

Apports énergétiques 1943-2000 Modélisation et prévision

**Rapport préparé pour
Hydro-Québec**

par

Peter Rasmussen
Université du Manitoba

Le 5 juin 2001

Table des matières

<u>1</u>	<u>Introduction</u>	1
<u>2</u>	<u>Analyse statistique exploratoire</u>	2
<u>2.1</u>	<u>Estimation de la moyenne et de la variance par lowess</u>	2
<u>2.2</u>	<u>Distribution des apports énergétiques</u>	4
<u>3</u>	<u>Modèles statistiques</u>	5
<u>3.1</u>	<u>Hypothèse 1: Moyenne constante, série aléatoire</u>	5
<u>3.2</u>	<u>Hypothèse 2: Moyenne variable, résidus aléatoire</u>	7
<u>3.3</u>	<u>Hypothèse 3: Moyenne constante, changement de niveau</u>	8
<u>3.4</u>	<u>Hypothèse 4: Moyenne constante, persistance interannuelle</u>	9
<u>3.5</u>	<u>Hypothèse 5: Variation de la moyenne reliée aux changements climatiques</u> ...	10
<u>3.6</u>	<u>Hypothèse 6: Variation de la moyenne reliée aux oscillations océaniques</u>	11
<u>4</u>	<u>Conclusions et recommandations</u>	12
<u>4.1</u>	<u>Sommaire des conclusions</u>	12
<u>4.1.1</u>	<u>Cycles hydrologiques</u>	12
<u>4.1.2</u>	<u>Autocorrélation</u>	12
<u>4.1.3</u>	<u>Moyenne à long terme</u>	13
<u>4.1.4</u>	<u>Saut de moyenne</u>	13
<u>4.1.5</u>	<u>Changements et oscillations climatiques</u>	13
<u>4.2</u>	<u>Modèle retenu</u>	13
<u>4.3</u>	<u>Prévision pour 2001-02</u>	15
<u>5</u>	<u>Bibliographie</u>	15
<u>6</u>	<u>Annexe: Lissage par lowess des apports énergétiques des huit systèmes d'Hydro-Québec</u>	17

1 Introduction

La série d'apports énergétiques observés sur la période 1943-2000 constitue un élément critique pour un nombre de décisions importantes que doit prendre Hydro-Québec. Il est important non seulement de comprendre les caractéristiques statistiques des données observées, mais aussi d'avoir un modèle permettant de prévoir les apports énergétiques des prochaines années.

Ce rapport présente quelques réflexions sur la modélisation des apports énergétiques. Les données ont déjà fait l'objet de nombreuses études. Nous allons examiner différentes hypothèses et offrir notre point de vue sur ce problème complexe.

La figure 1 montre les apports énergétiques agrégés des huit systèmes d'Hydro-Québec. On voit clairement la présence de séquences d'années sèches et humides. Ces séquences sont à la base des questions que se pose Hydro-Québec.

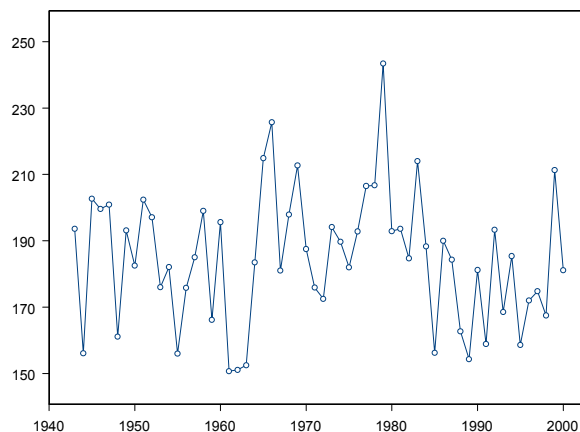


Figure 1. Apports énergétiques agrégés pour les huit systèmes d'Hydro-Québec [en TWh].

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer les caractéristiques de la série d'apports agrégés. Les principales propositions se résument comme suit:

- Les données annuelles sont indépendantes et distribuées identiquement. La présence de séquences est entièrement le résultat de l'aléa.
- Les séquences observées sont – au moins partiellement – le résultat de la manière dont les données ont été obtenues (par exemple, reconstitution versus bilan hydrique). Les séquences coïncident ainsi avec la mise en marche de certaines centrales. Elles sont donc le produit d'une influence anthropique.

- Les séquences sont dues à une persistance au niveau annuel. Le modèle AR(1) a été suggéré pour modéliser cette persistance.
- Les séquences sont le produit d'une persistance à longue mémoire. Des modèles du type *bruit fractionnel gaussien* ou FARMA pourraient être considérés.
- La série contient un ou plusieurs sauts brusques, parfois appelé *rupture* ou *changement de moyenne* d'un niveau à un autre.
- Les séquences sont causées par des cycles climatiques liés aux oscillations océaniques à basse fréquence.
- Les apports énergétiques sont influencés par une tendance causée par le changement climatique.

La suite est divisée en deux parties, commençant avec une analyse statistique exploratoire suivie d'une discussion des différentes options de modélisation.

2 Analyse statistique exploratoire

L'analyse statistique exploratoire a pour but d'examiner les données afin de guider le choix de modèle.

2.1 Estimation de la moyenne et de la variance par lowess

Il est évident que la série d'apports énergétiques contient un élément aléatoire important. Aucun modèle statistique ne peut expliquer la totalité de la variation des apports. Afin de répondre aux questions qui nous ont été posées, on doit distinguer deux types de variations:

- variation de la moyenne,
- variation autour de la moyenne.

Cette distinction est importante, car pour la prévision, c'est la moyenne qui sera utilisée. Pour étudier les caractéristiques de la moyenne, on a généralement fait des hypothèses a priori sur sa forme. Parmi les hypothèses qui ont été discutées fréquemment au cours des dernières années, mentionnons:

- la moyenne est une constante,
- la moyenne change brusquement au milieu des années 1980; avant et après le changement, elle est constante.

Plutôt que de faire une hypothèse *a priori* sur la forme fonctionnelle de la moyenne, on peut utiliser une méthode non paramétrique pour estimer la moyenne. Une telle méthode permet de dégager les tendances dans les observations.

Ici, nous utilisons la méthode de régression non paramétrique connue sous le nom *lowess*. Cette méthode est similaire à une moyenne mobile, mais plus robuste du fait qu'elle donne moins de poids aux valeurs extrêmes. Pour estimer la moyenne correspondant à une année donnée, le *lowess* considère seulement les observations dans le voisinage de cette année. La largeur du voisinage est déterminée par un paramètre de lissage que l'utilisateur doit spécifier. Une régression linéaire pondérée est ensuite calculée. La pondération des observations décroît en fonction de la distance à l'année d'intérêt. Pour déterminer une courbe décrivant la moyenne sur toute la période d'observation, il faut effectuer cette estimation à chaque point d'observation. De plus, une série d'itérations est faite pour réduire l'impact de grands résidus. La méthode est décrite par Cleveland (1979).

On doit noter que *lowess* est un outil diagnostique qui comporte un élément subjectif lié au choix du paramètre de lissage. Ce paramètre influence de manière importante l'allure de la courbe de régression. On doit essayer de le choisir de manière à préserver les grandes tendances des données sans admettre trop de fluctuations locales. Puisque c'est un outil descriptif, on devrait préférentiellement éviter l'extrapolation à l'extérieur de la zone de données.

La figure 2 montre la régression *lowess* pour les apports énergétiques agrégés. L'estimation a été effectuée avec le logiciel *S-Plus*. Il est clair que la moyenne estimée par *lowess* varie en fonction du temps avec une hausse au cours des années 1965-1980 et une décroissance depuis le début des années quatre-vingts.

Bien que l'intérêt principal concerne la série d'apports agrégés, nous avons appliqué la méthode *lowess* à chacun des huit systèmes afin de voir s'il y a un patron. Le résultat est donné dans l'annexe A. Les lissages ont été effectués en utilisant des paramètres de lissage obtenus par la validation croisée. Le degré de lissage semble être approprié.

Certaines caractéristiques se dégagent facilement des figures dans l'annexe. Toutes les courbes enregistrent une hausse plus ou moins importante autour de 1975. Trois bassins ont des moyennes estimées dont la forme temporelle est assez semblable, soit LaGrande, Churchill et St-Laurent: Les séries commencent avec une décroissance de la moyenne jusqu'à 1960, suivie d'une croissance de la moyenne jusqu'à 1975, suivie d'une autre décroissance jusqu'à aujourd'hui. Puisque ces trois systèmes ensemble comptent environ 70% de la production, ces caractéristiques seront évidemment reflétées dans la courbe pour les apports agrégés.

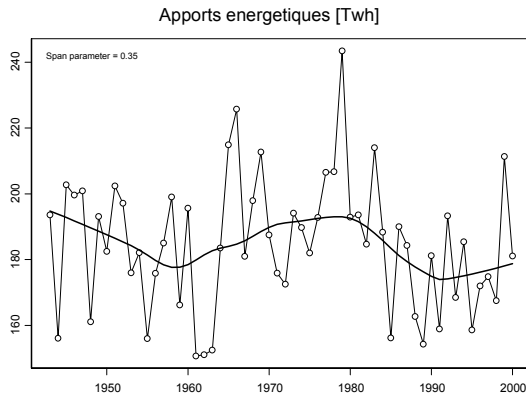


Figure 2. Apports énergétiques agrégés pour les huit systèmes d'Hydro-Québec [en TWh] avec la courbe de régression lowess.

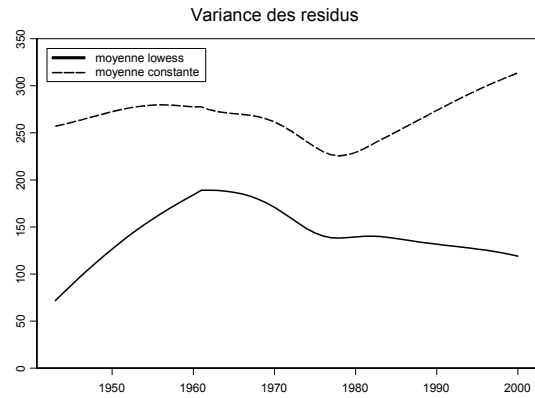


Figure 3. Variance des résidus.

La variance des résidus en fonction du temps est estimée par une régression lowess sur les résidus au carré. Le résultat est donné dans la figure 3 où on considère également la variance des résidus sous l'hypothèse d'une moyenne constante. Puisque la variation de la moyenne dans le modèle lowess explique une partie de la variation des données, il n'est pas surprenant que la variance des résidus associée à une moyenne constante soit plus élevée. On note que la variance varie également en fonction du temps.

2.2 Distribution des apports énergétiques

La majorité des modèles que l'on peut considérer pour la modélisation des apports énergétiques nécessite que leur distribution soit connue. La figure 4 montre le graphique de probabilité normale des apports énergétiques. Les données semblent être adéquatement modélisées par une loi normale.

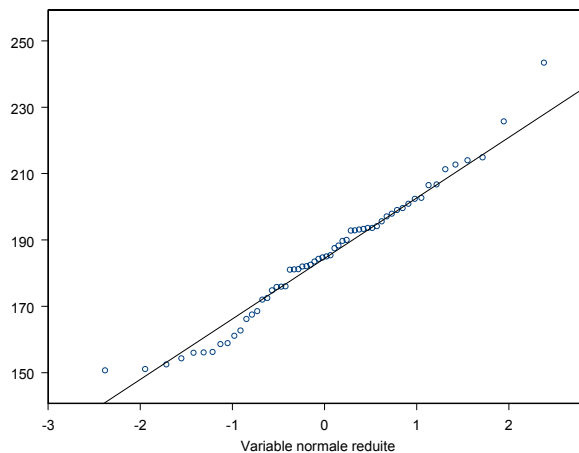


Figure 4. Distribution des apports énergétiques.

3 Modèles statistiques

La question fondamentale demeure comment expliquer la variation apparente de la moyenne locale. Dans ce qui suit, nous examinerons certaines des différentes hypothèses proposées pour expliquer le phénomène.

3.1 Hypothèse 1: Moyenne constante, série aléatoire

Le premier modèle statistique considéré ici est basé sur l'hypothèse que les données d'apports énergétiques sont indépendantes et distribuées identiquement. Aussi appelé un modèle à bruit blanc, ce modèle statistique peut être considéré comme le modèle de référence auquel les autres modèles sont comparés.

La figure 5 montre la fonction d'autocorrélation des données. L'autocorrélation d'ordre 1 n'est pas significative au niveau de 5%. Ceci pourrait justifier l'hypothèse d'un bruit blanc.

Pour vérifier si les cycles observés dans la figure 2 peuvent s'expliquer par l'aléa, nous procédons par simulation. Nous avons généré 1000 séries de longueur 58 à partir d'une distribution normale de moyenne 184.8 et écart-type 19.8. La simulation reproduit la longueur, la moyenne et l'écart-type de la série d'apports énergétiques. Pour chaque série simulée, nous avons effectué une régression lowess avec le paramètre de lissage égal à 0.35 (même valeur que dans la figure 2). Basée sur la régression lowess évaluée à chaque année, deux indices de variation ont été calculés:

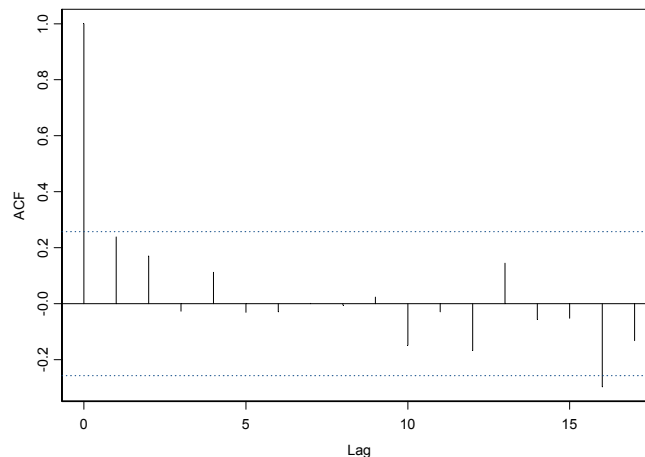


Figure 5. Fonction d'autocorrélation de la série agrégée.

$$\text{Indice 1} = \frac{\text{Var}[\hat{y}_t]}{\text{Var}[y_t]}$$

$$\text{Indice 2} = \frac{\max[\hat{y}_t] - \min[\hat{y}_t]}{\sqrt{\text{Var}[y_t]}}$$

où y_t représente les apports énergétiques et \hat{y}_t est la moyenne locale estimée par lowess. On peut interpréter l'indice 1 comme la partie de la variance des apports énergétiques expliquée par la variation de la moyenne. L'indice 2 donne la gamme de variation de la moyenne. Pour éviter l'influence des queues, on ne considère pas les cinq premières et les cinq dernières années lors du calcul du minimum et du maximum.

Les valeurs simulées des deux indices peuvent être comparées aux valeurs correspondant aux apports énergétiques. Le résultat est donné dans les figures 6a et 6b. Les valeurs des deux indices pour la séries d'apports énergétiques sont de 0.10 et 0.98, correspondant à des percentiles de 0.80 et 0.84 selon les distributions simulées. Ces valeurs suggèrent que la variation de la moyenne locale des apport énergétiques est un peu plus forte que la normale, mais il n'y aucune raison pour rejeter l'hypothèse du modèle sur la base des deux indices.

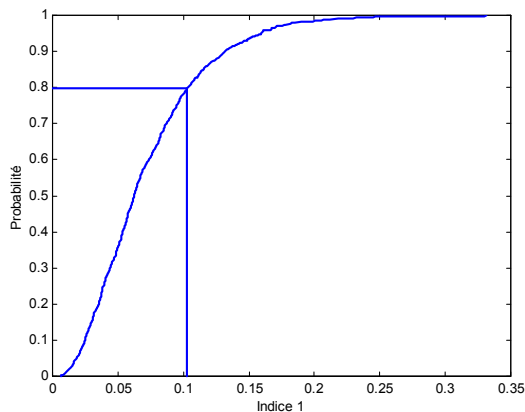


Figure 6a. Distribution empirique de l'indice 1. La valeur pour les apports énergétiques est 0.1.

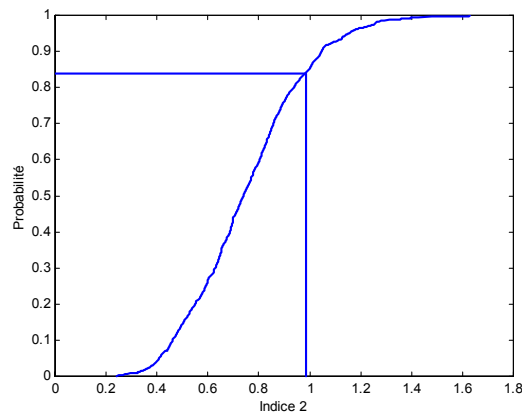


Figure 6b. . Distribution empirique de l'indice 2. La valeur pour les apports énergétiques est 0.98.

3.2 Hypothèse 2: Moyenne variable, résidus aléatoire

Bien que les résultats de la section précédente suggèrent que les cycles peuvent s'expliquer par l'aléa, on pourrait faire l'hypothèse que la *moyenne locale* varie autour d'une *moyenne à long terme*. Il est d'intérêt d'examiner d'autres rivières pour voir si la présence de cycles de moyenne locale est unique au système d'Hydro-Québec ou s'il s'agit un phénomène tout à fait normal qui se présente ailleurs. Nous avons donc choisi quelques stations hydrométriques des États-Unis. Les données ont été obtenues du réseau HCDN (Slack et al., 1993) et sont supposément fiables et peu influencées. Nous avons retenu quelques stations ayant une superficie de drainage de plus de 10 000 miles carrés parce que les grands bassins reflètent mieux les variations climatiques à grande échelle spatiale et temporelle. Malheureusement, le peu de stations canadiennes qui satisfont à ce critère sont soit très influencées ou ont une série d'observation trop courte pour permettre la mise en évidence des cycles.

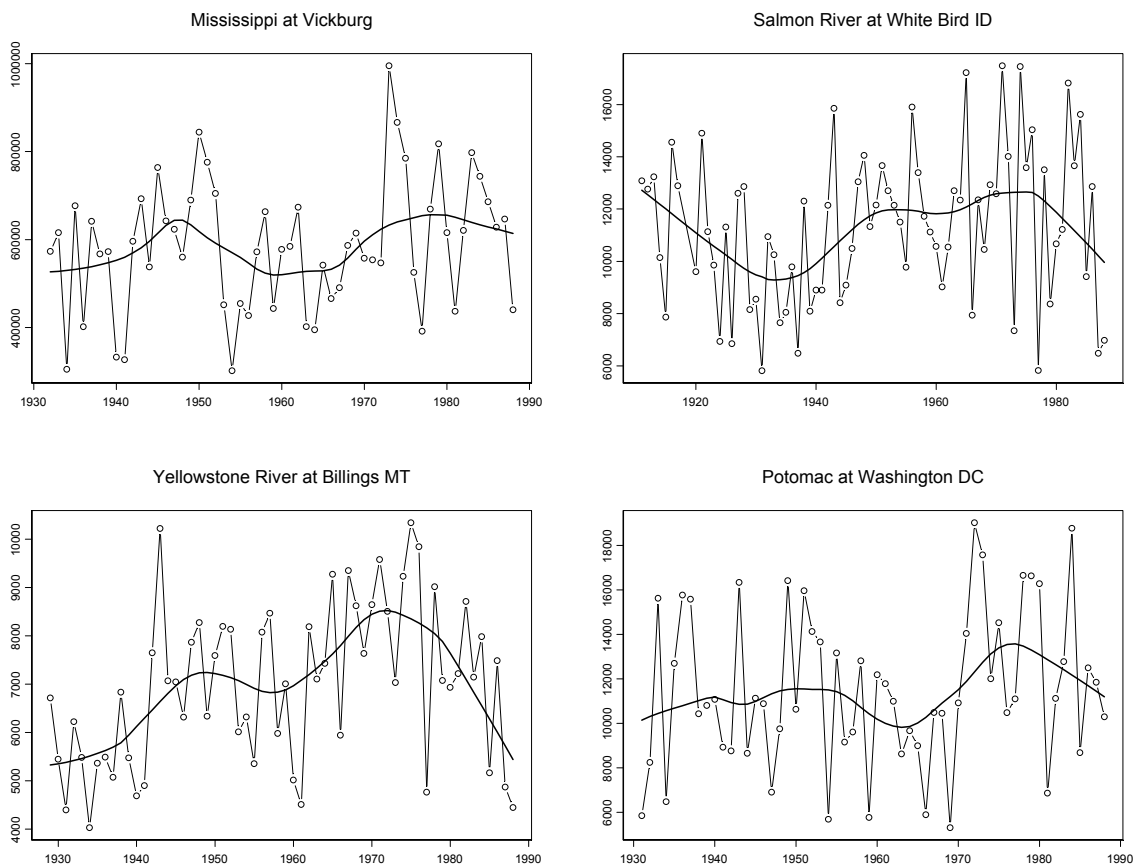


Figure 7. Apports moyens annuels de quatre grandes rivières américaines. Moyenne locale estimée par lowess.

La figure 7 montre quatre exemples d'apports annuels moyens des rivières américaines. Les séries illustrent bien la présence de cycles dans d'autres grands cours d'eau. Il faut souligner qu'il est facile de trouver des rivières qui ne démontrent pas ce patron de cycles, mais le phénomène est loin d'être unique. Les courbes de régression ont été obtenues par lowess en utilisant la même largeur de fenêtre que dans la figure 2. Le tableau 1 donnent quelques statistiques pour les quatre stations hydrométriques.

Tableau 1. Quatre stations hydrométriques des États-Unis.

Rivière	Superficie [sq.mi.]	Période	Nombre d'années	Indice 1	Indice 2
Mississippi	1 140 500	1932-88	57	0.11	0.93
Salmon	13 500	1911-88	76	0.14	0.97
Yellowstone	11 800	1929-88	61	0.35	1.84
Potomac	11 560	1931-88	58	0.09	1.08

3.3 Hypothèse 3: Moyenne constante, changement de niveau

Plusieurs études ont suggéré qu'un changement brusque de niveau de la moyenne a eu lieu au milieu des années quatre-vingts. La figure 8 montre les apports énergétiques avec la moyenne sous l'hypothèse qu'un changement brusque aurait eu lieu en 1984. Des analyses bayésiennes peuvent guider le choix du point de changement le plus probable (Perreault et al., 2000a,b). On peut envisager plusieurs points de changement. Par exemple, la période 1943-63 semble assez différente de la période 1964-1983 et on pourrait alors diviser l'échantillon en trois parties.

Tout comme la régression non paramétrique – et peut-être même plus, l'analyse bayésienne de changement de moyenne est un outil diagnostique (rétrospectif). De plus, elle est basée sur l'hypothèse *a priori* qu'un changement a eu lieu. Il est possible de *tester* si un changement a effectivement eu lieu.

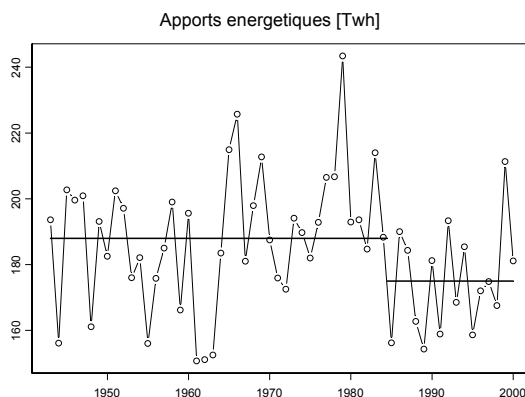


Figure 8. Apports énergétiques avec un changement avant et après 1984.

La plupart des analyses bayésiennes effectuées sur les données d'Hydro-Québec ont été basées sur l'hypothèse que la moyenne avant et après le changement serait constante, bien qu'il soit facile de modifier la procédure bayésienne pour admettre par exemple une variation polynomiale de la moyenne avant et après le changement (Rasmussen, 2001).

Nous avons plusieurs réservations par rapport à l'hypothèse d'un changement brusque de moyenne:

L'hypothèse est difficile à justifier physiquement. Nous croyons que le concept de *cycles de la moyenne locale* est plus facile à accepter intuitivement, même s'il n'est pas possible de les expliquer physiquement.

Les hypothèses du modèle sont arbitraires: Pourquoi un seul changement? Pourquoi une moyenne constante avant et après?

L'hypothèse est de caractère diagnostique. Cependant, pour faire la prévision, il faut un *modèle*. Il faut donc aller plus loin que la simple *observation*. Il faut faire des hypothèses sur la fréquence de changement, l'amplitude de changement, etc., afin de pouvoir prédire les valeurs futures à court et à long terme.

3.4 Hypothèse 4: Moyenne constante, persistance interannuelle

La figure 5 montre que l'autocorrélation d'ordre 1 n'est pas significative au niveau de 5%. Ceci n'est devrait pas exclure l'utilisation d'un modèle du type AR(1), si l'on croit que l'autocorrélation de 0.24 est réelle et non pas l'effet de l'aléa d'estimation.

D'abord on peut se poser la question, si une valeur de 0.24 est typique pour les rivières. On fait référence aux travaux de Vogel et al. (1998) qui ont examiné les données d'environ 1500 stations hydrométriques des États-Unis. En utilisant l'estimateur non biaisé de ρ_1 , ces auteurs ont trouvé que pour la majorité des régions hydrologiques des États-Unis, l'autocorrélation d'ordre 1 se situe entre 0.18 et 0.28. De plus, pour chaque région, la variation de l'estimation de ρ_1 autour de sa moyenne régionale peut s'expliquer par l'effet d'échantillonnage.

Basé sur les résultats de Vogel, il semble tout à fait raisonnable de conclure que l'autocorrélation de lag 1 de 0.24 associée à la série d'apports énergétiques est réelle. Elle ne reflète que ce qu'on observe ailleurs sur le continent nord-américain.

On peut envisager plusieurs explications à la persistance:

Mémoire des bassins versants

Persistance du climat

Cycles climatiques

Changements climatiques (tendances, sauts, etc.)

Effet d'échantillonnage

Combinaison de plusieurs des facteurs ci-dessus.

Il serait difficile de décortiquer de manière rigoureuse les différentes sources de l'autocorrélation. On offre ici une simple explication qui néglige probablement d'autres sources. On suggère que l'autocorrélation est produite par les cycles hydrologiques mis en évidence par la régression lowess dans la figure 2. La figure 9 montre la fonction d'autocorrélation des résidus de la figure 2. On voit qu'il n'y a pas de patron évident ce qui suggère que la régression lowess a blanchi la série.

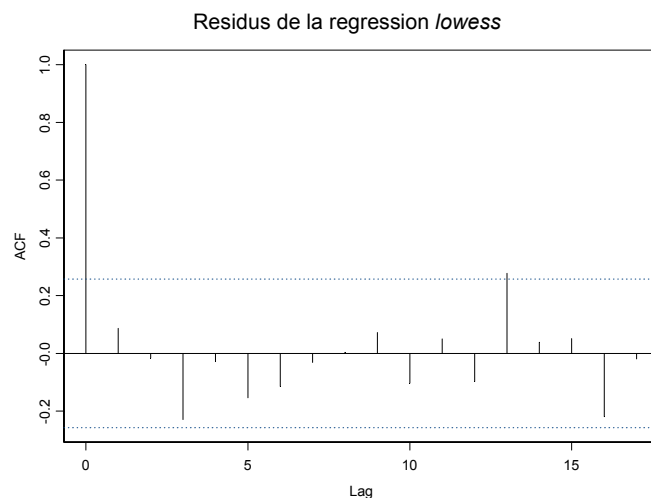


Figure 9. Autocorrélation des résidus de la régression lowess.

3.5 Hypothèse 5: Variation de la moyenne liée aux changements climatiques

Un effort considérable est actuellement consacré à l'étude des changements climatiques. Cependant, la réalité est que la science climatique n'est pas encore arrivée au point où l'on peut se prononcer avec certitude sur le caractère des impacts hydrologiques au Canada. Une étude d'Environnement Canada (The Canada Country Study, 1999) suggère que sous un scénario hypothétique de $2\times$ CO_2 , le nord du Québec verrait la température augmenter de 2 à 6°C, alors que le sud de la province verrait une augmentation de 1 à 4°C. On ne s'attend pas à des changements importants dans les précipitations. L'impact sur les ressources hydriques n'est pas bien connu.

Il nous semble très peu probable que les variations hydrologiques observées au Québec au cours des soixante dernières années puissent s'expliquer par des

changements climatiques. L'empreinte d'un changement climatique serait une tendance monotone plutôt que des cycles décennaux que l'on a observé. L'influence de l'augmentation des gaz à effet de serre au cours des soixante dernières années devrait être assez faible.

En parenthèse, mentionnons que le rapport d'Environnement Canada indique spécifiquement que le lien entre les cycles hydrologiques à l'échelle décennaux et les systèmes climatiques est peu connu.

3.6 Hypothèse 6: Variation de la moyenne reliée aux oscillations océaniques

Les oscillations océaniques à basse fréquence ont un impact sur le climat des continents et pourraient être à la source de cycles hydrologiques. Le mode dominant de variation climatique est El Niño qui affecte le climat de nombreux pays. Les études d'Environnement Canada suggère que les années El Niño sont souvent associées à des précipitations hivernales légèrement en dessous de la moyenne dans le sud du Québec. Cependant, l'impact d'El Niño est relativement faible au Québec. Une étude statistique sur la relation entre les apports énergétiques et les oscillations océaniques a été effectuée par Rasmussen et al. (1999). Cette étude conclut que la variation des apports énergétiques est plutôt liée à la circulation océanique du Nord-Atlantique. On a trouvé des indications d'une relation entre les apports énergétiques et le NAO et le BWA. Récemment, Slivitzky et Fortin (2001) ont suggéré un lien avec l'oscillation arctique (AO). La figure 10 montre la série de AO (moyenne de JFM) et le lissage par lowess. On a utilisé la même largeur de fenêtre que dans la figure 2. La caractéristique la plus importante est la tendance d'augmentation de l'indice des dernières années. On n'observe pas de cycles importants dans la figure. La variation de AO ne semble pas fournir une explication aux cycles hydrologiques observés au Québec.

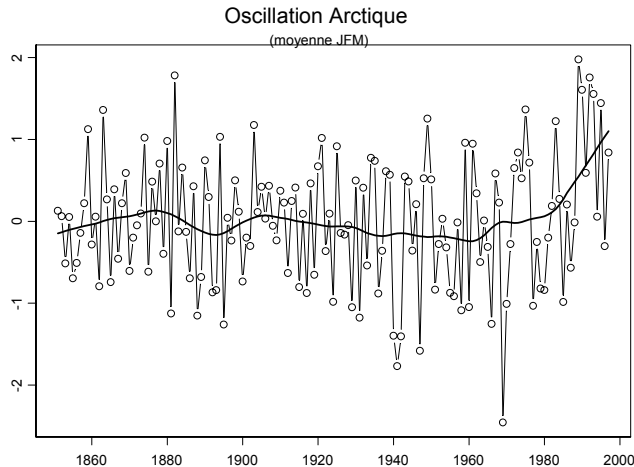


Figure 10. Oscillation arctique avec le lissage par lowess.

En conclusion, nous ne croyons pas que les oscillations océaniques soient utiles *actuellement* pour expliquer les cycles hydrologiques ou prédire les conditions hydrologiques futures au Québec. Pour le moment, notre compréhension des liens ne permet pas une utilisation opérationnelle. Afin d'utiliser les indices climatiques en mode prévisionnelle, il faut pouvoir les prédire une ou plusieurs années à l'avance, ce qui n'est pas possible avec les connaissances actuelles. Il s'agit cependant d'un sujet qui mérite d'être approfondi.

4 Conclusions et recommandations

4.1 Sommaire des conclusions

Les conclusions tirées de notre analyse des apports énergétiques 1943-2000 sont résumées dans ce qui suit.

4.1.1 Cycles hydrologiques

La série contient des cycles hydrologiques. Ces cycles peuvent être mis en évidence à l'aide de la régression non paramétrique (figure 2).

Le caractère (amplitude, fréquence) de ces cycles est similaire aux cycles observés dans d'autres grands bassins versants de l'Amérique du Nord.

La partie de la variance expliquée par la variation de la moyenne locale reste assez faible, de l'ordre de 10%.

4.1.2 Autocorrélation

L'autocorrélation d'ordre 1 des apports énergétiques est de 0.24.

L'autocorrélation est réelle et parfaitement en accord avec les résultats obtenus par Vogel et al. (1998) sur l'amplitude de l'autocorrélation d'ordre 1 pour les rivières des États-Unis.

L'autocorrélation pourrait être expliquée par les cycles hydrologiques. Si l'on admet une variation de la moyenne locale, les résidus autour de la moyenne sont non corrélés.

4.1.3 Moyenne à long terme

La meilleure estimation de la moyenne à long terme est la moyenne historique. Nous ne croyons pas que les changements climatiques ou les changements des bassins versants peuvent expliquer le caractère des variations.

Nous admettons cependant la variation d'une *moyenne locale* autour de la moyenne à long terme.

4.1.4 Saut de moyenne

La théorie des sauts de moyenne peut être vue comme une variante de la théorie des cycles. En augmentant le nombre de sauts, on s'approche dans un sens à la régression non paramétrique.

La théorie d'un saut de moyenne est difficile à justifier physiquement. Nous préférons l'approche par régression non paramétrique.

Un modèle basé sur l'hypothèse de sauts de moyenne est difficile à utiliser en mode prévisionnelle.

4.1.5 Changements et oscillations climatiques

Nous ne voyons pas de tendances dans les apports énergétiques qui pourraient être reliées aux changements climatiques.

Le lien entre les apports énergétiques et les oscillations océaniques est faible et on n'a pas pu établir une explication des cycles hydrologiques à l'aide des oscillations océaniques.

4.2 Modèle retenu

Le choix de modèle est difficile et nécessairement un peu arbitraire. Certes, il n'y a pas de *modèle vrai*, seulement des approximations plus ou moins bonnes. Nous examinons deux alternatives:

Modèle 1: Moyenne constante, série aléatoire.

Modèle 2: Moyenne variable, résidus aléatoires

Dans l'analyse descriptive précédente, on a utilisé la régression non paramétrique pour des fins diagnostiques. Pour pouvoir prédire des valeurs futures, il faut établir un modèle. On propose d'utiliser la méthode lowess avec une fenêtre qui couvre les 29 années précédant l'année de prévision. Pour la prévision, on ne fait pas d'extrapolation de la courbe de régression; on utilise plutôt la valeur de la dernière année comme indicateur de la moyenne locale pour les trois prochaines années.

Pour comparer la qualité des prévisions des deux modèles, on a simulé les prévisions des apports énergétiques un an à l'avance pour la dernière moitié de l'échantillon, soit la période 1972-2000 (29 valeurs précédentes sont requises avec lowess). La régression lowess doit être exécutée pour chaque nouvelle prévision. Le résultat est donné dans la figure 11.

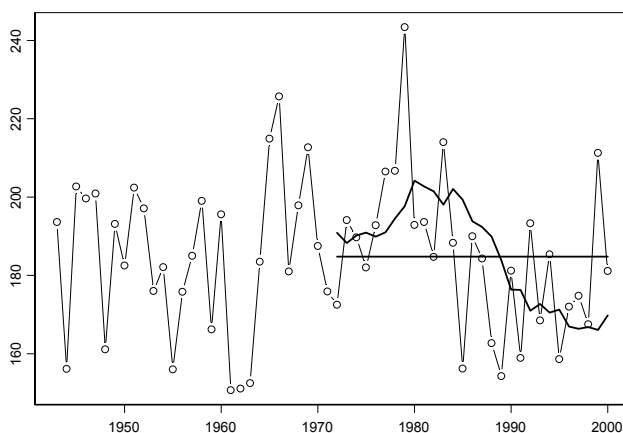


Figure 11. Prédiction des apports énergétiques un an à l'avance par les modèles 1 et 2.

La racine carrée des erreurs quadratiques moyennes est sensiblement la même pour les deux modèles et la période de validation, soit 19.8 pour le modèle 1 et 19.7 pour le modèle 2. On peut noter que le modèle non paramétrique est fortement pénalisé par la faible valeur enregistrée en 1985 et la valeur élevée enregistrée en 1999.

Nous préconisons le modèle à moyenne locale variable car il nous semble mieux refléter la réalité historique. Au cours des 14 dernières années, seulement trois valeurs ont dépassé la moyenne historique (une des trois valeurs étant presque identique à la moyenne). La prévision pour l'année 2001 - en supposant aucune connaissance des apports de printemps - est de 172 Twh. Au cours des 16 dernières années, cette valeur a été dépassée huit fois, alors que huit valeurs étaient inférieures à 172 Twh.

4.3 Prévision pour 2001-02

Le tableau suivant donne la prévision pour les trois prochaines années, avec l'écart-type de l'erreur de prévision obtenue par simulations.

Année	Prévision	Écart-type de la prévision
2001	172	19.7
2002	172	20.5
2003	172	21.6

Rappelons que la meilleur estimation de la moyenne à long terme est la moyenne historique. Une période de trois ans doit être considérée comme le délai maximale de prévision avec le modèle à moyenne locale.

5 Bibliographie

The Canada Country Study (1999) http://www.ec.gc.ca/climate/ccs/que_summ.htm.

Cleveland, W.S. (1979) Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74(368), 829-836.

Perreault, L., J. Bernier, B. Bobée et E. Parent (2000a) Bayesian changepoint analysis in hydrometeorological time series, Part I, The normal model revisited. *Journal of Hydrology*, 235, 221-241.

Perreault, L., J. Bernier, B. Bobée et E. Parent (2000b) Bayesian changepoint analysis in hydrometeorological time series, Part II, Comparison of changepoint models and forecasting. *Journal of Hydrology*, 235, 242-263.

Rasmussen, P.F. (2001) Bayesian changepoint analysis using the general linear model, *Water Resources Research*, sous presse.

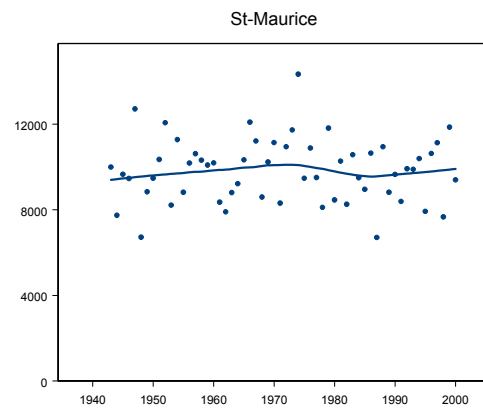
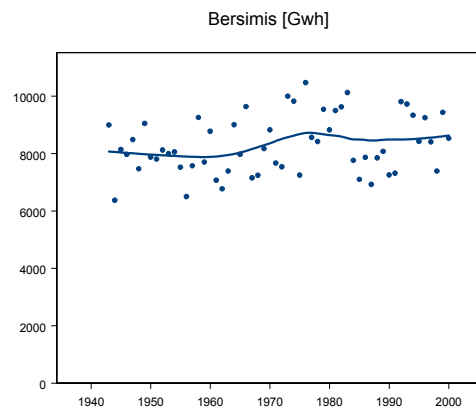
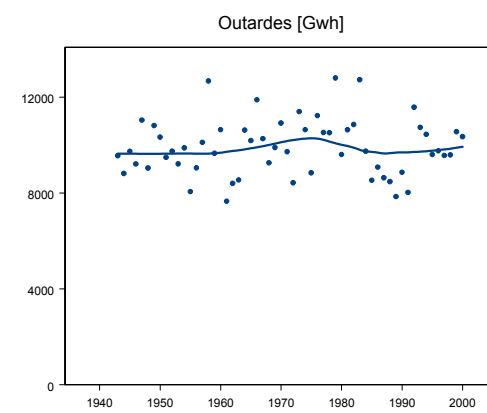
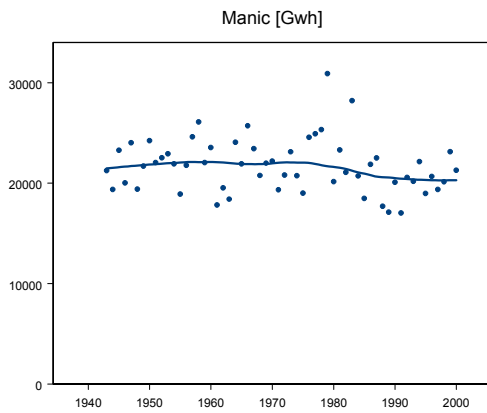
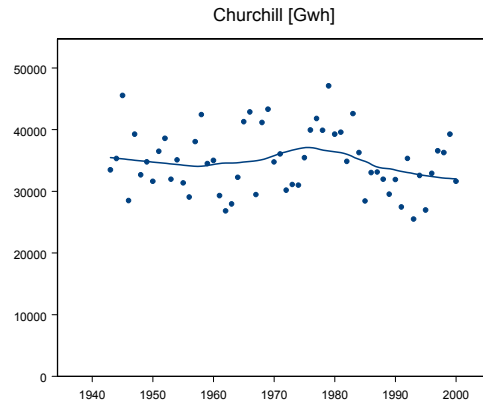
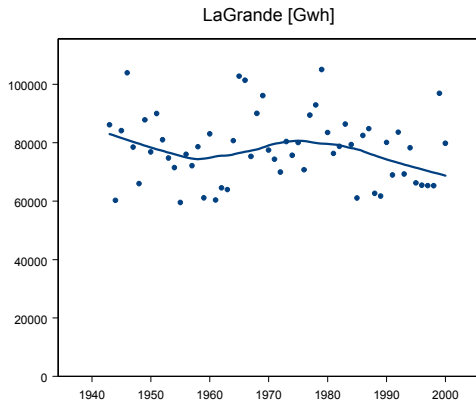
Rasmussen, P.F., Fortin, V., Slivitzky, M. et B. Bobée (1999) Impact des oscillations climatiques à basse fréquence sur les apports des rivières québécoises. *Rapport de recherche* No R-541, INRS-Eau.

Slack, J.R., A.M. Lumb et J.M. Landwehr (1993) Hydro-climatic data network (HCDN): Streamflow data set 1874-1988. USGS Water Resources Investigations Report 93-4076, Reston, Virginia.

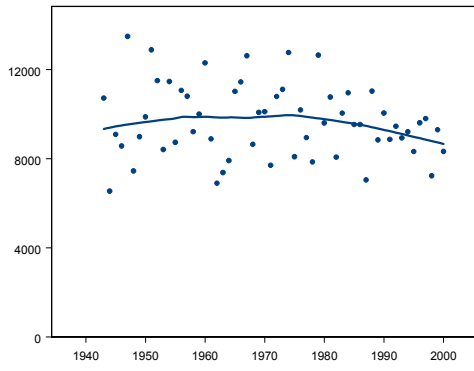
Slivitzky, M. et V. Fortin (2001) Downward shift in runoff in Northern Quebec in the middle eighties and possible links to the Arctic Oscillation. *Working document*, INRS-Eau.

Vogel, R., Tsai, Y., et J.F. Limbrunner (1998) The regional persistence and variability of annual streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 34(12), 3445-3459.

6 Annexe: Lissage par lowess des apports énergétiques des huit systèmes d'Hydro-Québec.



Outaouais [Gwh]



St-Laurent [Gwh]

