

# **Analyse et prévision des apports énergétiques**

par

Vincent Fortin

Unité d'expertise mécanique, métallurgie et civil

Institut de recherche d'Hydro-Québec

7 juin 2001

## Sommaire exécutif

À la demande de M. Luc Perreault de l'unité Prévision et ressources hydriques du groupe Production, nous présentons une analyse sommaire des séries d'apports énergétiques 1943-2000, dans le but de répondre aux questions formulées par celui-ci:

1. Est-ce qu'il existe une tendance dans la série d'apports énergétiques annuels?
2. Est-ce qu'il existe des ruptures de moyenne dans la série d'apports énergétiques annuels?
3. Est-ce qu'on peut mettre en évidence des cycles significatifs dans la série d'apports énergétiques annuels?
4. Si les données d'apports énergétiques annuels récentes ne s'inscrivent pas dans la continuité des précédentes:
  - a. Quel modèle et quel estimateur de l'apport énergétique moyen proposez-vous?
  - b. Comment peut-on prendre en compte une éventuelle non-stationnarité en mode prévisionnel?
5. Quelle est votre prévision de l'apport énergétique annuel des 3 prochaines années? Quelle en est l'incertitude?
6. Recommandez-vous de prendre en compte le caractère autorégressif des apports énergétiques annuels? Si oui, quelle serait la cause d'une telle persistance?

Après avoir réfléchi au sens des questions posées, nous en sommes arrivé à la conclusion qu'elles pouvaient être résumées ainsi:

- Quelle est votre prévision des apports énergétiques des trois prochaines années et quelle est son incertitude?
- Quelle est votre justification pour cette prévision? (modèle utilisé, variables explicatives, relations de cause à effet, ...)

Ce rapport est consacré à l'étude des séries d'apports énergétiques dans le but de faire une meilleure prévision pour les trois prochaines années. Ainsi, l'objectif n'est pas de faire une prévision de la moyenne des apports énergétiques pour le XXIème siècle. La prévision faite pour ces trois années, même lorsqu'elle correspond à la moyenne historique des apports, ne doit pas être interprétée comme une prédiction du régime hydrologique dans lequel Hydro-Québec évoluera au XXIème siècle, mais comme notre meilleure estimation pour les trois prochaines années. En raison des progrès constants dans le domaine de la climatologie et de la prévision saisonnière, les conclusions de ce rapport devront être révisées périodiquement.

Le rapport est divisé en cinq parties:

- discussion sur les questions posées
- revue des mécanismes pouvant causer une dérive des apports énergétiques par rapport à leur moyenne historique
- analyse rétrospective des séries d'apports énergétiques
- prévision des apports énergétiques en fonction des constats effectués
- recommandations et conclusions

Après avoir revu les différents mécanismes qui peuvent causer une dérive des apports énergétiques par rapport à leur moyenne historique (erreur de mesure, réchauffement global, oscillations climatiques), nous arrivons à la conclusion la prévision des apports énergétiques pour les trois prochaines années devrait être basée sur:

- la prise en compte de l'autocorrélation lorsque celle-ci s'explique par le comportement du bassin-versant
- la prise en compte des prévisions saisonnières émises par Environnement Canada

Suite à l'analyse des séries énergétiques réalisées par la suite, nous faisons les constats suivants:

### **Regroupement des complexes**

- Les apports énergétiques des huit complexes peuvent être regroupés en trois groupes homogènes: le Saint-Laurent, le Sud (Outaouais et Saint-Maurice), et le Nord (Côte-Nord et Moyen Nord).
- Les apports énergétiques du Saint-Laurent sont presque indépendants des apports des autres complexes, mais il est déjà arrivé qu'une sécheresse touche l'ensemble des systèmes.
- Les apports énergétiques de la région du Sud et du Nord sont modérément corrélés.

### **Apports énergétiques du Saint-Laurent**

- Les apports énergétiques du Saint-Laurent se comportent depuis plus d'un siècle comme un processus stochastique autorégressif, et l'estimation faite des paramètres de ce processus est stable dans le temps.
- L'hypothèse que cette autocorrélation soit causée en partie par la mémoire du système hydrique est vraisemblable. La prise en compte de cette autocorrélation

devrait permettre de réduire l'erreur de prévision de 30% en moyenne pour la première année de prévision

- Sur cette base, nous prévoyons un déficit cumulé de 1.4 TWh au cours des trois prochaines années pour le Saint-Laurent. L'écart-type de cette prévision est de 2.9 TWh.
- La probabilité que les apports énergétiques du Saint-Laurent soient sous la moyenne est d'environ 75% pour 2001, 65% pour 2002 et 60% pour 2003.

### **Apports énergétiques du Sud (Outaouais et Saint-Maurice)**

- Les apports énergétiques dans le sud du Québec semblent purement aléatoires.
- Il n'y a pas lieu de baser la prévision des apports énergétiques de ces complexes sur les apports des années précédentes.

### **Apports énergétiques du Nord (Côte-Nord et Moyen-Nord)**

- L'autocorrélation observée dans les apports énergétiques du Nord s'explique en bonne partie par une forte persistance dans les précipitations hivernales et printanières.
- Cette persistance semble liée à l'oscillation arctique (AO), mais ce lien statistique est trop ténu pour être utilisé en mode prévisionnel, d'autant plus que la prévisibilité de cette oscillation est faible.
- Il n'est pas recommandé d'utiliser les apports énergétiques des années précédentes pour établir une prévision d'apports énergétiques dans cette région

### **Prévision de la série agrégée d'apports énergétiques**

- Nous proposons une méthode simple pour tenir compte de prévisions météorologiques saisonnières dans la prévision annuelle des apports énergétiques
- Cette méthode a certainement besoin d'être raffinée, mais elle constitue déjà une avenue prometteuse pour améliorer la prévision des apports à cette échelle.
- À l'aide des prévisions saisonnières d'Environnement Canada, nous avons calculé les probabilités suivantes que les apports énergétiques soient sous la normale (i.e. dans le tercile inférieur), près de la normale (i.e. dans le tercile central), et au-dessus de la normale (i.e. dans le tercile supérieur). Le tableau suivant reproduit les résultats obtenus.

Probabilité que l'apport énergétique appartienne à chaque tercile

---

Année	sous la normale: $Q \leq 182$ TWh	près de la normale: $182 < Q < 193$ TWh	au-dessus de la normale: $Q \geq 193$ TWh
2001	entre 35 et 75%	entre 25 et 40%	entre 0 et 30%
2002	entre 33 et 40%	entre 20 et 33%	entre 33 et 40%
2003	une chance sur trois	une chance sur trois	une chance sur trois

## Recommandations

Suite aux analyses effectuées et aux résultats obtenus, nous avons fait les recommandations suivantes:

- réviser le calcul de l'incertitude sur les apports énergétiques pour le Saint-Maurice et La Grande
- pour fin d'estimation de la moyenne historique, reconstituer les séries énergétiques sans préserver la variance, de façon à réduire l'erreur d'estimation de cette moyenne et considérer la reconstitution des données avant 1943 dans le sud, par corrélation avec des débits en rivière
- tenir compte de l'autocorrélation des apports uniquement pour le Saint-Laurent
- améliorer la prévision d'apports pour les autres systèmes en utilisant des prévisions météorologiques saisonnières
- collaborer avec Environnement Canada et l'IRI pour développer des produits de prévision saisonnière mieux adaptés à nos besoins
- continuer à chercher à comprendre le comportement non aléatoire des précipitations hivernales dans le Nord du Québec.

## Table des matières

Sommaire exécutif .....	2
Regroupement des complexes.....	3
Apports énergétiques du Saint-Laurent .....	3
Apports énergétiques du Sud (Outaouais et Saint-Maurice).....	4
Apports énergétiques du Nord (Côte-Nord et Moyen-Nord).....	4
Prévision de la série agrégée d'apports énergétiques .....	4
Recommandations.....	5
1. Quelques remarques préalables à l'analyse .....	15
1.1 Quelques remarques sur les tests statistiques et l'hypothèse d'indépendance et d'identique distribution.....	15
1.2 Quelques remarques par rapport aux données .....	16
1.3 Quelques remarques sur le concept d'apport énergétique moyen .....	17
1.4 Un résumé des questions posées .....	19
2. Revue des mécanismes pouvant causer une dérive des apports énergétiques par rapport à leur moyenne historique.....	20
2.1 Réchauffement global et hydraulicité .....	20
2.2 Oscillations climatiques et hydraulicité .....	21
2.3 Oscillation australe, El-Nino et La Nina.....	22
2.4 Oscillation nord-atlantique (NAO) et oscillation arctique (AO) .....	25
2.5 Prévision saisonnière et hydraulicité .....	32
2.6 Stratégie retenue pour améliorer la prévision d'apports.....	32
3. Analyse descriptive des séries d'apports énergétiques.....	34
3.1 Séries chronologiques étudiées .....	34
3.2 Portrait temporel de chaque série.....	35

3.2.1 Analyse des séquences.....	36
3.2.2 Interprétation des séquences dans un contexte prévisionnel.....	37
3.2.3 Agrégation à l'échelle décennale.....	37
3.2.4 Sommaire des caractéristiques statistiques observées .....	39
3.3 Corrélations entre les sites .....	39
3.4 Analyse en composantes principales .....	40
3.5 Regroupement des complexes en trois régions.....	41
3.6 Étude des apports énergétiques du Saint-Laurent.....	44
3.6.1 Cause de l'augmentation des apports après 1970.....	44
3.6.2 Apports du Saint-Laurent avant 1943 .....	45
3.7 Étude des apports énergétiques du Sud du Québec .....	47
3.8 Étude des apports énergétiques du Nord.....	49
3.8.1 Comparaison avec les débits de la rivière Ashuanipi .....	50
3.8.2 Analyse des précipitations moyennes pour Churchill Falls.....	53
3.8.3 Oscillation arctique et précipitations hivernales .....	56
4. Prévisions pour les années 2001 à 2003 .....	58
4.1 Prise en compte de l'autocorrélation pour le Saint-Laurent.....	58
4.2 Prévision saisonnière pour le Québec et le Labrador.....	58
4.2.1 Utilisation des prévisions saisonnières de température .....	60
4.2.2 Utilisation des prévisions saisonnières de précipitation .....	60
4.2.3 Prévisions saisonnières de l'IRI .....	61
4.2.3.1 Prévision saisonnières pour l'hiver et le printemps 2001.....	61
4.2.3.2 Prévision saisonnières pour l'été et l'automne 2001.....	62
4.2.4 Prévisions saisonnières d'Environnement Canada.....	62
4.2.4.1 Prévision saisonnières émises le 1er décembre 2000 .....	63

4.2.4.2 Prévision saisonnières émises le 1er juin 2001 .....	63
4.2.4.3 Construction d'une prévision annuelle pour 2001.....	64
4.2.4.4 Construction d'une prévision annuelle pour 2002.....	65
4.2.5 Combinaison des prévisions d'Environnement Canada et de l'IRI .....	65
4.3 Prévision de la série agrégée.....	65
5. Recommandations et conclusion.....	69
Références (à compléter) .....	70
Annexe A: .....	73
Prévisions saisonnières émises pour le Canada .....	73
Prévisions saisonnières émises par Environnement Canada.....	74
Prévisions émises le 1er juin 2001 .....	74
Prévision pour l'été 2001 émises le 1er juin 2001.....	74
Prévision pour l'automne 2001 émises le 1er juin 2001 .....	74
Prévision pour l'hiver 2002 émises le 1er juin 2001 .....	75
Prévision pour le printemps 2002 émises le 1er juin 2001 .....	75
Prévision émises le 1er décembre 2000 .....	76
Prévisions pour l'hiver 2001 émises le 1er décembre 2000 .....	76
Prévisions pour le printemps 2001 émises le 1er décembre 2000 .....	76
Prévisions pour l'été 2001 émises le 1er décembre 2000.....	76
Prévisions pour l'automne 2001 émises le 1er décembre 2000.....	77
Prévisions saisonnières émises par IRI .....	78
Prévisions émises le 1er mars .....	78
Prévisions émises le 1er mars 2001 pour le printemps 2001 .....	78
Prévisions émises le 1er mars 2001 pour l'été 2001 (juillet-septembre).....	78
Prévisions émises le 1er décembre .....	79

Prévisions émises le 1er décembre 2000 pour l'hiver 2001 .....	79
Prévisions émises le 1er décembre 2000 pour le printemps 2001 .....	80
Prévisions saisonnières émises par IGES .....	81
Prévisions émises le 1er juin 2001 pour l'été 2001 .....	81
Prévisions émises le 1er décembre 2000 pour l'hiver 2001 .....	82
Prévisions saisonnières émises par le CDC .....	83
Prévision de température émise le 1er mai 2001 pour 6 mois .....	83
Prévision de précipitation émise le 1er mai 2001 pour 6 mois .....	84
Annexe B: .....	85
Portrait temporel des séries d'apports énergétiques pour huit complexes hydroélectriques et pour la somme de ces huit séries.....	85
Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Saint-Laurent .....	86
Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Outaouais .....	87
Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Saint-Maurice.....	88
Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Bersimis .....	89
Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Outardes .....	90
Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Manicouagan.....	91
Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe La Grande .....	92
Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Churchill Falls.....	93
Portrait temporel des apports énergétiques: Série agrégée .....	94

## Liste des figures

Figure 1: Impact de l'oscillation australe sur l'Amérique du Nord. Tirée de la brochure "La Niña and the Great Lakes Region", publiée par le laboratoire GLERL de NOAA et disponible à l'adresse <a href="http://www.glerl.noaa.gov/pubs/brochures/laninaflyer/lanina.html">http://www.glerl.noaa.gov/pubs/brochures/laninaflyer/lanina.html</a> .....	22
Figure 2: Impact des événements El-Nino sur les températures au Canada .....	23
Figure 3: Impact des événements El-Nino sur les précipitations au Canada .....	24
Figure 4: Impact des événements La Nina sur les températures au Canada .....	24
Figure 5: Impact des événements La Nina sur les précipitations au Canada .....	25
Figure 6: Indice NAO publié par Phil Jones, Climate Research Unit, University of East Anglia (différence de pression normalisée entre l'Islande et Gibraltar de décembre à mars) <a href="http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm">http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm</a> .....	26
Figure 7: Indice AO publié par David Thompson, Colorado State University .....	27
Figure 8: Pente de la régression entre l'indice AO et les anomalies de précipitations pour l'Amérique du Nord, publiées par le Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, <a href="http://tao.atmos.washington.edu/analyses0500/">http://tao.atmos.washington.edu/analyses0500/</a> .....	28
Figure 9: Pente de la régression entre l'indice AO et les anomalies de températures pour l'Amérique du Nord, publiées par le Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, <a href="http://tao.atmos.washington.edu/analyses0500/">http://tao.atmos.washington.edu/analyses0500/</a> .....	29
Figure 10: Régression linéaire entre l'indice AO et la température hivernale à Cartwright (Labrador) pour la période 1959-1999 .....	30
Figure 11: Pourcentage de la variabilité de la moyenne décennale de la température de surface pouvant être expliquée par un ensemble de modèles atmosphère-océan (tiré de Boer, 2001) .....	31
Figure 12: Séries chronologiques étudiées .....	34
Figure 13: Écart entre le nombre de séquences espérées pour un échantillon aléatoire provenant d'une distribution symétrique, et le nombre de séquences observées dans les séries d'apports énergétiques, les séquences étant calculées par rapport à la moyenne .....	36
Figure 14: Apports énergétiques moyens pour chaque complexe pour chaque décennie	38
Figure 15: Trois premiers EOF extraits des séries d'apports énergétiques .....	40

Figure 16: Projection des complexes dans l'espace des trois premiers EOF .....	41
Figure 17: Apports énergétiques pour les trois régions retenues .....	43
Figure 18: Apports énergétiques moyens pour chaque région pour chaque décennie.....	43
Figure 19: Anomalies de précipitation au-dessus de la région des Grands Lacs de 1900 à 1995.....	45
Figure 20: Comparaison des apports énergétiques du Saint-Laurent (1943-2000) avec le débit du Saint-Laurent à Ogdensburg (1860-1956) et les apports naturels au Lac Ontario (1900-1999) .....	46
Figure 21: Graphiques d'autocorrélation pour les apports énergétiques du Saint-Laurent (1943-2000), le débit du Saint-Laurent à Ogdensburg (1860-1956) et les apports naturels au Lac Ontario (1900-1999).....	46
Figure 22: Portrait de la série d'apports énergétiques du Sud du Québec.....	48
Figure 23: Procédure de Lee & Heghinian appliquée aux apports énergétiques du Sud du Québec .....	48
Figure 24: Portrait de la série d'apports énergétiques du Nord du Québec.....	49
Figure 25: Procédure de Lee & Heghinian appliquée aux apports énergétiques du Nord du Québec .....	50
Figure 26: Apports énergétiques standardisés de la région du Nord comparés au débit moyen annuel de la rivière Ashuanipi (1956-1999) .....	51
Figure 27: Graphique d'autocorrélation pour la rivière Ashuanipi (1956-1999) et les apports énergétiques du Nord pour les périodes 1956-1999 et 1943-2000 .....	51
Figure 28: Valeurs minimales, moyennes et maximales du débit moyen mensuel pour la rivière Ashuanipi entre 1956 et 1999.....	52
Figure 29: Graphiques d'autocorrélation pour les débits annuels de la rivière Ashuanipi, calculés pendant la crue (avril-juillet), et après la crue (août-mars).....	53
Figure 30: Relation entre les précipitations moyennes pour le complexe Churchill Falls (telles que mesurées par CflCo) et les apports énergétiques pour la région du Nord (1973-1997).....	54
Figure 31: Précipitation hivernales et printanières au-dessus du complexe Churchill Falls, selon les données obtenues de CflCo pour la période 1973-1999 .....	55
Figure 32: Précipitation estivales et automnales au-dessus du complexe Churchill Falls, selon les données obtenues de CflCo pour la période 1972-1999 .....	55

Figure 33: Précipitation hivernales et printanières combinées (de décembre à mai) au-dessus du complexe Churchill Falls, selon les données obtenues de CflCo pour la période 1973-1997 .....	56
Figure 34: Précipitations hivernales au-dessus du bassin du complexe Churchill Falls et indice AO (DJF) pour la période 1973-1997 .....	57
Figure 35: Relation entre l'indice AO (DJF) et les précipitations hivernales au-dessus du bassin du complexe Churchill Falls entre 1973 et 1997 .....	57
Figure 36: Relation entre les précipitations moyennes mesurées par CflCo et les apports énergétiques pour le bassin de Churchill Falls (1973-1997). Le coefficient de corrélation est de 0.91. Tiré de Fortin (2001).....	61

## Liste des tableaux

Tableau 1: Principales caractéristiques des séries d'apports énergétiques.....	39
Tableau 2: Corrélations entre les apports énergétiques pour 8 complexes d'Hydro-Québec .....	39
Tableau 3: Corrélations entre les apports énergétiques de trois régions.....	43
Tableau 4: Corrélation entre les apports énergétiques du Saint-Laurent (1943-2000), le débit du Saint-Laurent à Ogdensburg (1860-1956) et les apports naturels au Lac Ontario (1900-1999) .....	46
Tableau 5: Sommaire des prévisions émises par Environnement Canada le 1er décembre 2000.....	63
Tableau 6: Sommaire des prévisions émises par Environnement Canada le 1er juin 2001 .....	64
Tableau 7: Prévision annuelle des apports énergétiques des régions du Sud et du Nord pour 2001 .....	64
Tableau 8: Prévision annuelle des apports énergétiques des régions du Sud et du Nord pour 2001 négligeant l'incertitude sur la prévision saisonnière .....	64
Tableau 9: Prévision annuelle des apports énergétiques des régions du Sud et du Nord pour 2002 négligeant l'incertitude sur la prévision saisonnière .....	65
Tableau 10: Prévision catégorique des apports énergétiques de trois régions pour les années 2001 à 2003, basée sur l'autocorrélation des apports du Saint-Laurent et sur la prévision saisonnière d'Environnement Canada, en prenant en compte de façon sommaire l'incertitude sur cette prévision.....	66
Tableau 11: Prévision catégorique des apports énergétiques de trois régions pour les années 2001 à 2003, basée sur l'autocorrélation des apports du Saint-Laurent et sur la prévision saisonnière d'Environnement Canada, en ne prenant pas en compte l'incertitude sur cette prévision .....	66
Tableau 12: Prévision catégorique des apports énergétiques totaux pour les années 2001 à 2003, basée sur l'autocorrélation des apports du Saint-Laurent et sur la prévision saisonnière d'Environnement Canada, en prenant en compte de façon sommaire l'incertitude sur cette prévision .....	67
Tableau 13: Prévision catégorique des apports énergétiques totaux pour les années 2001 à 2003, basée sur l'autocorrélation des apports du Saint-Laurent et sur la prévision saisonnière d'Environnement Canada, en ne prenant pas en compte l'incertitude sur cette prévision .....	67

Tableau 14: Prévision catégorique des apports énergétiques totaux pour les années 2001 à 2003, sous forme de probabilités imprécises ..... 68

## 1. Quelques remarques préalables à l'analyse

Avant d'entamer cette étude, nous aimerions faire quelques commentaires sur les tests statistiques, sur le concept d'apport énergétique moyen et sur les données fournies. Cela nous amènera à résumer plus simplement les questions posées.

### 1.1 Quelques remarques sur les tests statistiques et l'hypothèse d'indépendance et d'identique distribution

Les questions formulées par M. Perreault peuvent être regroupées ainsi:

Questions 1, 2 et 3: Diagnostics de la série d'apports énergétiques

Questions 4 et 5: Prédiction et prévision basée sur cette analyse rétrospective

Question 6: Décision en avenir incertain

De façon classique, on répond aux questions diagnostiques par des tests d'hypothèse, permettant (au mieux) d'évaluer la crédibilité de l'hypothèse d'indépendance et d'identique distribution (i.i.d.) des apports énergétiques par rapport à d'autres hypothèses (modèles avec tendance, saut de moyenne, cycles, ...). Ces tests peuvent aider à identifier un modèle plausible pour ces observations. Les questions de prédiction, de prévision et de décision découlent du choix de ce modèle, de même que de la prise en compte d'informations complémentaires (par exemple, sur un éventuel changement climatique au XXIème siècle) et des conséquences des différentes décisions possibles.

Cependant, M. Perreault fait ressortir dans sa demande que la recommandation faite en 1998 de prendre en compte la persistance des apports énergétiques pour prévoir ces mêmes apports a été rejetée parce qu'il n'a pas été possible d'en identifier la cause. C'est pourquoi il nous demande à la question 6 de donner une explication pour la persistance observée dans le cas où notre recommandation serait à l'effet de prendre en compte cette persistance pour la prévision des apports. Nous croyons donc qu'un travail d'analyse statistique, même très rigoureux, ne saurait convaincre à lui seul les décideurs de prendre en compte les résultats de cette même analyse.

Nous sommes par ailleurs convaincus que d'autres experts sauront effectuer d'excellents tests diagnostiques sur la série d'apports énergétiques. Dans cette perspective, les analyses rétrospectives effectuées par Perreault et al. (2000a, 2000b) nous semblent très pertinentes. Nous recommandons une mise à jour de ces résultats à la lumière des apports des dernières années.

De plus, il ne servirait à rien de s'en tenir à statuer si oui ou non l'hypothèse i.i.d. est crédible. D'ailleurs, notre opinion à ce sujet est que cette hypothèse est certainement fautive: on sait que le climat est en perpétuelle évolution, que les temps caractéristiques des nappes phréatiques, des tourbières et même des lacs sont de nature à créer un effet de mémoire dans les apports annuels. Le seul fait d'agrèger les apports par année civile

fausse la donne! Si on n'arrivait pas à observer clairement ces effets dans les séries fournies, ce serait parce que la taille d'échantillon est insuffisante.

En somme, le jugement que nous porterons dans le cadre de cette étude aura nettement plus de poids s'il est basé sur une compréhension, même limitée, des causes climatiques, hydrologiques ou anthropiques de la variabilité observée dans les séries d'apports énergétiques que s'il repose sur les résultats de tests d'hypothèse.

La démarche que nous proposons dans ce rapport consiste plutôt à effectuer une analyse rétrospective des séries d'apports énergétiques pour trois régions, en tentant d'identifier pour chacune les causes climatiques ou hydrologiques des principales anomalies observées dans ces séries, pour ensuite discuter de la prévisibilité de ces séries.

## 1.2 Quelques remarques par rapport aux données

La série chronologique des apports énergétiques d'un complexe est obtenue en multipliant les apports observés ou reconstitués à l'échelle annuelle par un facteur de production moyen, qui permet de convertir des m<sup>3</sup>/s en GWh. Pour en arriver à une meilleure compréhension de la variabilité naturelle, il serait utile de revenir à une unité de mesure ayant plus de sens physique, comme les apports naturels en m<sup>3</sup>/s et la hauteur d'eau ruisselée, en mm par unité de surface. Dans un prochain exercice, il serait utile de fournir les séries d'apports en GWh, en m<sup>3</sup>/s, et en mm / unité de surface.

Nous trouvons que l'exercice d'évaluation de l'incertitude sur les apports énergétiques a été relativement bien fait, bien qu'il faille revoir quelques détails qui pourraient avoir de l'importance. Par exemple le fait que les apports du Saint-Maurice aient été comparés à des rivières "voisines" de la basse Côte-Nord (Petit-Mécatina et Romaine).<sup>1</sup> De plus, il nous semble surprenant que l'incertitude sur les apports reconstitués pour La Grande soit du même ordre de grandeur pour la période 1943-1960 que pour la période 1961-1981. En effet, les stations en rivière utilisées lors de la seconde période de reconstitution avait l'avantage d'être situées sur le bassin de la rivière La Grande ou sur les bassins versants dérivés vers celui de La Grande Rivière.

Pour être rigoureux, il faudrait tenir compte de la décroissance dans le temps de l'incertitude sur les apports énergétiques dans tous les calculs statistiques, en donnant par exemple un poids à chaque observation qui soit proportionnelle à l'inverse de sa variance d'échantillonnage, ce qui assure une estimation non biaisée de variance minimale lorsque cette variance est connue. Dans le cas où la variance est inconnue, dans notre cas en raison de l'incertitude sur la variabilité naturelle, on pourrait utiliser des poids proportionnel à l'estimation de cette variance d'échantillonnage.

Cependant, la variance de l'erreur de mesure sur la série agrégée pendant la période 1943-1985 étant de l'ordre de  $(5 \text{ TWh})^2 = 25 \text{ TWh}^2$ , elle reste faible par rapport à la

---

<sup>1</sup> Ce détail a été porté à notre attention par Michel Slivitzky.

variabilité totale au cours de cette même période, qui est de l'ordre de  $(20.5 \text{ TWh})^2 = 420 \text{ TWh}^2$ . Si on suppose l'erreur de mesure indépendante de la variabilité naturelle, on peut estimer la variabilité naturelle par la différence entre ces deux valeurs, soit  $s_1^2 = 395 \text{ TWh}^2$ . Un estimateur combiné (*pooled estimate*) de la variabilité naturelle, plus précis, peut être obtenu en prenant une moyenne pondérée de cette valeur avec l'estimation  $s_2^2 = (15.5 \text{ TWh})^2 = 240 \text{ TWh}^2$  de la variabilité naturelle durant la période 1985-2000, pendant laquelle l'erreur de mesure est supposée négligeable. On obtient:

$$s^2 = \left[ (n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2 \right] / (n_1 + n_2 - 2) = (18.9 \text{ TWh})^2 = 355 \text{ TWh}^2$$

Le poids donné aux années avant 1986 serait donc proportionnel à  $1/(355+25)$ , et celui des années à partir de 1986 proportionnel à  $1/355$ , ce qui donne un poids équivalent à 0.98 années de mesure pour les années avant 1986, et un poids équivalent à 1.05 années de mesure à partir de 1986. Ces poids sont relativement faibles selon nous pour nous permettre de ne pas les considérer.

La réduction de la variabilité naturelle observée avant et après 1986, soit respectivement  $s_1 = 19.9 \text{ TWh}$  et  $s_2 = 15.5 \text{ TWh}$  (après avoir pris en compte la réduction de l'erreur de mesure à partir de 1986) nous mène à nous demander si l'estimation faite de l'erreur de mesure ne serait pas trop conservatrice. Si l'écart entre  $s_1$  et  $s_2$  n'est pas explicable de façon crédible par la variabilité d'échantillonnage de ces statistiques, nous serions portés à supposer que l'estimation faite de l'erreur de mesure est optimiste.

Une façon de répondre à cette question consiste à évaluer la probabilité que le rapport  $s_1^2/s_2^2$  soit supérieur ou égal à  $(19.9/15.5)^2 = 1.65$  sous l'hypothèse que les deux sous-échantillons sont constitués d'observations provenant d'une même population, une fois retiré l'effet de l'erreur de mesure. Sous l'hypothèse de normalité des observations, qui est plausible pour des apports énergétiques totaux, on peut montrer que cette statistique suit une loi  $F(n_1-1, n_2-1)$  (Walpole et Myers, 1985), et qu'en conséquence la probabilité d'observer une valeur supérieure ou égale à 1.65 pour le rapport  $s_1^2/s_2^2$  est d'environ 15%, ce qui n'est pas très faible. Ainsi, il est plausible que l'écart entre  $s_1$  et  $s_2$  soit causé par l'erreur d'échantillonnage de ces deux quantités.

### 1.3 Quelques remarques sur le concept d'apport énergétique moyen

Même si M. Perreault nous demande d'estimer l'apport énergétique moyen, nous en déduisons à la lecture, et parce que nous connaissons quelque peu ce problème, que l'emphase est plutôt sur la prévision de l'apport énergétique annuel pour les prochaines années. Les deux choses peuvent évidemment être liées. Encore faut-il savoir ce qu'est un apport énergétique moyen. Il peut s'agir de trois choses:

1. la moyenne des apports énergétiques des 58 dernières années

L'apport énergétique moyen pourrait référer à la moyenne arithmétique des apports énergétiques de la période 1943-2000. Étant donné que l'erreur de mesure sur ces apports est significative et variable dans le temps, ce n'est pas nécessairement une mince tâche.

2. la moyenne des apports énergétiques des  $n$  prochaines années

L'apport énergétique moyen pourrait aussi référer à une prévision de la moyenne arithmétique des apports pour les  $n$  prochaines années, c'est-à-dire une période finie.

3. l'espérance d'un processus stochastique représentant adéquatement la série des apports énergétiques observés et le comportement futur attendu

Cette définition est généralement celle que l'on entend par "apport énergétique moyen". Elle dépend cependant d'un modèle. En fait, la moyenne de certains processus stochastiques n'existe pas ou alors dépend du temps. D'ailleurs, telle que formulée, la question 4 nous demande de formuler un estimateur pour l'apport énergétique moyen précisément dans le cas où celui-ci dépendrait du temps!

À la lumière du préambule de la question 4, nous supposons qu'il nous est demandé de proposer un processus stochastique pour modéliser les apports énergétiques et de fournir une estimation pour l'espérance de ce processus en fonction du temps, et en particulier pour les trois prochaines années.

Notons que dans ce cas, l'apport énergétique moyen constitue une quantité non observable, contrairement aux définitions 1 et 2. Notre point de vue est que les quantités non observables ne sont pas intéressantes en soit, mais uniquement par ce qu'elles révèlent sur les observables. Ceci s'explique facilement dans un cadre bayésien.

Généralement, un modèle paramétrique  $f(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})$  d'un processus stochastique  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  aura un ou plusieurs paramètres d'échelle ou de localisation permettant d'appliquer ce modèle à divers processus, indépendamment de l'unité de mesure ou de l'origine de l'échelle de mesure. Certains de ces paramètres peuvent correspondre à l'espérance d'une, de plusieurs ou de toutes les observations  $x_i$  (conditionnelle à la connaissance de  $\boldsymbol{\theta}$ ). Il peut être intéressant d'utiliser la règle de Bayes pour cerner l'incertitude sur  $\boldsymbol{\theta}$  à la lumière d'un échantillon  $\mathbf{x}$ :

$$p(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{x}) = \frac{f(\mathbf{x} | \boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})}{\int f(\mathbf{x} | \boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})d\boldsymbol{\theta}}$$

Cependant, si nous nous intéressons véritablement à prédire des quantités observables  $\mathbf{y}$  étant données des observations  $\mathbf{x}$ , le modèle  $f(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})$  et ses paramètres  $\boldsymbol{\theta}$  ne sont intéressants que dans la mesure où ils facilitent la construction de la distribution prévisionnelle  $f(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ :

$$f(\mathbf{y} | \mathbf{x}) = \int f(\mathbf{y} | \boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{x})d\boldsymbol{\theta}$$

Dans cette perspective, il faut éviter de mettre trop d'emphase sur l'estimation des paramètres du modèle, mais plutôt insister sur la caractérisation de l'incertitude sur la prédiction (ici, la prévision des apports énergétiques des trois prochaines années).

### **1.4 Un résumé des questions posées**

En fonction des commentaires formulés dans cette section, nous proposons de résumer les questions posées ainsi, en inversant du même coup l'ordre des questions:

- Quelle est votre prévision des apports énergétiques des trois prochaines années et quelle est son incertitude?
- Quelle est votre justification pour cette prévision? (modèle utilisé, variables explicatives, relations de cause à effet, ...)

## **2. Revue des mécanismes pouvant causer une dérive des apports énergétiques par rapport à leur moyenne historique**

### **2.1 Réchauffement global et hydraulicité**

Il faut s'attendre à ce qu'un réchauffement du climat lié à une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère influence l'hydraulicité au Québec, tant en raison de l'augmentation de l'évaporation et de l'évapotranspiration qu'en raison d'un changement des quantités de précipitation. Cependant, la résolution actuelle des modèles de circulation générale (GCM) utilisés pour prédire les impacts d'une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre est trop faible pour permettre de préciser les impacts régionaux d'éventuels changements climatiques.<sup>2</sup>

Une rapport récent produit par Global Change Strategies International (GCSI 2000) présente une revue de littérature des quelques études hydrologiques réalisées à l'aide de ces données pour le Québec. Des résultats préliminaires obtenus par Singh (1988) avec une première version du modèle GCM canadien montraient de façon générale une augmentation des débits dans le nord du Québec. Une étude réalisée par Slivitzky et Morin (1996) sur la rivière Moisie, qui est représentative des bassins de la Côte-Nord, prédit une variation de l'hydraulicité de -5% à +10% selon le modèle et le scénario utilisé, lorsque la concentration de gaz à effet de serre aura doublée par rapport à la période 1961-90. L'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique prédisent quant à eux à l'aide du GCM canadien une réduction de l'ordre de 40% des apports du Saint-Laurent par rapport à la période 1900-90 (Hofmann et al., 1998), et une augmentation de la production énergétique de 15% pour le nord du Québec (Mercier, 1998). Cette différence entre le sud et le nord s'explique par le rôle de la température, qui cause une augmentation importante de l'évaporation et de l'évapotranspiration dans le sud, alors que dans le nord elle serait compensée par une augmentation des précipitations hivernales.

Par contre, pour le moment, lors d'un atelier pan-canadien organisé en mars 2001 par Environnement Canada, les participants ont montré qu'au cours du XX<sup>ème</sup> siècle les débits des rivières avaient augmenté légèrement, en particulier les débits minimums, même dans la région des Grands Lacs. Cependant, les niveaux des Lacs Supérieur, Michigan et Huron sont en ce moment à leur niveau le plus bas depuis les 35 dernières

---

<sup>2</sup> Le centre de recherche d'Hydro-Québec participe en ce moment à la mise sur pied d'un consortium, nommé OURANOS, qui aura pour objectif de palier à cette lacune en finançant entre autres des activités de recherche dans le domaine de la modélisation régionale du climat à l'aide d'un modèle climatique à aire limitée.

années, en raison de températures très chaudes depuis 1997, qui ont causé une forte augmentation de l'évaporation, en particulier pour le Lac Supérieur.<sup>3</sup>

Les effets prévus en ce moment pour les différents complexes s'annuleraient en partie. En supposant que la réduction de 40% pour le Saint-Laurent s'appliquerait aussi aux bassins de l'Outaouais et du Saint-Maurice, on s'attendrait à une baisse de 13 TWh, ce qui est probablement une surestimation, étant donné que les bassins de l'Outaouais et du Saint-Maurice sont nettement plus au nord que celui du Saint-Laurent. Une augmentation de 5% pour la Côte-Nord, soit le point milieu entre -5% et 10%, correspondrait à une hausse des apports énergétiques d'environ 2 TWh, alors qu'une hausse de 15% de la production dans le nord du Québec et au Labrador correspond à +17 TWh. Au total, le bilan positif de +4 TWh ou +2% nous semble nettement inférieur à l'incertitude de cette estimation.

De plus, les données d'apports énergétiques récentes ne supportent pas pour le moment l'hypothèse que le réchauffement global ait déjà influencé à ce point les apports énergétiques. En effet, au lieu des 4 TWh attendus, on observe au cours de la décennie 1991-2000 une baisse des apports énergétiques de 10 TWh par rapport à la période 1961-1990, ce qui donne peu de poids à l'hypothèse que le réchauffement global mène à une augmentation d'environ 4 TWh des apports énergétiques et que cet effet soit déjà visible dans notre historique.

Dans l'état actuel des connaissances, il nous apparaît donc peu opportun de biaiser la prévision des apports énergétiques des trois prochaines années en fonction des prédictions actuelles d'hydraulicité prévues pour le milieu du XXIème siècle. Étant donné la variabilité naturelle des apports énergétiques (environ 20 TWh), et dans l'optique où l'on s'intéresse avant tout à la prévision des apports énergétiques des trois prochaines années, l'exploitation d'une éventuelle persistance dans cette série, même faible, devrait avoir nettement plus d'importance que la prise en compte d'un éventuel changement climatique.

## 2.2 Oscillations climatiques et hydraulicité

L'hydraulicité est de façon évidente influencée par le climat, puisque le ruissellement est le bilan de la précipitation et de l'évaporation. On caractérise maintenant la variabilité climatique par différents indices qui montrent des patrons non aléatoires dans l'espace ou dans le temps, de la quasi-périodicité de l'oscillation australe (*El-Nino Southern oscillation*, ou ENSO), reliée aux phénomènes El-Nino et La Nina et de l'oscillation quasi-bisannuelle des vents équatoriaux (*Quasi bi-annual oscillation*, ou QBO), jusqu'aux variations décennales des pressions atmosphériques du pacifique (*Pacific decadal oscillation*, ou PDO) et potentiellement des gradients de pression dans l'Atlantique Nord (*North-Atlantic oscillation*, ou NAO) et dans l'arctique (*Arctic oscillation*, ou AO). Ces différents indices sont choisis et publicisés précisément parce qu'ils diffèrent

---

<sup>3</sup> On pourra consulter à cet effet le bulletin "Levels Alert" publié par le Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL) à l'adresse <http://www.glerl.noaa.gov/data/now/wlevels/lowlevels/>

statistiquement d'un bruit blanc et que conséquemment ils peuvent être des manifestations d'un phénomène climatique qui ne soit pas purement aléatoire, et donc explicable.

## 2.3 Oscillation australe, El-Nino et La Nina

Dans le cas de l'oscillation australe, les climatologues ont pu comprendre à l'aide d'observations et de modèles comment les interactions entre l'atmosphère et l'océan permettent de créer et maintenir des anomalies de pression atmosphérique et de température océanique dans le Pacifique.<sup>4</sup> Des modèles couplés de l'atmosphère et de l'océan permettent de tirer partie de l'inertie des océans pour développer des prévisions saisonnières crédibles dans le cas d'années El-Nino (années chaudes dans le Pacifique Est) ou La Nina (années froides dans le Pacifique Est).

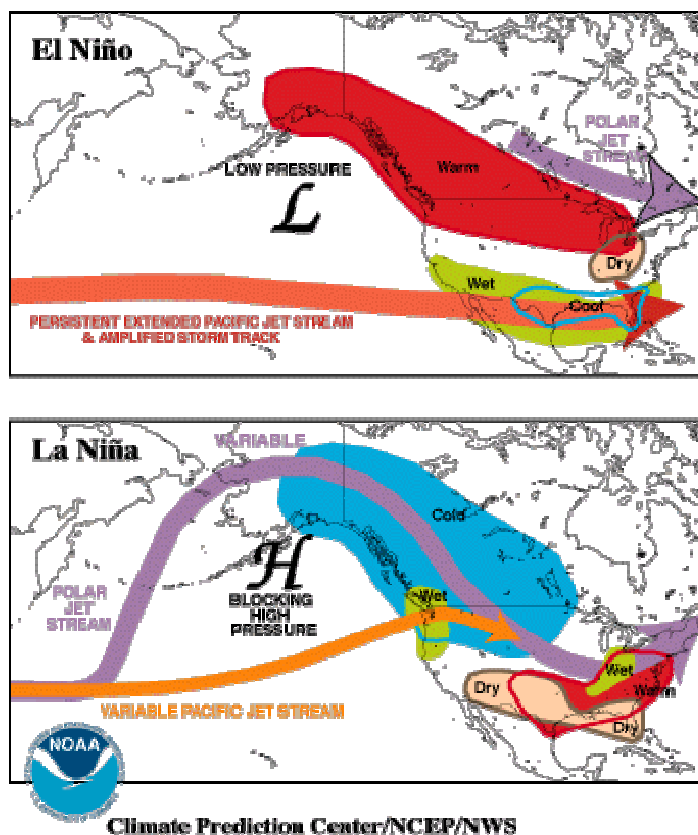


Figure 1: Impact de l'oscillation australe sur l'Amérique du Nord. Tirée de la brochure "La Niña and the Great Lakes Region", publiée par le laboratoire GLERL de NOAA et disponible à l'adresse <http://www.glerl.noaa.gov/pubs/brochures/laninaflyer/lanina.html>

Les phénomènes comme El-Nino et La Nina favorisent certains patrons météorologiques. Comme le montre la Figure 1, des conditions généralement plus chaudes prévalent dans l'Ouest canadien lors des années El-Nino, combinées à des conditions plus sèches dans la

<sup>4</sup> Voir par exemple le site <http://elnino.noaa.gov>

région des Grands Lacs. L'inverse se produit lors des années La Nina. Selon cette analyse effectuée par NOAA, le Québec, à l'exception peut-être d'une partie de la vallée du Saint-Laurent, semble peu affecté par ce phénomène, en comparaison du reste de l'Amérique du Nord. Cependant, comme le montre les figures suivantes, Environnement Canada note tout de même un effet des événements El-Nino et La Nina au Québec.<sup>5</sup> Dans la région où se trouvent les principaux réservoirs d'Hydro-Québec, on remarque que El-Nino est associé à des conditions légèrement plus chaudes, plus humides dans le Moyen-Nord et plus sèches sur la Côte-Nord, alors que les années La Nina sont caractérisées par un temps plus sec sur les bassins du Moyen-Nord et plus humide sur les bassins de la Côte-Nord.

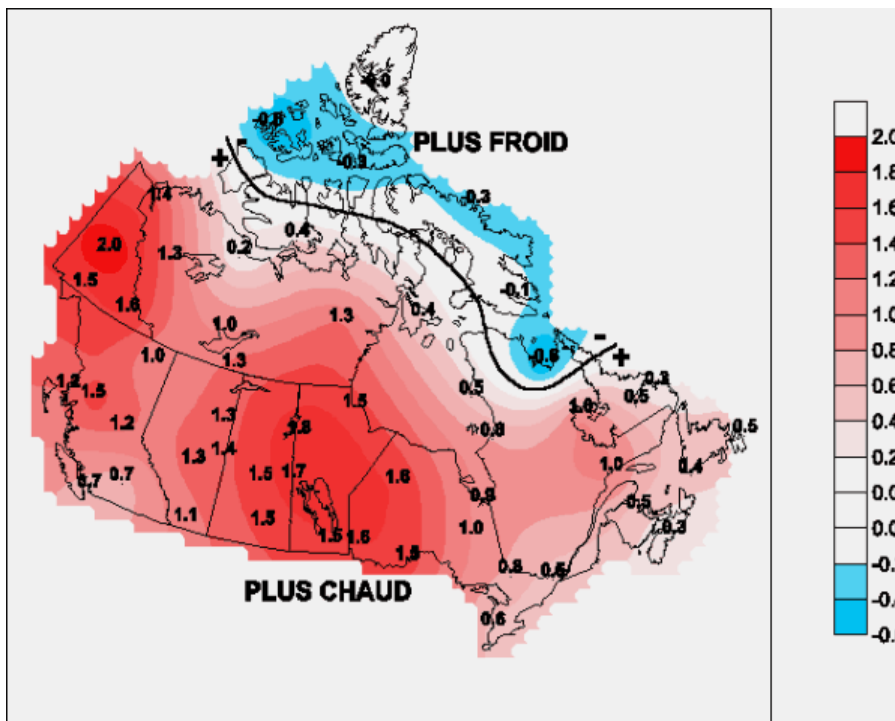


Figure 2: Impact des événements El-Nino sur les températures au Canada

<sup>5</sup> Les quatre graphiques suivants sont tirés du site Internet suivant d'Environnement Canada:  
[http://www.msc-smc.ec.gc.ca/elnino/index\\_f.cfm](http://www.msc-smc.ec.gc.ca/elnino/index_f.cfm)

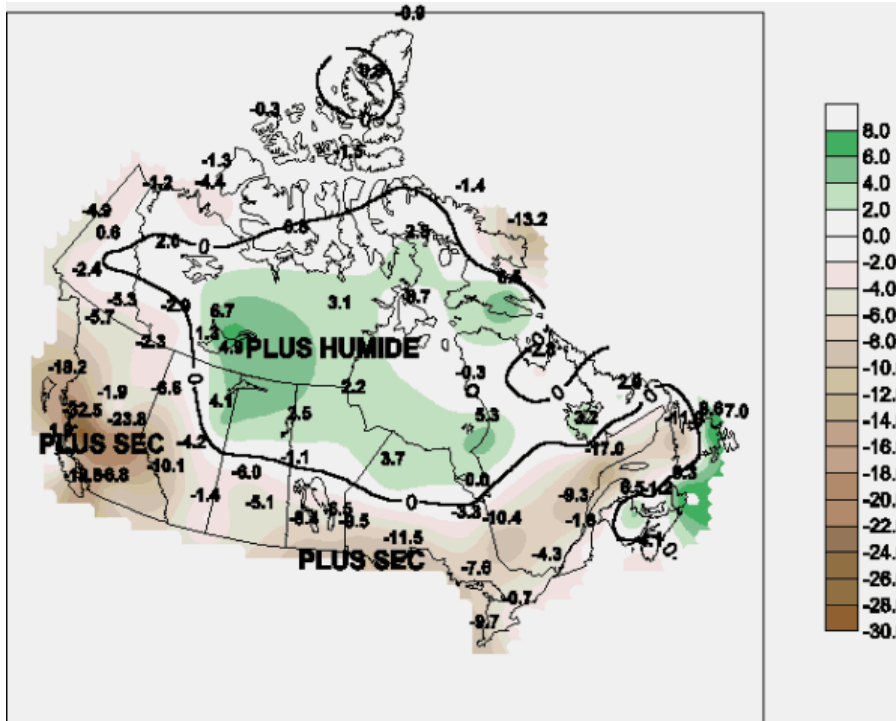


Figure 3: Impact des événements El-Nino sur les précipitations au Canada

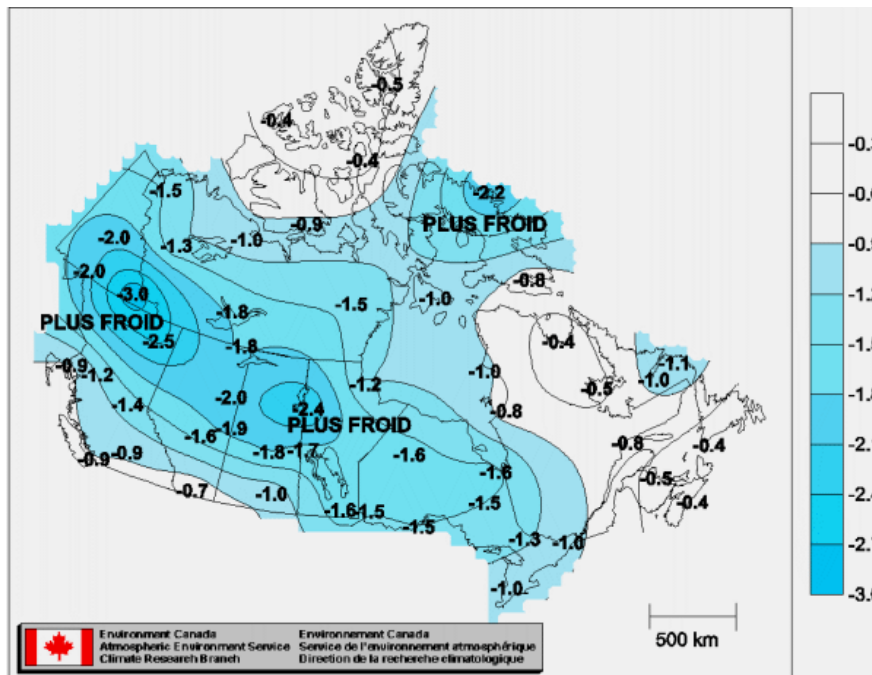


Figure 4: Impact des événements La Nina sur les températures au Canada

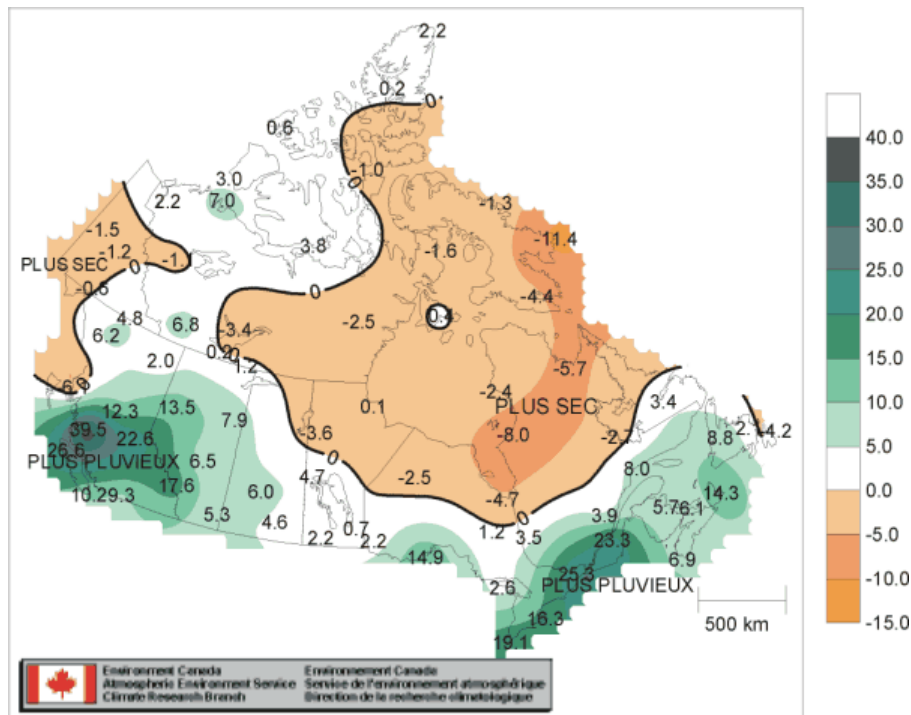


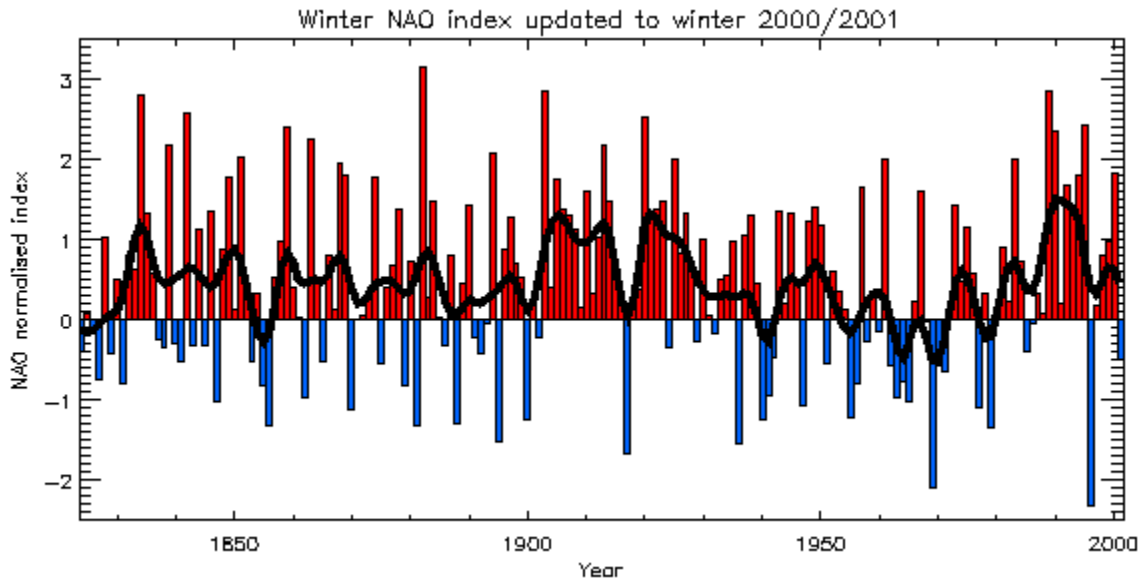
Figure 5: Impact des événements La Nina sur les précipitations au Canada

La péninsule Québec-Labrador semble donc être dans une région où les effets de El-Nino et La Nina sont non seulement faibles, mais ont des effets opposés sur la Côte-Nord et dans le Moyen-Nord. De plus, les événements El-Nino et La Nina durent typiquement moins d'une année, ce qui fait de ces phénomènes des causes peu plausibles pour expliquer des tendances, des ruptures de moyenne ou des cycles au niveau de l'hydraulicité. Il s'avère donc relativement difficile de tirer profit de ces cartes pour améliorer la prévision des apports énergétiques lors d'années El-Nino ou La Nina. Cependant, étant donné que des modèles couplés atmosphère-océan arrivent à prévoir en partie ces phénomènes, il peut être intéressant d'utiliser plus directement les sorties de ces modèles pour effectuer une prévision d'apports énergétiques dans ces conditions, de façon à tenir compte de l'effet prévu d'un événement donné, plutôt que de l'effet moyen des événements El-Nino et La Nina passés, sur lesquels sont basées les cartes produites par Environnement Canada. Une façon de réaliser cela consiste à tirer profit des prévisions saisonnières, sujet que nous abordons plus loin dans ce rapport.

## 2.4 Oscillation nord-atlantique (NAO) et oscillation arctique (AO)

Pendant la période hivernale (de décembre à mars), la différence de pression au niveau de la mer entre le nord de l'Atlantique et les régions plus méridionales est relativement élevée (en valeur absolue). Ce phénomène, nommé *North-Atlantic Oscillation* ou NAO peut être mesuré par exemple par la différence de pression entre l'Islande et Gibraltar (Figure 6) ou par la première fonction orthogonale empirique du champ de pression dans l'Atlantique Nord. Ce signal montre des caractéristiques statistiques peu vraisemblables

pour un bruit blanc, en particulier une anomalie positive qui s'est produite au début du siècle, ou encore celle qui perdure depuis le début des années 1980.

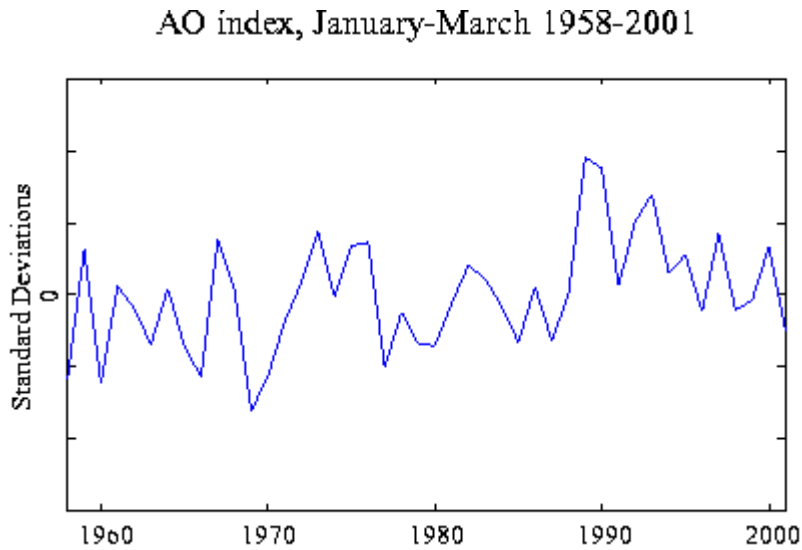


**Figure 6: Indice NAO publié par Phil Jones, Climate Research Unit, University of East Anglia (différence de pression normalisée entre l'Islande et Gibraltar de décembre à mars)**  
[http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao\\_update.htm](http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm)

Ayant un centre d'action plus près du Québec que le phénomène El-Nino, les liens entre l'oscillation NAO et l'hydraulicité au Québec a été étudiée par Rasmussen et al. (1999), qui a mis en évidence un lien de nature statistique entre cette oscillation et l'hydraulicité dans le Nord-Est de la péninsule Québec-Labrador, les anomalies positives de NAO étant liées à des années généralement plus sèches.

Cette étude a aussi démontré que ce lien statistique était plus fort entre l'hydraulicité de cette région et une mesure alternative de cette oscillation, soit l'indice BWA, qui mesure la différence de la hauteur du géopotential de 500 mb entre un point situé au large de l'Île de Baffin et un autre situé dans l'Atlantique Ouest (Shabbar et al, 1997).

Récemment, Wallace (2000) a défendu de façon éloquent la thèse voulant que l'oscillation nord-atlantique (NAO) soit une manifestation nord-atlantique d'un phénomène plus global, l'oscillation arctique (*Arctic Oscillation*, ou AO). On utilise comme indicateur de cette oscillation la première composante principale du champ de pression au niveau de la mer dans l'Arctique (Figure 7). Cet indice montre une corrélation de plus de 0,8 avec l'indice NAO.



**Figure 7: Indice AO publié par David Thompson, Colorado State University**

Slivitzky (2000) a montré qu'il existe un lien statistique important entre AO et l'hydraulicité du Nord québécois, qui explique environ 20% de la variance des apports (Slivitzky, 2000), les années fortes étant associées à des années sèches. Ces résultats sont consistants avec une analyse effectuée récemment par Todd Mitchell de l'Université de Washington, qui a montré qu'il existait une corrélation importante entre les précipitations au-dessus de la péninsule Québec-Labrador et AO, en utilisant une base de données de précipitations préparées par l'Université du Delaware (Figure 8). Cependant, des corrélations encore plus importantes existeraient sur la Côte Ouest et en Floride.

## AO precipitation anomalies (cm/month) 1950-96

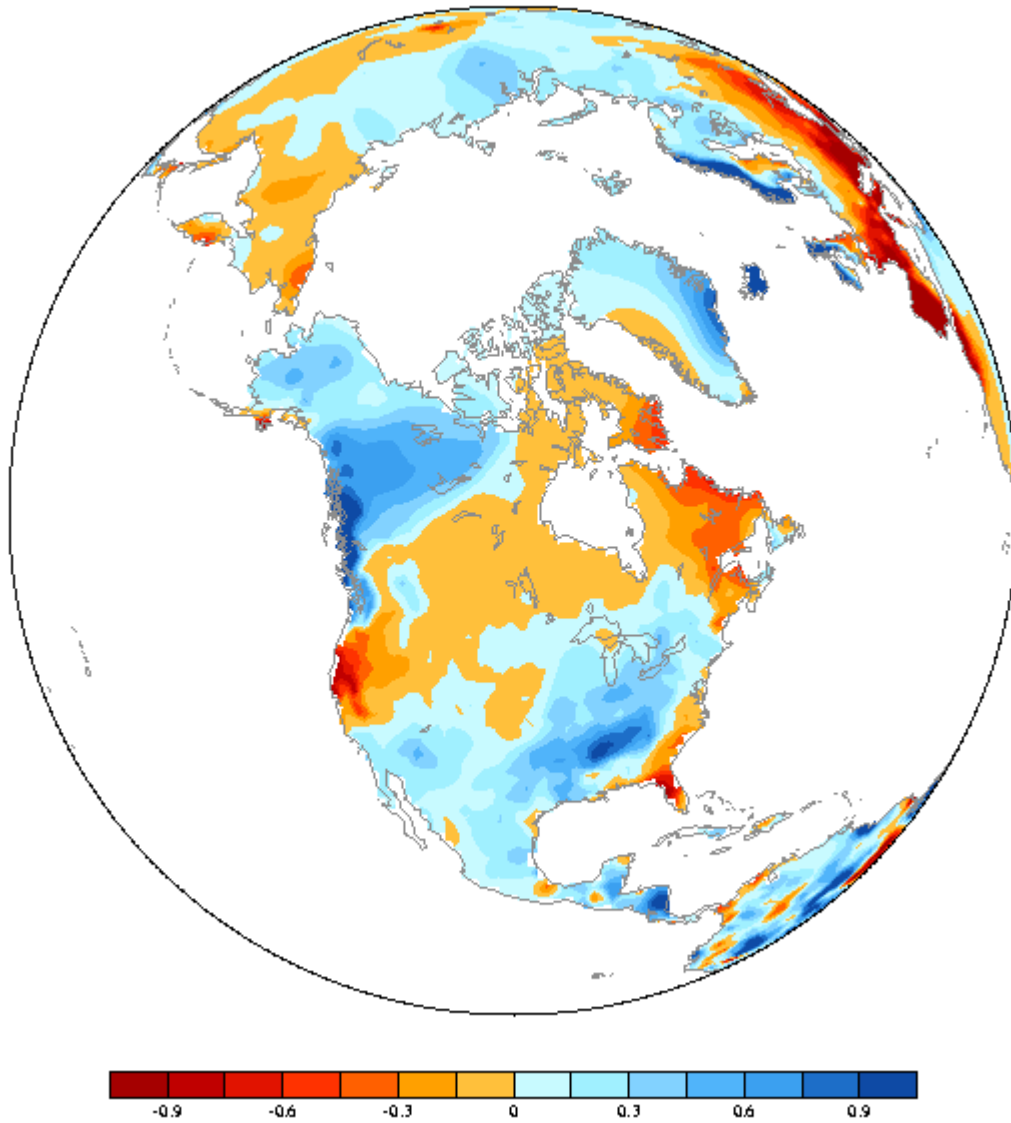


Figure 8: Pente de la régression entre l'indice AO et les anomalies de précipitations pour l'Amérique du Nord, publiées par le Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, <http://tao.atmos.washington.edu/analyses0500/>

## AO surface temperature anomalies (C) 1950-96

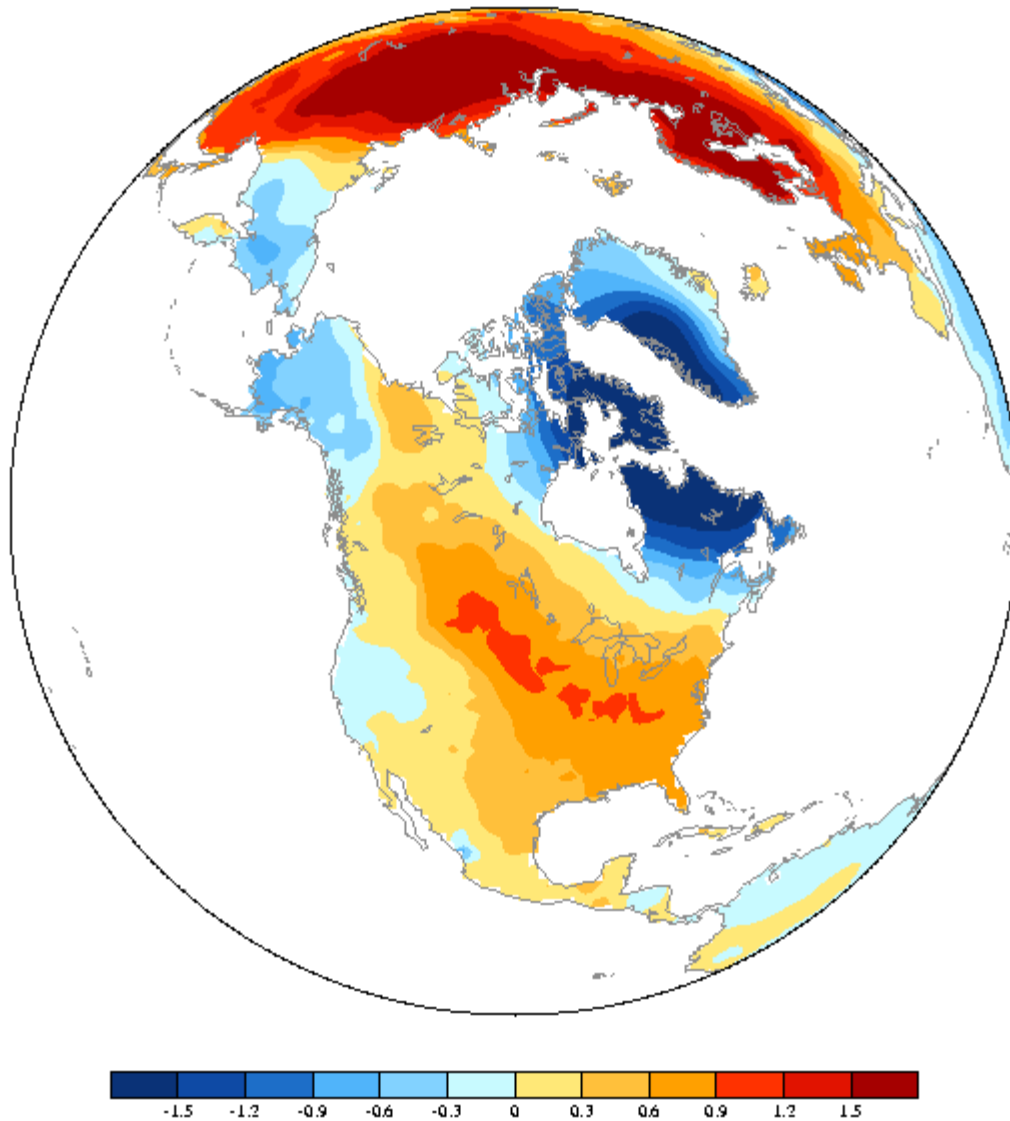
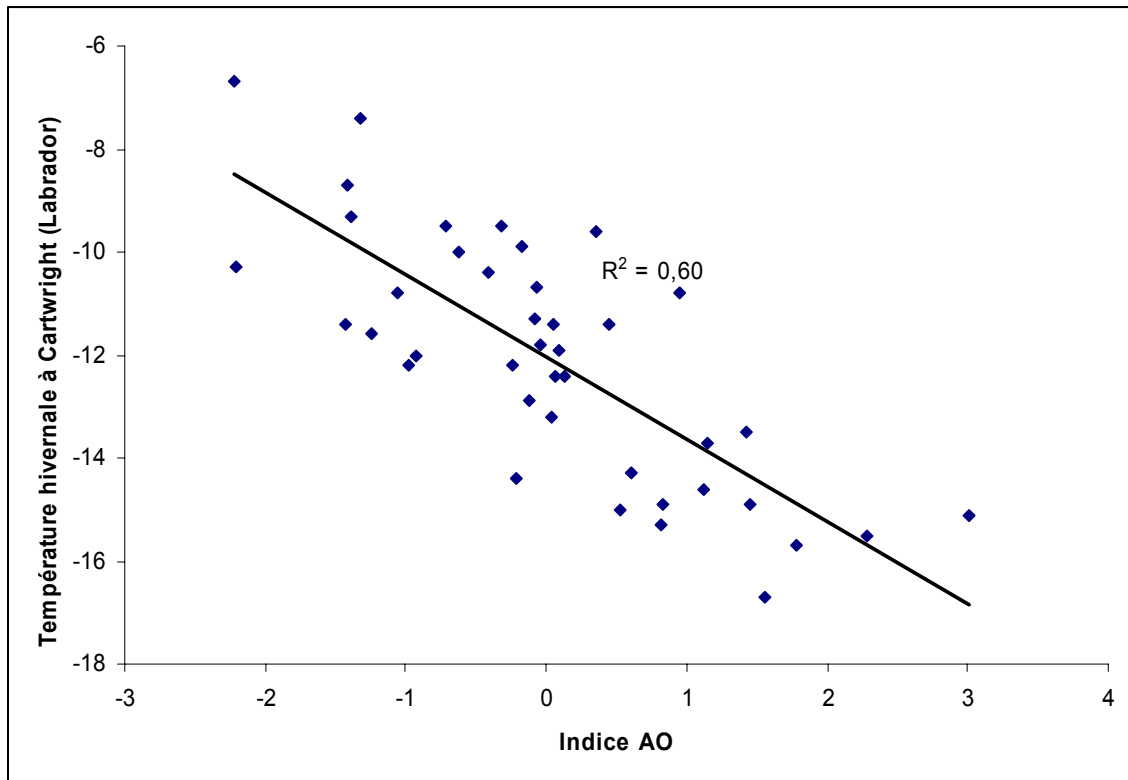


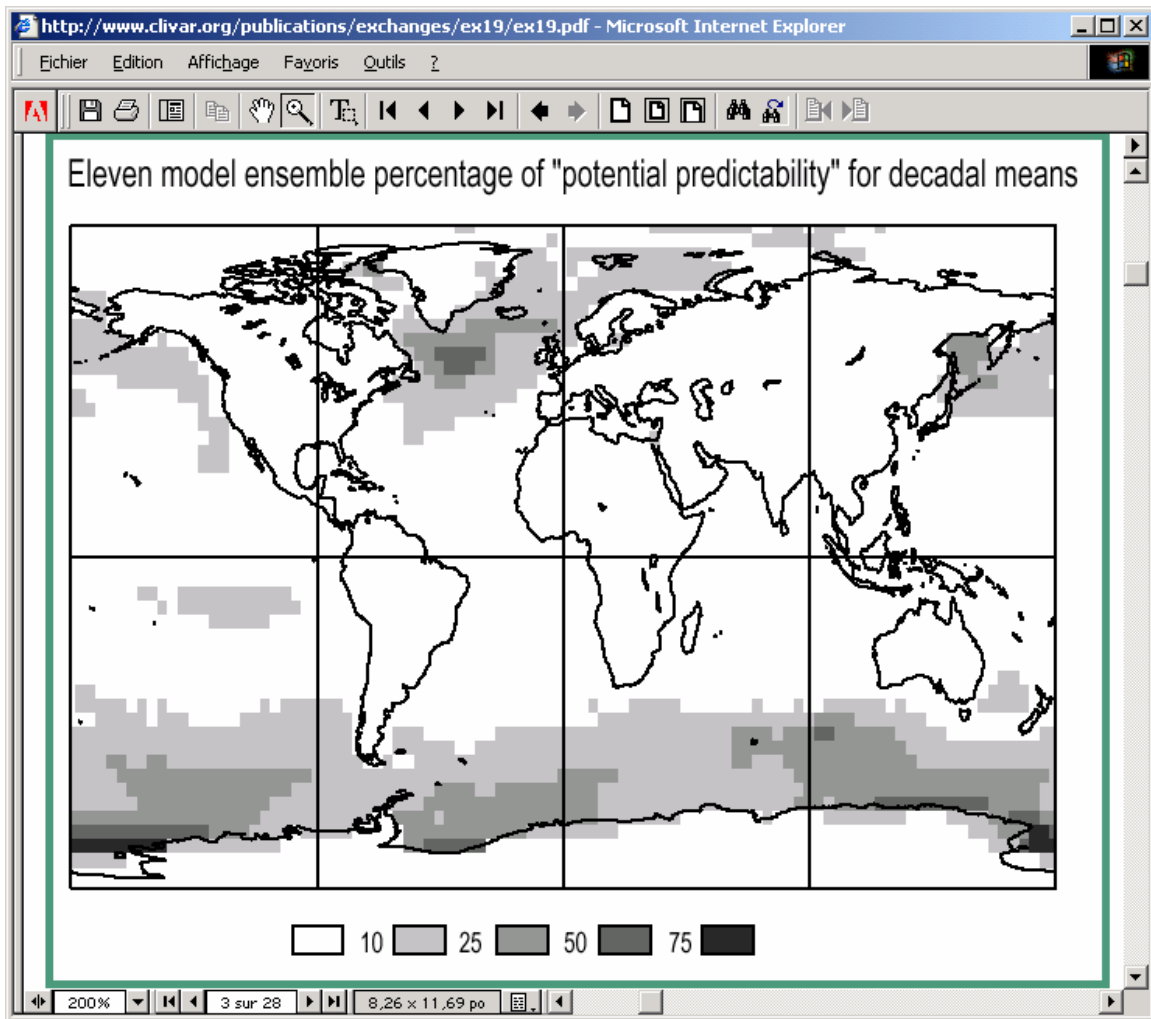
Figure 9: Pente de la régression entre l'indice AO et les anomalies de températures pour l'Amérique du Nord, publiées par le Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, <http://tao.atmos.washington.edu/analyses0500/>

L'oscillation arctique est cependant beaucoup mieux corrélée avec les températures hivernales au-dessus du Québec, comme le montre la Figure 9. Par exemple, l'indice AO permet d'expliquer 60% de la variance des températures hivernales à Cartwright (Figure 10), ce qui correspond à un coefficient de corrélation de -0.78.



**Figure 10: Régression linéaire entre l'indice AO et la température hivernale à Cartwright (Labrador) pour la période 1959-1999**

Le phénomène mesuré par les indices NAO, BWA et AO reste moins bien compris que l'oscillation australe, et aucune prévision crédible n'est disponible. Il semblerait que le rôle joué par l'océan soit bien moindre dans le cadre de NAO et qu'en conséquence la prévisibilité du phénomène soit limitée à quelques semaines, puisque l'inertie de l'atmosphère est bien inférieure à celle des océans (Greatbatch, 2000). Cependant, Boer (2001) souligne que les simulations récentes effectuées avec un ensemble de modèles couplés atmosphère-océan montrent un signal non aléatoire dans l'Atlantique Nord pour la moyenne décennale de la température de l'air à la surface de l'océan, ce qui implique qu'il existerait une prévisibilité potentielle du comportement atmosphérique de l'Atlantique Nord à cette échelle.



**Figure 11: Pourcentage de la variabilité de la moyenne décennale de la température de surface pouvant être expliquée par un ensemble de modèles atmosphère-océan (tiré de Boer, 2001)**

La Figure 11 présente le pourcentage de la variabilité de la moyenne décennale de la température de surface qui est potentiellement explicable par ces modèles à différents endroits sur le globe. On observe rapidement que cette prévisibilité potentielle est supérieure près des pôles, et presque inexistante au niveau tropical, à l'exception d'une zone à l'ouest de l'Amérique du Sud qui est très affectée par l'oscillation ENSO. Dans l'hémisphère nord, la zone où cette prévisibilité potentielle est la plus haute (environ 50%) est située au large du Labrador.

Il peut être intéressant d'étudier les liens entre ces indicateurs de variabilité climatique et l'hydraulicité pour mieux comprendre le passé, mais leur utilité dans un cadre prévisionnel est limitée, en raison de notre incapacité à les prévoir.

Dans un article récent, Hoerling et al. (2001) soutiennent cependant que le régime d'anomalies positives plus fréquentes dans lequel se maintient NAO depuis la fin des années 1980 serait causé par un réchauffement de l'océan aux tropiques. Ceci est en accord avec les résultats de Shindell et al (2001), qui soutiennent qu'un réchauffement

du climat pourrait avoir pour conséquence de maintenir AO en phase positive. Il conviendra donc de suivre avec attention les travaux liés à la validation de cette hypothèse scientifique: si cette hypothèse se révélait fondée, le lien statistique observé entre AO, NAO et les apports énergétiques pourrait être utilisé pour prédire un climat plus sec dans le nord-est de la péninsule Québec-Labrador au XXI<sup>ème</sup> siècle, sous l'hypothèse d'un réchauffement global. Il y a cependant un danger important à utiliser une relation statistique établie dans un régime climatique particulier, et à l'utiliser pour faire des prédictions pour un climat futur. En effet, même si la relation statistique est la manifestation d'une relation de cause à effet, rien ne laisse croire que les phénomènes à l'origine de la portion non expliquée de la variance (i.e. 80% de la variance) ne changeront pas eux aussi.

Finalement, dans un objectif de prévision pour les trois prochaines années, le véritable défi reste de réussir à prévoir les variations à plus court terme du climat régional. En l'absence de prévisions crédibles d'indices climatiques qui pourraient nous être utiles, une alternative consiste à tirer profit des prévisions saisonnières émises par les centres météorologiques, et qui devraient intégrer les effets de ces oscillations de façon implicite.

## 2.5 Prévision saisonnière et hydraulité

Plusieurs organismes émettent des prévisions saisonnières de température et de précipitation couvrant le Canada, dont:

- Environnement Canada: [http://weather.ec.gc.ca/saisons/index\\_f.html](http://weather.ec.gc.ca/saisons/index_f.html)
- CDC: <http://www.cdc.noaa.gov/Seasonal/forecasts.html>
- IGES: <http://grads.iges.org/ellfb/>
- IRI: [http://iri.ldeo.columbia.edu/climate/forecast/net\\_asmt/](http://iri.ldeo.columbia.edu/climate/forecast/net_asmt/)

Évidemment, ces prévisions sont loin d'être parfaites. Cependant, la plupart de ces organismes évaluent l'incertitude associées à ces prévisions, de telle sorte qu'elles peuvent être utilisées dans un contexte opérationnel, par exemple à l'aide de la méthode proposée par Croley (2000) qui consiste, à l'intérieur d'un processus de prévision hydrologique étendue de type ESP (Day, 1985), à pondérer les scénarios climatologiques observés de façon à ce que les fréquences empiriques de certains événements reproduisent les probabilités d'occurrence des événements prédits par une prévision saisonnière.

Ces prévisions saisonnières ont l'avantage d'être effectuées directement pour les paramètres qui ont une importance pour le bilan hydrologique: la température et la précipitation au-dessus du territoire concerné.

## 2.6 Stratégie retenue pour améliorer la prévision d'apports

Compte tenu de l'état de la science dans le domaine de l'analyse des impacts des changements climatiques et de la variabilité naturelle du climat, nous proposons d'étudier

deux approches pour améliorer la prévision des apports énergétiques des trois prochaines années:

- prise en compte de l'autocorrélation, dans la mesure où celle-ci peut être expliquée physiquement par le comportement du bassin versant
- utilisation de prévisions saisonnières lorsque celles-ci sont relativement précises pour apporter une information utile

Avant de s'attaquer à ces problèmes, nous effectuerons une analyse descriptive des séries d'apports énergétiques.

### 3. Analyse descriptive des séries d'apports énergétiques

Cette analyse porte sur les séries d'apports énergétiques pour 8 complexes d'Hydro-Québec, dans le but de mieux comprendre la série agrégée. Ces 8 complexes sont:

1. Saint-Laurent
2. Outaouais
3. Saint-Maurice
4. Bersimis
5. Outardes
6. Manic
7. La Grande
8. Churchill Falls

#### 3.1 Séries chronologiques étudiées

La Figure 12 présente les séries chronologiques d'apports énergétiques annuels pour les huit complexes étudiés. Chaque série est composée de  $n=58$  observations couvrant la période 1943-2000.

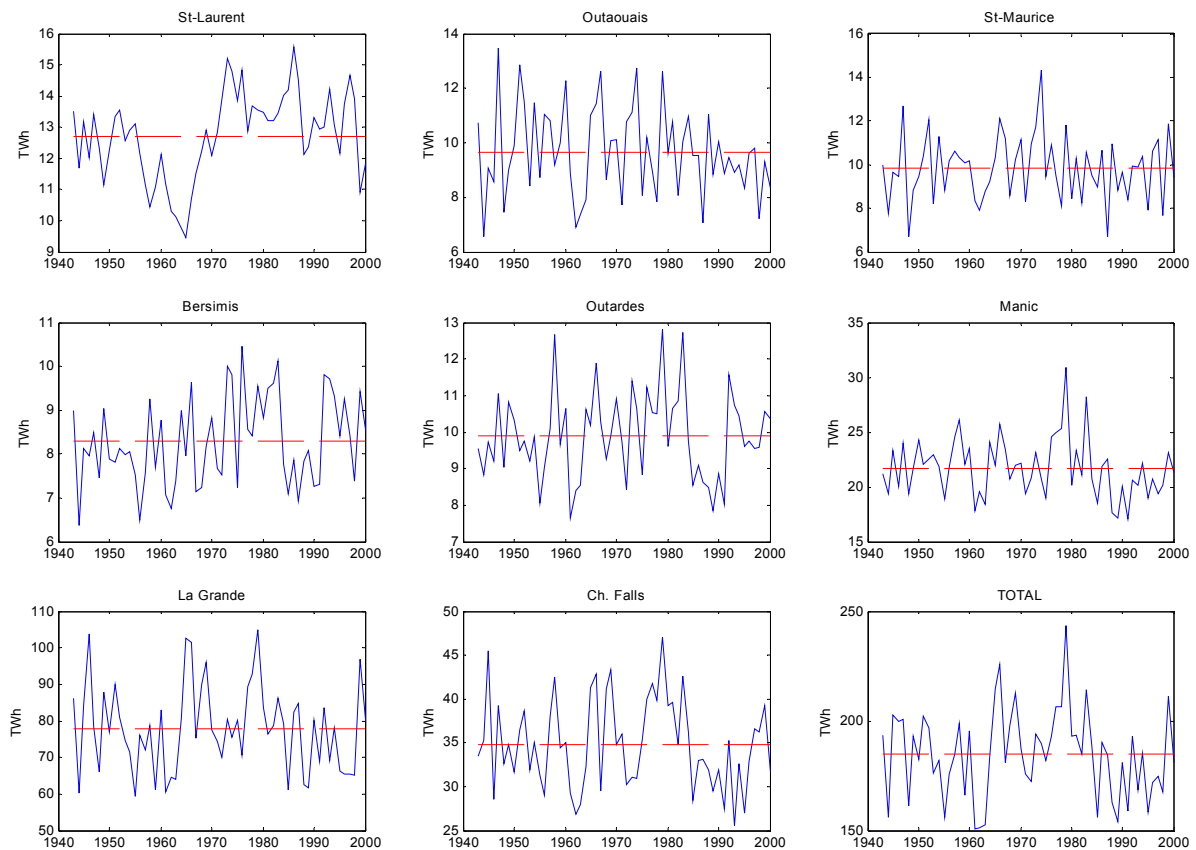


Figure 12: Série chronologiques étudiées

### 3.2 Portrait temporel de chaque série

Nous voulons dans cette section tracer un portrait rapide des séries chronologiques présentées à la Figure 12. À cette fin, nous avons produit pour chaque série quelques graphiques, que l'on retrouvera à l'Annexe B:

- un graphique présentant la série chronologique
- un graphique présentant les observations ordonnées, sur papier de probabilité normal
- l'autocorrélation et l'autocorrélation partielle pour des délais de 1 à 10 ans, accompagnée d'un intervalle de confiance à 95%
- différents résultats résultant de l'application de la procédure de Lee & Heghinian (1977), qui permet de cerner la date de changement de la moyenne dans une série d'observations normales indépendantes, sous l'hypothèse qu'il survient exactement un changement de moyenne pendant la période d'observation<sup>6</sup>, soit:
  - la distribution a posteriori de la date de changement
  - la distribution a posteriori de l'amplitude du changement
  - la distribution a posteriori de la moyenne avant et après le saut

D'abord, on observe que l'hypothèse de normalité des apports énergétiques annuels semble raisonnable pour tous les sites. On remarque ensuite que les sites suivants présentent une autocorrélation élevée:

- Saint-Laurent
- La Grande
- Churchill Falls
- série agrégée

À l'aide de la procédure de Lee & Heghinian (1977), on remarque que la date la plus probable pour un changement de moyenne se situe:

- autour de 1970 pour les complexes Saint-Laurent et Bersimis, avec une moyenne plus élevée après le saut
- autour de 1984 pour Outardes, Manicouagan, Churchill Falls, La Grande ainsi que la série agrégée, avec une moyenne moins élevée après le saut

Cependant, à l'exception du Saint-Laurent, un changement ayant peu d'amplitude demeure crédible. Pour les complexes Outaouais et Saint-Maurice, la forme en "U" de la

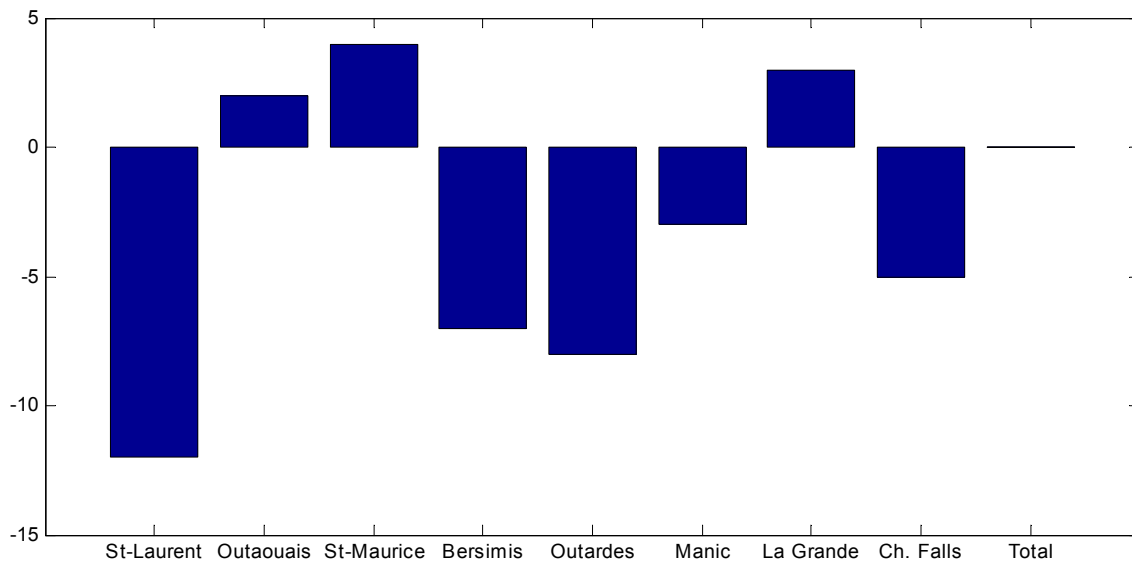
---

<sup>6</sup> Malgré tous les défauts de la procédure de Lee & Heghinian (1977), en particulier l'impossibilité d'utiliser cette procédure pour détecter un changement (Perreault et al., 2000b), il reste que cette procédure permet à l'hydrologue de tester visuellement la stationarité de la moyenne, principalement en raison de l'expérience acquise au fil des ans.

distribution a posteriori de la date de changement est symptomatique du non-respect de l'hypothèse qu'il existe un changement de moyenne au cours de la période considérée.

### 3.2.1 Analyse des séquences

Il est aussi intéressant d'étudier les séquences d'années sèches et humides. Définissons une séquence sèche comme une série d'années sous la moyenne et une séquence humide comme une série d'années au-dessus de la moyenne.<sup>7</sup> Pour un échantillon aléatoire provenant d'une distribution symétrique, le nombre total  $r$  de séquences sèches et humides devrait être en moyenne  $n/2+1$ , où  $n$  est la taille d'échantillon (Walpole et Myers, 1985). Or, pour certains complexes, ce nombre est relativement faible, comme le montre la Figure 13:



**Figure 13: Écart entre le nombre de séquences espérées pour un échantillon aléatoire provenant d'une distribution symétrique, et le nombre de séquences observées dans les séries d'apports énergétiques, les séquences étant calculées par rapport à la moyenne**

Sous l'hypothèse que les séries d'apports énergétiques sont aléatoires, la distribution d'échantillonnage de la statistique  $z = r - (n/2 + 1)$ , présentée à la Figure 13, tend vers une loi normale de moyenne zéro et d'écart-type  $\sqrt{(n-2)/4}$ , soit environ 4 pour une taille d'échantillon  $n=58$  (Walpole et Myers, 1985). Ainsi, la valeur observée pour le complexe Saint-Laurent serait exceptionnelle pour un échantillon aléatoire. Les valeurs observées pour les complexes Bersimis et Outardes sont aussi relativement élevées (alors

<sup>7</sup> Il est usuel de calculer les séquences par rapport à la médiane plutôt qu'à la moyenne. Cependant, les décideurs sont plus familiers avec les apports moyens. De plus, la distribution empirique des apports énergétiques est relativement symétrique.

que la *p-value* pour le complexe Saint-Laurent est 0.002, les *p-value* pour Bersimis et Outardes sont respectivement 0.07 et 0.04).

### 3.2.2 Interprétation des séquences dans un contexte prévisionnel

Le nombre de séquences a aussi une interprétation dans un contexte prévisionnel. Pour le comprendre, considérons la prévision, imprécise et plus ou moins naïve, consistant à affirmer que l'écart énergétique de l'année prochaine (i.e. la différence entre les apports et leur moyenne) sera de même signe que l'écart énergétique de l'année courante. Notons au passage que c'est le type de prévision qui sera faite par un modèle autorégressif lorsque la fonction d'autocorrélation estimée est positive.

Si on avait effectué ce type de prévision depuis le début de l'historique (à partir de 1944 puisqu'il faut connaître l'apport de l'année précédente), on aurait eu raison tant que l'année en cours n'est pas la fin d'une séquence. Puisqu'il y a  $r-1$  fins de séquences et  $n-1$  prévisions émises, la prévision aurait été incorrecte dans une proportion  $(r-1)/(n-1)$  de cas. À l'opposé, la prévision aurait été correcte dans une proportion  $(n-r)/(n-1)$  de cas.

Évidemment, sachant uniquement que les apports énergétiques ont une distribution symétrique, il serait possible de faire une prévision se réalisant dans 50% des cas sans connaître l'apport de l'année précédente, par exemple en lançant une pièce de monnaie ou en misant toujours sur une année au-dessus de la moyenne. L'écart entre la proportion de prévisions correcte et  $\frac{1}{2}$  donne donc une idée de la performance d'une telle prévision. Or, cet écart sera positif si et seulement si la statistique  $z = r - (n/2 + 1)$  est négative.

Ainsi, la Figure 13 permet d'identifier les séries chronologiques pour lesquelles une telle prévision aurait été efficace au cours des 57 dernières années: le Saint-Laurent, tous les sites de la Côte-Nord, de même que Churchill Falls. Il fallait s'attendre qu'une telle prévision s'avère peu efficace pour les complexes Outaouais et Saint-Maurice, puisque l'autocorrélation observée à ces sites à négative. Par contre, il vaut la peine de remarquer qu'une même approche de prévision se révèle aussi peu efficace pour le complexe La Grande et pour la série agrégée!

Étant donné ce résultat, **nous ne voyons pas comment nous pourrions justifier une prévision d'apports énergétiques qui consisterait à avancer que l'écart énergétique de l'année prochaine sera de même signe que celui de cette année, en se basant uniquement sur l'apport énergétique agrégé de l'année en cours**, du moins si le modèle stochastique sous-jacent est stationnaire (autrement, la performance mesurée sur le passé ne serait pas garante de la performance attendue dans le futur).

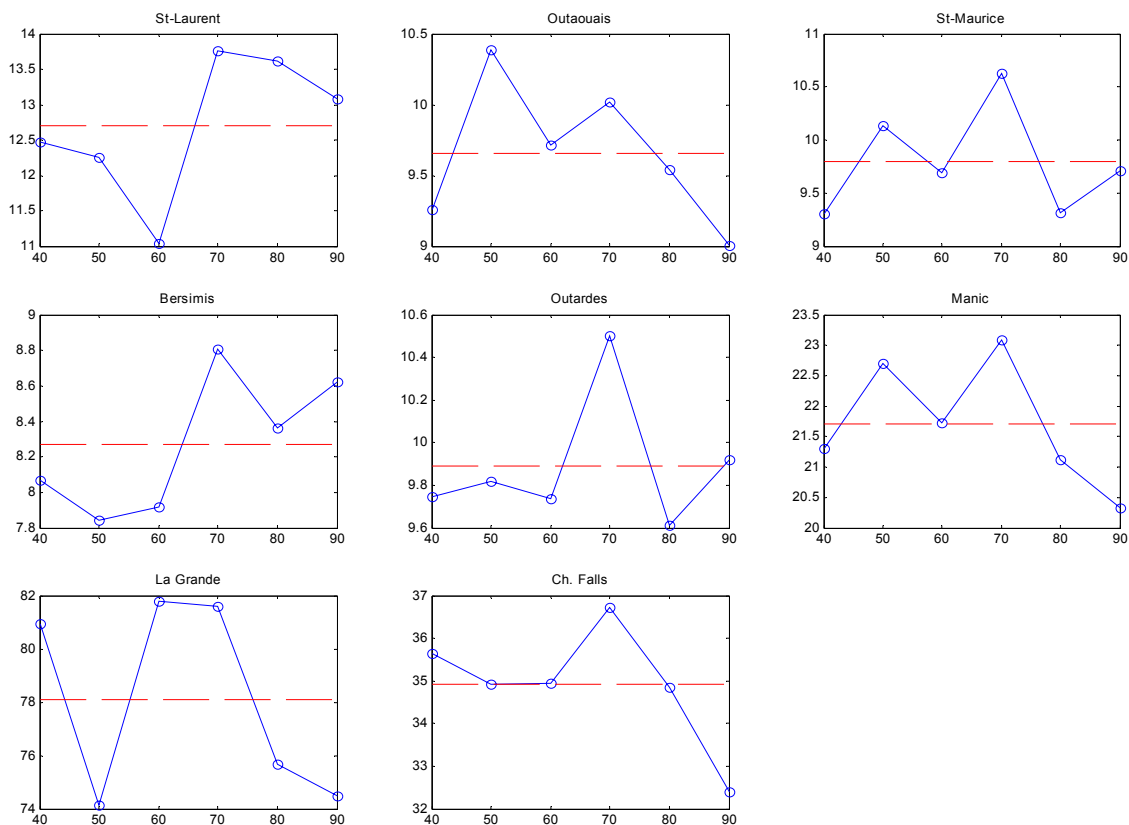
### 3.2.3 Agrégation à l'échelle décennale

Puisque nous observons pour certains complexes un faible nombre de séquences humides et sèches, cela signifie que la longueur moyenne de chaque séquence est plus élevée que ce à quoi nous pourrions nous attendre pour échantillon aléatoire. Pour ces sites, il y a donc des périodes relativement longues où les apports sont soit au-dessus de la moyenne,

soit au-dessous. On peut observer cela en effectuant une agrégation des séries au niveau décennal.

La Figure 14 présente les apports énergétiques moyens pour chaque complexe et pour chaque décennie. Notons que la décennie 1940 est incomplète, et que l'année 2000 a été regroupée avec la décennie 1990-1999. À cette échelle, on remarque différentes choses:

- à l'échelle décennale, les apports du Saint-Laurent et du complexe Bersimis sont restés au-dessus de la moyenne depuis les années 1970
- pour tous les complexes, les apports énergétiques ont été au-dessus de la moyenne pendant les années 1970.
- les années 1980 et 1990 correspondent à des années de plus faible hydraulicité pour les sites du sud (Outaouais, Saint-Maurice) ainsi que pour les trois sites les plus au nord (Manic, La Grande et Churchill Falls)



**Figure 14: Apports énergétiques moyens pour chaque complexe pour chaque décennie**

À l'exception du Saint-Laurent, remarquons aussi que les deux seuls complexes pour lesquels les apports ne sont pas sous la moyenne pendant les décennies 1980 et 1990,

soient Bersimis et Outardes, sont les deux complexes dont les bassins versants sont les plus petits.

### 3.2.4 Sommaire des caractéristiques statistiques observées

En résumé, les caractéristiques suivantes de séries d'apports énergétiques ressortent:

Saint-Laurent	autocorrélation très élevée, très faible nombre de séquences ( <i>runs</i> ), augmentation significative des apports après 1970 sous l'hypothèse d'un changement de régime au cours de la période
La Grande et Ch. Falls	autocorrélation élevée
Bersimis et Outardes	faible nombre de séquences
Outardes, Manic, Ch. Falls et La Grande	diminution modérée des apports après 1984, sous l'hypothèse d'un changement de régime au cours de la période
Pour tous les sites	apports au-dessus de la moyenne pendant la décennie 1970-1979
Série agrégée	autocorrélation élevée, diminution modérée des apports après 1984, sous l'hypothèse d'un changement de régime au cours de la période

Tableau 1: Principales caractéristiques des séries d'apports énergétiques

### 3.3 Corrélations entre les sites

On peut faire un premier constat intéressant en analysant les corrélations entre les séries fournies aux huit complexes. Le Tableau 2 présente les corrélations entre chaque paire de série<sup>8</sup>:

	<i>St-Laurent</i>	<i>Outaouais</i>	<i>St-Maurice</i>	<i>Bersimis</i>	<i>Outardes</i>	<i>Manic</i>	<i>La Grande</i>
Outaouais	0.17						
St-Maurice	0.16	<b>0.82</b>					
Bersimis	0.20	<i>0.29</i>	<b>0.49</b>				
Outardes	0.00	<b>0.37</b>	<b>0.48</b>	<b>0.79</b>			
Manic	-0.02	<b>0.40</b>	<b>0.41</b>	<b>0.49</b>	<b>0.81</b>		
La Grande	-0.06	<i>0.28</i>	<i>0.27</i>	<b>0.35</b>	<b>0.52</b>	<b>0.59</b>	
Ch. Falls	0.02	<i>0.25</i>	<i>0.27</i>	<b>0.34</b>	<b>0.57</b>	<b>0.66</b>	<b>0.58</b>

Tableau 2: Corrélations entre les apports énergétiques pour 8 complexes d'Hydro-Québec

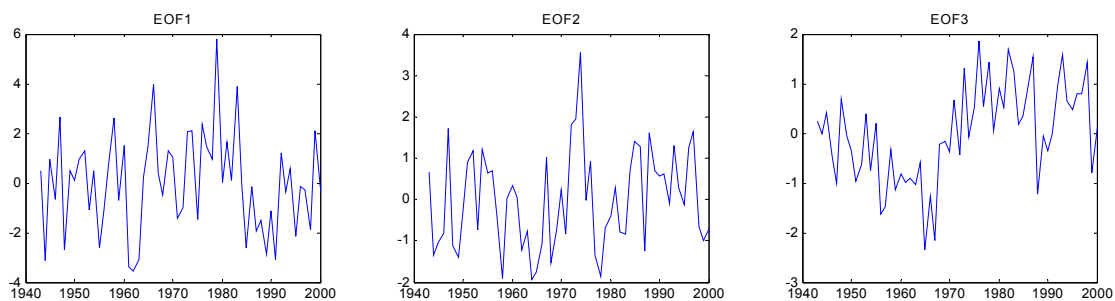
<sup>8</sup> Les corrélations significatives au seuil de 5% sont indiquées en italique et les corrélations significatives au seuil de 1% sont indiquées en gras. Nous conserverons cette convention dans tous le rapport.

On observe immédiatement que:

- aucun complexe n'est significativement corrélé avec le Saint-Laurent, mais les complexes situés plus au sud (Outaouais, Saint-Maurice et Bersimis), sont tout de même plus corrélés avec le Saint-Laurent que les autres
- les complexes du Moyen-Nord (La Grande et Churchill Falls) sont moins corrélés avec les complexes de l'Outaouais et du Saint-Maurice
- le complexe Bersimis est moins corrélé que les autres avec ses voisins
- tous les autres complexes sont fortement corrélés entre eux

### 3.4 Analyse en composantes principales

Une façon d'extraire un signal commun d'un ensemble de séries chronologiques corrélées consiste à effectuer une analyse en fonctions orthogonales empiriques (EOF). Il s'agit de construire des séries chronologiques orthogonales à partir d'une analyse en composante principale de la matrice de corrélation (Stevens, 1986).<sup>9</sup> La Figure 15 présente les trois premières EOF, qui expliquent ensemble 78% de la variance.



**Figure 15: Trois premiers EOF extraits des séries d'apports énergétiques**

On observe que le premier EOF montre une légère tendance à la hausse du début des années 1940 au milieu des années 1980, avec un creux important au début des années 1960. Par la suite, ce signal devient fortement négatif jusqu'à la fin des années 1980 (sans pour autant atteindre le niveau du début des années 1960), pour ensuite retourner vers des valeurs plus proches de zéro. La caractéristique la plus frappante du second EOF est un pic au début des années 1970, mais on observe aussi un creux au début des années 1960 et une période de dix ans (1988-97) pendant laquelle le signal est généralement resté positif. Le troisième EOF suit principalement le patron du Saint-Laurent.

---

<sup>9</sup> Lorsqu'on étudie des séries d'apports naturels, il est conseillé de faire ce travail sur la matrice des covariances, de façon à ne pas accorder dans l'analyse un trop grand poids aux sites contribuant peu en terme d'énergie. Dans le cas qui nous intéresse, la transformation des apports en énergie (une transformation qui ne dépend pas uniquement de la taille du bassin versant), biaiserait trop l'analyse.

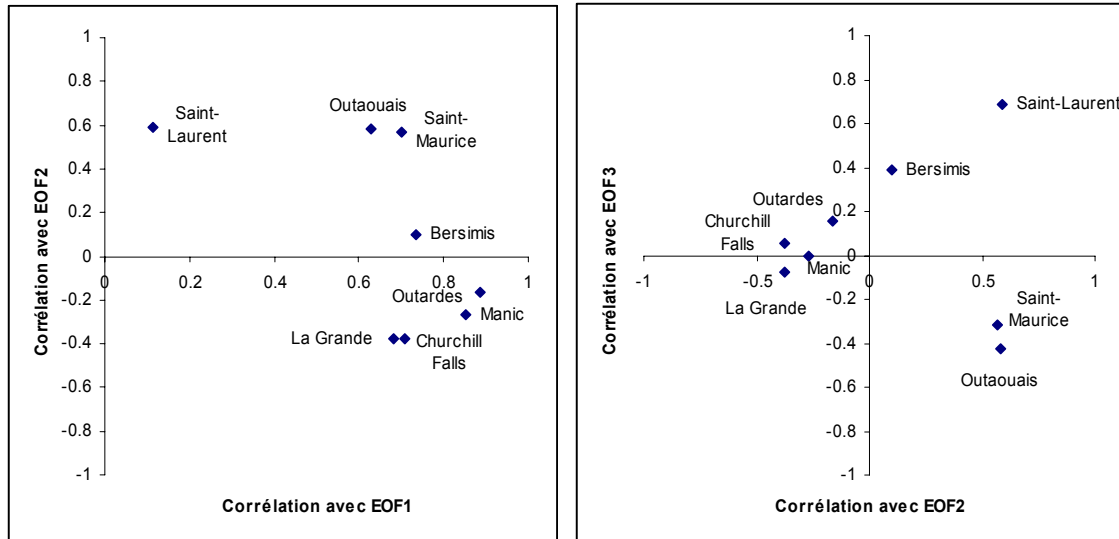


Figure 16: Projection des complexes dans l'espace des trois premiers EOF

On peut interpréter ces trois EOF en étudiant les corrélations entre ceux-ci et les séries chronologiques originales (cf. Figure 16). En projetant ces corrélations dans l'espace des deux premiers EOF, on observe que le premier EOF est fortement corrélé avec l'ensemble des sites à l'exception du Saint-Laurent, alors que le second EOF est lié à la position nord-sud des bassins (les corrélations étant positives pour les sites plus au sud, et négatives pour les sites plus au nord). Le troisième EOF est fortement corrélé avec les apports énergétiques du Saint-Laurent, mais permet aussi de distinguer l'Outaouais du Saint-Laurent. Ainsi:

- Le premier EOF donne la tendance de l'ensemble du parc, à l'exception du Saint-Laurent.
- Le second EOF vient moduler le premier EOF pour les sites du sud, accroissant la sécheresse des années soixante pour ces sites, ajoutant la période de plus forte hydraulicité au début des années 1970, et réduisant l'ampleur de la sécheresse de la fin des années 1980 jusqu'au milieu des années 1990.
- Le troisième EOF représente principalement le Saint-Laurent. Il est normal qu'un des EOF soit similaire à la série chronologique du Saint-Laurent, puisque celle-ci montre peu de corrélation avec les autres sites. On observe tout de même que la sécheresse du début des années soixante est moins présente dans le troisième EOF que dans la série du Saint-Laurent, car cette sécheresse que l'on retrouve dans l'ensemble des sites est déjà présente dans les deux premiers EOF.

### 3.5 Regroupement des complexes en trois régions

À la lumière de l'analyse en composante principale, il semble possible de regrouper les sites de façon à réduire la dimension du vecteur d'observations autrement que par l'étude de fonctions empiriques orthogonales. Nous formerons trois groupes: le Saint-Laurent, le

sud du Québec (Outaouais et Saint-Maurice), et enfin le Moyen-Nord et la Côte-nord regroupés dans un troisième groupe. Le seul site qui soit difficile à regrouper est Bersimis: ce complexe semble se comporter davantage comme les sites du sud que les autres complexes de la Côte-Nord et du Moyen-Nord. Il ne faut cependant pas oublier qu'une partie significative du bassin-versant du complexe Bersimis est constituée d'une dérivation d'un sous-bassin de la rivière Saguenay, qui n'appartient pas à la Côte-Nord. Il n'est donc pas si surprenant que ce complexe se comporte différemment des sites plus à l'est et plus au nord.

Ces regroupements, suggérés par l'analyse en composante principale, ont été confirmés par l'utilisation de la méthode Iphigénie (Kaufmann, 1975). Cette méthode permet de regrouper un ensemble de points en fonction de leur distance, définie ici comme  $d_{i,j} = 1 - \rho_{i,j}^2$ , où  $\rho_{i,j}$  est la corrélation entre le site  $i$  et le site  $j$ . Contrairement à d'autres méthodes de classification, la méthode Iphigénie ne demande pas de fixer au préalable le nombre de groupes. Par contre, elle permet de former des sous-ensembles de sites voisins sans assurer que ces sous-ensembles forment une partition. Le résultat obtenu à l'aide de la méthode Iphigénie est le suivant:

- Groupe 1: Churchill Falls, Outardes, Manic, La Grande
- Groupe 2: Bersimis, Outardes, Manic, La Grande
- Groupe 3: Bersimis, Saint-Maurice
- Groupe 4: Saint-Maurice, Outaouais
- Groupe 5: Saint-Laurent

Ces groupes ne forment pas une partition, en raison encore une fois du complexe Bersimis, qui n'est pas considéré voisin du complexe Churchill Falls (et donc exclu du groupe 1), et qui est considéré voisin du Saint-Maurice, mais non de l'Outaouais. La solution la plus simple, pour obtenir une partition, consiste à ajouter Bersimis au groupe 1, et à supprimer les groupes 2 et 3, ce qui mène au même regroupement que celui que nous avons déduit précédemment par analyse en composantes principales:

- le Saint-Laurent
- le Sud: Saint-Maurice, Outaouais
- le Nord: Churchill Falls, Bersimis, Outardes, Manic, La Grande

La Figure 17 et la Figure 18 présentent les séries d'apports énergétiques pour ces trois régions, à l'échelle annuelle et à l'échelle décennale. Les séries chronologiques des trois régions retenues semblent avoir un comportement fort différent. Notons cependant qu'il existe une corrélation importante entre la région du Sud et la région du Nord, comme le montre le Tableau 3, et que la décroissance des apports énergétiques de la série agrégée au cours des deux dernières décennies s'observe aussi pour les trois régions, après le maximum atteint au cours des années 1970. Dans un contexte prévisionnel, il sera important de s'interroger sur la pertinence de préserver cette cohérence, en particulier la corrélation spatiale entre les régions du Sud et du Nord.

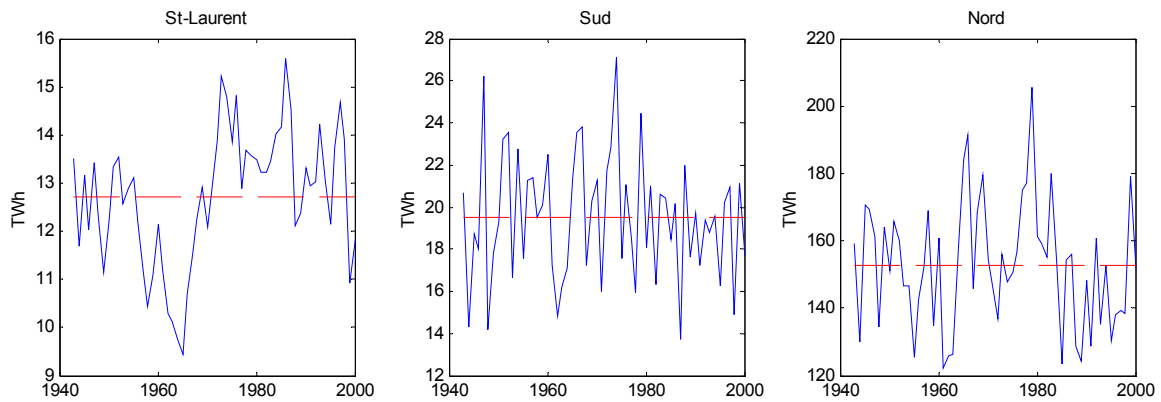


Figure 17: Apports énergétiques pour les trois régions retenues

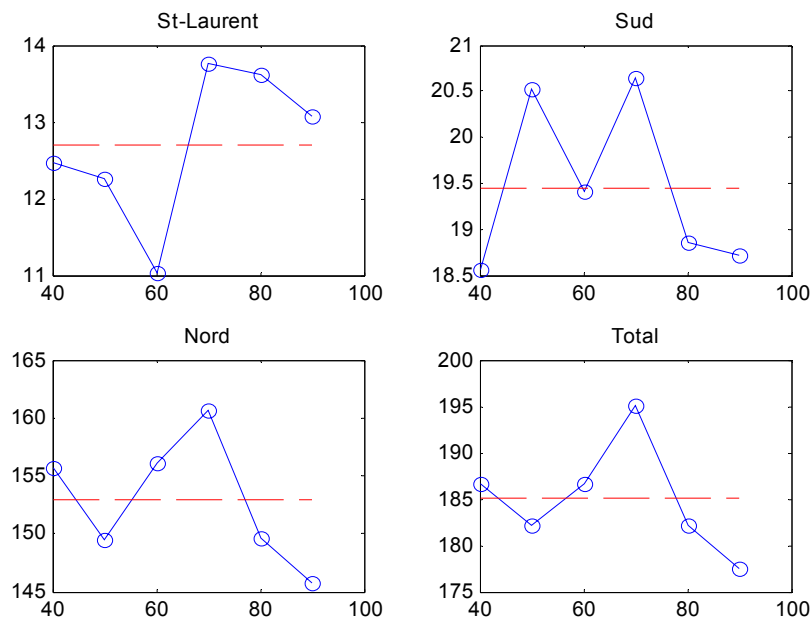


Figure 18: Apports énergétiques moyens pour chaque région pour chaque décennie

	<i>St-Laurent</i>	<i>Sud</i>	<i>Nord</i>
St-Laurent	1.00		
Sud	0.18	1.00	
Nord	-0.02	<b>0.37</b>	1.00

Tableau 3: Corrélations entre les apports énergétiques de trois régions

Ces trois séries seront décrites plus en détail dans les sections suivantes.

### 3.6 Étude des apports énergétiques du Saint-Laurent

Puisque le Saint-Laurent constitue à lui seul l'une des trois régions étudiées, son portrait statistique a déjà été étudié à la section précédente sur la période 1943-2000. Rappelons les caractéristiques statistiques observées de cette série:

- autocorrélation très élevée (0.7 pour l'autocorrélation d'ordre 1)
- séquences sèches et humides peu nombreuses, et par conséquent plus longues
- augmentation significative des apports après 1970 sous l'hypothèse d'un changement de régime au cours de la période

La fonction d'autocorrélation est typique d'un modèle autorégressif: décroissance approximativement exponentielle, autocorrélation partielle devenant rapidement non significative. En fait, la série chronologique des apports naturels du Saint-Laurent est souvent utilisée comme exemple typique d'un processus naturel adéquatement modélisé par un processus stochastique autorégressif. Par exemple, Hipel et McLeod (1978) choisissent un modèle autorégressif d'ordre 3, i.e. AR(3), pour modéliser le débit du Saint-Laurent à Ogdensburg. McLeod et Hipel (1978) montrent aussi que l'adéquation d'un modèle AR(3) est supérieure à celle d'un modèle préservant le coefficient de Hurst, où le critère d'adéquation est celui proposé par Akaike (1974). Pour la même série de données, Bras et Rodriguez-Iturbe (1985) recommandent un modèle AR(1).

#### 3.6.1 Cause de l'augmentation des apports après 1970

Malgré la grande taille du bassin-versant du Saint-Laurent, la forte persistance observée dans cette série ne peut vraisemblablement être expliquée uniquement par l'effet de stockage du bassin-versant. D'ailleurs, Perreault et al. (1999) rapportent une augmentation des débits des rivières dans le Nord-Est des États-Unis à la même période. Ceci milite en faveur d'une explication climatique: soit une augmentation des précipitations, soit une réduction de l'évapotranspiration et de l'évaporation. Pour étudier ce phénomène, nous avons extrait de la base de données du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) les anomalies de température et de précipitation au-dessus du bassin-versant des Grands Lacs.<sup>10</sup>

Alors que les températures présentent une légère tendance à la hausse depuis le début du siècle, les précipitations présentent une hausse très nette au début des années 1970, comme le montre la Figure 19, ce qui confirme que l'augmentation des apports énergétiques du Saint-Laurent depuis les années 1970 est lié à un phénomène climatique régional, et non uniquement à l'effet de mémoire du bassin. Cependant, l'autocorrélation d'ordre 1 des apports énergétiques du Saint-Laurent est plus élevée que la moyenne

---

<sup>10</sup> Ces données sont disponibles sur le site web suivant: <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>.

régionale de ce paramètre, estimé à 0.4 par Vogel et al. (1998), ce qui laisse supposer qu'une bonne partie de la persistance est liée à l'effet de mémoire du bassin-versant.

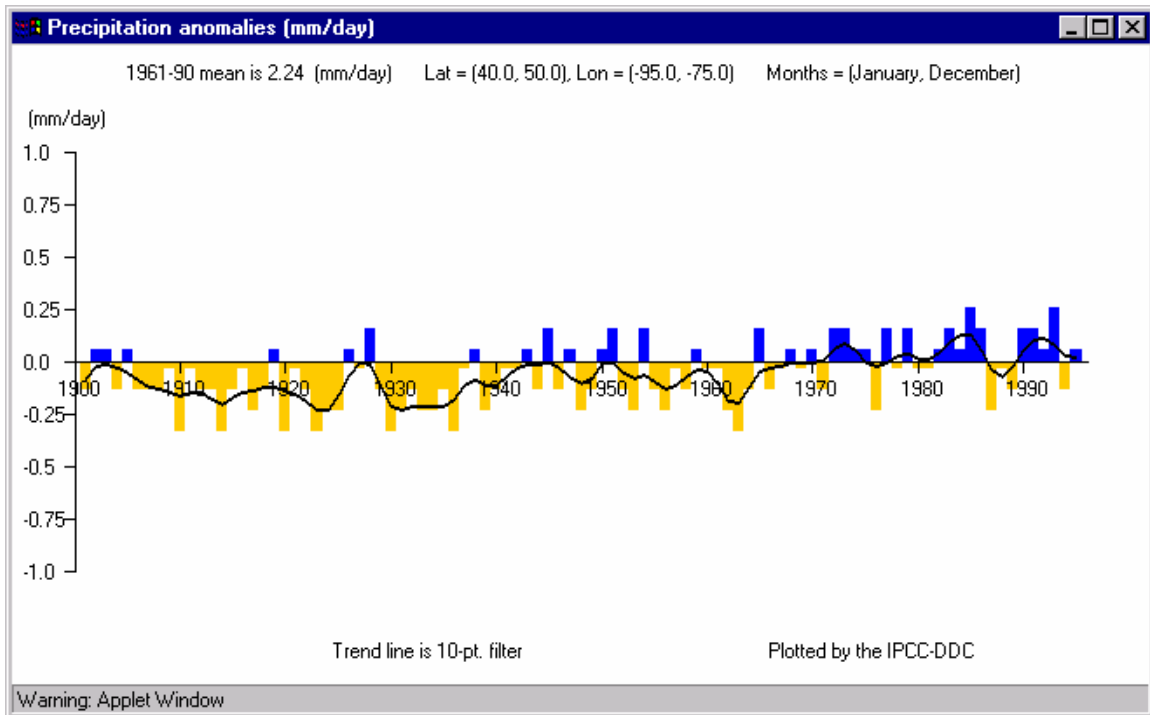


Figure 19: Anomalies de précipitation au-dessus de la région des Grands Lacs de 1900 à 1995

### 3.6.2 Apports du Saint-Laurent avant 1943

Le Saint-Laurent est l'un des cours d'eau canadiens pour lesquels on dispose de données annuelles de bonne qualité depuis plus d'un siècle. Ces données peuvent contribuer à améliorer la prévision des apports énergétiques du Saint-Laurent. Nous avons à notre disposition deux séries chronologiques des débits du fleuve: le débit du Saint-Laurent à Ogdensburg de 1860 à 1956, tiré du jeu de données utilisé par Hipel et McLeod (1978)<sup>11</sup>, et les apports naturels du Lac Ontario (*net basin supply* ou NBS) de 1900 à 1999, fournis par Mme Laura Fagherazzi, de l'unité Prévision et ressources hydriques. Nous avons d'abord standardisé ces trois séries, puis nous les avons porté sur le même graphique (cf. Figure 20). Étant donné la cohérence apparente de ces trois signaux, on pourrait certainement utiliser les débits à Ogdensburg et les apports au Lac Ontario pour reconstituer la série des apports énergétiques du Saint-Laurent avant 1943. En fait, il existe probablement une série d'apports reconstitués depuis 1860 à Cornwall ou à Beauharnois-Les Cèdres qui pourrait être utilisée rapidement pour préciser la moyenne des apports énergétiques du Saint-Laurent.

<sup>11</sup> Ce jeu de données est disponible sur Internet à l'adresse [http://solafide.uark.edu/Courses/Timeseries/HM\\_data/hurst/](http://solafide.uark.edu/Courses/Timeseries/HM_data/hurst/)

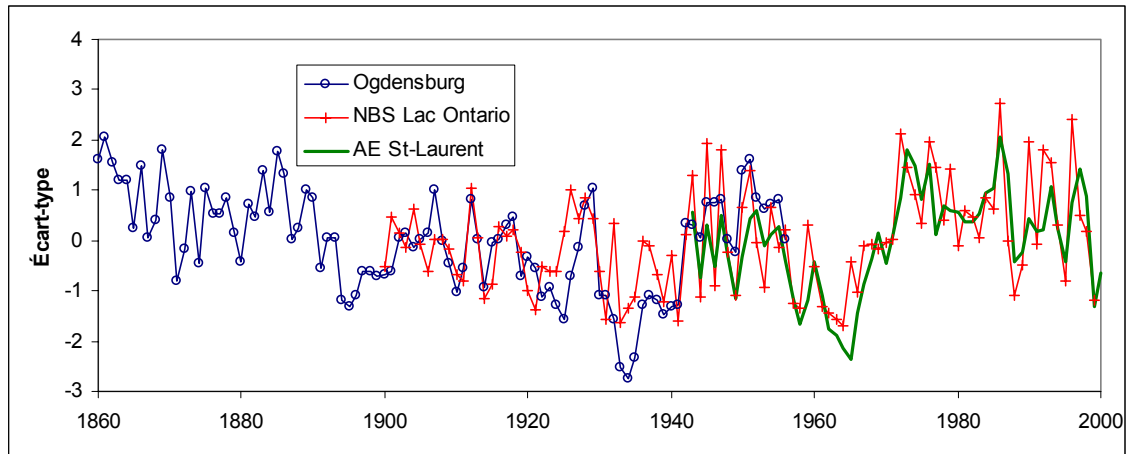


Figure 20: Comparaison des apports énergétiques du Saint-Laurent (1943-2000) avec le débit du Saint-Laurent à Ogdensburg (1860-1956) et les apports naturels au Lac Ontario (1900-1999)

Le Tableau 4 présente les corrélations entre les ces trois séries ainsi que, entre parenthèse, la longueur de la période concomitante.

	<i>Ogdensburg</i>	<i>Lac Ontario</i>	<i>AE St-Laurent</i>
Ogdensburg	1.00 ( <i>n</i> =97)		
Lac Ontario	<b>0.59</b> ( <i>n</i> =57)	1.00 ( <i>n</i> =100)	
AE St-Laurent	<b>0.56</b> ( <i>n</i> =14)	<b>0.76</b> ( <i>n</i> =57)	1.00 ( <i>n</i> =58)

Tableau 4: Corrélation entre les apports énergétiques du Saint-Laurent (1943-2000), le débit du Saint-Laurent à Ogdensburg (1860-1956) et les apports naturels au Lac Ontario (1900-1999)

Malgré le fait que la corrélation soit plus élevée entre les apports naturels du Lac Ontario et les apports énergétiques du Saint-Laurent (0.76) qu'entre le débit du Saint-Laurent à Ogdensburg (0.59), cette dernière série représente probablement mieux la persistance des apports énergétiques du Saint-Laurent, puisque ce débit intègre l'effet de l'ensemble des Grands Lacs. Ceci apparaît de façon frappante lorsque l'on compare les graphiques d'autocorrélation de ces trois séries pour des délais de 1 à 10 ans (cf Figure 21).

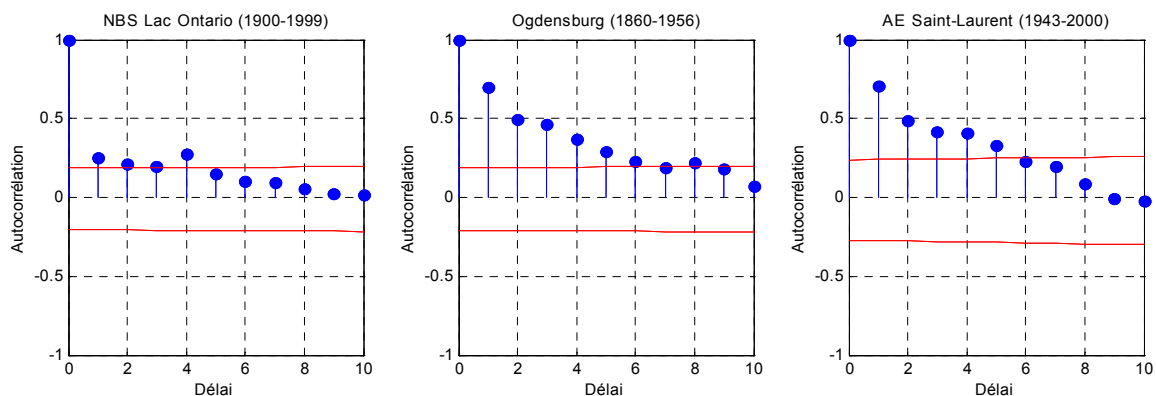


Figure 21: Graphiques d'autocorrélation pour les apports énergétiques du Saint-Laurent (1943-2000), le débit du Saint-Laurent à Ogdensburg (1860-1956) et les apports naturels au Lac Ontario (1900-1999)

La différence entre l'autocorrélation d'ordre 1 du débit du Saint-Laurent à Ogdensburg et l'autocorrélation d'ordre 1 des apports énergétiques du Saint-Laurent est plus petite qu'un centième, et les valeurs d'autocorrélation sont très similaires pour tous les délais entre 1 et 10 ans. Nous en déduisons que les valeurs d'autocorrélation estimées pour les apports énergétiques du Saint-Laurent sur la période 1943-2000 sont relativement robustes, et qu'il y aurait probablement avantage à en tirer profit pour améliorer la prévision des apports à l'échelle annuelle.

Par exemple, en étalonnant un modèle AR(3) sur les données du Saint-Laurent à Ogdensburg de 1860 à 1942, soit bien avant la hausse des apports observée depuis 1970, et en utilisant ces paramètres sans mise à jour à partir de 1943, on aurait pu réduire l'erreur de 32% pour la prévision une année à l'avance, de 14% pour la prévision deux années à l'avance, et de 11% pour la prévision trois années à l'avance.<sup>12</sup> En comparaison, un modèle AR(1) aurait réduit l'erreur de 30% pour la première année, 12% pour la deuxième et 9% pour la troisième. Notons que des résultats tout à fait similaires sont obtenus lorsque le modèle est étalonné sur la période 1943-2000 et utilisé pour effectuer des prévisions sur la période 1860-1942, ce qui confirme que la performance du modèle autorégressif n'est pas influencée par la période de plus forte hydraulité observée depuis 1970. En fonction de ces résultats, nous recommandons donc que l'on tire profit de l'autocorrélation pour la prévision des apports. Un modèle AR(1) pourrait cependant être suffisant, surtout dans l'objectif de faire accepter le principe qu'il y a avantage à tirer profit de l'autocorrélation pour effectuer de meilleures prévisions d'apports.

### 3.7 Étude des apports énergétiques du Sud du Québec

Comme le montre la Figure 22 et la Figure 23, les apports énergétiques dans le sud du Québec (Ouataouais et Saint-Maurice) ressemblent à un bruit blanc. On notera cependant la période de faible hydraulité au début des années 1960, et une apparente diminution de la variabilité depuis une vingtaine d'années. Dans le cadre d'une prévision pour les trois prochaines années, il nous semble correct de se baser sur la moyenne à long terme, qui pourrait cependant être améliorée en tirant profit des débits mesurés en rivière à partir de 1920 dans ce secteur (par exemple, les débits mesurés à Chat-Falls et à Grand-Mère) et éventuellement des prévisions saisonnières.

---

<sup>12</sup> On entend ici par erreur la racine carré de l'erreur quadratique moyenne. Les pourcentages de réduction de l'erreur sont calculés par rapport à la prévision par défaut consistant à prévoir la moyenne à long terme pour les trois prochaines années.

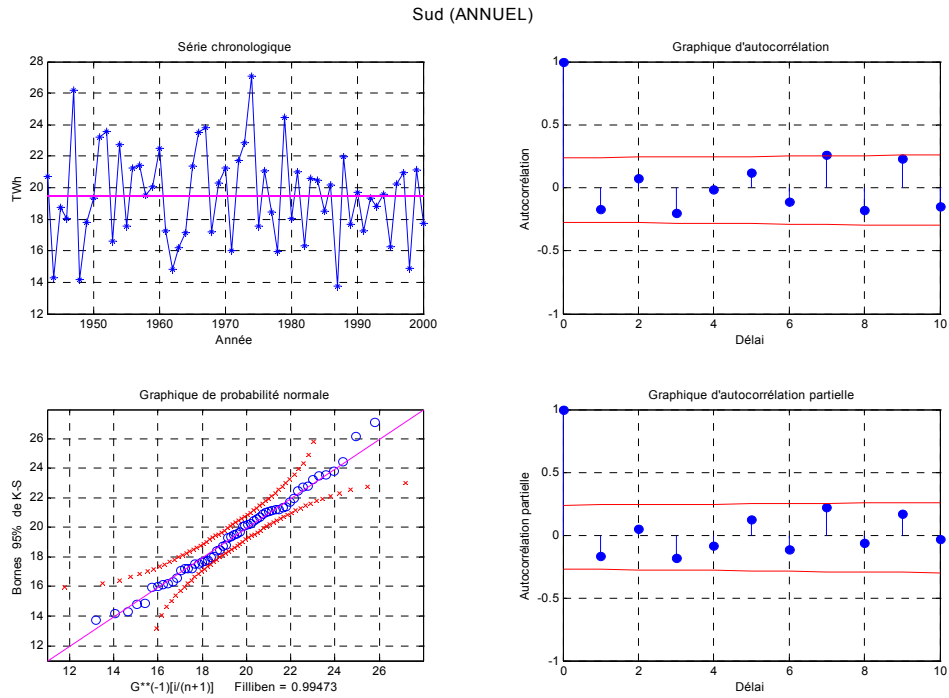


Figure 22: Portrait de la série d'apports énergétiques du Sud du Québec

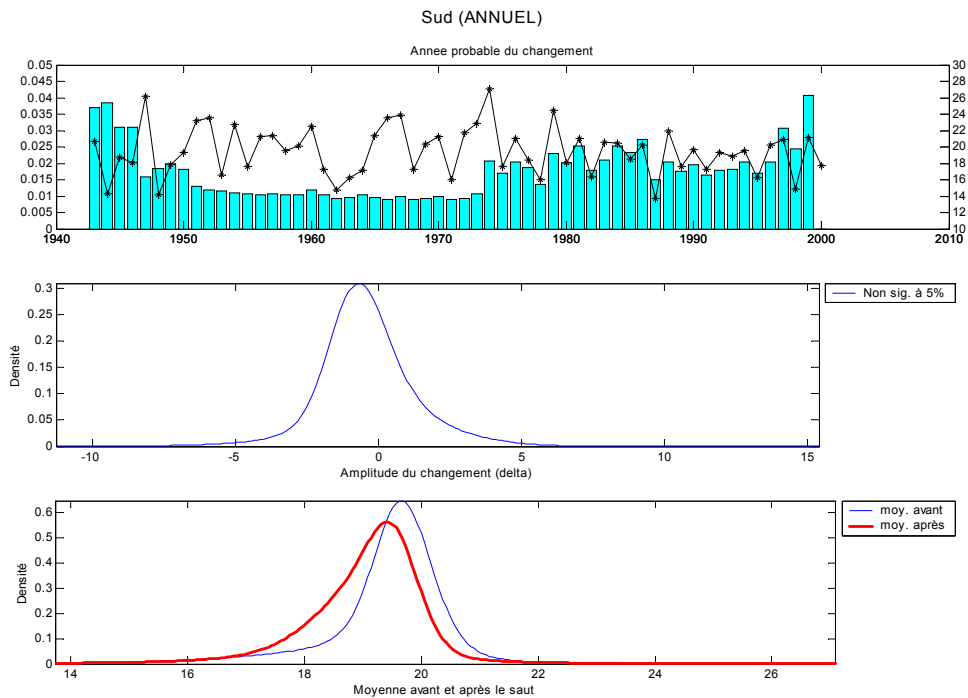


Figure 23: Procédure de Lee & Heghinian appliquée aux apports énergétiques du Sud du Québec

### 3.8 Étude des apports énergétiques du Nord

L'analyse des apports énergétiques du Nord est plus problématique, en raison du court historique disponible. En effet, il est déjà difficile de reconstituer les apports entre 1943 et 1960 dans cette région. Visuellement, en observant les données (Figure 24), on identifie rapidement trois régimes d'une durée de deux décennies:

- les années 1943-1960, caractérisées par une moyenne de 153 TWh
- les années 1961-1980, caractérisées par une moyenne de 158 TWh
- les années 1981-2000, caractérisées par une moyenne de 145 TWh

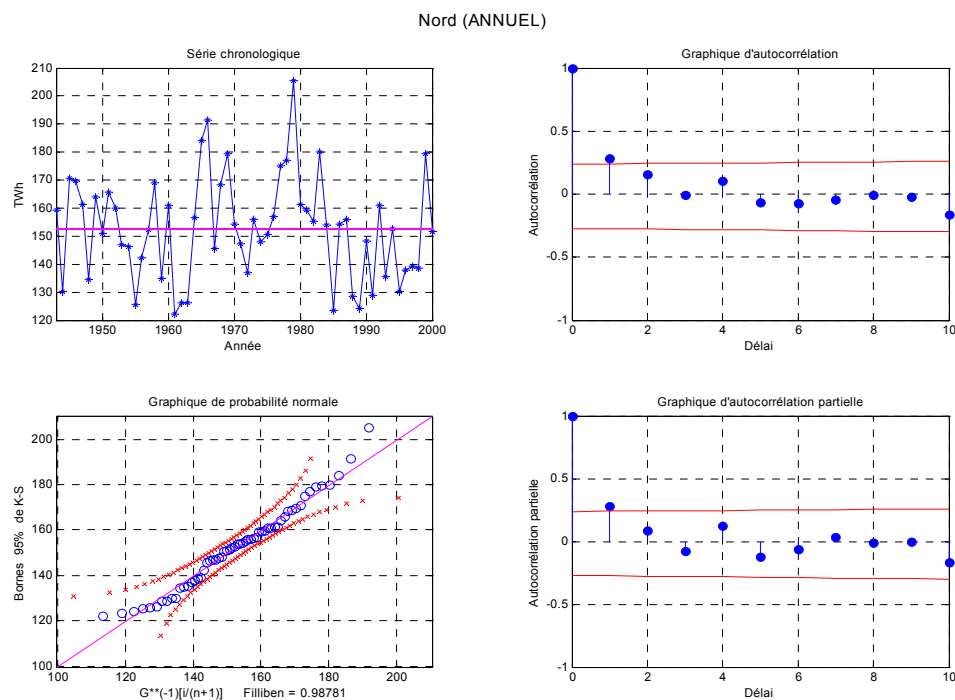
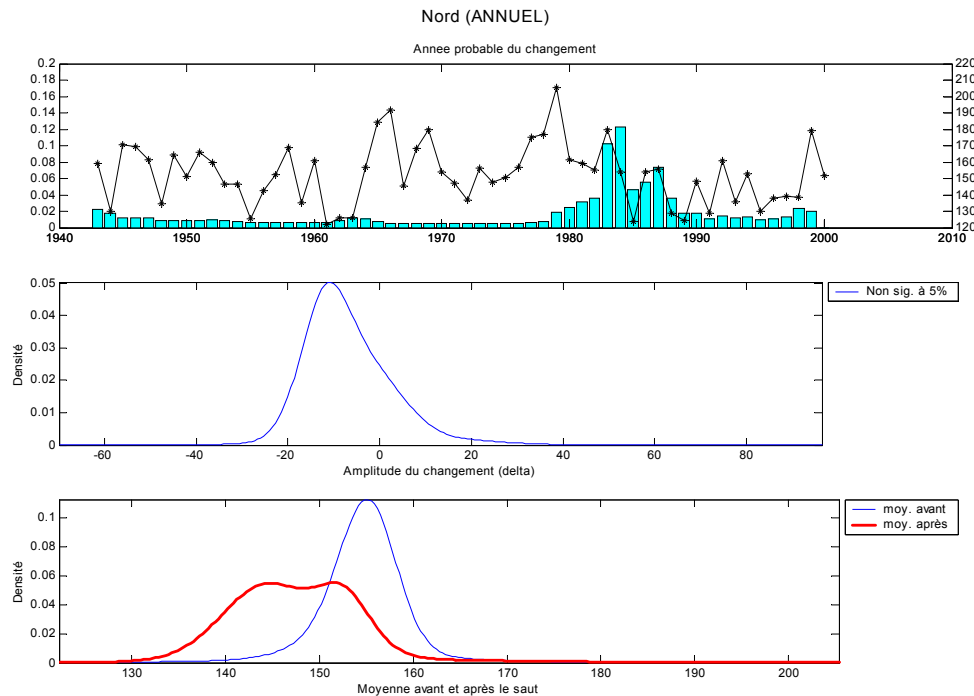


Figure 24: Portrait de la série d'apports énergétiques du Nord du Québec

Sous l'hypothèse d'un changement de moyenne, l'analyse des résultats de la procédure de Lee & Heghinian (Figure 25) montre une réduction de l'ordre de 10 TWh des apports énergétiques à partir d'un date située autour de 1984. Une amplitude variant entre -23 TWh et +18 TWh reste cependant crédible pour l'amplitude de ce changement.



**Figure 25: Procédure de Lee & Heghinian appliquée aux apports énergétiques du Nord du Québec**

Curieusement, ces périodes coïncident relativement bien avec les périodes de reconstitution des données de La Grande, qui domine la série énergétique du Nord: de 1943 à 1960, les données ont été obtenues par régression à partir des apports de la rivière Harricana et de la station météorologique Nitchequon, de 1961 à 1980 les apports ont été reconstitués à partir de stations situées sur le bassin versant de La Grande par rapport de superficie, et par la suite elles ont été obtenues par bilan hydrique.

### 3.8.1 Comparaison avec les débits de la rivière Ashuanipi

Une façon de valider cette série consiste à la comparer à d'autres rivières naturelles. La rivière jaugée la plus représentative de cette région est à notre avis la rivière Ashuanipi, située à la tête du bassin versant de Churchill Falls. Nous avons obtenu les données de débit pour la rivière Ashuanipi à l'aide du CD HYDAT publié par Environnement Canada pour la période 1956-1997, et en communiquant directement avec la région de l'Atlantique pour la période 1998-1999. Il y a une donnée manquante en mars 1988, qui a été comblée par interpolation linéaire des observations de février et avril 1988, étant donné qu'il s'agit de la période de récession hivernale.

La Figure 26 permet de comparer les apports énergétiques de la région du Nord avec les débits moyens annuels de la rivière Ashuanipi de 1956 à 1999. On observe une très bonne correspondance, ce qui laisse supposer que les apports énergétiques du Nord sont relativement fiables, au moins depuis 1956. La corrélation entre les deux séries sur cette période est de 0.83, pour une variance expliquée de 69%. Ainsi, il semble peu plausible

que la variabilité observée des apports énergétiques dans cette région soit causée principalement par des erreurs de mesure ou de reconstitution.

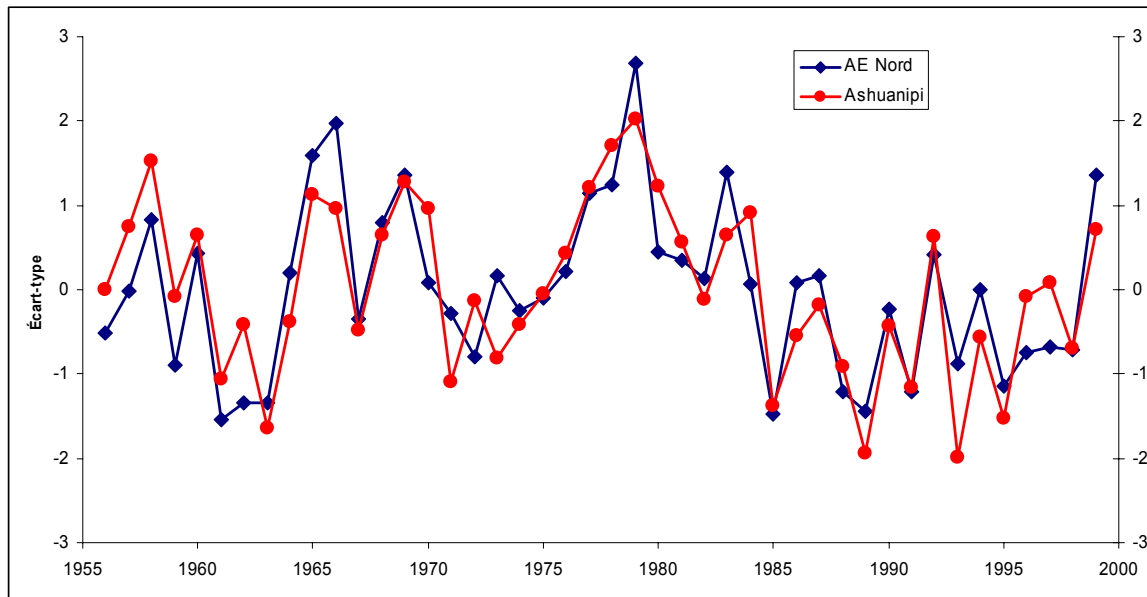


Figure 26: Apports énergétiques standardisés de la région du Nord comparés au débit moyen annuel de la rivière Ashuanipi (1956-1999)

Comme le montre la Figure 24, seule l'autocorrélation d'ordre 1 des apports énergétiques du Nord dépasse le seuil de l'intervalle de confiance à 95%. En comparant le graphique d'autocorrélation avec celui obtenu pour le Saint-Laurent (Figure 21), on observe que la persistance est nettement moins élevée pour les apports énergétiques du Nord, au moins lorsqu'elle est mesurée par un modèle linéaire. Comme le montre la Figure 27, l'autocorrélation des débits de la rivière Ashuanipi est légèrement plus élevée que celle des apports énergétiques du Nord, mais les graphiques d'autocorrélation sont relativement semblables lorsque comparés sur la même période, soit 1956-1999. La principale différence est au niveau de l'autocorrélation d'ordre 2.

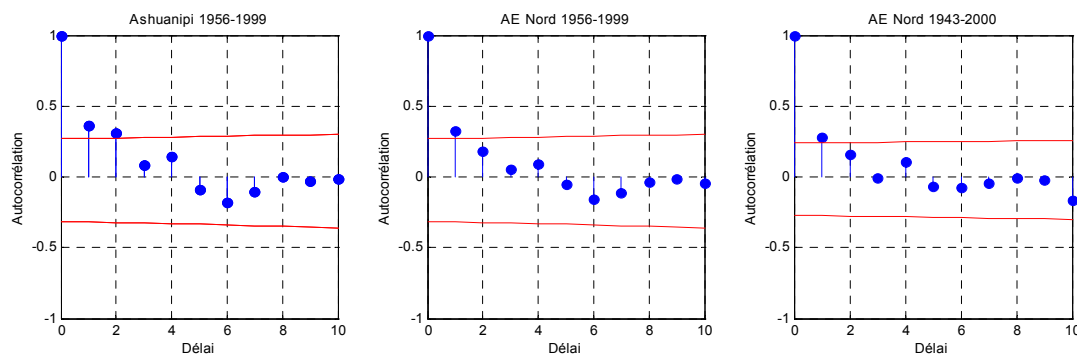


Figure 27: Graphique d'autocorrélation pour la rivière Ashuanipi (1956-1999) et les apports énergétiques du Nord pour les périodes 1956-1999 et 1943-2000

Au niveau des séquences, qui sont comme nous l'avons vu précédemment un indicateur de la prévisibilité basée sur un modèle autorégressif, on observe 28 séquences sur un période de 58 ans pour la série d'apports énergétiques du Nord. Sous l'hypothèse que les observations sont aléatoires et proviennent d'une distribution symétrique, on peut s'attendre à observer 30 séquences sur cette période, mais l'écart-type de cette statistique est de l'ordre de 4. Pour les débits de la rivière Ashuanipi, on observe 18 séquences, alors que la valeur attendue est de 23 avec un écart-type de 3. Dans les deux cas, les valeurs laissent supposer une certaine prévisibilité pour un modèle autorégressif, mais le nombre de séquences n'est pas anormalement bas sous l'hypothèse que ces deux échantillons sont aléatoires.

En raison de la différence de superficie entre ces deux bassins, soit au-delà de 300 000 km<sup>2</sup> pour les complexes du Nord et à peine 19 000 km<sup>2</sup> pour Ashuanipi, il semble peu plausible que l'autocorrélation observée dans les apports énergétiques de la région du Nord soient principalement causés par l'effet de mémoire attendu pour un si grand bassin. Autrement, on se serait attendu à une plus forte autocorrélation pour les apports énergétiques du Nord, de la même façon que l'on observe une autocorrélation plus forte pour le Saint-Laurent que pour le Lac Ontario uniquement.

Slivitzky (2000) a remarqué que la baisse des débits de rivière était principalement visible pendant la crue. Nous avons voulu analyser cet effet pour les débits de la rivière Ashuanipi, représentative au moins au niveau annuel des apports énergétiques du Nord. Comme le montre la Figure 28, la crue sur la rivière Ashuanipi débute parfois au mois d'avril pour se prolonger parfois jusqu'à la fin juillet. Nous avons donc défini comme saison de crue la période avril-juillet.

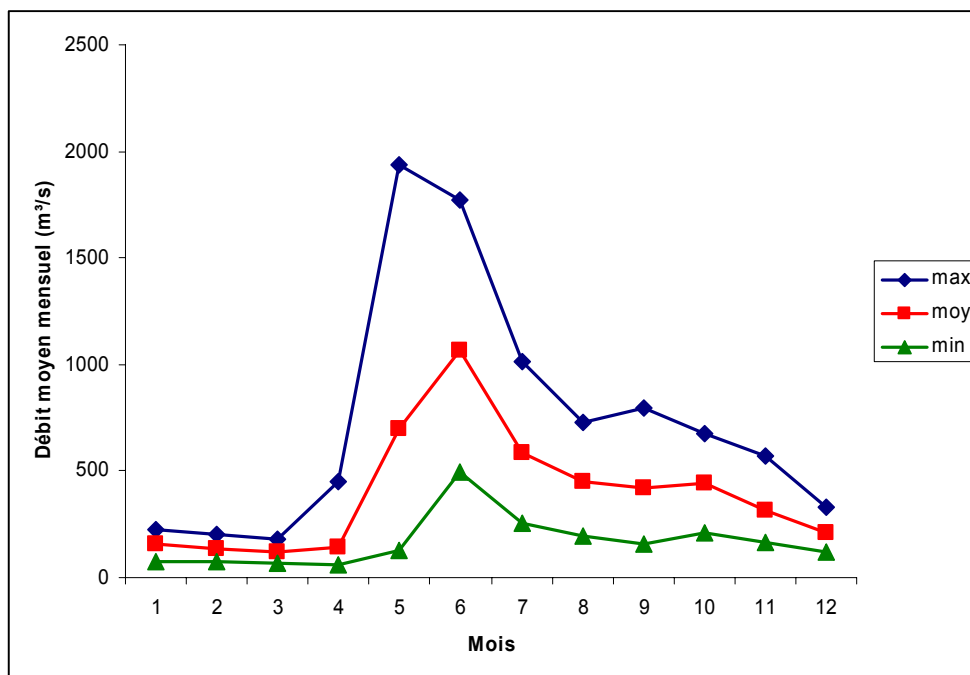
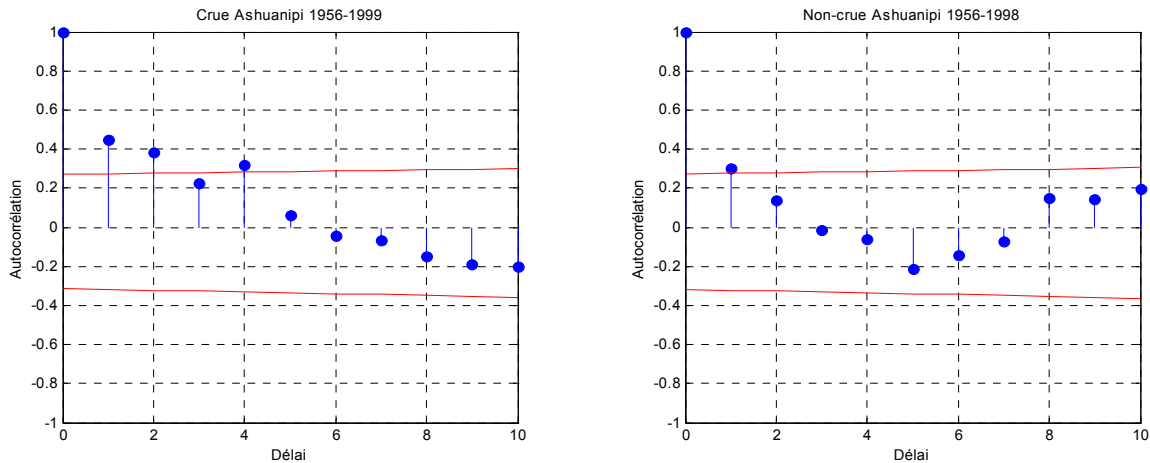


Figure 28: Valeurs minimales, moyennes et maximales du débit moyen mensuel pour la rivière Ashuanipi entre 1956 et 1999



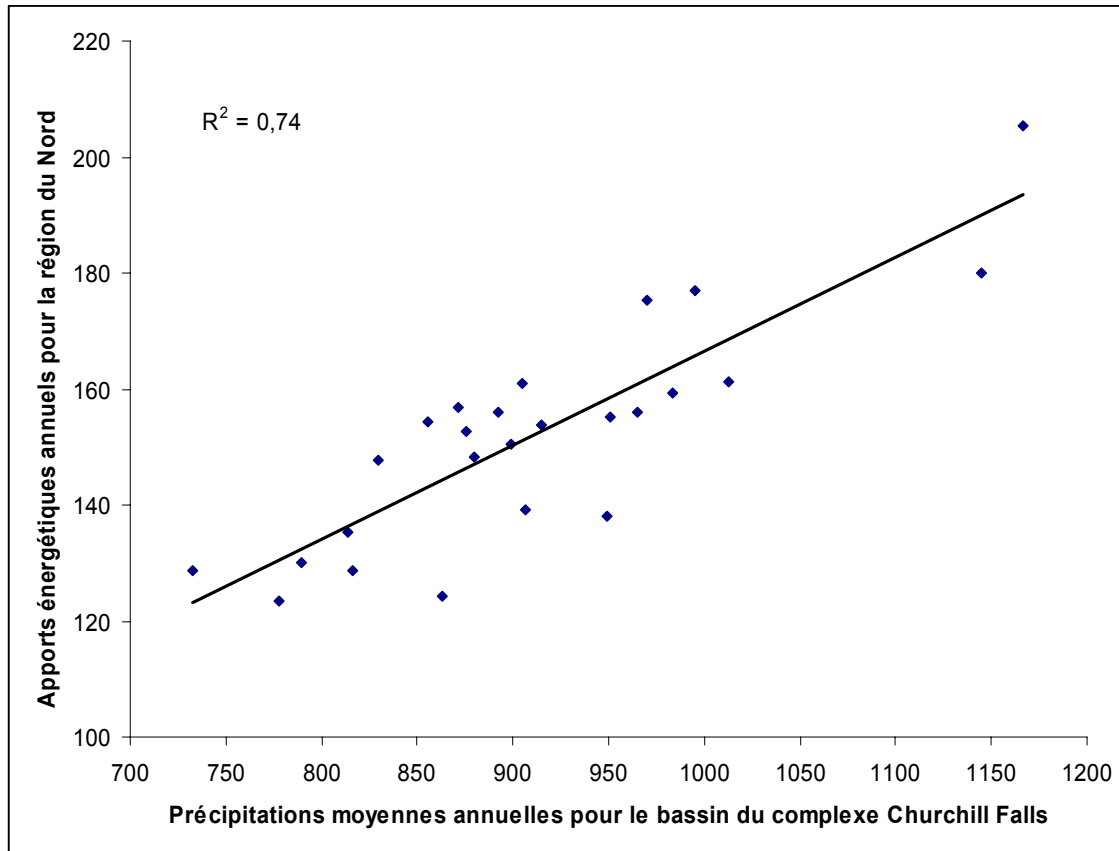
**Figure 29: Graphiques d'autocorrélation pour les débits annuels de la rivière Ashuanipi, calculés pendant la crue (avril-juillet), et après la crue (août-mars)**

La Figure 29 présente les graphiques d'autocorrélation obtenus pour ces deux séries annuelles (crue et non-crue). On observe effectivement une persistance plus importante pour la période de la crue, qui laisse supposer que l'on pourrait prédire les débits de crue en fonction des débits de crue des années précédentes et plusieurs années à l'avance. La corrélation entre le volume de deux crues successives atteint 0.45, alors que la corrélation entre le volume de la crue et le volume de la période suivante de 8 mois (i.e. la "non-crue" suivante) est 0.37. Encore une fois, cela milite plutôt en faveur d'une explication climatique régionale qu'un effet de mémoire du bassin, qu'il faudrait valider par une analyse des précipitations de cette région.

Il est difficile d'étudier la variabilité des précipitations dans le nord du Québec, en raison de la faible densité des stations, et de leur automatisation depuis le début des années 1990, ce qui rend difficile les comparaisons entre les valeurs mesurées avant et après l'automatisation, en particulier pour la neige. Nous disposons cependant d'une série relativement homogène de précipitations moyennes pour le bassin de Churchill Falls.

### 3.8.2 Analyse des précipitations moyennes pour Churchill Falls

La compagnie Churchill Falls and Labrador Company (CflCo) opère un réseau de 17 précipitomètres sur le bassin-versant du complexe Churchill Falls. À l'aide de ces données, Fortin et Latraverse (2000) ont construit une série chronologie de précipitations moyennes au-dessus de cette région à l'échelle mensuelle, couvrant la période de septembre 1973 à avril 2000. Quelques données sont cependant manquantes à partir de février 1998. Nous ne tenterons pas de les reconstituer. Ces données sont, à l'échelle annuelle fortement corrélées avec les apports énergétiques de la région Nord, comme le montre la Figure 30.



**Figure 30: Relation entre les précipitations moyennes pour le complexe Churchill Falls (telles que mesurées par CfiCo) et les apports énergétiques pour la région du Nord (1973-1997)**

Étant donné la courte période que couvrent ces données et la forte corrélation observée avec les apports énergétiques, le principal intérêt de ces données de précipitation est de permettre d'étudier la variation des précipitations à l'échelle mensuelle, ce qui est impossible dans le nord en observant les apports, puisqu'on ne peut distinguer véritablement que deux saisons dans les données de débit. La Figure 31 présente les précipitations hivernales (DJF) et printanières (MAM), alors que la Figure 32 présente les précipitations estivales (JJA) et automnales (SON) calculées à partir de ces données. On peut observer sur ces graphiques que seules les précipitations hivernales et printanières paraissent avoir connu une baisse au milieu des années 1980, alors que les précipitations estivales et automnales sont relativement stables dans le temps.

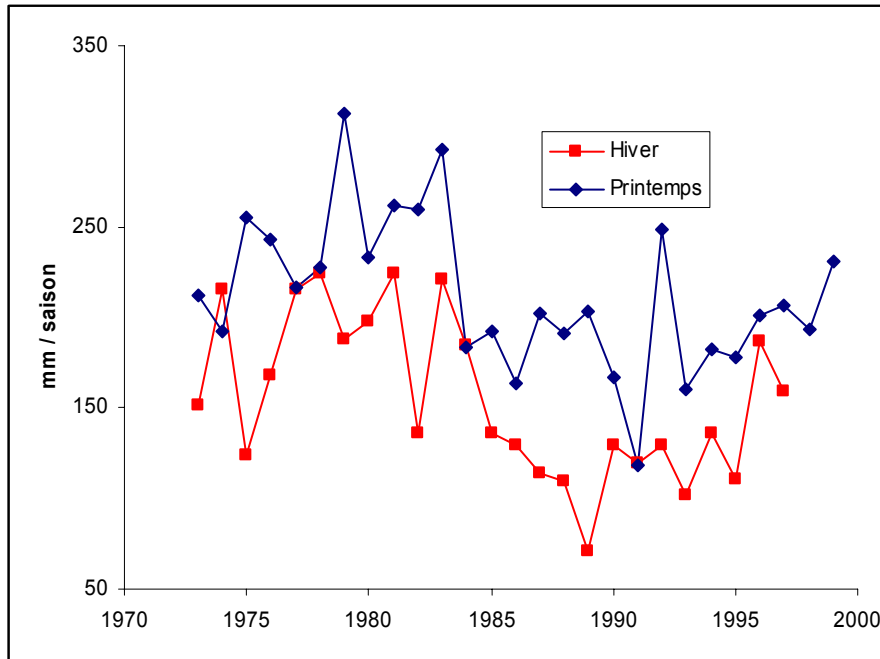


Figure 31: Précipitation hivernales et printanières au-dessus du complexe Churchill Falls, selon les données obtenues de CflCo pour la période 1973-1999

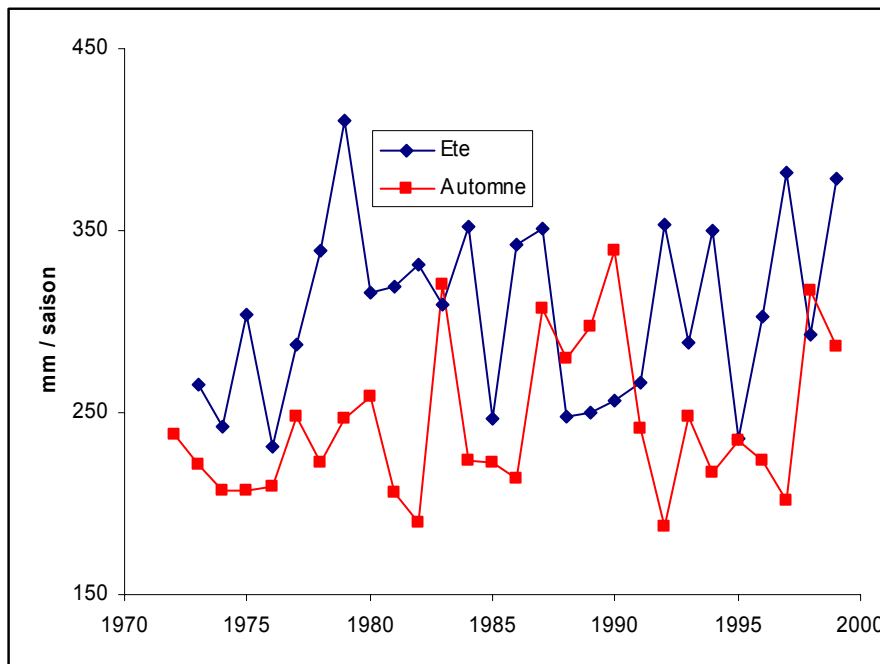


Figure 32: Précipitation estivales et automnales au-dessus du complexe Churchill Falls, selon les données obtenues de CflCo pour la période 1972-1999

La Figure 33 présente la somme des précipitations hivernales et printanières (de décembre à mai). On y observe une forte persistance, avec un cycle apparent. L'autocorrélation de cette série chronologique est très élevée (0.59), ce qui laisserait

supposer qu'il est possible d'en tirer partie pour prévoir les précipitations une année à l'avance. Cependant, l'autocorrélation avant 1984 est seulement de 0.05, et elle est négative (-0.15) à partir de 1984, ce qui permet de supposer que l'autocorrélation s'explique principalement par le saut observé en 1984. Étant donné le fort lien entre les ces précipitations et les apports énergétiques du Nord, il est plausible de supposer que la persistance observée dans les apports énergétiques vient principalement de ce signal, lui-même difficile à prévoir. Il nous apparaît donc peu opportun de tenter d'effectuer une prévision des apports énergétiques du Nord sur la base des apports des années antérieures si l'on n'est pas capable d'expliquer et de prédire le comportement des précipitations hivernales et printanières dans cette région.

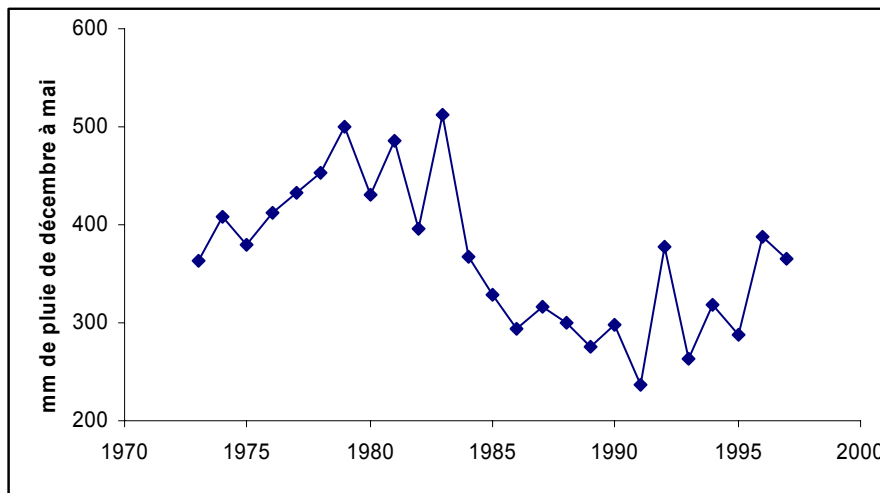


Figure 33: Précipitation hivernales et printanières combinées (de décembre à mai) au-dessus du complexe Churchill Falls, selon les données obtenues de CflCo pour la période 1973-1997

### 3.8.3 Oscillation arctique et précipitations hivernales

À la lumière de nos lectures récentes, l'oscillation arctique (AO) demeure la cause la plus vraisemblable pour expliquer la variabilité des précipitations hivernales et donc d'une partie des apports énergétiques. La corrélation entre AO et les précipitations hivernales au-dessus du complexe Churchill Falls atteint -0.49 sur la période 1973-1997. Cependant, un examen visuel de cette relation montre que bien que ces deux signaux soient souvent en opposition, ils sont loin de mesurer le même phénomène (cf. Figure 34 et Figure 35). En particulier, le fait que l'indice AO soit relativement faible pendant les premières années de sécheresse (1985 et 1986) surprend. En fait, la corrélation mesurée de -0.49 est causée en bonne partie par quelques points extrêmes: 1977, 1989 et 1993. Notre compréhension des mécanismes qui créent une persistance dans les précipitations hivernales reste fort limitée, et nous considérons qu'il n'y a pas lieu de faire pour la région du Nord une prévision différente de la moyenne historique sur la base des apports précédents ou de l'indice AO.

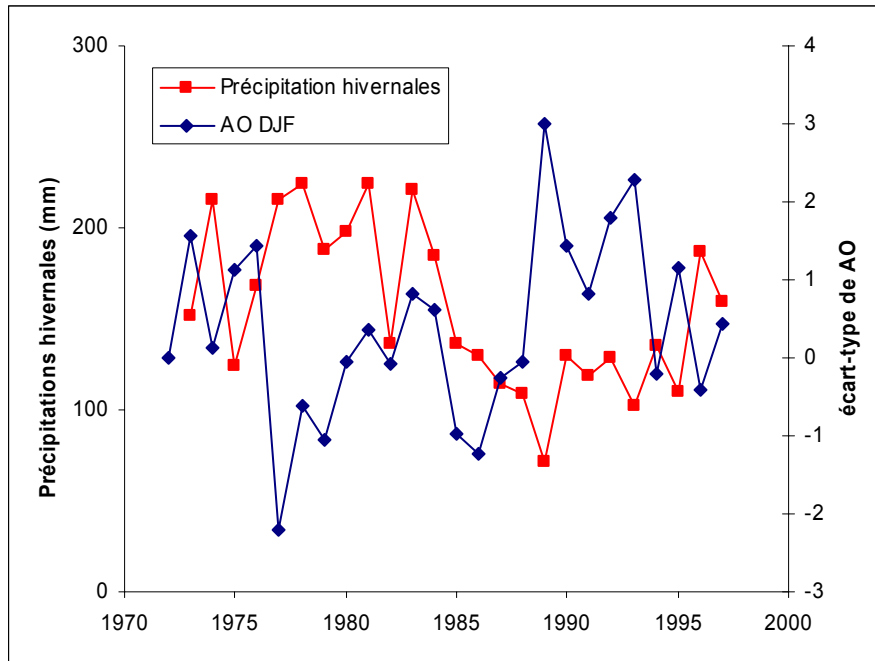


Figure 34: Précipitations hivernales au-dessus du bassin du complexe Churchill Falls et indice AO (DJF) pour la période 1973-1997

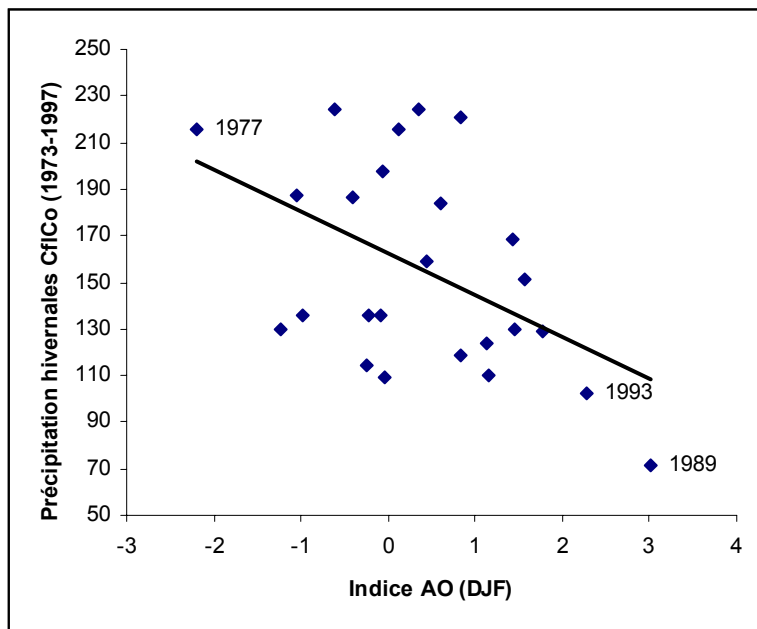


Figure 35: Relation entre l'indice AO (DJF) et les précipitations hivernales au-dessus du bassin du complexe Churchill Falls entre 1973 et 1997

## 4. Prévisions pour les années 2001 à 2003

En fonction du portrait que nous avons tracé des séries d'apports énergétiques, nous recommandons que les prévisions énergétiques pour les années 2001 à 2003 soient faites sur la base d'un modèle autorégressif d'ordre 1 pour le Saint-Laurent en raison de l'inertie de ce système hydrique. Pour les autres complexes, la prévision devrait tenir compte des uniquement des prévisions saisonnières, et non des apports observés au cours des dernières années.

### 4.1 Prise en compte de l'autocorrélation pour le Saint-Laurent

L'autocorrélation des apports énergétiques du Saint-Laurent étant de 0.7 et le dernier apport observé étant 0.9 TWh sous la moyenne historique, nous proposons les prévisions suivantes pour les écarts  $\Delta\hat{Q}_t$  à la moyenne historique:

Année	Prévision pour chaque année		Déficit cumulé prévu	
	$\Delta\hat{Q}_t$	$P(\Delta Q_t < 0)$	$\Sigma \Delta\hat{Q}_t$	$P(\Sigma \Delta Q_t < 0)$
2001	$-0.63 \pm 1$ TWh	74%	$-0.63 \pm 1$ TWh	74%
2002	$-0.44 \pm 1.2$ TWh	64%	$-1.07 \pm 1.9$ TWh	71%
2003	$-0.31 \pm 1.3$ TWh	59%	$-1.38 \pm 2.9$ TWh	68%

Il sera utile dans la suite de ce travail de considérer une prévision catégoriques pour trois terciles, c'est-à-dire la probabilité que l'apport énergétique se situe dans le premier, le second, et le troisième tercile des valeurs observées historiquement. Le seuil entre le premier et le second tercile est 13.4 TWh, alors que le seuil entre le second et le troisième tercile est de 12.2 TWh. Ces probabilités sont données dans le tableau suivant:

Année	Probabilité que l'apport énergétique appartienne à chaque tercile		
	3ème tercile: $Q < 12.2$	2ème tercile: $12.2 < Q < 13.4$	1er tercile: $Q > 13.4$
2001	54%	36%	10%
2002	47%	35%	18%
2003	44%	34%	22%

Il serait possible de prendre en compte aussi les prévisions saisonnières pour le Saint-Laurent. Ce travail est déjà fait pour les Grands Lacs par le laboratoire GLERL. Cependant, l'utilisation de l'autocorrélation devrait permettre des gains en précision plus importants que l'utilisation de la prévision saisonnière, à l'exception des années El-Nino, puisque ce phénomène affecte les Grands Lacs.

### 4.2 Prévision saisonnière pour le Québec et le Labrador

On retrouve à l'Annexe B des prévisions saisonnières couvrant le Canada émis par quatre organismes différents:

- Environnement Canada

- Climate Diagnostics Center (CDC )
- Institute for Global Environment and Society (IGES)
- International Research Institute for Climate Prediction (IRI)

Ces prévisions sont toutes construites de façon différente, et surtout présentées de façon différentes. Voici les principales caractéristiques des produits de chaque organisme

Environnement Canada: Les prévisions émises par Environnement Canada sont des prévisions catégoriques, dans le sens où cet organisme émet pour chaque point du territoire une prévision spécifiant dans quel tercile on peut s'attendre à observer la température moyenne et la précipitation moyenne pour chaque trimestre (au-dessus de, près de, ou sous la normale). À chaque trimestre, cet organisme émet des prévisions pour les 4 prochains trimestres. Pour les trois premiers mois, les prévisions sont émises par une analyse des résultats de prévisions d'ensemble émises par deux modèles atmosphériques. Pour les trois autres trimestres, les prévisions sont émises par un modèle statistique basé sur l'analyse de corrélations canoniques. Des cartes d'habileté sont aussi produites, qui spécifient pour chaque point du territoire la probabilité que la prévision soit correcte, mais seulement pour les deux premiers trimestres.

CDC: Cet organisme américain n'émet pas de prévisions opérationnelles ailleurs qu'aux États-Unis, du moins elle ne semblent pas disponibles sur son site web. Cependant, les résultats la version expérimentale (i.e. en développement) sont disponible pour le monde entier. Elles sont basées sur des prévisions d'ensemble d'un modèle de circulation générale. Aucune carte d'habileté ou information sur l'incertitude n'est disponible.

IGES: Cet organisme sans but lucratif émet des prévisions par corrélation canonique pour le Canada, pour un seul trimestre. En fait, il s'agit du même produit qui est distribué à partir du second trimestre par Environnement Canada. Cependant, la présentation est différente: on présente une carte d'anomalie, en degrés et en mm/jour selon qu'il s'agit de température ou de précipitations. L'habileté du système est mesurée par une carte de corrélation entre l'anomalie prévue et l'anomalie observée.

IRI: Cet institut produit, pour deux trimestres à l'avance, des prévisions catégoriques probabilistes pour trois terciles. Ainsi, au lieu de prévoir à quel tercile chaque observation appartiendra, l'IRI évalue la probabilité que l'observation appartienne à chaque groupe. Cette évaluation est faite par des experts, de façon subjective, en se basant entre autres sur différentes sorties de modèles atmosphériques.

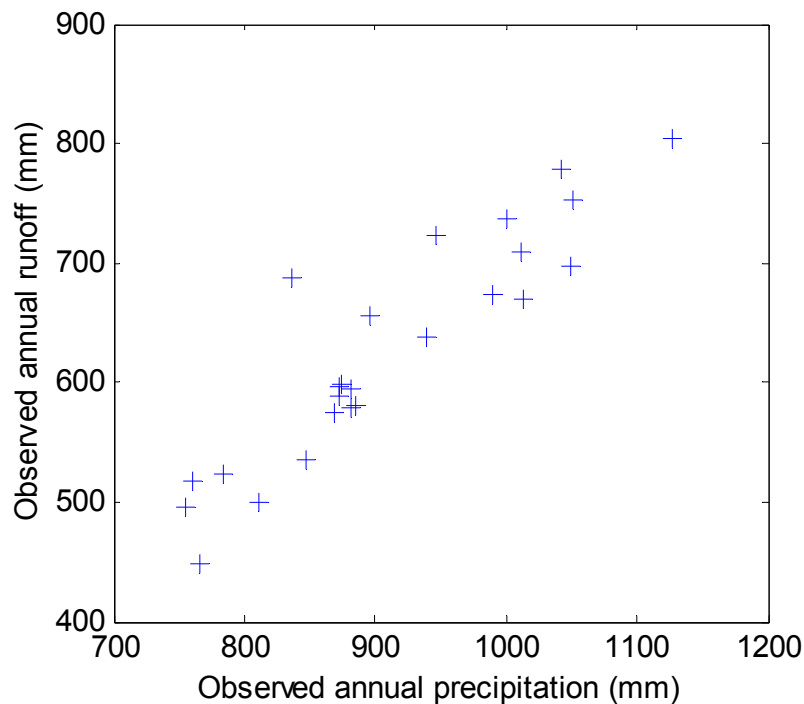
Dans le temps qui nous est imparti pour cette analyse, il nous paraît difficile d'intégrer rapidement des prévisions saisonnières quantitatives, comme celles émises par le CDC et IGES, surtout que le CDC ne publie pas de mesure de l'incertitude sur sa prévision saisonnière. Nous tenterons donc d'utiliser les prévisions de l'IRI et celles d'Environnement Canada.

#### **4.2.1 Utilisation des prévisions saisonnières de température**

On pourrait croire que la seule utilité de la prévision saisonnière de température soit de permettre de prévoir une crue hâtive ou tardive, ou d'évaluer l'évapotranspiration. Cependant, Slivitzky (2000) mentionne que les débits des rivières sont souvent mieux corrélés avec les températures hivernales qu'avec les précipitations hivernales. Cela est causé d'une part par une mauvaise estimation de la précipitation hivernale totale au-dessus des bassins-versants, et d'autre part parce que la température hivernale semble jouer le rôle d'un indicateur de circulation générale, étant donné sa forte corrélation avec l'oscillation arctique (Slivitzky, 2000). En fait, la température hivernale pourrait même être un indicateur de l'effet régional du phénomène global que constitue AO. Si tel est le cas, la prévision saisonnière de température peut être exploitée pour dériver une prévision d'apports énergétiques, en tirant profit de la corrélation entre la température hivernale et les précipitations hivernales. Cette possibilité ne sera cependant pas explorée, faute de temps.

#### **4.2.2 Utilisation des prévisions saisonnières de précipitation**

Nous avons vu que, dans le nord de la péninsule Québec-Labrador, la corrélation entre les précipitations et les apports énergétiques est relativement forte à l'échelle annuelle. En effet, on arrive à expliquer les trois quarts de la variance des apports énergétiques du Nord simplement à partir des précipitations moyenne pour le bassin versant de Churchill Falls (cf. Figure 30). Nous croyons que ce chiffre serait nettement plus élevé si l'on intégrait une mesure précise de la précipitation moyenne pour l'ensemble des bassins, et si l'on utilisait une année hydrologique plutôt qu'une année civile pour calculer les bilans annuels. Par exemple, la corrélation entre ces mêmes précipitations et les apports énergétiques du bassin de Churchill Falls est de 0.91, ce qui laisse peu de place pour la température (et donc l'évapotranspiration) ou les apports des années précédentes dans un modèle de bilan hydrologique à l'échelle annuelle (cf. Figure 36).



**Figure 36: Relation entre les précipitations moyennes mesurées par CflCo et les apports énergétiques pour le bassin de Churchill Falls (1973-1997). Le coefficient de corrélation est de 0.91. Tiré de Fortin (2001)**

Cette relation entre précipitation annuelle et apports énergétiques n'est probablement pas aussi forte dans le sud, en raison du rôle beaucoup plus grand joué par l'évapotranspiration. Comme le poids des complexes du Sud dans la série agrégé est plus faible, nous supposons pour simplifier que les précipitations annuelles au-dessus des régions Sud et Nord sont toujours dans le même tercile que les apports énergétiques, i.e. que dans la table de contingence "précipitations versus apports", toutes les observations tombent sur la diagonale. En observant la Figure 36, on voit que ce serait à peu près le cas pour Churchill Falls.

### 4.2.3 Prévisions saisonnières de l'IRI

Sous l'hypothèse qu'à l'échelle annuelle les prévisions catégoriques d'apports énergétiques catégoriques sont données par les prévisions catégoriques de précipitation, on peut émettre facilement les prévisions suivantes en analysant les prévisions saisonnières de précipitation de l'IRI. En effet, la présentation retenue par l'IRI intègre l'incertitude sur cette même prévision.

#### 4.2.3.1 Prévision saisonnières pour l'hiver et le printemps 2001

En décembre 2000, l'IRI prévoyait un hiver (JFM) et un printemps (AMJ) normal pour le Québec, puisqu'un poids égal était associé à chaque catégorie. Il n'y avait donc pas lieu de modifier la prévision énergétique à la lumière de cette prévision.

### 4.2.3.2 Prévision saisonnières pour l'été et l'automne 2001

En mars 2001, l'IRI a émis de nouvelles prévisions pour le printemps (AMJ) et l'été (JAS) 2001. Cet organisme associe encore un poids égal à chaque catégorie. Il n'y a donc toujours pas lieu de modifier la prévision énergétique à la lumière de cette prévision saisonnière.

### 4.2.4 Prévisions saisonnières d'Environnement Canada

Les prévisions saisonnières d'Environnement Canada sont moins faciles à intégrer à la prévision énergétique, puisque leur produit de prévision n'intègre pas l'incertitude sur la prévision saisonnière: il est nécessaire d'étudier des cartes d'habiletés émises séparément. En fait, pour chaque point de grille, Environnement Canada émet au temps  $t$  une prévision catégorique  $\hat{X}_{t,L} \in \{1\text{er tercile}, 2\text{ème tercile}, 3\text{ème tercile}\}$  valide pour la saison  $t+L$ , de même qu'une mesure de l'habileté de cette prévision, qui correspond à la probabilité  $P(\hat{X}_{t,L} = X_{t+L}) = H$ . Ce n'est pas équivalent au produit de l'IRI, qui fournit plutôt la probabilité a posteriori de la catégorie en fonction de l'information, ce qui correspond à  $P(X_{t+L} = x | \hat{X}_{t,L})$  pour chaque  $x \in \{1\text{er tercile}, 2\text{ème tercile}, 3\text{ème tercile}\}$ .

On peut cependant calculer  $P(X_{t+L} = x | \hat{X}_{t,L})$  à l'aide du théorème de Bayes:

$$P(X_{t+L} = x | \hat{X}_{t,L}) = \frac{P(\hat{X}_{t,L} | X_{t+L} = x) \cdot P(X_{t+L} = x)}{\sum_{i=1}^3 P(\hat{X}_{t,L} | X_{t+L} = i) \cdot P(X_{t+L} = i)}$$

On peut simplifier cette expression car par définition  $P(X_{t+L} = i) = 1/3$ :

$$P(X_{t+L} = x | \hat{X}_{t,L}) = \frac{P(\hat{X}_{t,L} | X_{t+L} = x)}{\sum_{i=1}^3 P(\hat{X}_{t,L} | X_{t+L} = i)}$$

Cependant, Environnement Canada ne fournit pas pour chaque point de grille la table de contingence nécessaire pour calculer la probabilité a posteriori  $P(X_{t+L} = x | \hat{X}_{t,L})$ . En effet, Environnement Canada ne fournit qu'une mesure de l'habileté moyenne:

$$P(\hat{X}_{t,L} = X_{t+L}) = \sum_{i=1}^3 P(\hat{X}_{t,L} = i | X_{t+L} = i) \cdot P(X_{t+L} = i) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P(\hat{X}_{t,L} = i | X_{t+L} = i)$$

Autrement dit, dans la table de contingence entre la prévision et l'observation, on ne connaît que la somme des probabilités situées sur la diagonale. La théorie des probabilités imprécises pourrait ici permettre de résoudre cette difficulté (Walley, 1991; Fortin et al., 2001). Cependant, pour simplifier le discours, nous ferons l'hypothèse que la probabilité

d'identifier correctement la catégorie est la même quelle que soit l'état de la nature, ce qui revient à écrire:

$$P(\hat{X}_{t,L} = X_{t+L}) = P(\hat{X}_{t,L} = x | X_{t+L} = x) = H$$

De la même façon, nous ferons l'hypothèse que la probabilité  $P(\hat{X}_{t,L} \neq X_{t+L})$  de se tromper ne dépend pas non plus de l'état de la nature:

$$P(\hat{X}_{t,L} \neq X_{t+L}) = 1 - H / 2$$

On peut montrer que ces contraintes sont suffisantes pour déterminer la table de contingence de telle sorte que:

$$P(X_{t+L} = x | \hat{X}_{t,L}) = \begin{cases} H & \text{si } \hat{X}_{t,L} = x \\ 1 - H / 2 & \text{sinon} \end{cases}$$

Étudions maintenant les prévisions saisonnières émises récemment par Environnement Canada.

#### 4.2.4.1 Prévision saisonnières émises le 1er décembre 2000

Les prévisions émises le 1er décembre par Environnement Canada n'étaient pas très encourageantes pour Hydro-Québec: on prévoyait des précipitations près de la normale ou sous la normale pour l'hiver et le printemps 2001, des précipitations sous la normale dans le Nord et au-dessus de la normale dans le Sud pour l'été, et enfin des précipitations sous la normale pour l'automne. Le Tableau 5 résume ces prévisions pour les deux régions. L'habileté de la prévision est indiquée entre parenthèse - il s'agit de la valeur moyenne au-dessus du bassin, estimée visuellement à partir des cartes d'habileté. Ces estimations sont très approximatives, et il serait intéressant d'obtenir des nombres plus précis de la part d'Environnement Canada. On peut noter que l'habileté n'est pas évaluée pour les prévisions du 3ème et du 4ème trimestre.

**Tableau 5: Sommaire des prévisions émises par Environnement Canada le 1er décembre 2000**

Saison	Sud	Nord
Hiver (DJF)	sous ( $H=40\%$ )	sous ( $H=33\%$ )
Printemps (MAM)	près ( $H=40\%$ )	sous ( $H=40\%$ )
Été (JJA)	au-dessus ( $H=?$ )	sous ( $H=?$ )
Automne (SON)	sous ( $H=?$ )	sous ( $H=?$ )

#### 4.2.4.2 Prévision saisonnières émises le 1er juin 2001

Les prévisions saisonnières émises le 1er juin 2001 ne sont un peu plus encourageantes pour Hydro-Québec: on prévoit pour l'été 2001 des conditions près des normales dans le nord, au-dessus des normales dans le sud, mais des conditions sèches pour l'automne 2001 et l'hiver 2002. Pour le printemps 2002, on prévoit cependant des conditions au-dessus des normales pour le Nord.

**Tableau 6: Sommaire des prévisions émises par Environnement Canada le 1er juin 2001**

<b>Saison</b>	<b>Sud</b>	<b>Nord</b>
Été (JJA)	au-dessus ( $H=33\%$ )	près ( $H=46\%$ )
Automne (SON)	sous ( $H=33\%$ )	sous ( $H=33\%$ )
Hiver (DJF)	sous ( $H=?$ )	sous ( $H=?$ )
Printemps (MAM)	près ( $H=?$ )	au-dessus ( $H=?$ )

#### 4.2.4.3 Construction d'une prévision annuelle pour 2001

Il est très difficile de travailler avec des prévisions pour lesquelles on ne dispose d'aucune mesure d'incertitude. Dans un premier temps, nous n'utiliserons pas ces prévisions. Pour l'année 2001, nous proposons de combiner les prévisions hivernales et printanières émises en décembre 2000 avec les prévisions estivales et automnales émises en juin 2001. Pour construire une prévision annuelle, il faut déterminer le poids relatif à accorder à chaque saison. Nous proposons de leur accorder un poids équivalent; si les précipitations sont généralement plus élevées l'été, une plus grande partie s'évapore. Le Tableau 7 résumer la prévision annuelle ainsi obtenue. On indique, pour chaque saison et pour chaque région, la probabilité de chaque catégorie, elle-même dérivée de l'habileté de la prévision.

**Tableau 7: Prévision annuelle des apports énergétiques des régions du Sud et du Nord pour 2001**

<b>Saison</b>	<b>Région du Sud</b>			<b>Région du Nord</b>		
	<b>sous</b>	<b>près</b>	<b>au-dessus</b>	<b>sous</b>	<b>près</b>	<b>au-dessus</b>
Hiver	40%	30%	30%	33%	33%	33%
Printemps	30%	40%	30%	40%	30%	30%
Été	33%	33%	33%	27%	46%	27%
Automne	33%	33%	33%	33%	33%	33%
<b>Annuel</b>	<b>34%</b>	<b>34%</b>	<b>32%</b>	<b>33%</b>	<b>36%</b>	<b>31%</b>

On peut comparer cette prévision à celle qui serait obtenue si l'on ne tenait pas compte de l'incertitude, c'est-à-dire en supposant une habileté parfaite à l'échelle saisonnière. Dans ce cas, la prévision serait résumée par le tableau suivant:

**Tableau 8: Prévision annuelle des apports énergétiques des régions du Sud et du Nord pour 2001 négligeant l'incertitude sur la prévision saisonnière**

<b>Saison</b>	<b>Région du Sud</b>			<b>Région du Nord</b>		
	<b>sous</b>	<b>près</b>	<b>au-dessus</b>	<b>sous</b>	<b>près</b>	<b>au-dessus</b>
Hiver	100%	0%	0%	100%	0%	0%
Printemps	0%	100%	0%	100%	0%	0%
Été	0%	0%	100%	0%	100%	0%
Automne	100%	0%	0%	100%	0%	0%
<b>Annuel</b>	<b>50%</b>	<b>25%</b>	<b>25%</b>	<b>75%</b>	<b>25%</b>	<b>0%</b>

Il est possible qu'une prévision catégorique intermédiaire soit raisonnable. En effet:

- L'habileté du système de prévision est évaluée de façon sommaire et approximative.

- En raison de la continuité du phénomène prévu, on devrait peut-être accorder un poids plus grand à la catégorie "près de la normale" lorsqu'une prévision "au-dessus de la normale" ou "sous la normale" est émise.
- L'habileté est une mesure de la fréquence moyenne de prévision correcte, qui n'est pas nécessairement un bon estimateur de la probabilité correspondante. En particulier, on s'attend à ce que la prévision saisonnière se comporte mieux lorsqu'il existe des anomalies de température au niveau des océans.

Pour ces raisons, nous fournirons aussi une prévision ponctuelle basée sur la prévision saisonnière qui ne tient pas compte de l'incertitude associée à cette prévision, à titre de comparaison. Ceci permettra aussi d'émettre une telle prévision pour 2002.

#### 4.2.4.4 Construction d'une prévision annuelle pour 2002

Sans tenir compte de l'incertitude sur la prévision saisonnière, on obtient la prévision annuelle suivante pour 2002 (le trois catégories sont équiprobables pour les deux derniers trimestres, puisque aucune prévision n'est disponible):

**Tableau 9: Prévision annuelle des apports énergétiques des régions du Sud et du Nord pour 2002 négligeant l'incertitude sur la prévision saisonnière**

Saison	Région du Sud			Région du Nord		
	sous	près	au-dessus	sous	près	au-dessus
Hiver	100%	0%	0%	100%	0%	0%
Printemps	0%	100%	0%	0%	0%	100%
Été	33%	33%	33%	33%	33%	33%
Automne	33%	33%	33%	33%	33%	33%
<b>Annuel</b>	<b>42%</b>	<b>42%</b>	<b>16%</b>	<b>42%</b>	<b>16%</b>	<b>42%</b>

#### 4.2.5 Combinaison des prévisions d'Environnement Canada et de l'IRI

Si nous accordions une crédibilité équivalente aux prévisions émises par Environnement Canada et par l'IRI, il serait normal de prendre une moyenne des ces deux prévisions, obtenues de façon indépendantes et considérées a priori aussi crédibles l'une que l'autre. Cependant, bien que l'IRI fournisse des produits très attrayants, son intérêt semble porté davantage sur les zones tropicales, pour lesquelles la prévision saisonnière a d'ailleurs souvent plus de succès. Nous ignorerons donc la prévision de l'IRI, qui accordait pour cette période des poids égaux à chaque catégorie.

### 4.3 Prévision de la série agrégée

En combinant les résultats obtenus pour les régions du Sud et du Nord avec ceux obtenus précédemment pour le Saint-Laurent, on obtient la prévision catégorique suivante pour les trois années de prévision:

**Tableau 10: Prévision catégorique des apports énergétiques de trois régions pour les années 2001 à 2003, basée sur l'autocorrélation des apports du Saint-Laurent et sur la prévision saisonnière d'Environnement Canada, en prenant en compte de façon sommaire l'incertitude sur cette prévision**

Probabilité que l'apport énergétique appartienne à chaque tercile

Année	sous la normale			près de la normale			au-dessus de la normale		
	St-L.	Sud	Nord	St-L.	Sud	Nord	St-L.	Sud	Nord
2001	<b>54%</b>	<b>34%</b>	33%	<b>36%</b>	<b>34%</b>	<b>36%</b>	<b>10%</b>	<b>32%</b>	<b>31%</b>
2002	<b>47%</b>	33%	33%	<b>35%</b>	33%	33%	<b>18%</b>	33%	33%
2003	<b>44%</b>	33%	33%	<b>34%</b>	33%	33%	<b>22%</b>	33%	33%

Les nombres sont fort différents lorsque l'on néglige l'incertitude sur la prévision saisonnière:

**Tableau 11: Prévision catégorique des apports énergétiques de trois régions pour les années 2001 à 2003, basée sur l'autocorrélation des apports du Saint-Laurent et sur la prévision saisonnière d'Environnement Canada, en ne prenant pas en compte l'incertitude sur cette prévision**

Probabilité que l'apport énergétique appartienne à chaque tercile

Année	sous la normale			près de la normale			au-dessus de la normale		
	St-L.	Sud	Nord	St-L.	Sud	Nord	St-L.	Sud	Nord
2001	<b>54%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>36%</b>	<b>25%</b>	<b>25%</b>	<b>10%</b>	<b>25%</b>	<b>0%</b>
2002	<b>47%</b>	<b>42%</b>	<b>42%</b>	<b>35%</b>	<b>42%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>	<b>16%</b>	<b>42%</b>
2003	<b>44%</b>	33%	33%	<b>34%</b>	33%	33%	<b>22%</b>	33%	33%

Pour la série agrégée, on peut pondérer ces pourcentages en fonction de l'énergie moyenne produite par chaque région. Ces poids sont respectivement de 7% pour le Saint-Laurent, de 10.5% pour le Sud et de 82.5% pour le Nord. On obtient donc finalement la prévision catégorique suivante pour les années 2001, 2002 et 2003:

**Tableau 12: Prévision catégorique des apports énergétiques totaux pour les années 2001 à 2003, basée sur l'autocorrélation des apports du Saint-Laurent et sur la prévision saisonnière d'Environnement Canada, en prenant en compte de façon sommaire l'incertitude sur cette prévision**

Probabilité que l'apport énergétique appartienne à chaque tercile			
Année	sous la normale: $Q \leq 182$ TWh	près de la normale: $182 < Q < 193$ TWh	au-dessus de la normale: $Q \geq 193$ TWh
2001	35%	36%	29%
2002	une chance sur trois	une chance sur trois	une chance sur trois
2003	une chance sur trois	une chance sur trois	une chance sur trois

**Tableau 13: Prévision catégorique des apports énergétiques totaux pour les années 2001 à 2003, basée sur l'autocorrélation des apports du Saint-Laurent et sur la prévision saisonnière d'Environnement Canada, en ne prenant pas en compte l'incertitude sur cette prévision**

Probabilité que l'apport énergétique appartienne à chaque tercile			
Année	sous la normale: $Q \leq 182$ TWh	près de la normale: $182 < Q < 193$ TWh	au-dessus de la normale: $Q \geq 193$ TWh
2001	71%	26%	3%
2002	42%	20%	38%
2003	une chance sur trois	une chance sur trois	une chance sur trois

Les limites des trois catégories ont été calculées à partir de la distribution empirique des apports énergétiques sur la période 1961-1990, qui correspond à la période utilisée pour le calcul des normales de précipitation par Environnement Canada.

D'un côté, on pourrait se contenter du Tableau 12 et considérer presque équiprobables toutes les catégories en raison de l'incertitude des prévisions saisonnières, que nous avons estimée de façon pessimiste, compte tenu du peu d'information disponible sur celle-ci (en particulier, nous avons rejeté les prévisions pour 2002 parce que l'estimation de l'incertitude n'était pas disponible). Étant donné les enjeux, cela nous semble imprudent. D'autre part, les résultats présentés au Tableau 13 sont basés sur l'hypothèse d'une prévision parfaite, qui mène à une concentration excessive de la probabilité dans une catégorie. Dans ces circonstances, nous proposons de fournir comme produit final un intervalle de probabilité pour chaque catégorie, obtenu en combinant le Tableau 12 et le Tableau 13. Pour éviter de donner une fausse impression de précision, nous avons arrondi les valeurs au 5% inférieur pour la borne inférieure de l'intervalle, et au 5% supérieur pour la borne supérieure de l'intervalle, sauf lorsque la valeur est de 33%, puisqu'une telle prévision signifie précisément que la prévision ne change pas notre probabilité a priori pour cette catégorie.

**Tableau 14: Prévision catégorique des apports énergétiques totaux pour les années 2001 à 2003, sous forme de probabilités imprécises**

Probabilité que l'apport énergétique appartienne à chaque tercile			
Année	sous la normale: $Q \leq 182$ TWh	près de la normale: $182 < Q < 193$ TWh	au-dessus de la normale: $Q \geq 193$ TWh
2001	entre 35 et 75%	entre 25 et 40%	entre 0 et 30%
2002	entre 33 et 40%	entre 20 et 33%	entre 33 et 40%
2003	une chance sur trois	une chance sur trois	une chance sur trois

Il nous semble peu opportun d'émettre à partir de ces prévisions catégoriques une prévision ponctuelle pour la série agrégée. Cela donnerait à notre avis au lecteur un faux sentiment de confiance dans la prévision énergétique. En fonction des résultats obtenus et des approximations effectuées pour obtenir ces prévisions catégoriques, nous considérons qu'une prévision ponctuelle égale à la moyenne historique pour les années 2001 à 2003 reste défendable. Cependant, il serait important de discuter rapidement avec les responsables de la prévision saisonnière d'Environnement Canada pour raffiner la mesure de l'habileté, mais surtout pour s'assurer que la probabilité de succès qu'ils accordent cette année à leur prévision est correctement estimée par la fréquence historique de succès de la procédure de prévision utilisée. En somme, l'objectif devrait être de réussir à faire la différence entre une fréquence observée et une probabilité de succès pour l'année en cours.

## 5. Recommandations et conclusion

En fonction des analyses effectuées et des résultats obtenus, nous proposons que les actions suivantes soient entreprises:

- réviser le calcul de l'incertitude sur les apports énergétiques pour le Saint-Maurice et La Grande
- pour fin d'estimation de la moyenne historique, reconstituer les séries énergétiques sans préserver la variance, de façon à réduire l'erreur d'estimation de cette moyenne et considérer la reconstitution des données avant 1943 dans le sud, par corrélation avec des débits en rivière
- tenir compte de l'autocorrélation des apports uniquement pour le Saint-Laurent
- améliorer la prévision d'apports pour les autres systèmes en utilisant des prévisions météorologiques saisonnières
- collaborer avec Environnement Canada et l'IRI pour développer des produits de prévision saisonnière mieux adaptés à nos besoins
- continuer à chercher à comprendre le comportement non aléatoire des précipitations hivernales dans le Nord du Québec.

Nos résultats suggèrent que la moyenne historique des apports énergétiques reste une prévision valable des apports énergétiques des dernières années. Cependant, il faut rester vigilant, car la climatologie est une science qui évolue très rapidement. De nouveaux résultats peuvent venir jeter un doute sur la représentativité de l'historique récent. Par exemple, Luc Gagnon, conseiller en changement climatique a récemment avancé l'hypothèse que l'anomalie positive des années 1970 puisse être expliquée par les émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), qui ont atteint leur maximum à cette période (communication personnelle).

Finalement, il importe de s'assurer que les données utilisées pour le calcul des apports énergétiques soit le plus fiable possible. En particulier, il est vraisemblable que les apports naturels calculés par bilan hydrique soient sous-estimés en raison d'une surestimation du rendement des groupes turbines-alternateurs. Cela ne biaise pas les apports énergétiques pour la période récente, puisque le facteur de production tient compte de ce biais. Par contre, les apports naturels reconstitués par rapport de superficie de bassin versant n'ont pas ce biais négatif, de sorte que les apports énergétiques obtenus en multipliant ces valeurs reconstituées par un facteur de production augmenté implicitement pour tenir compte de l'erreur dans la mesure des rendements risquent fort d'être surestimés.

## Références

- Akaike, H. (1974) *A new look at the statistical model identification*, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-19: 716-723.
- Boer, G. (2001). Decadal potential predictability in coupled models, *CLIVAR Exchanges*, 6(1):3.
- Bras, R.L. et I. Rodriguez-Iturbe (1985). *Random Functions in Hydrology*, Addison-Wesley.
- Croley, T.E. (2000). *Using Meteorology Probability Forecasts in Operational Hydrology*, ASCE Press, Reston, Virginie.
- Day, G.N. (1985). Extended streamflow forecasting using NWSRFS, *Journal of the Water Resources Planning and Management Division, ASCE*, 111: 157-170.
- Fortin, V. (2001). Assessment of Regional Trends and Impacts on Hydro-Québec. *Proceedings of the workshop "Trends in Canadian Hydrological Time Series"*, D. Harvey ed., Burlington, March 8-9, 2001 (à paraître).
- Fortin, V., É. Parent et B. Bobée (2001). Posterior previsions for the parameter of a binomial model via natural extension of a finite number of judgments. *Proceedings of the Second International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications (ISIPTA'01)*, Ithaca, New York, 26-29 juin 2001, accepté pour publication.
- Fortin, V. et M. Latraverse (2000). *Une base de données hydrométéorologiques pour le développement d'un indicateur d'hydraulicité*, Institut de recherche d'Hydro-Québec, rapport IREQ-2000-268.
- GCSI (2000). *Water Sector: Vulnerability and Adaptation to Climate Change*, rapport produit par Global Change Strategies International Inc. et le Service Météorologique du Canada pour le Fonds d'action pour le changement climatique (FACC).
- Greatbatch, R.J. (2000). The North Atlantic Oscillation, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 14(4-5): 213-242.
- Hipel, K.W. et A.I. McLeod (1978). Preservation of the rescaled adjusted range 2. Simulation studies using Box-Jenkins models, *Water Resources Research*, 14(3): 509-515.
- Hoerling, M.P., J.W. Hurrell et T. Xu (2001). Tropical origins for recent North Atlantic climate change, *Science*, 292: 90-92.

- Hofmann, N., L. Mortsch, S. Donner, K. Duncan, R. Kreutzwiser, S. Kulshreshtha, A. Piggott, S. Schellenberg, B. Shertzerand et M. Slivitzky (1998). *Étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique. Tome VII. Chapitre 1. Changement et variabilité climatiques: Impacts sur l'eau au Canada*, Environnement Canada.
- Kaufmann, A. (1975). *Introduction à la théorie des sous-ensembles flous à l'usage des ingénieurs (Fuzzy Sets Theory). 3. Applications à la classification et à la reconnaissance des formes, aux automates et aux systèmes, au choix des critères*, Masson, Paris.
- Lee, A.F.S. et S.M. Heghinian (1977). A shift in the mean level in a sequence of independent normal random variable. A Bayesian approach, *Technometrics*, 19: 503-506.
- McLeod, A.I. et K.W. Hipel (1978). Preservation of the rescaled adjusted range 1. A reassessment of the Hurst phenomenon, *Water Resources Research*, 14(3): 491-508.
- Mercier, G. (1998). *Étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique. Tome VII. Chapitre 7. Secteur de l'énergie*, Environnement Canada
- Perreault, L., J. Bernier, B. Bobée et É. Parent (2000a). Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part I. The normal model revisited, *Journal of Hydrology*, 235: 221-241.
- Perreault, L., J. Bernier, B. Bobée et É. Parent (2000b). Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part II. Comparison of change-point models and forecasting, *Journal of Hydrology*, 235: 221-241.
- Perreault, L., M. Haché, M. Slivitsky et B. Bobée (1999). Detection of changes in precipitation and runoff over eastern Canada and US using a Bayesian approach, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 13: 201–216.
- Rasmussen, P.F., V. Fortin, M. Slivitzky et B. Bobée (1999). *Impact des oscillations climatiques à basse fréquence sur les apports des rivières québécoises: Étude statistique exploratoire*, Chaire industrielle Hydro-Québec/CRSNG en hydrologie statistique, INRS-Eau, rapport R-541.
- Shabbar, A. K. Higuchi, W. Skinner et J.L. Knox (1997). The association between the BWA index and winter surface temperature variability over Eastern Canada and West Greenland. *Int. J. Climat.*, 17:1195-1210.
- Shindell, D.T., G.A. Schmidt, R.L. Miller et D. Rind (2001). Northern Hemisphere winter climate response to greenhouse gas, ozone, solar, and volcanic forcing. *J. Geophys. Res.* 106: 7193-7210.

- Singh, B. (1988). *The Implications of Climate Change for Natural Resources in Qubec*, Climate Change Digest CCD 88-08. Service de l'Environnement Atmosphérique, Downsview.
- Slivitzky, M. (2000). *Downward shift in runoff in Northern Quebec-Labrador in the middle eighties and possible links to the Arctic Oscillation*. Document de travail, INRS-Eau.
- Slivitzky, M. et G. Mortin (1996). Impacts of climatic changes on the hydrological regime: the Moisie river case revisited. *CMOS Bulletin*, 24(4):77-81.
- Stevens, J. (1986). *Applied multivariate statistics for the social sciences*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Vogel, R.M., Y. Tsai et J.F. Limbrunner (1998). The regional persistence and variability of annual streamflow in the United States, *Water Resources Research* 34(12): 3445-3459.
- Wallace, J.M. (2000). North atlantic oscillation / Annular mode: Two paradigms - One phenomenon, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126: 791-805.
- Walley, P. (1991). *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities*, Chapman and Hall, Londres.
- Walpole, R.E. et R.H. Myers (1985). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Macmillan Publishing Company, New York.

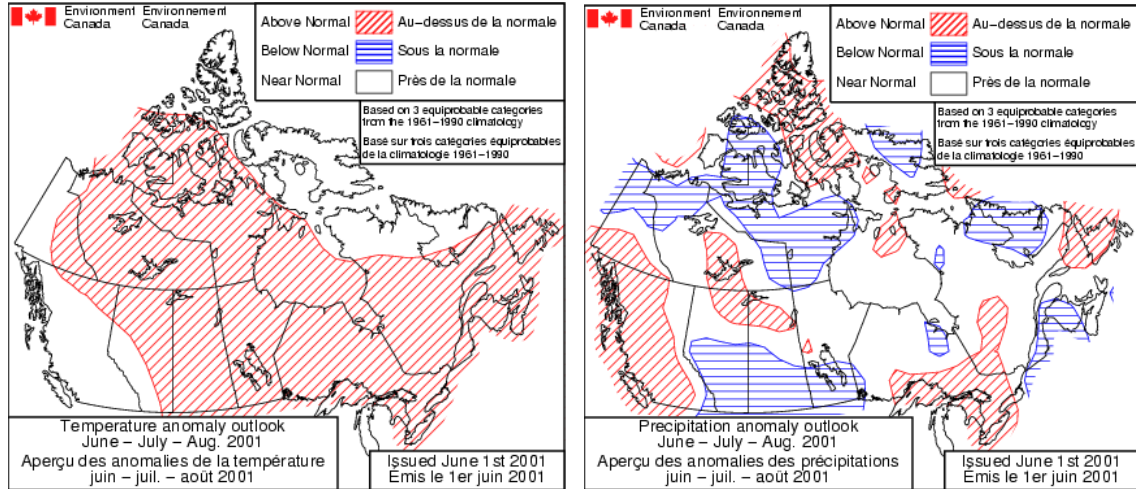
## **Annexe A:**

### **Prévisions saisonnières émises pour le Canada**

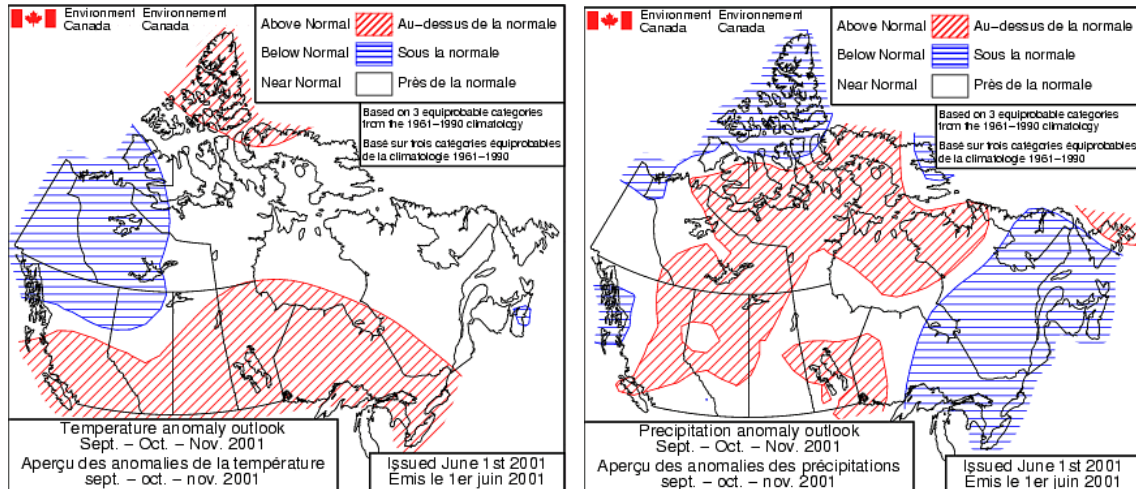
## Prévisions saisonnières émises par Environnement Canada

### Prévisions émises le 1er juin 2001

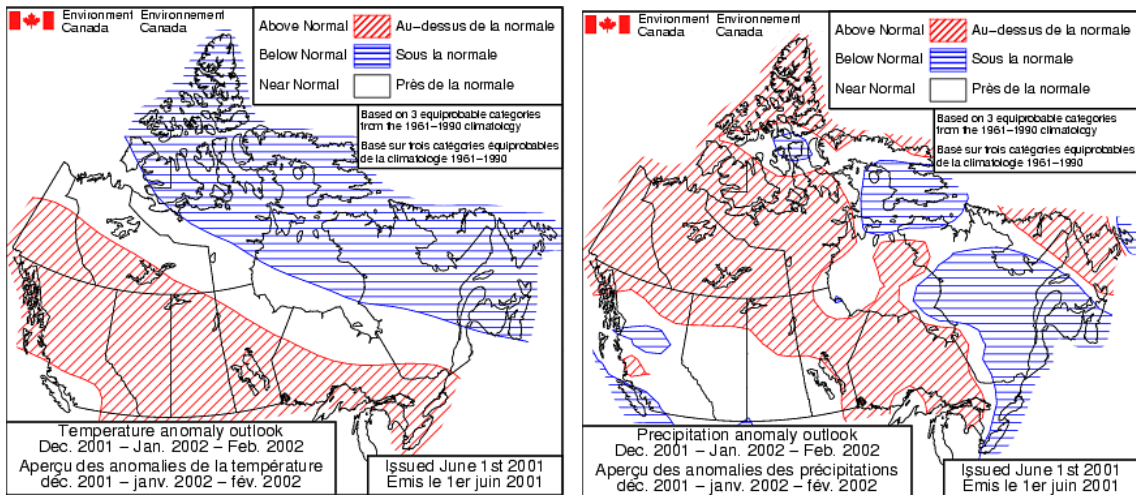
#### Prévision pour l'été 2001 émises le 1er juin 2001



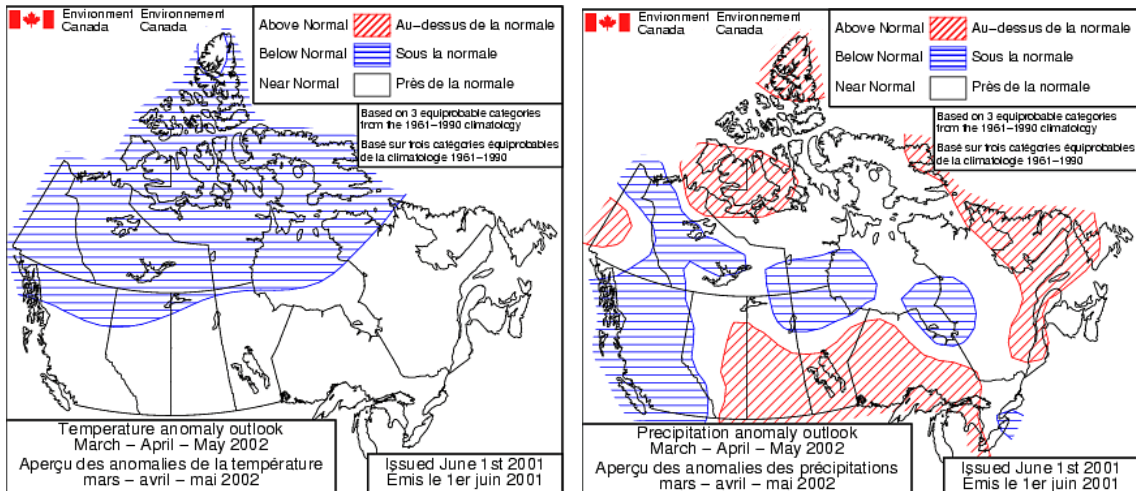
#### Prévision pour l'automne 2001 émises le 1er juin 2001



## Prévision pour l'hiver 2002 émises le 1er juin 2001

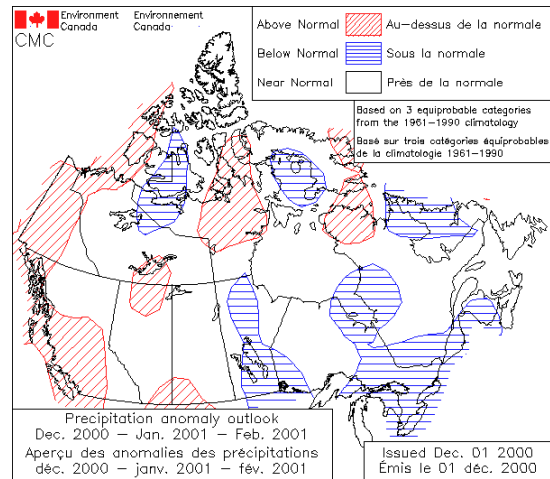
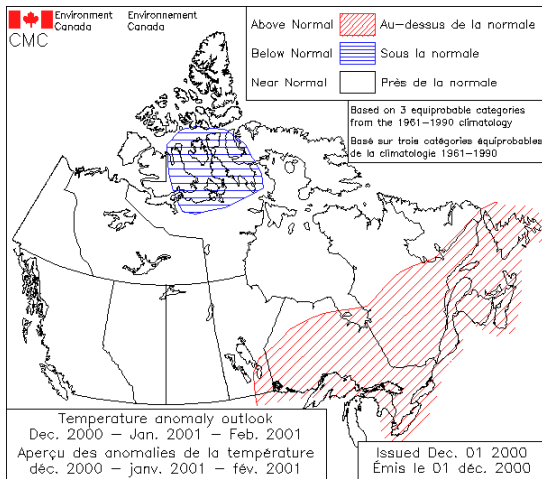


## Prévision pour le printemps 2002 émises le 1er juin 2001

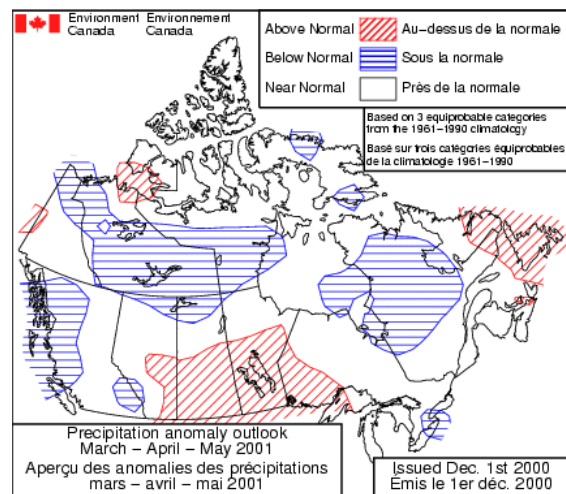
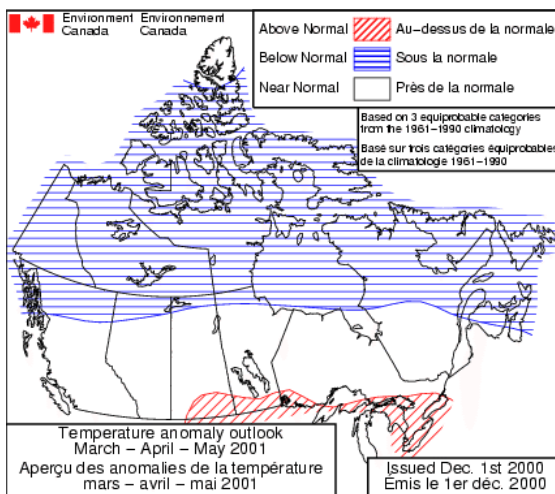


## Prévision émisses le 1er décembre 2000

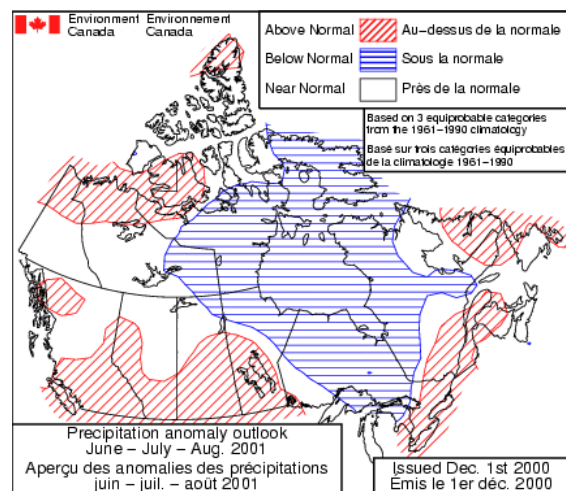
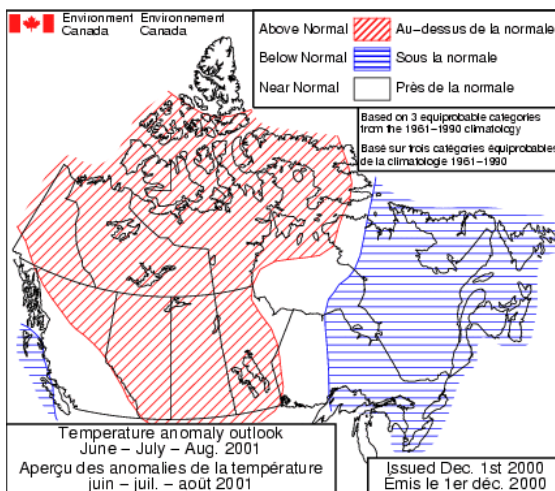
### Prévisions pour l'hiver 2001 émisses le 1er décembre 2000



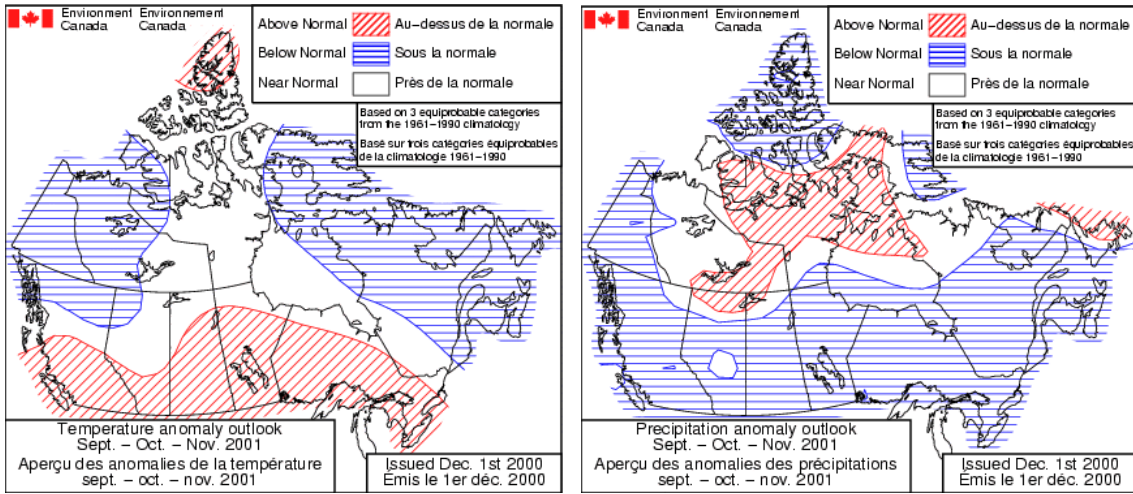
### Prévisions pour le printemps 2001 émisses le 1er décembre 2000



### Prévisions pour l'été 2001 émisses le 1er décembre 2000



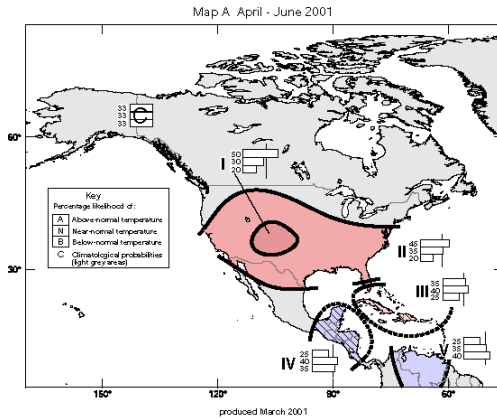
## Prévisions pour l'automne 2001 émises le 1er décembre 2000



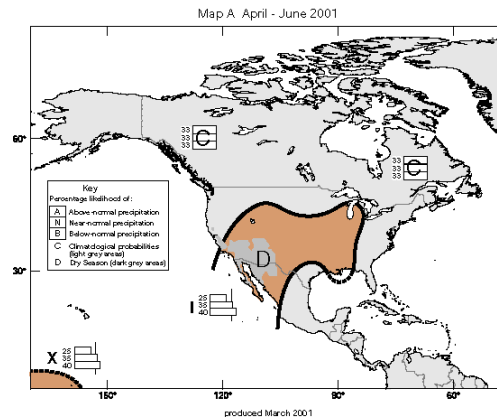
## Prévisions saisonnières émises par IRI

### Prévisions émises le 1er mars

### Prévisions émises le 1er mars 2001 pour le printemps 2001



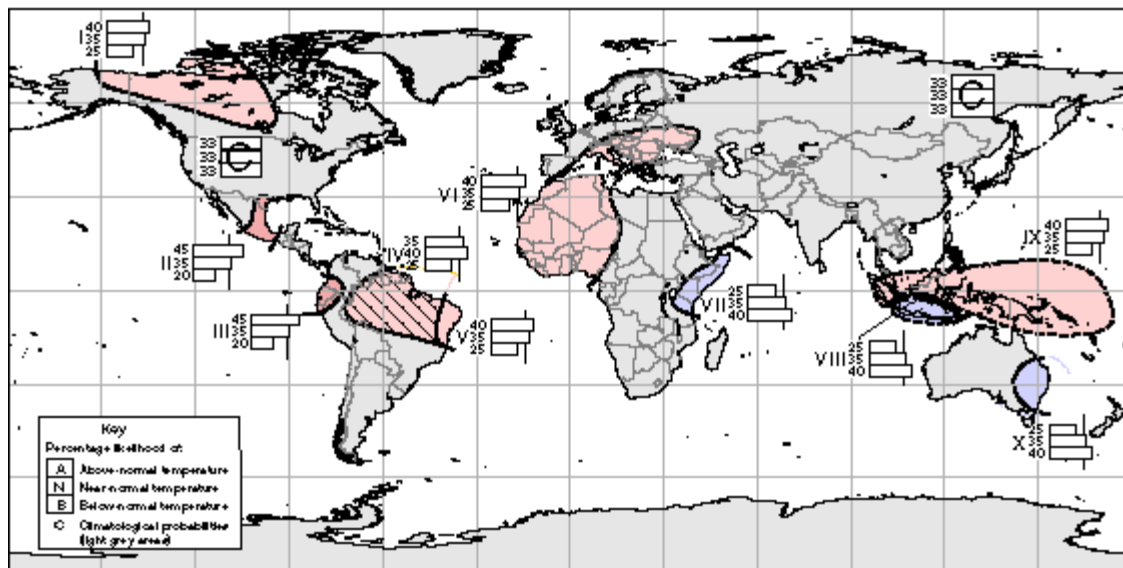
Température



Précipitation

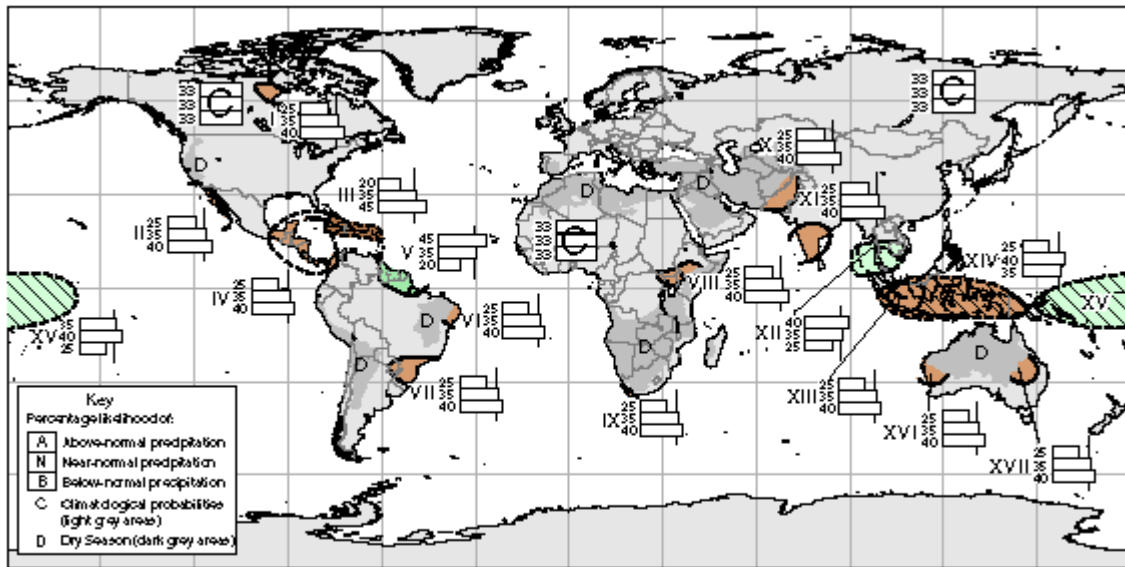
### Prévisions émises le 1er mars 2001 pour l'été 2001 (juillet-septembre)

Map B July - September 2001



Température

Map B July - September 2001



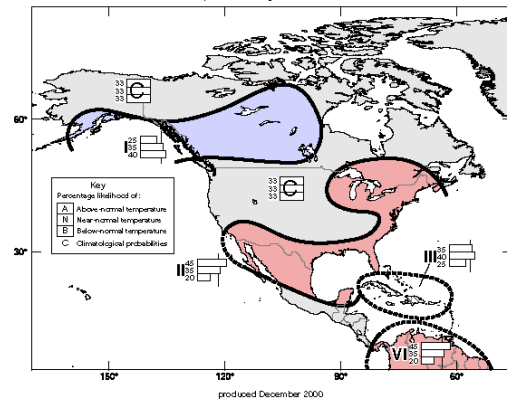
produced March 2001

**Précipitation**

**Prévisions émises le 1er décembre**

**Prévisions émises le 1er décembre 2000 pour l'hiver 2001**

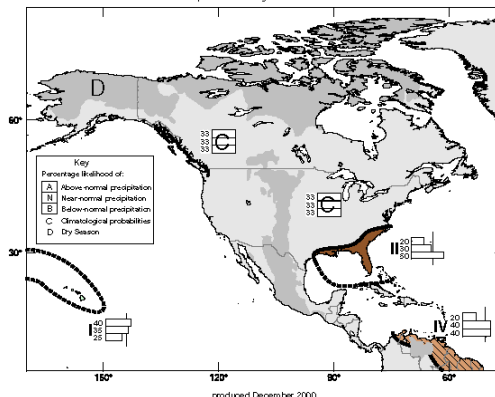
Map A January - March 2001



produced December 2000

**Température**

Map A January - March 2001

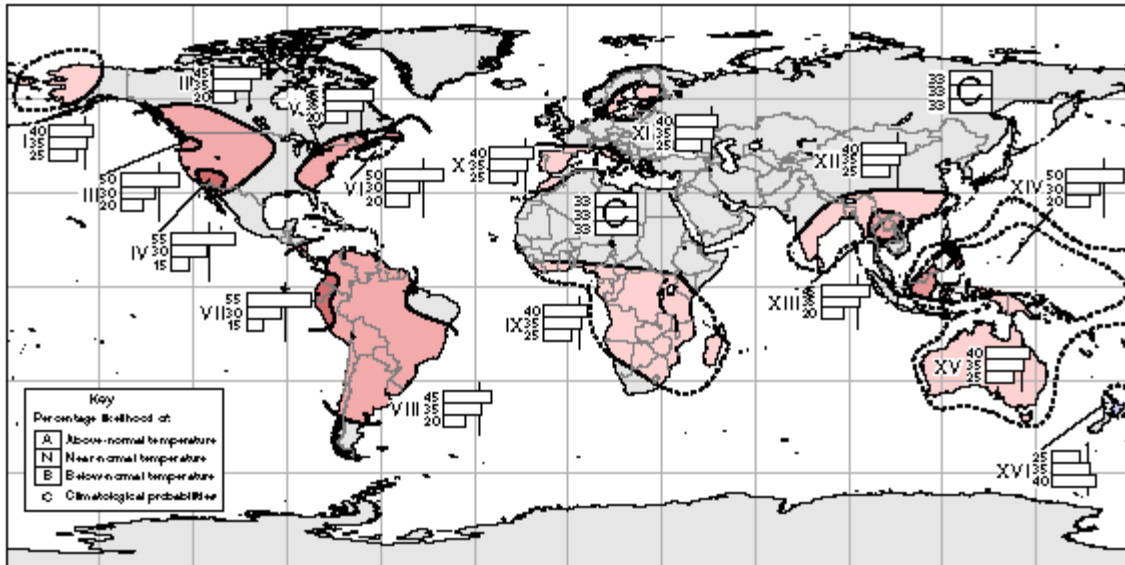


produced December 2000

**Précipitation**

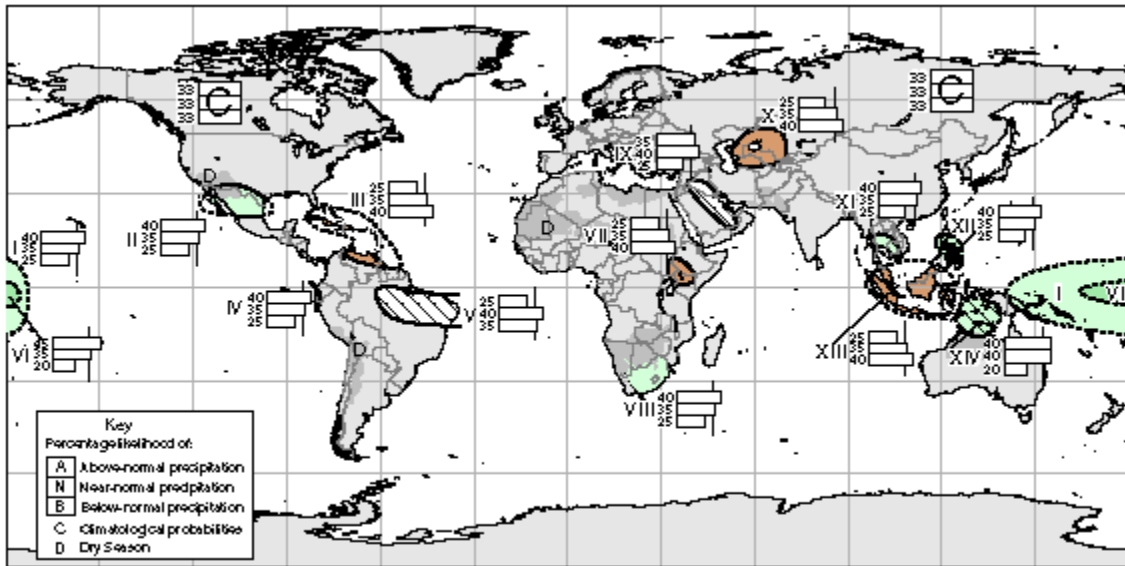
## Prévisions émises le 1er décembre 2000 pour le printemps 2001

Map B April - June 2001



### Température

Map B April - June 2001

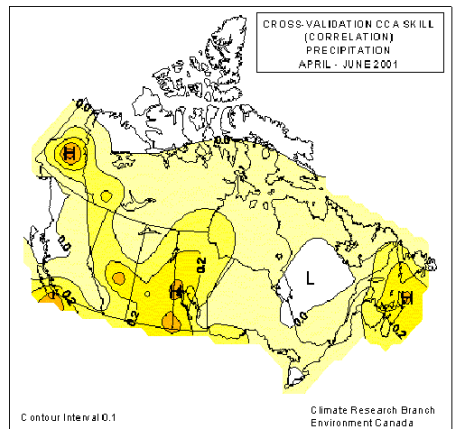
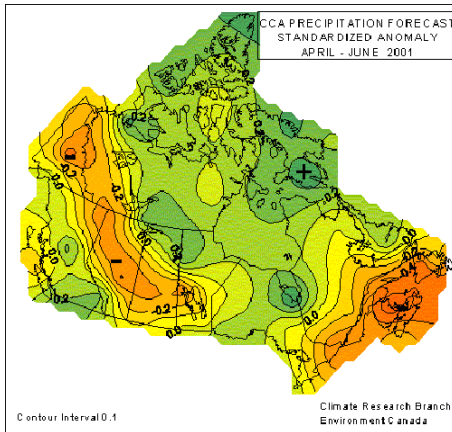
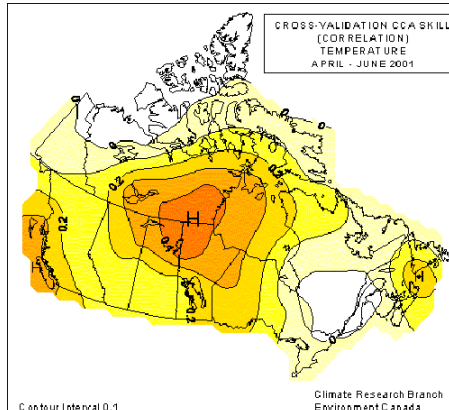
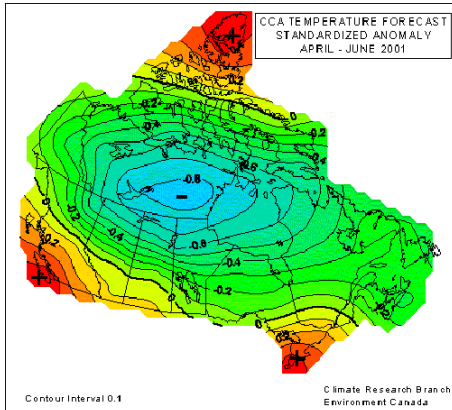


produced December 2000

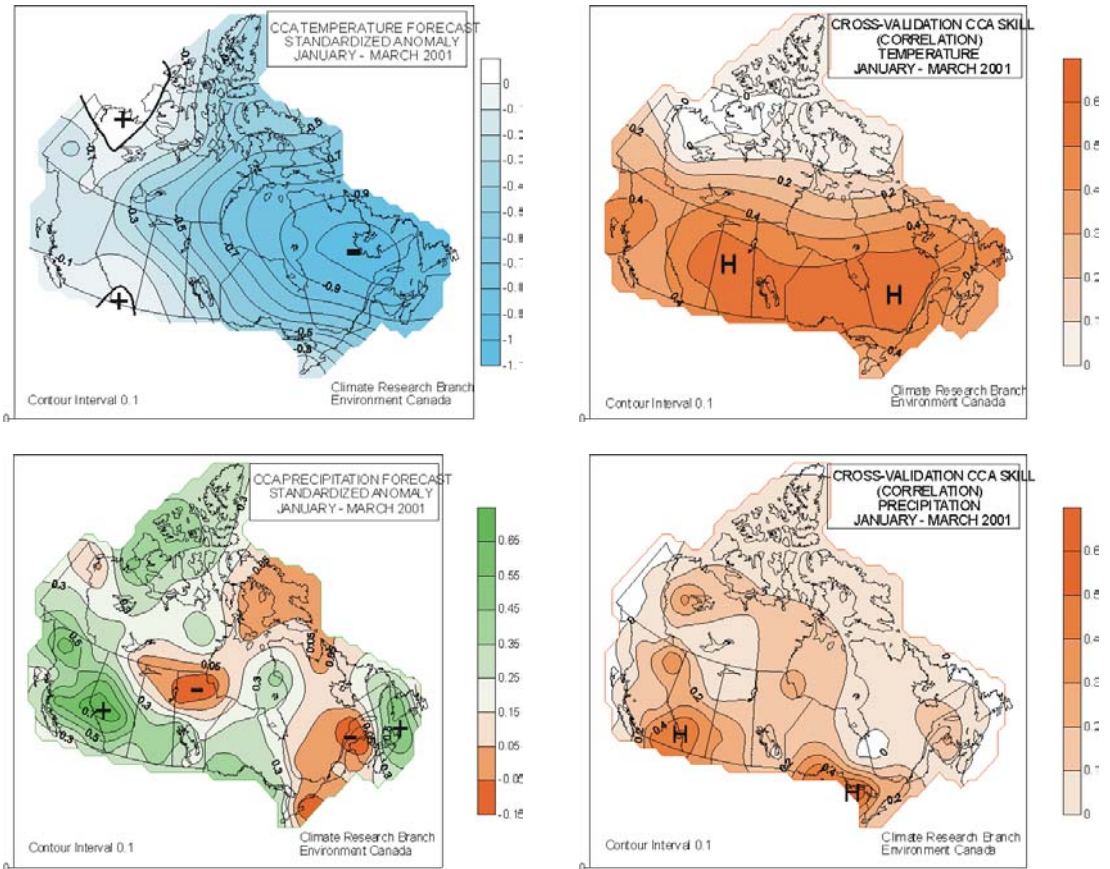
### Précipitation

## Prévisions saisonnières émises par IGES

### Prévisions émises le 1er juin 2001 pour l'été 2001



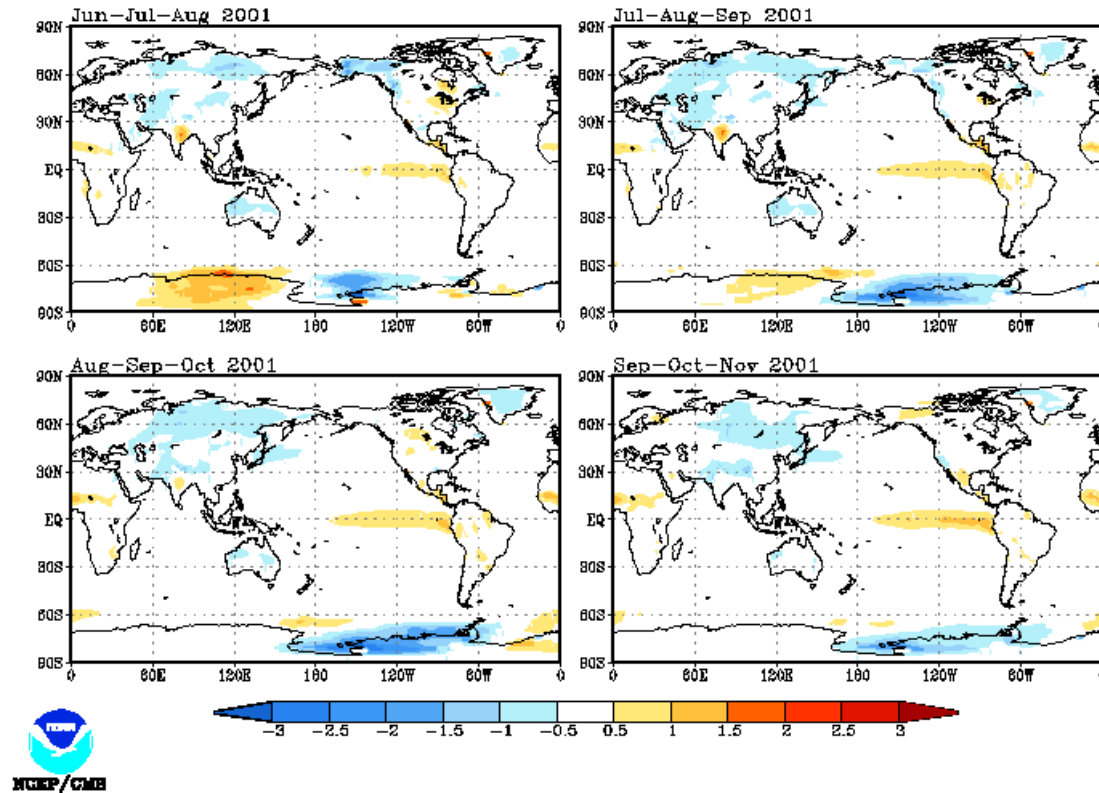
### Prévisions émises le 1er décembre 2000 pour l'hiver 2001



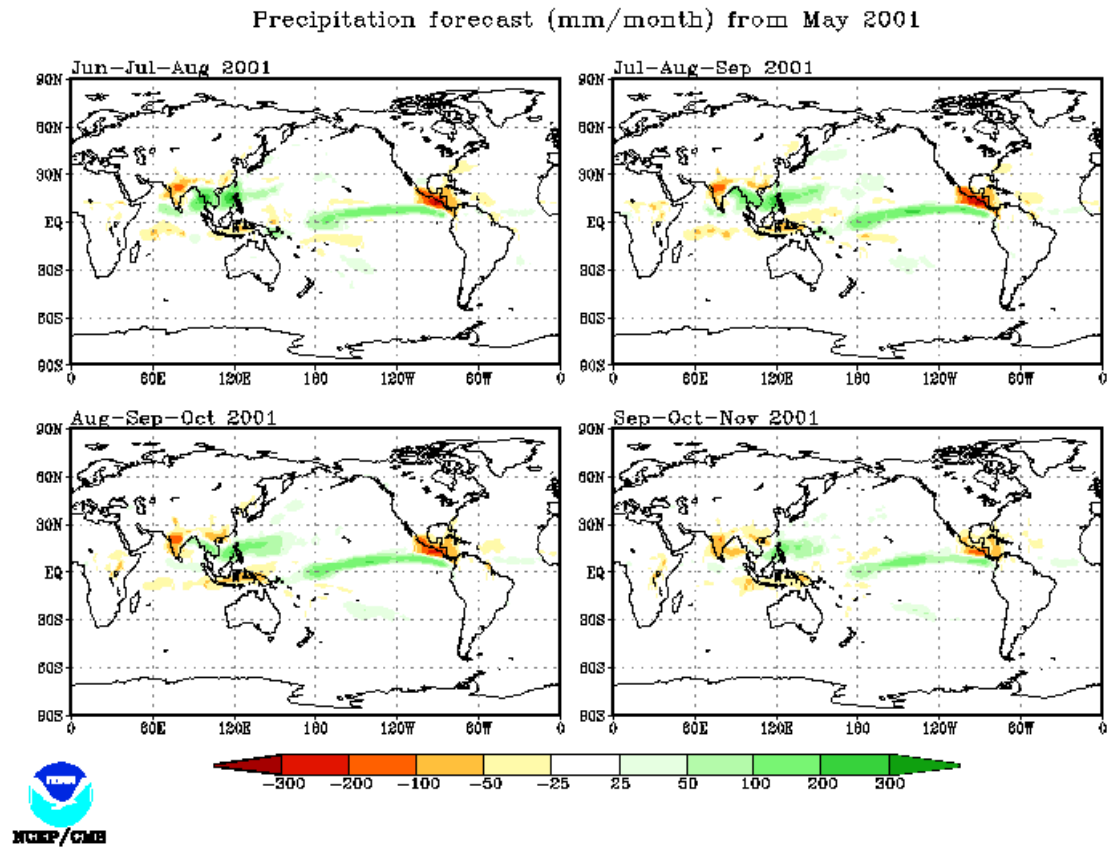
## Prévisions saisonnières émises par le CDC

### Prévision de température émise le 1er mai 2001 pour 6 mois

Surface temperature forecast (Kelvin) from May 2001



## Prévision de précipitation émise le 1er mai 2001 pour 6 mois

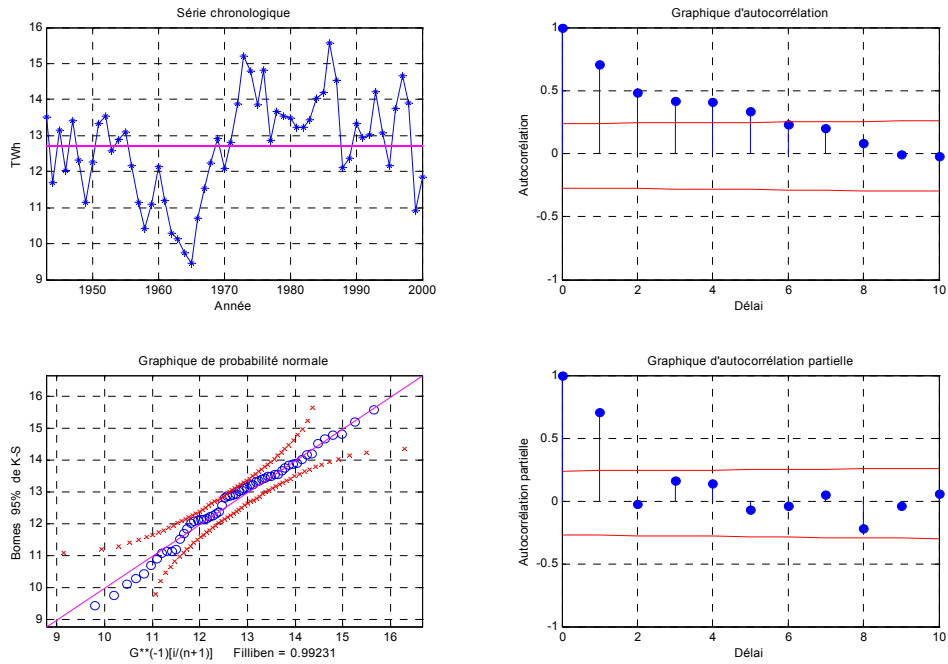


## **Annexe B:**

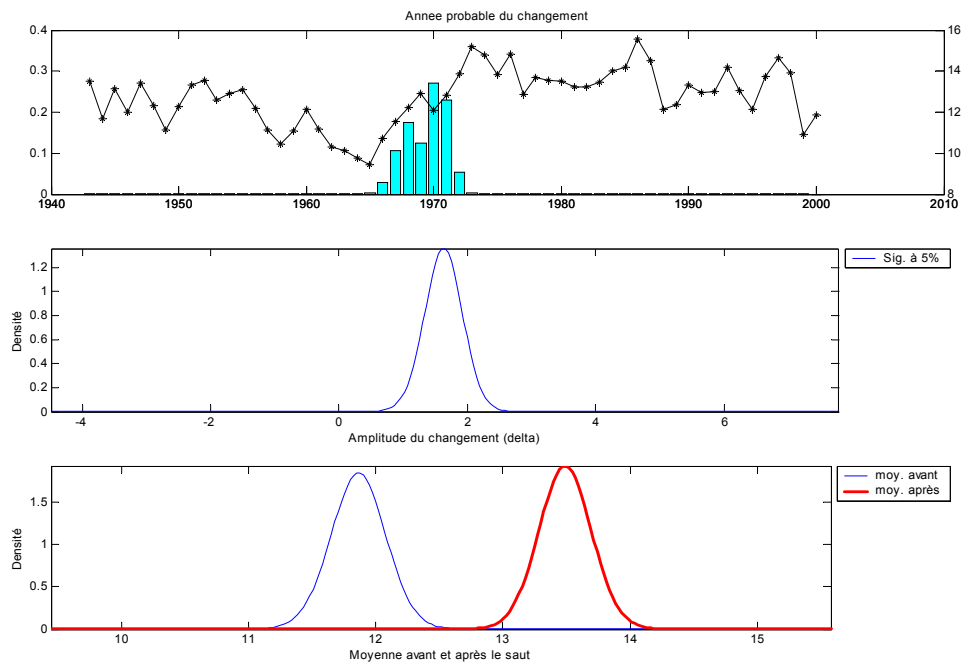
### **Portrait temporel des séries d'apports énergétiques pour huit complexes hydroélectriques et pour la somme de ces huit séries**

## Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Saint-Laurent

St-Laurent (ANNUEL)

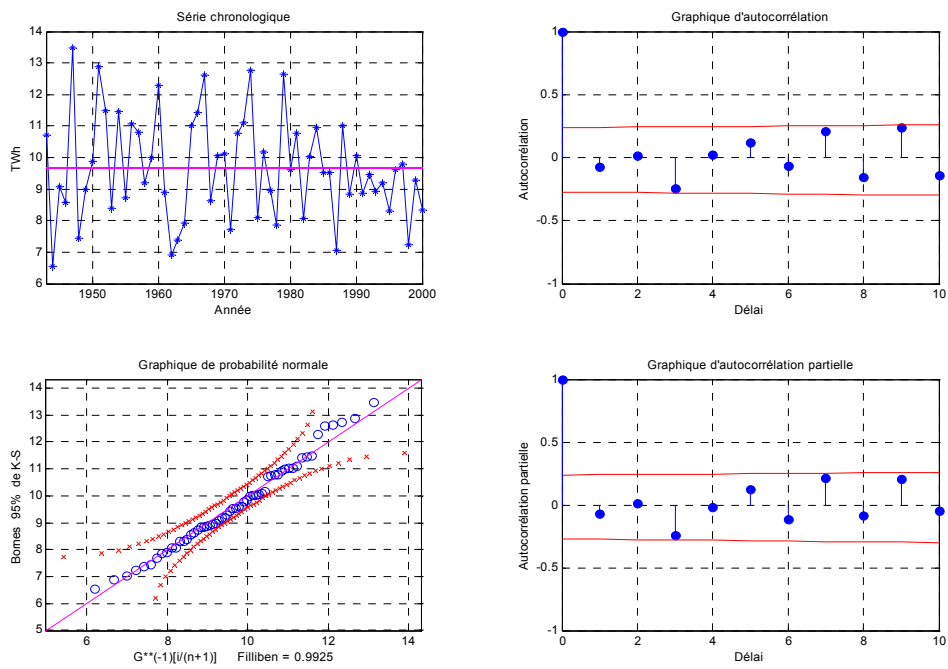


St-Laurent (ANNUEL)

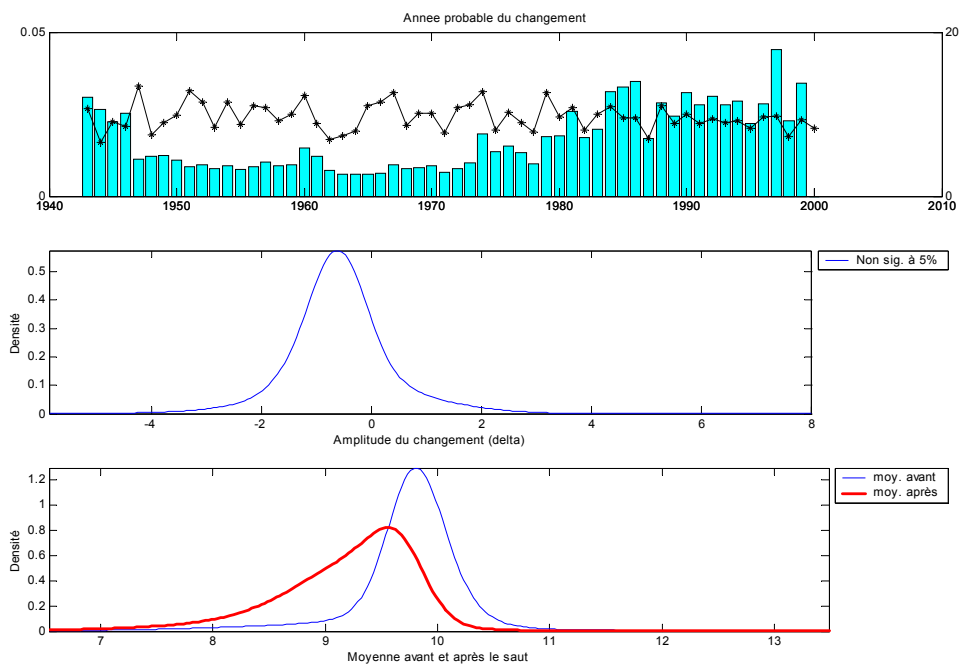


## Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Outaouais

Outaouais (ANNUEL)

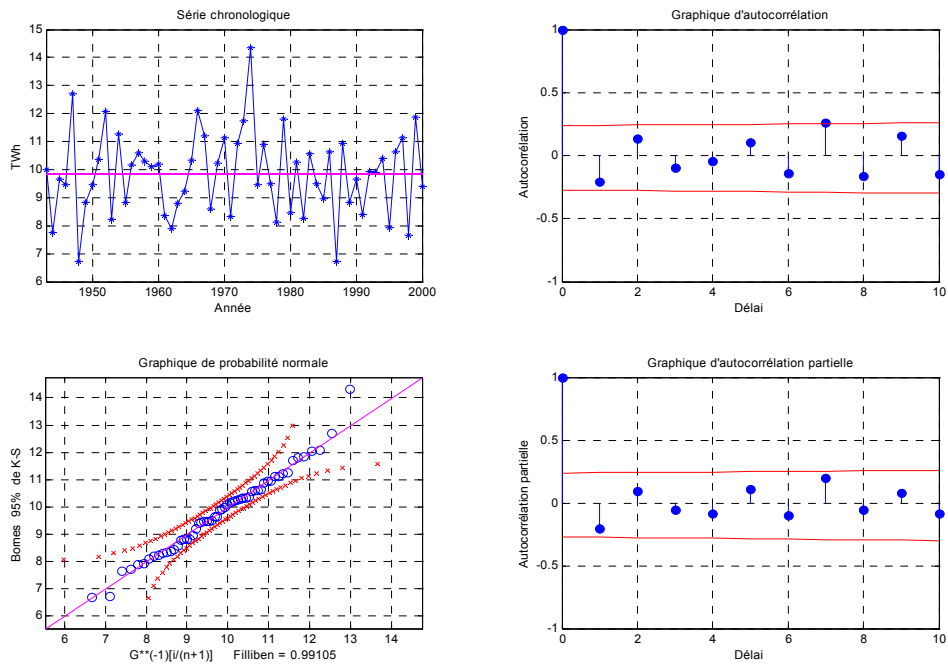


Outaouais (ANNUEL)

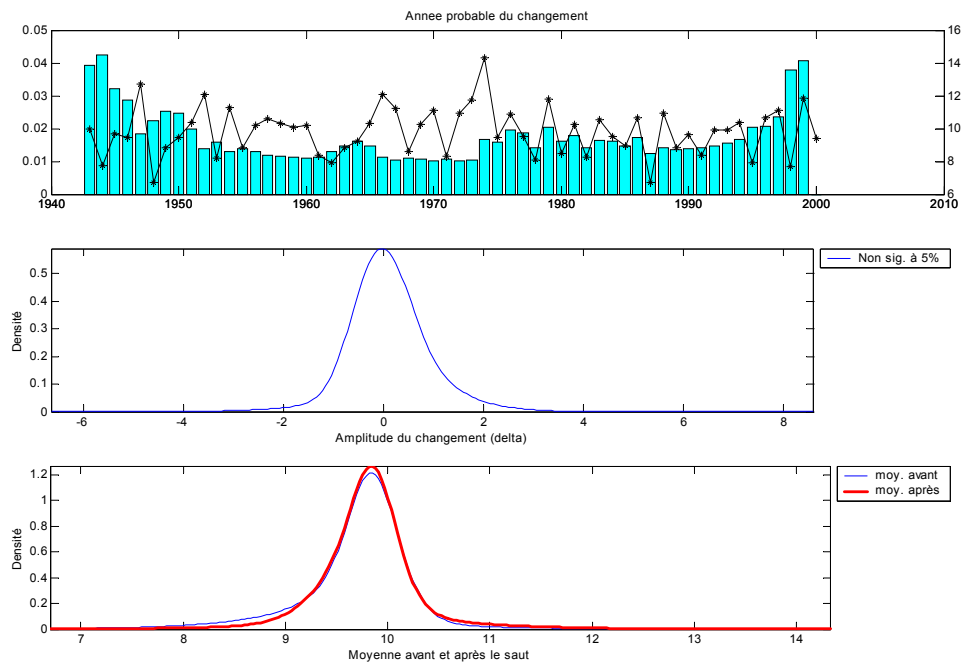


## Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Saint-Maurice

St-Maurice (ANNUEL)

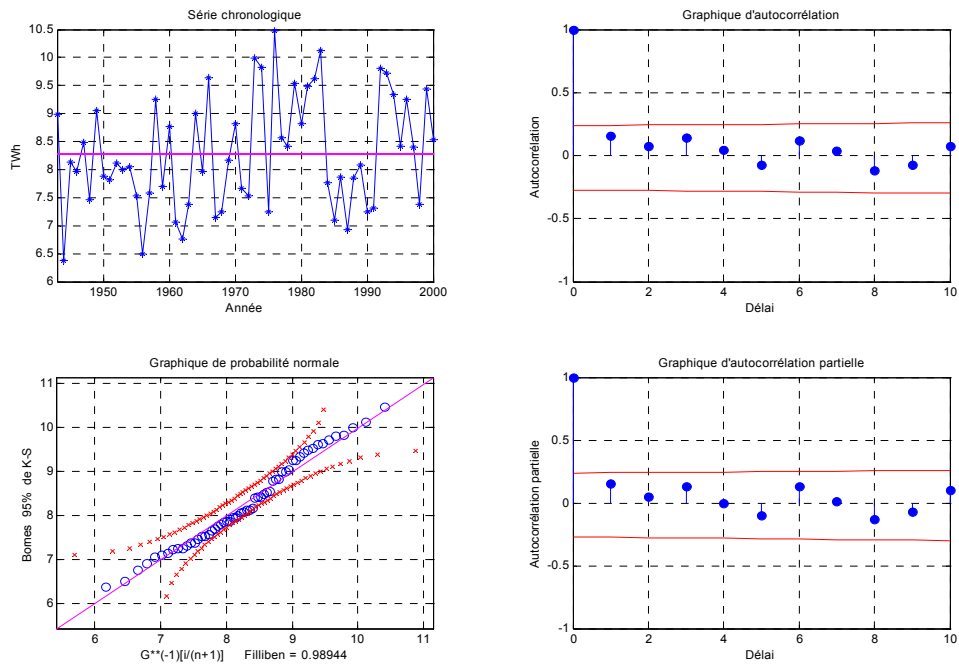


St-Maurice (ANNUEL)

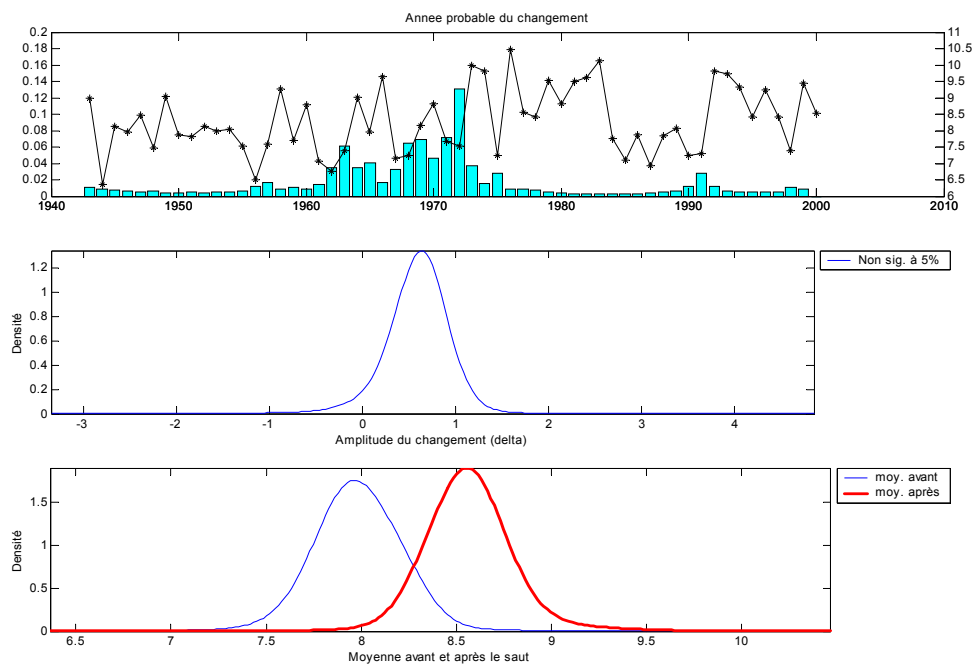


## Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Bersimis

Bersimis (ANNUEL)

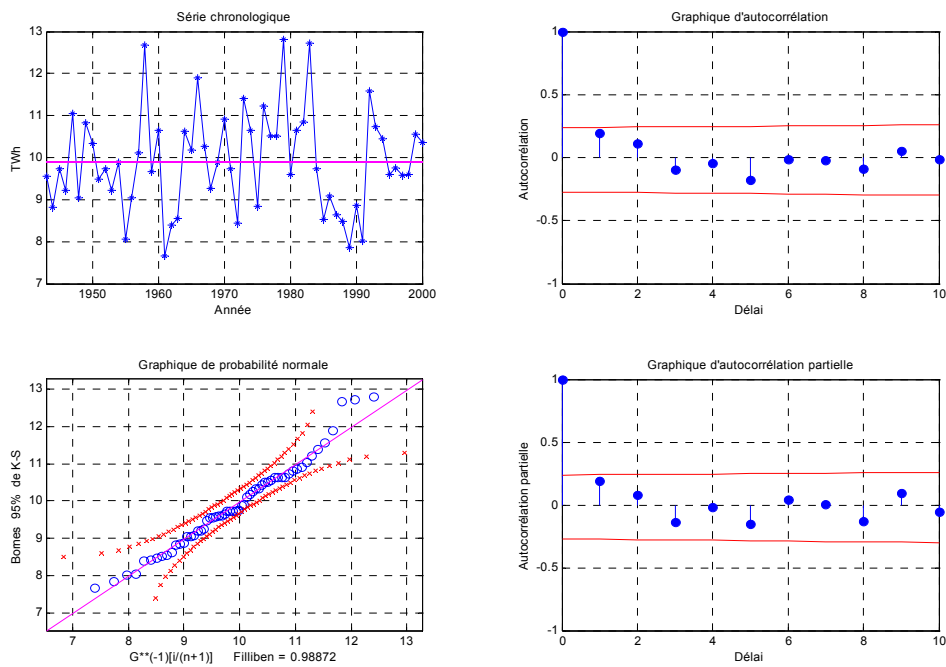


Bersimis (ANNUEL)

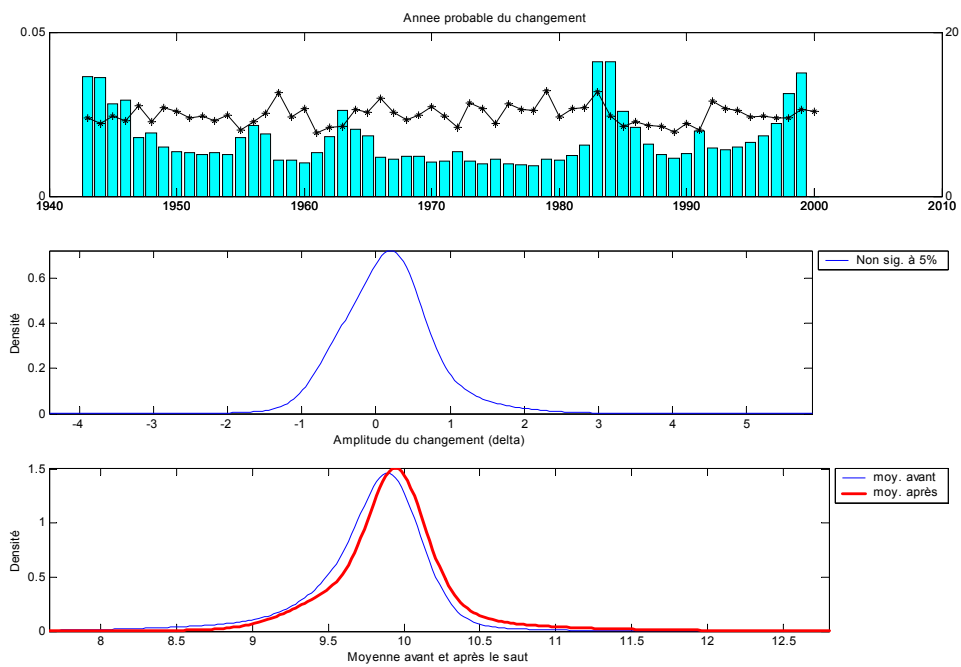


## Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Outardes

Outardes (ANNUEL)

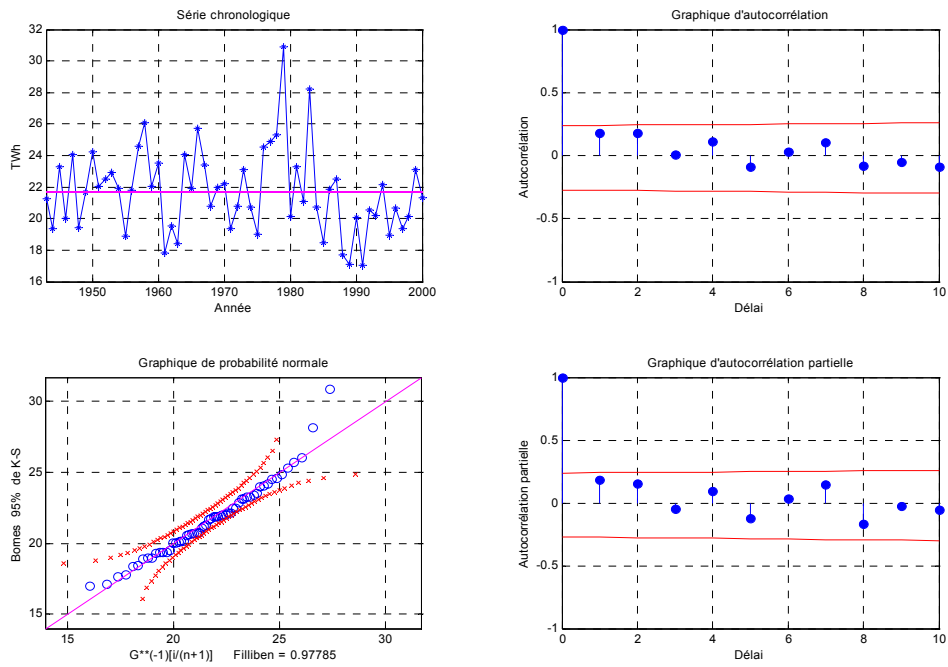


Outardes (ANNUEL)

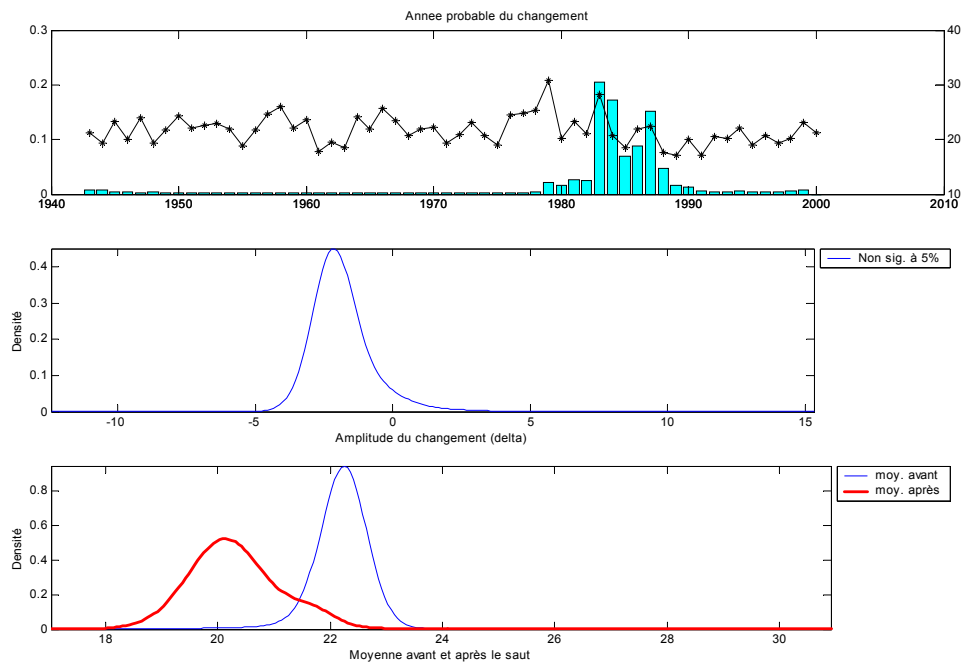


## Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Manicouagan

Manic (ANNUEL)

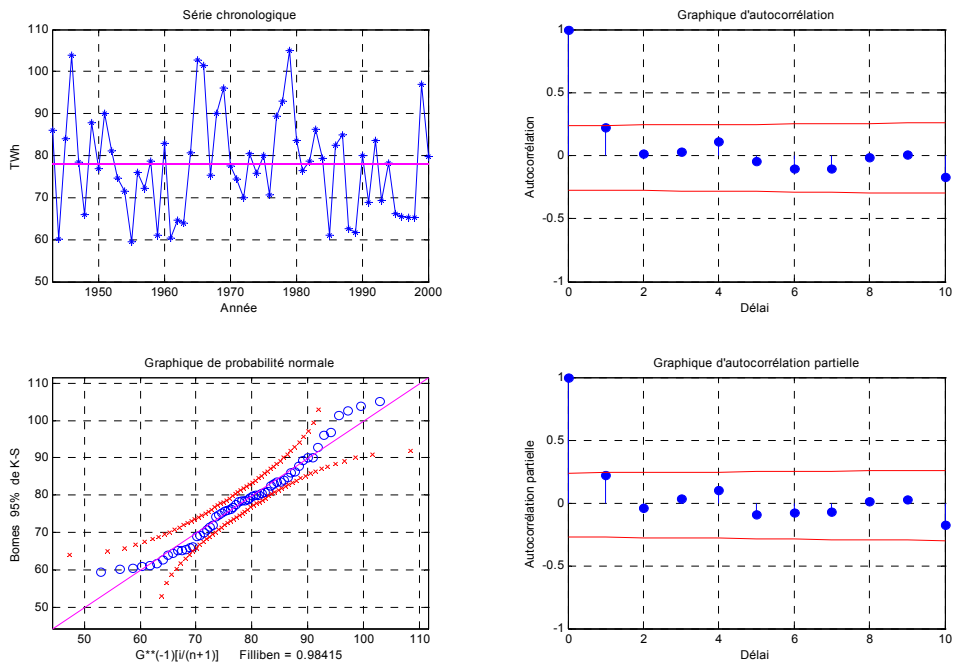


Manic (ANNUEL)

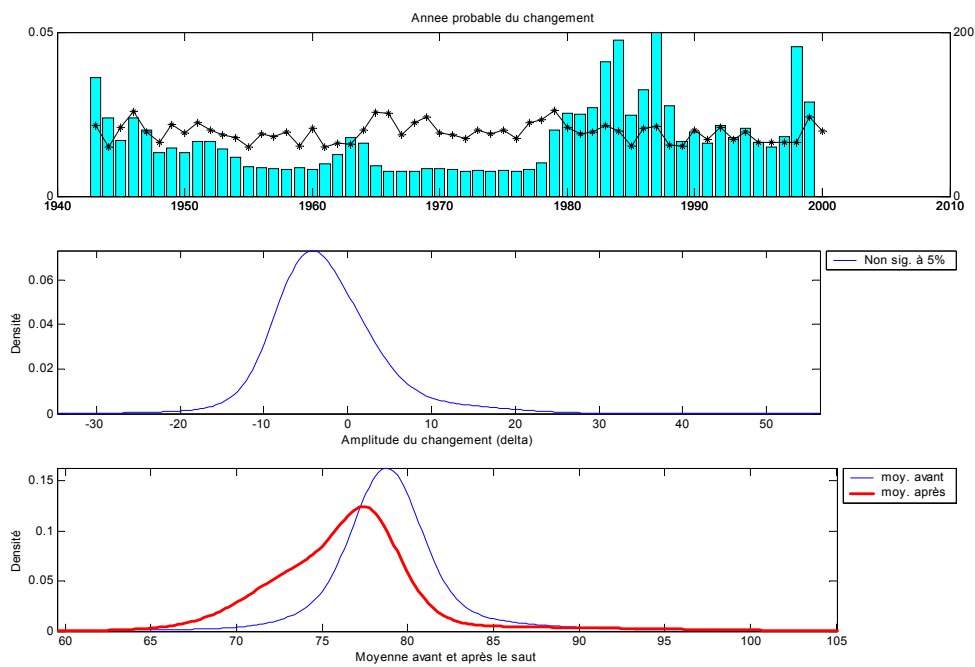


## Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe La Grande

La Grande (ANNUEL)

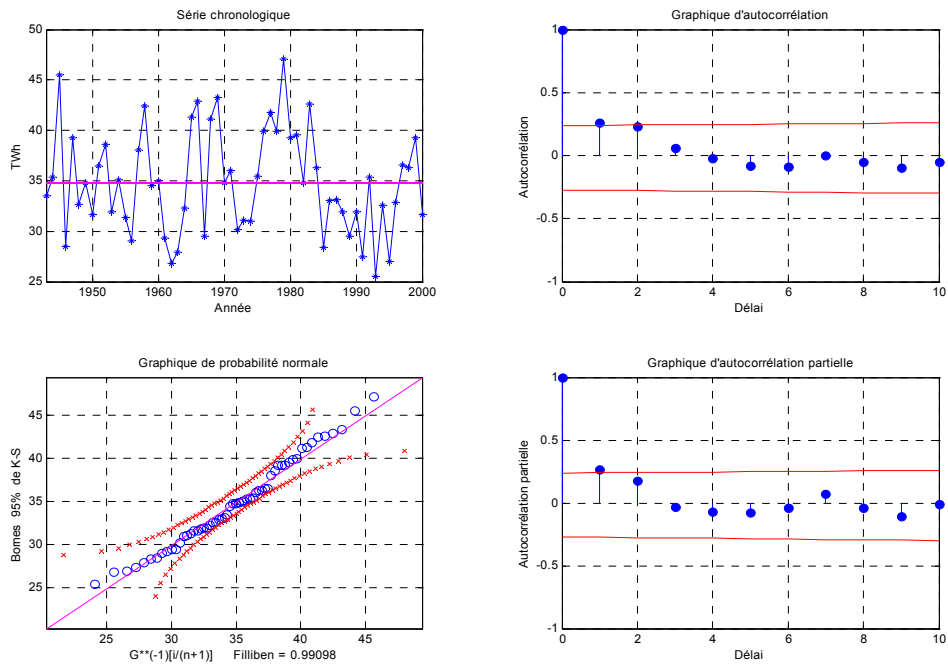


La Grande (ANNUEL)

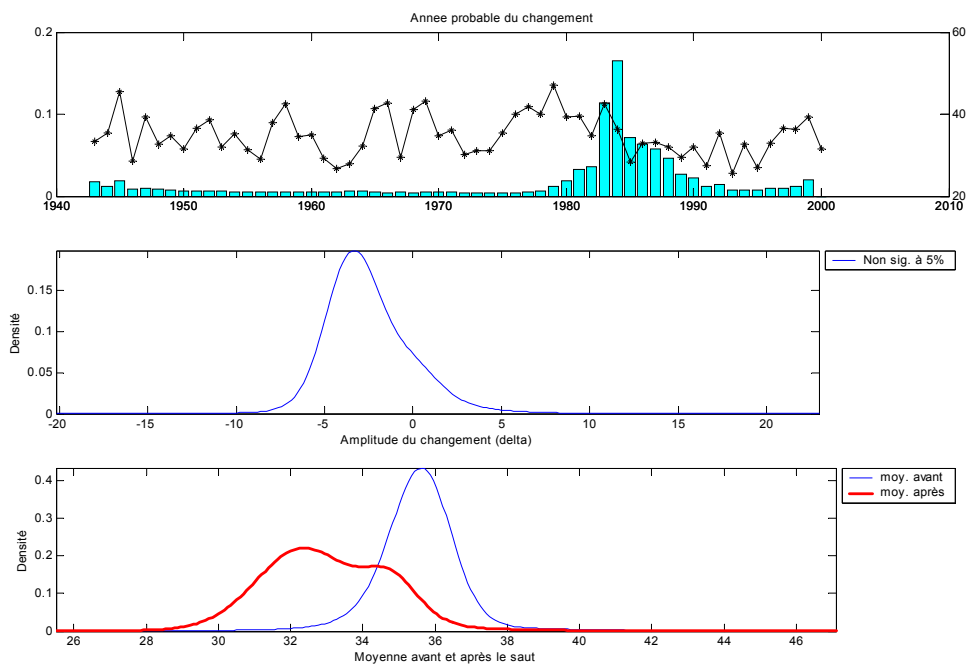


## Portrait temporel des apports énergétiques: Complexe Churchill Falls

Ch. Falls (ANNUEL)

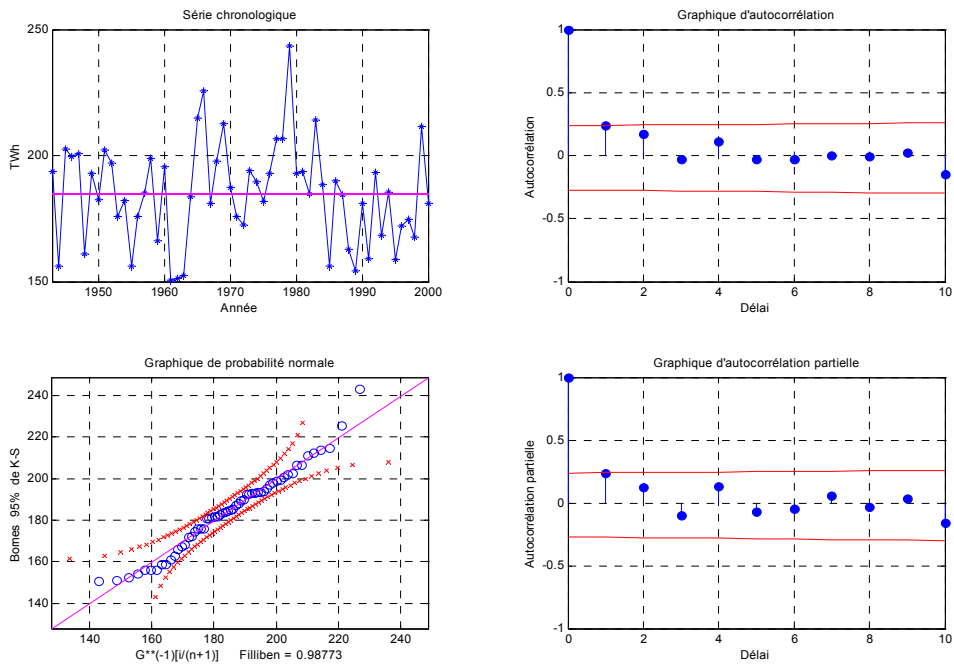


Ch. Falls (ANNUEL)



## Portrait temporel des apports énergétiques: Série agrégée

Total (ANNUEL)



Total (ANNUEL)

