. 439-473.
- Qian, M., Jones, C., Laprise, R. et Caya, D. 2008. «The influences of NAO and the Hudson Bay sea-ice on the climate of eastern Canada», *Climate Dynamics*, Vol. 31, p. 169-182.
- Rivard, C., Michaud, Y., Deblonde, C., Boisvert, V., Carrier, C., Morin, R. H., Calvert, T., Vigneault, H., Conohan, D., Castonguay, S., Lefebvre, R., Rivera, A. et Parent, M. 2008. «Canadian Groundwater Inventory: Regional Hydrogeological characterization of the South-central part of the Maritimes Carboniferous Basin», CGC Bulletin 589, Commission Géologique du Canada, 86 p.
- Rivard, C., Paradis, D., Bolduc, A., Morin, R. H., Liao, S.L, Pullan, S., Gauthier, M.J., Trépanier, S., Blackmore, A., Blackmore, A., Blackmore, A., Spooner, I., Deblonde, C., Fernandes, R., Castonguay, S., Michaud, Y., Drage, J., Drage, J. et Paniconi, C. 2009a. «Canadian groundwater inventory: Regional hydrogeological characterization of the Annapolis-Cornwallis Valley aquifers», Bulletin 598, p. 194, Sous presses.

- Rivard, C., Vigneault, H., Piggott, A., Larocque, M., Anctil, F. 2009b. «Groundwater recharge trends in Canada», *Canadian Journal of Earth Sciences*, soumis.
- Scibek, J., Allen, D.M., Cannon, A. et Whitfield, P. 2007. «Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model», *Journal of Hydrology*, Vol. 333, p. 165-181.
- Shabbar, A. 2006. «The impact of El Niño-Southern Oscillation on the Canadian climate», *Advances in Geosciences*, Vol. 6, p. 149–153.
- Shabbar, A., Bonsal, B. et Khandekar, M. 1997a. «Canadian precipitation patterns associated with the Southern Oscillation», *Journal of Climate*, Vol. 10, p. 3016–3027.
- Shabbar, A., Higuchi, K., Skinner, W. et Knox, J.L. 1997b. «The association between the BWA index and winter surface temperature variability over eastern Canada and west Greenland», *International Journal of Climatology*, Vol. 17, p. 1195–1210.
- St. George, S. 2007. «Streamflow in the Winnipeg River basin, Canada: Trends, extremes and climate linkages», *Journal of Hydrology*, Vol. 332, p. 396–411.
- Stahl, K., Moore, R.D. et McKendry, I.G. 2006. «The role of synoptic scale circulation in the linkage between large-scale ocean-atmosphere indices and winter surface climate in British Columbia, Canada», *International Journal of Climatology*, Vol. 26, p. 541–560.
- Tanco, R. et Kruze, E. 2001. «Prediction of seasonal water-table fluctuations in La Pampa and Buenos Aires, Argentina», *Hydrogeology Journal*, Vol. 9, p. 339-347
- Toews, M.W. et Allen, D.M. 2009. «Evaluating different GCMs for predicting spatial recharge in an irrigated arid region». *Journal of Hydrology*, Vol. 374, p. 265-281.
- Thompson, D.W.J. et Wallace, J.M. 1998. «The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields» *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, p. 1297–1300.
- Torrence, C., et Compo, G.P. 1998. «A practical guide to wavelet analysis», *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 79, p. 61–78.
- Wallace, J.M. et Gutzler, D.S. 1981. «Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter», *Monthly Weather Review*, Vol. 109, p. 784–812.
- Wallace, J. M. 2000. «North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms- one phenomenon», *Q.J.R. Meteorological Society*, Vol. 126, p. 791–805.

Yarnal, B. et Diaz, H.F. 1986: Relationships between the extremes of the Southern Oscillations and the winter climate of the Anglo- American Pacific coast. *International Journal of Climatology*, Vol. 6, p. 197–219.

ANNEXE 1

Cette annexe présente les spectres en ondelettes des chroniques annuelles de précipitation, de température et de niveaux piézométriques utilisées dans cette étude.

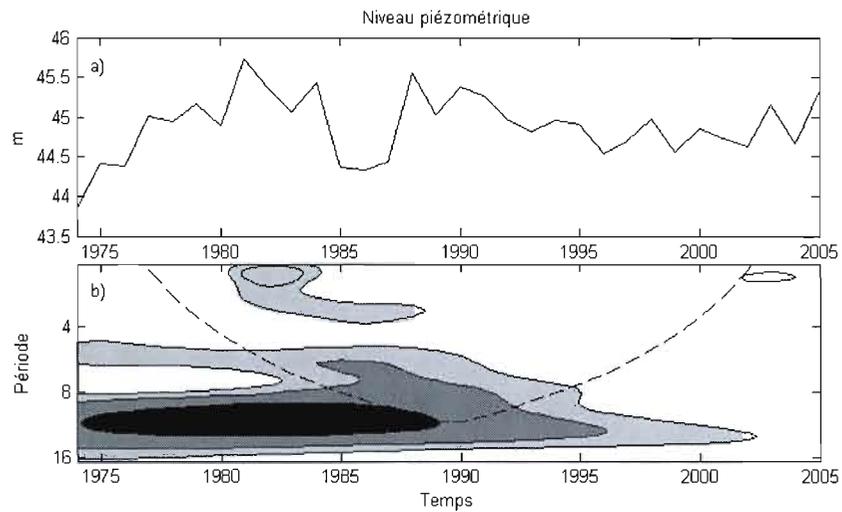


Figure A1 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de niveau piézométrique à l'Île-du-Prince-Édouard

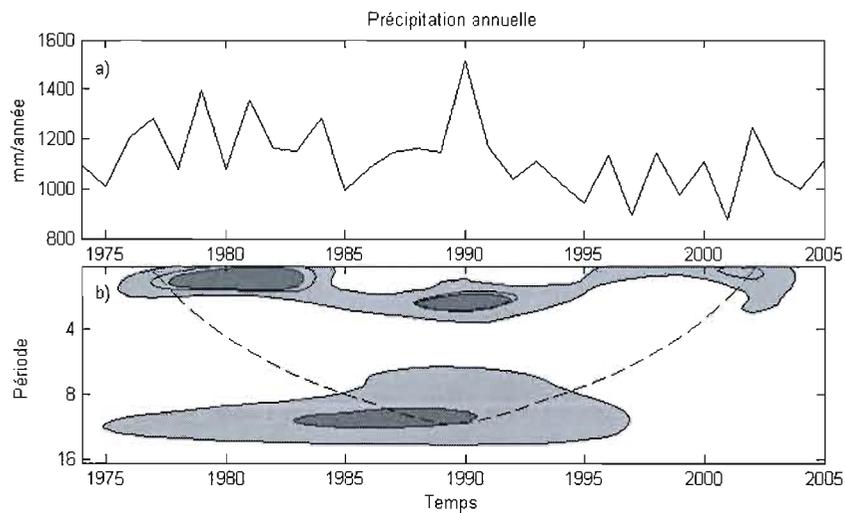


Figure A2 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles de précipitation à l'Île-du-Prince-Édouard

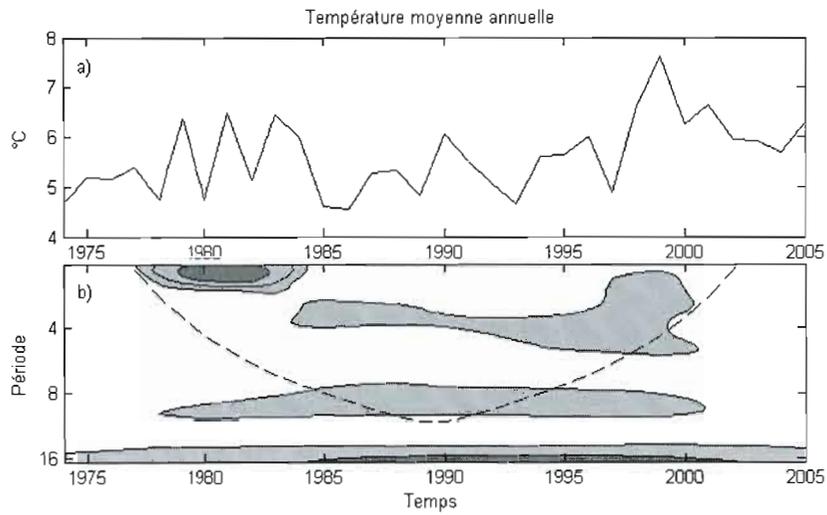


Figure A3 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de température à l'Île-du-Prince-Édouard

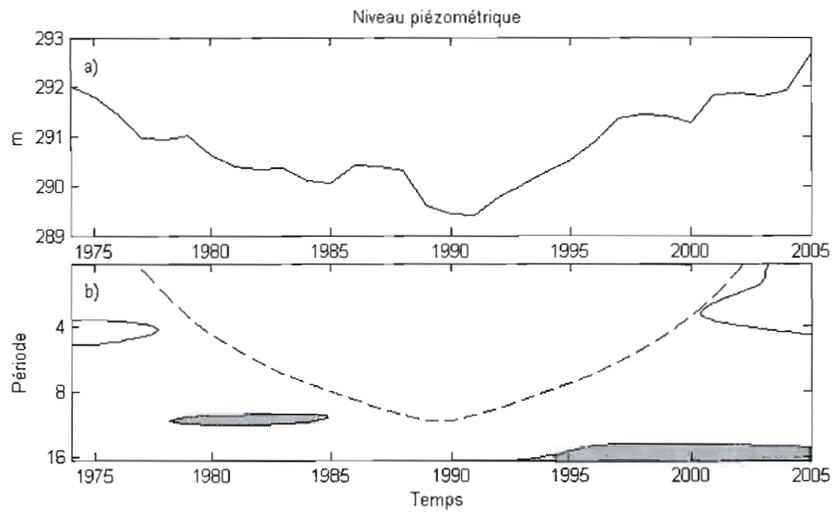


Figure A4 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de niveau piézométrique au Manitoba

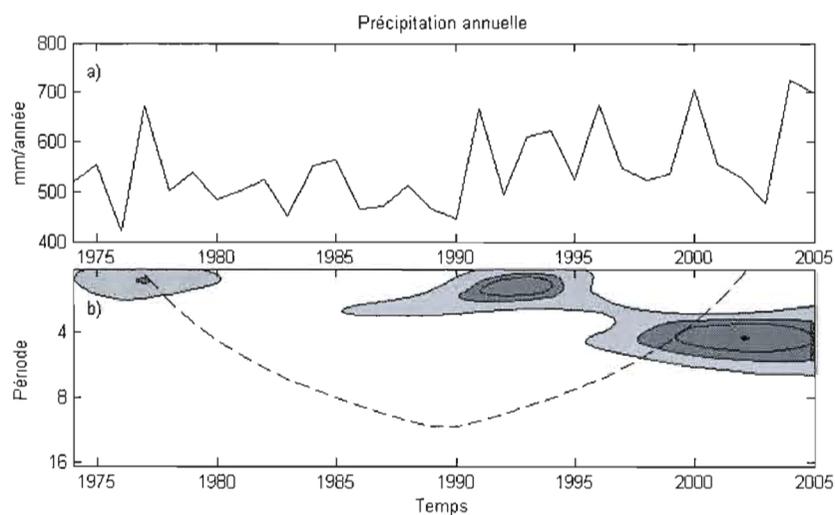


Figure A5 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles de précipitation au Manitoba

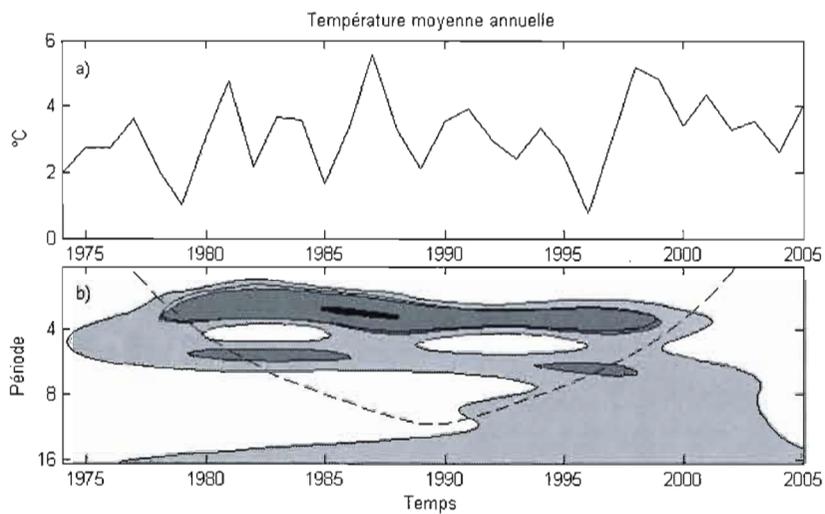


Figure A6 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de température au Manitoba

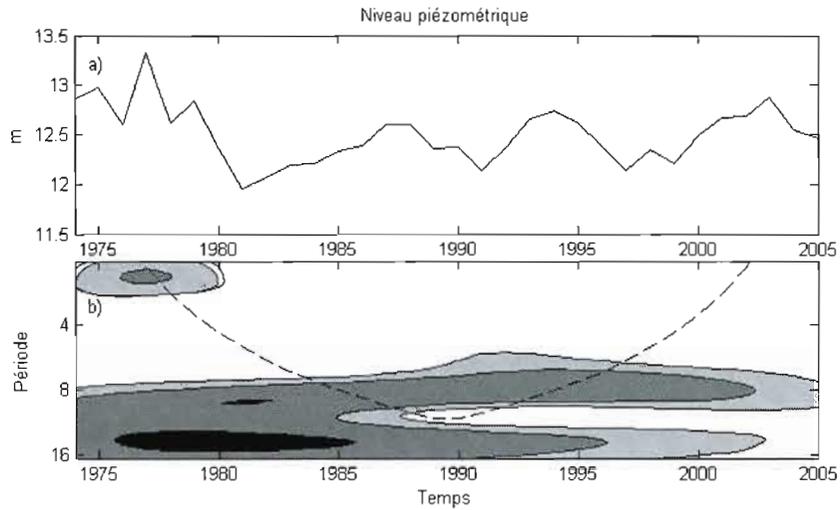


Figure A7 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de niveau piézométrique à l'Île de Vancouver

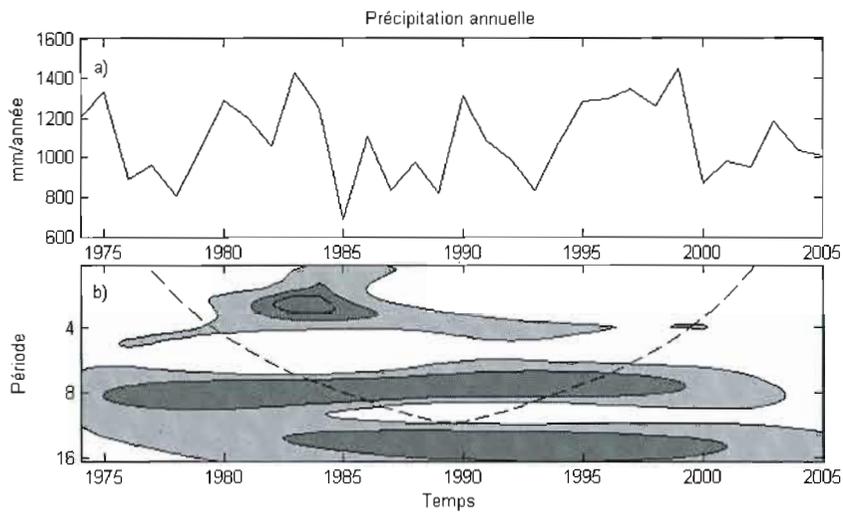


Figure A8 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles de précipitation à l'Île de Vancouver

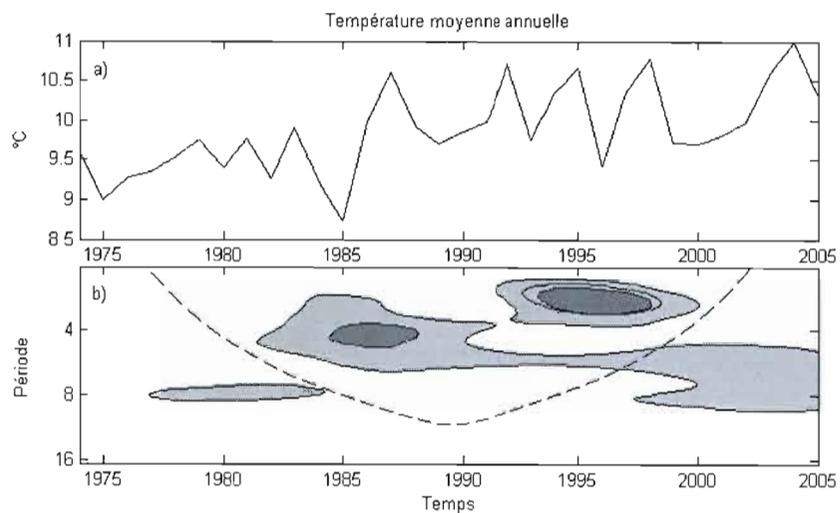


Figure A9 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de température à l'Île de Vancouver

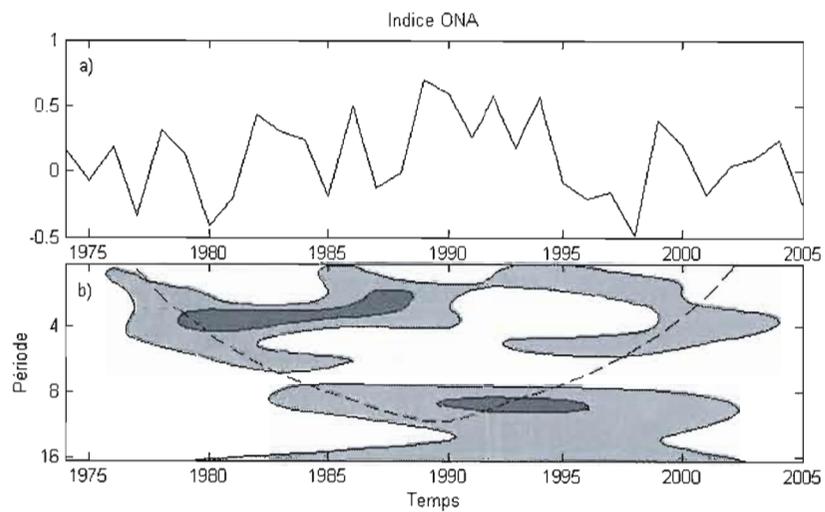


Figure A10 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de l'Oscillation Nord-Atlantique

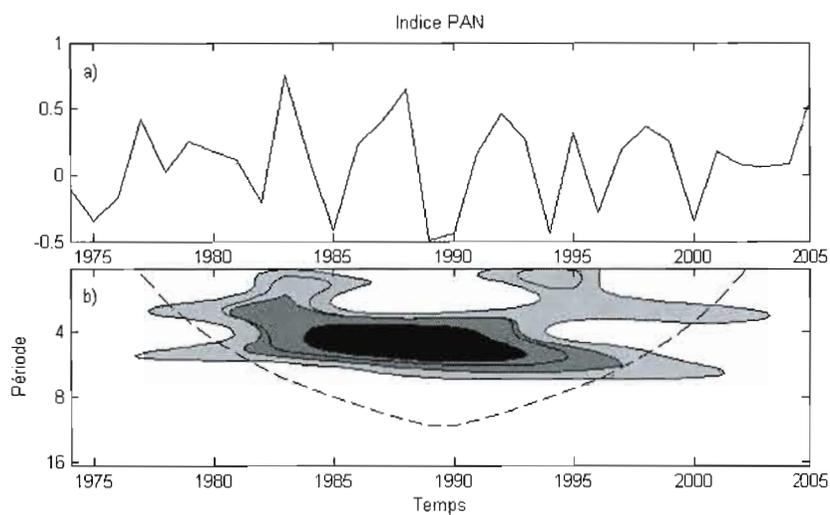


Figure A11 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de l'indice Pacifique/ Amérique du Nord

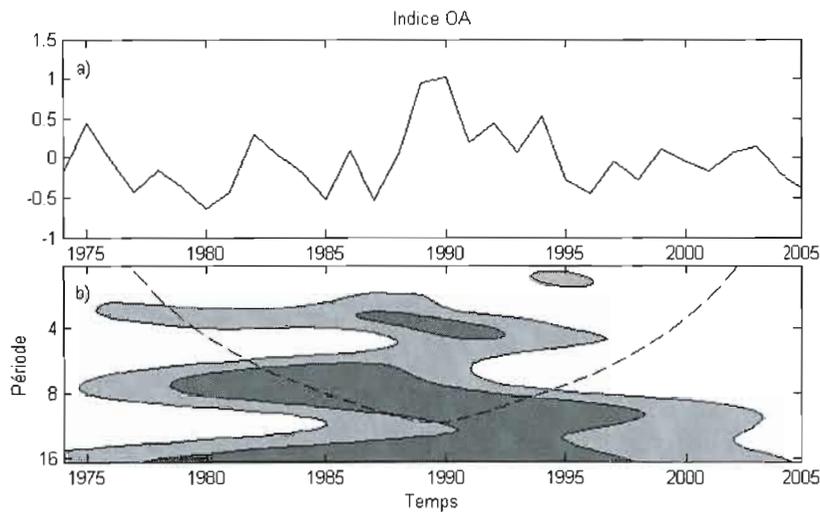


Figure A12 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de l'Oscillation Arctique

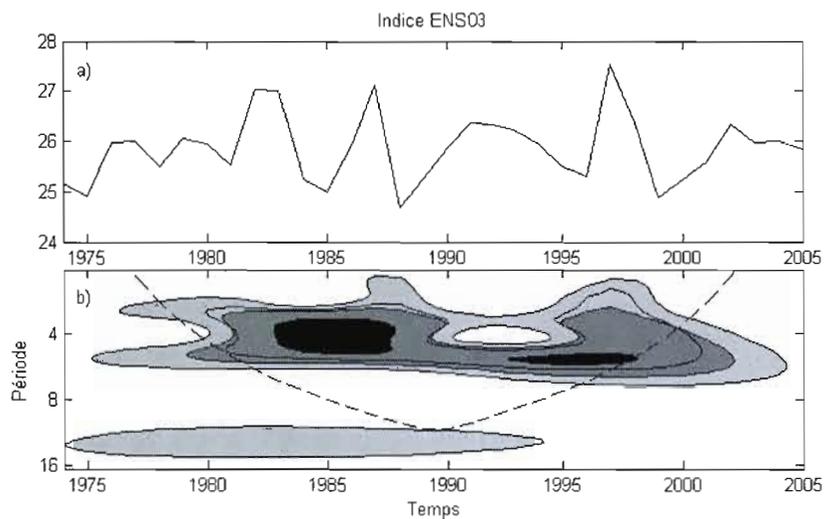


Figure A13 a) Série temporelle et b) spectre en ondelettes des valeurs annuelles moyennes de anomalie de température de surface marine au dessus de la zone Niño-3