

ANALYSE DES SÉRIES D'APPORTS ÉNERGÉTIQUES D'HYDRO-QUÉBEC

CONFIDENTIEL

Rapport préparé à l'attention de :

Monsieur Luc Perreault
Hydro-Québec
Prévisions et Ressources Hydriques
Plans et Programmes d'Équipement de Production
75, Boul. René-Levesque Ouest, 9eme Étage
Montréal, (Québec) H2Z 1A4

par

**Taha B.M.J. Ouarda
Hugo Gingras
Paulin Coulibaly
Bernard Bobée**

Chaire Hydro-Québec/CRSNG en Hydrologie Statistique
Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau
2800, rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7

Rapport de recherche

Juin 2001

Table de matières

1 Introduction	3
1.1 Problématique	3
1.2 Mandat	3
2 Résultats des analyses sur les séries d’apports énergétiques annuels (1943-2000)	4
2.1 Autocorrélation d’ordre 1 et 2 (ρ_1 et ρ_2)	4
2.2 Test de stationnarité de Kendall	4
2.3 Procédure bayésienne de détection d’un saut dans la moyenne	5
2.4 Résultats de la procédure bayésienne multivariée (modèle régressif)	22
2.5 Conclusions partielles	29
3 Analyse harmonique des séries d’apports énergétiques annuels	31
3.1 Harmoniques d’ordre 1 et 2 pour les séries d’apports énergétiques	31
3.2 Harmoniques d’ordre 1 et 2 pour la série d’oscillations de l’Arctique	40
3.3 Corrélation croisée entre les séries d’apports et la série AO	41
3.4 Harmoniques d’ordre 1 et 2 pour la série AMO	42
3.5 Corrélation croisée entre les séries d’apports et la série AMO	43
3.6 Conclusions partielles	43
4 Prévision des apports énergétiques annuels	45
4.1 Modèle auto-régressif d’ordre 1, évaluation des prévisions pour 1998-2000	45
4.2 Modèle auto-régressif d’ordre 1, prévisions pour 2001-2003	47
4.3 Prévision par la méthode des réseaux de neurones artificiels RNA	49
4.4 Conclusions partielles	56
5 Conclusions	58
6 Bibliographie	61

1 Introduction

1.1 Problématique

Hydro-Québec est intéressé à établir une vision commune relative aux caractéristiques des séries d'apports énergétiques annuels des différents systèmes ainsi que de la série agrégée. Le présent document fait partie d'une consultation qu'Hydro-Québec organise pour répondre à ces questions. Cette consultation fait suite aux conclusions d'un comité d'experts qui a analysé ces séries en 1998.

1.2 Mandat

Compte tenu des nouvelles techniques d'analyse statistique développées durant les dernières années, des connaissances récentes concernant les phénomènes de changements climatiques, et des nouvelles données acquises, Hydro-Québec est intéressé à faire le suivi des conclusions du comité d'experts de 1998 et répondre aux questions suivantes :

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 (réponse affirmative à l'une des 3 premières questions), quel modèle et quel estimateur de l'apport énergétique moyen proposez vous, et comment peut-on prendre en compte cette non-stationnarité en mode prévisionnel;
5. Quelle est la prévision de l'apport énergétique annuel des 3 prochaines années, et 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.

2 Résultats des analyses sur les séries d'apports énergétiques annuels (1943-2000)

2.1 Autocorrélation d'ordre 1 et 2 (ρ_1 et ρ_2)

Région	ρ_1 (1943-1997)	ρ_1 (1943-2000)	ρ_2 (1943-1997)	ρ_2 (1943-2000)
St-Laurent	0.74	0.71	0.56	0.50
Outaouais	-0.08	-0.07	-0.01	0.01
St-Maurice	-0.15	-0.21	0.13	0.14
Bersimis	0.18	0.15	0.10	0.08
Outardes	0.19	0.19	0.12	0.12
Manic	0.18	0.18	0.19	0.18
La Grande	0.25	0.22	0.03	0.01
Churchill Falls	0.27	0.26	0.24	0.23
Série agrégée	0.27	0.24	0.18	0.18

2.2 Test de stationnarité de Kendall

H0 : Il n'y a pas de tendance dans la série d'observations

H1 : Il y a une tendance dans la série d'observations

Seuil du test : 5%

Région	Statistique K	<i>p-value</i>	Décision	Sens de la tendance (s'il y a lieu)
St-Laurent	2.41	0.0157	H1	↑
Outaouais	1.17	0.2431	H0	–
St-Maurice	0.12	0.9039	H0	–
Bersimis	1.58	0.1134	H0	–
Outardes	0.44	0.6580	H0	–
Manic	1.44	0.1511	H0	–
La Grande	0.63	0.5283	H0	–
Churchill Falls	0.71	0.4771	H0	–
Série agrégée	1.08	0.2801	H0	–

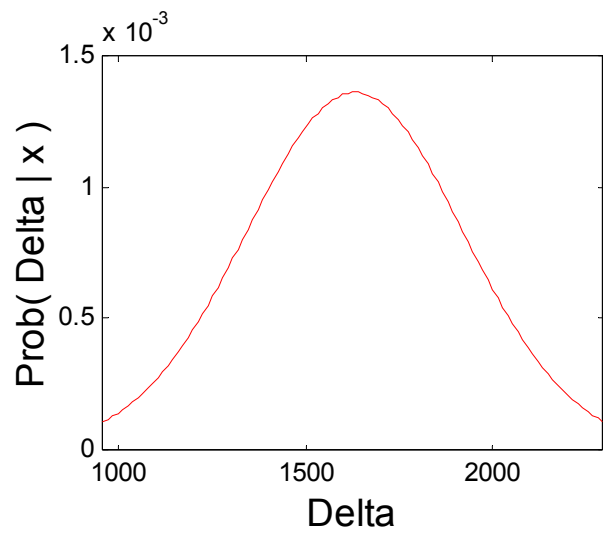
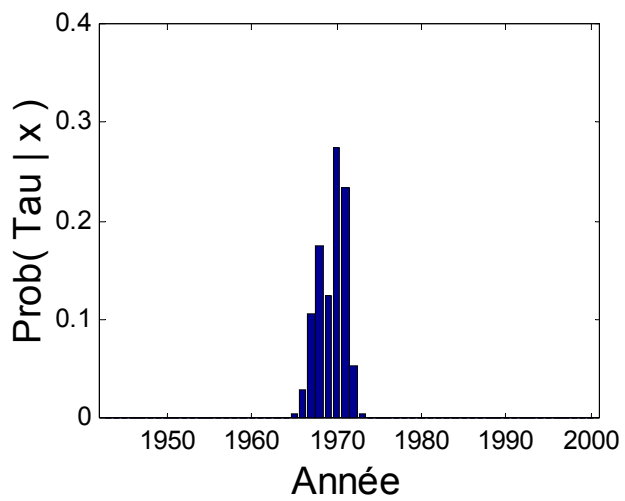
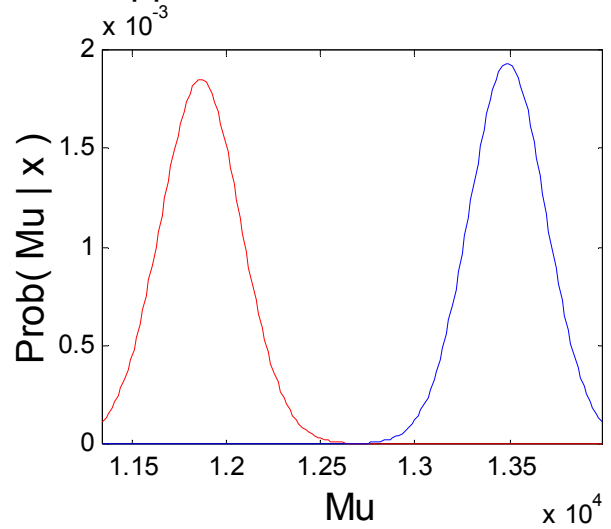
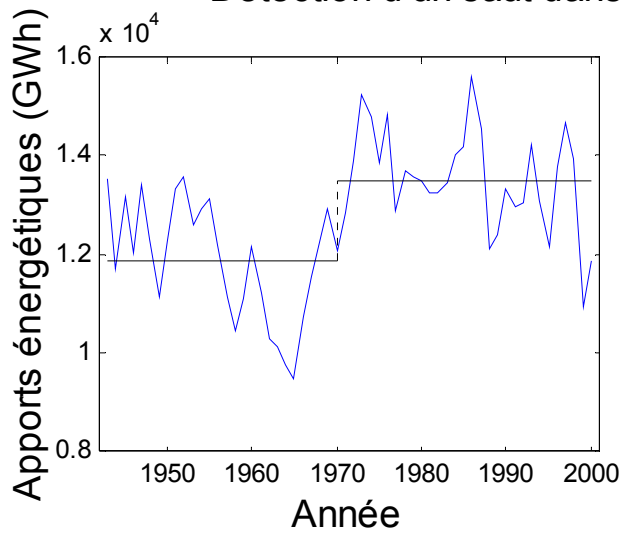
2.3 Procédure bayésienne de détection d'un saut dans la moyenne (mode non informatif)

Note: L'hypothèse de normalité des données à été jugée acceptable suite à un examen visuel des différentes séries d'apports sur papier normal.

2.3a) St-Laurent:

Facteur de Bayes	=	45061.65
Prob[Tau = 2000]	=	0.0000
Prob[1943 < Tau < 2000]	=	1.0000
Mode a posteriori pour Tau	=	1970
Prob[Tau = ModeTau]	=	0.2749
Prob[ModeTau-1 < Tau < ModeTau+1]	=	0.6313
Prob[ModeTau-2 < Tau < ModeTau+2]	=	0.8587
Prob[ModeTau-3 < Tau < ModeTau+3]	=	0.9673
Moyenne a posteriori pour Tau	=	1969.43
Écart-type a posteriori pour Tau	=	1.58
Intervalle de crédibilité à 90% pour Tau	=	[1966 1971]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Tau	=	[1965 1972]
Mode a posteriori pour mu1	=	11855.66
Moyenne a posteriori pour mu1	=	11861.36
Écart-type a posteriori pour mu1	=	214.67
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu1	=	[11491.35 12203.41]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu1	=	[11408.56 12269.65]
Mode a posteriori pour mu2	=	13495.05
Moyenne a posteriori pour mu2	=	13489.71
Écart-type a posteriori pour mu2	=	203.21
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu2	=	[13130.74 13809.68]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu2	=	[13064.50 13892.47]
Mode a posteriori pour Delta	=	1624.54
Moyenne a posteriori pour Delta	=	1628.35
Écart-type a posteriori pour Delta	=	295.60
Intervalle de crédibilité à 90% pour Delta	=	[1130.90 2104.84]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Delta	=	[1024.16 2198.24]

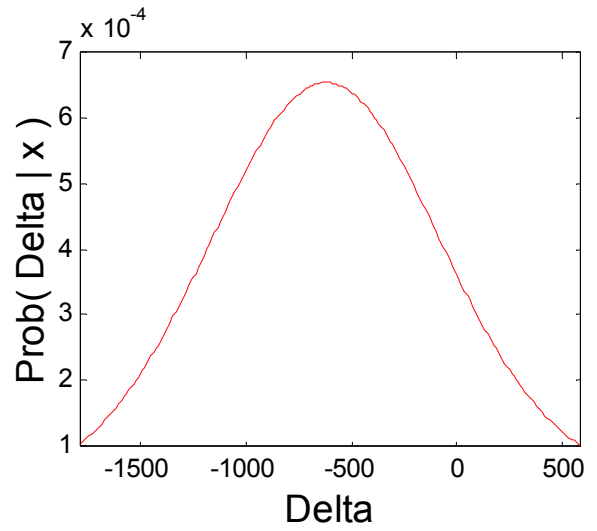
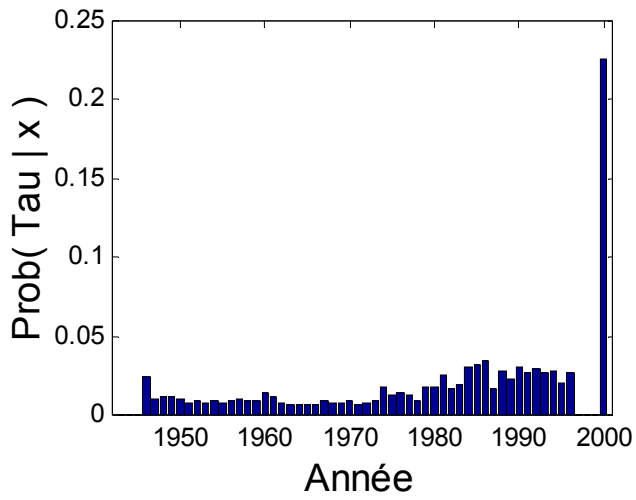
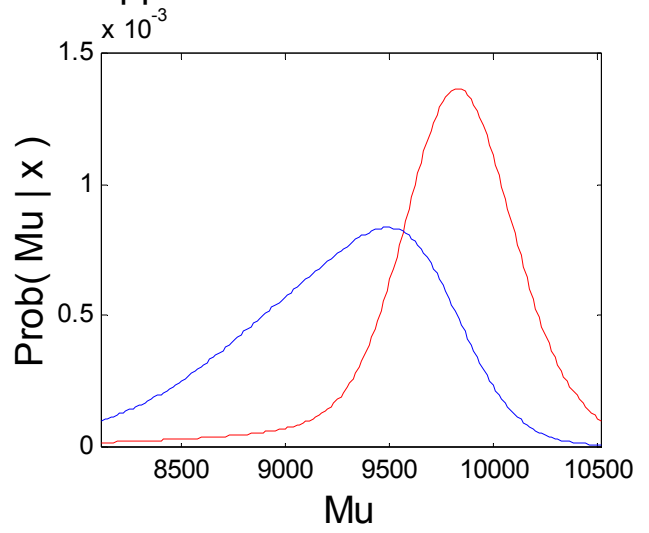
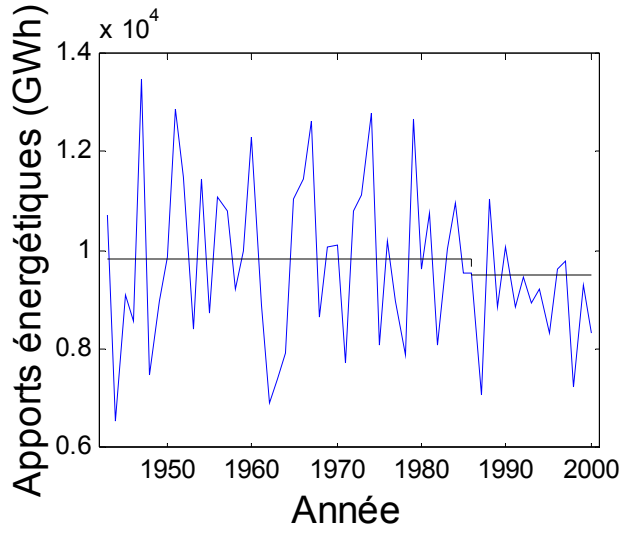
Détection d'un saut dans la série d'apports du St-Laurent



2.3b) Outaouais:

Facteur de Bayes	=	3.42
Prob[Tau = 2000]	=	0.2264
Prob[1943 < Tau < 2000]	=	0.7736
Mode a posteriori pour Tau	=	1986
Prob[Tau = ModeTau]	=	0.0438
Prob[ModeTau-1 < Tau < ModeTau+1]	=	0.1069
Prob[ModeTau-2 < Tau < ModeTau+2]	=	0.1822
Prob[ModeTau-3 < Tau < ModeTau+3]	=	0.2377
Moyenne a posteriori pour Tau	=	1976.90
Écart-type a posteriori pour Tau	=	15.09
Intervalle de crédibilité à 90% pour Tau	=	[1947 1994]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Tau	=	[1945 1996]
Mode a posteriori pour mu1	=	9834.44
Moyenne a posteriori pour mu1	=	9786.66
Écart-type a posteriori pour mu1	=	351.76
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu1	=	[9102.94 10327.08]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu1	=	[8714.79 10461.44]
Mode a posteriori pour mu2	=	9491.08
Moyenne a posteriori pour mu2	=	9218.16
Écart-type a posteriori pour mu2	=	434.64
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu2	=	[8237.08 9938.94]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu2	=	[7998.22 10058.36]
Mode a posteriori pour Delta	=	-621.48
Moyenne a posteriori pour Delta	=	-568.51
Écart-type a posteriori pour Delta	=	559.15
Intervalle de crédibilité à 90% pour Delta	=	[-1564.07 886.64]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Delta	=	[-1721.16 1138.00]

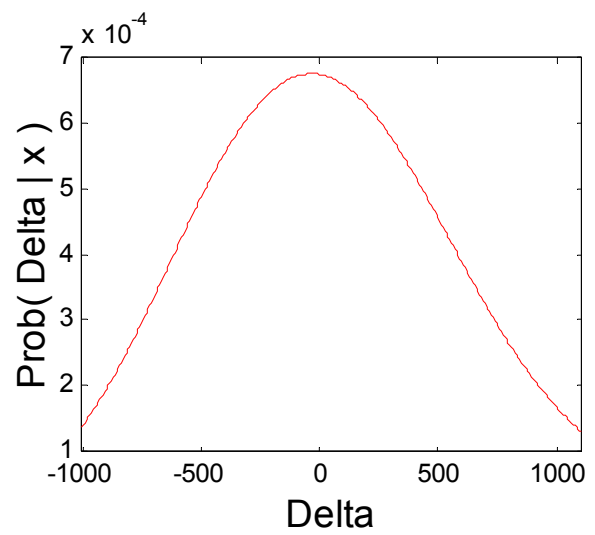
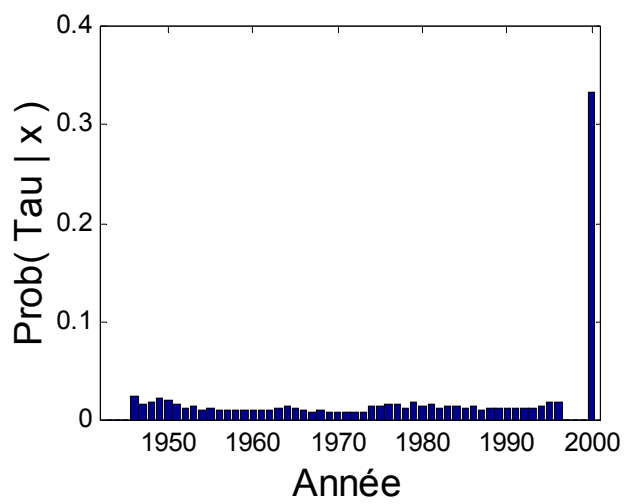
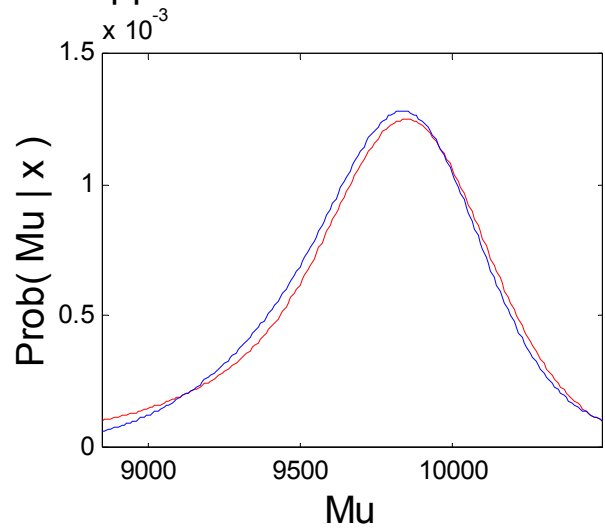
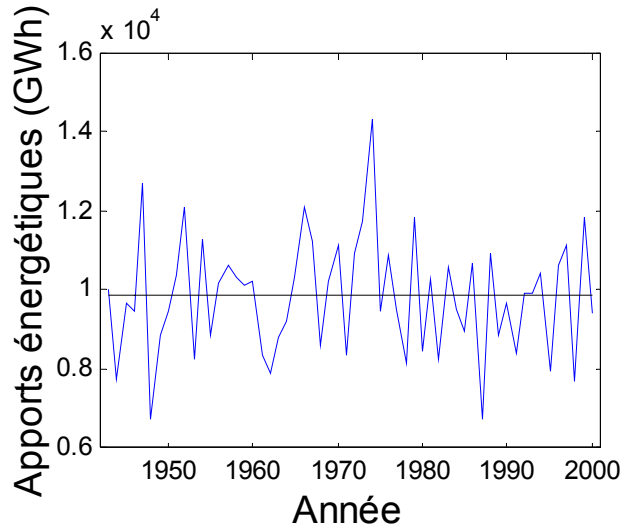
Détection d'un saut dans la série d'apports de l'Outaouais



2.3c) St-Maurice:

Facteur de Bayes	=	2.01
Prob[Tau = 2000]	=	0.3324
Prob[1943 < Tau < 2000]	=	0.6676
Mode a posteriori pour Tau	=	1946
Prob[Tau = ModeTau]	=	0.0366
Prob[ModeTau-1 < Tau < ModeTau+1]	=	0.0600
Prob[ModeTau-2 < Tau < ModeTau+2]	=	0.0888
Prob[ModeTau-3 < Tau < ModeTau+3]	=	0.1215
Moyenne a posteriori pour Tau	=	1970.51
Écart-type a posteriori pour Tau	=	15.75
Intervalle de crédibilité à 90% pour Tau	=	[1946 1994]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Tau	=	[1945 1996]
Mode a posteriori pour mu1	=	9847.42
Moyenne a posteriori pour mu1	=	9746.30
Écart-type a posteriori pour mu1	=	368.45
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu1	=	[9014.03 10351.12]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu1	=	[8803.39 10515.97]
Mode a posteriori pour mu2	=	9838.26
Moyenne a posteriori pour mu2	=	9785.21
Écart-type a posteriori pour mu2	=	353.39
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu2	=	[9142.24 10360.28]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu2	=	[8995.71 10561.76]
Mode a posteriori pour Delta	=	-35.30
Moyenne a posteriori pour Delta	=	38.91
Écart-type a posteriori pour Delta	=	510.53
Intervalle de crédibilité à 90% pour Delta	=	[-774.26 1104.81]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Delta	=	[-872.78 1104.81]

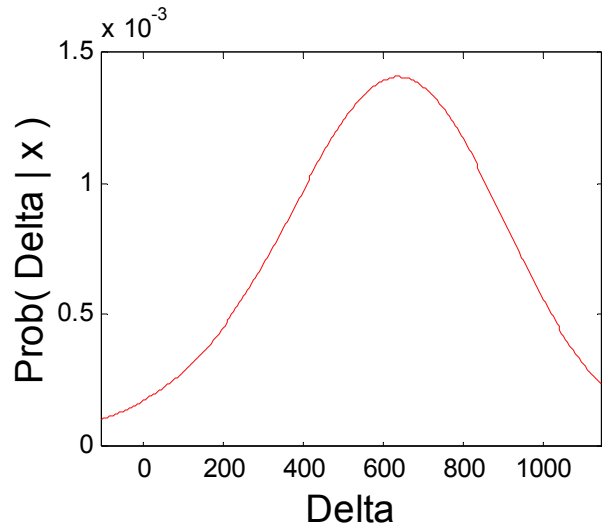
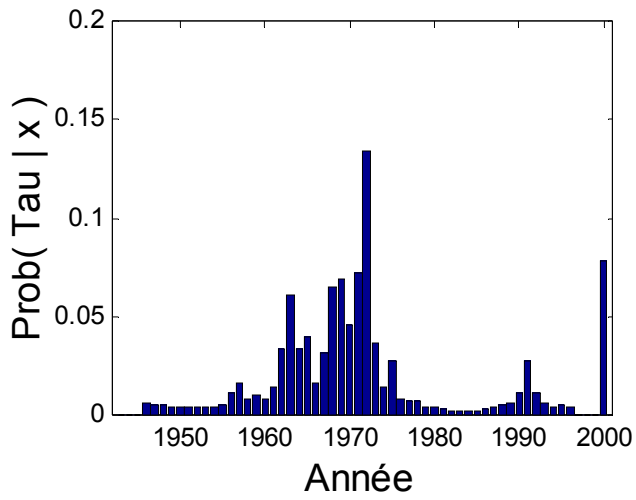
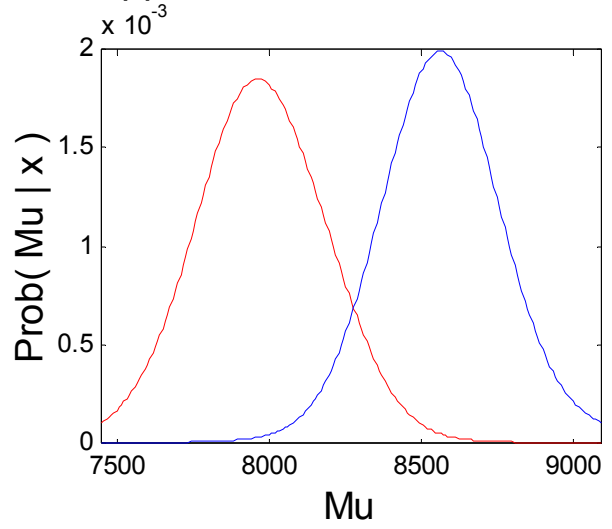
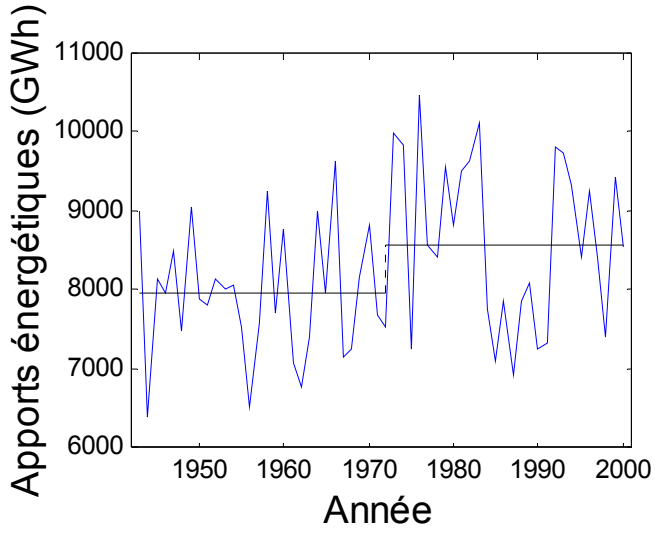
Détection d'un saut dans la série d'apports de la St-Maurice



2.3d) Bersimis:

Facteur de Bayes	=	11.75
Prob[Tau = 2000]	=	0.0784
Prob[1943 < Tau < 2000]	=	0.9216
Mode a posteriori pour Tau	=	1972
Prob[Tau = ModeTau]	=	0.1449
Prob[ModeTau-1 < Tau < ModeTau+1]	=	0.2623
Prob[ModeTau-2 < Tau < ModeTau+2]	=	0.3272
Prob[ModeTau-3 < Tau < ModeTau+3]	=	0.4316
Moyenne a posteriori pour Tau	=	1969.69
Écart-type a posteriori pour Tau	=	9.33
Intervalle de crédibilité à 90% pour Tau	=	[1955 1990]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Tau	=	[1949 1992]
Mode a posteriori pour mu1	=	7958.79
Moyenne a posteriori pour mu1	=	7970.71
Écart-type a posteriori pour mu1	=	199.73
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu1	=	[7598.01 8327.97]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu1	=	[7522.49 8395.09]
Mode a posteriori pour mu2	=	8562.89
Moyenne a posteriori pour mu2	=	8573.83
Écart-type a posteriori pour mu2	=	194.64
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu2	=	[8227.28 8932.07]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu2	=	[8151.77 9032.75]
Mode a posteriori pour Delta	=	636.98
Moyenne a posteriori pour Delta	=	603.11
Écart-type a posteriori pour Delta	=	278.89
Intervalle de crédibilité à 90% pour Delta	=	[95.65 1090.53]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Delta	=	[-16.52 1144.17]

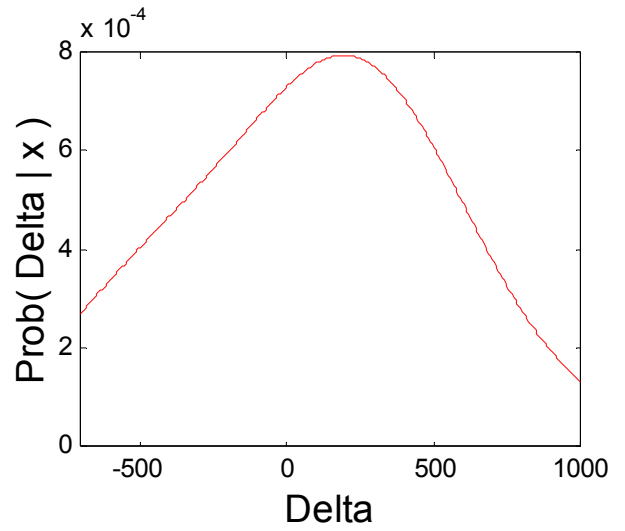
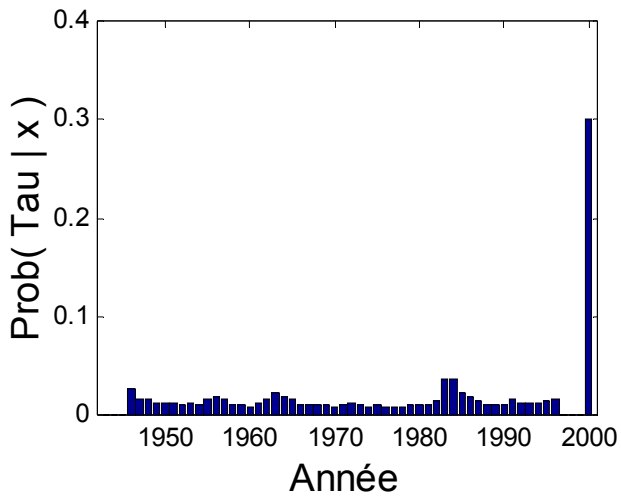
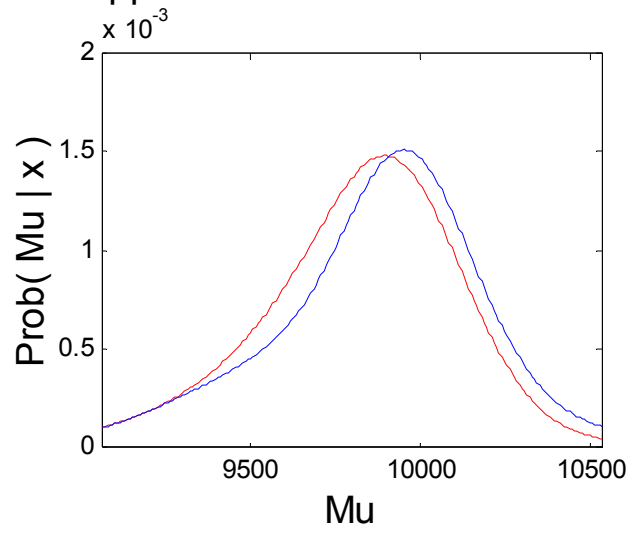
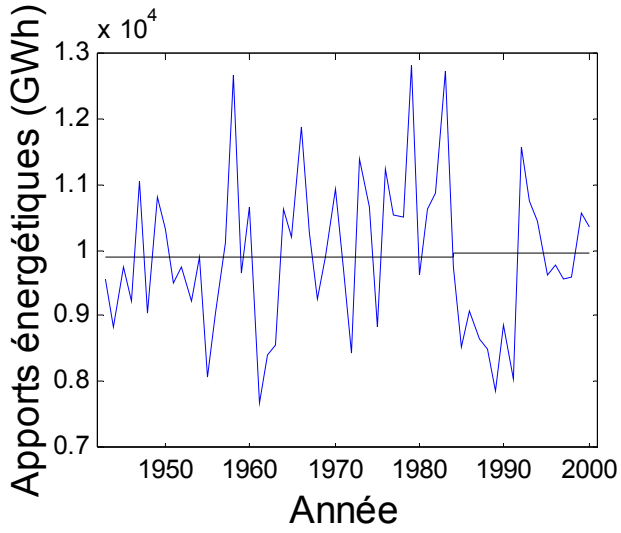
Détection d'un saut dans la série d'apports de Bersimis



2.3e) Outardes:

Facteur de Bayes	= 2.33
Prob[Tau = 2000]	= 0.3005
Prob[1943 < Tau < 2000]	= 0.6995
Mode a posteriori pour Tau	= 1984
Prob[Tau = ModeTau]	= 0.0526
Prob[ModeTau-1 < Tau < ModeTau+1]	= 0.1375
Prob[ModeTau-2 < Tau < ModeTau+2]	= 0.1830
Prob[ModeTau-3 < Tau < ModeTau+3]	= 0.2179
Moyenne a posteriori pour Tau	= 1971.31
Écart-type a posteriori pour Tau	= 15.31
Intervalle de crédibilité à 90% pour Tau	= [1946 1993]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Tau	= [1945 1995]
Mode a posteriori pour mu1	= 9893.66
Moyenne a posteriori pour mu1	= 9807.54
Écart-type a posteriori pour mu1	= 282.84
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu1	= [9257.86 10285.48]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu1	= [9117.40 10403.77]
Mode a posteriori pour mu2	= 9952.80
Moyenne a posteriori pour mu2	= 9883.29
Écart-type a posteriori pour mu2	= 278.85
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu2	= [9272.65 10381.59]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu2	= [9146.97 10536.84]
Mode a posteriori pour Delta	= 192.67
Moyenne a posteriori pour Delta	= 75.75
Écart-type a posteriori pour Delta	= 397.19
Intervalle de crédibilité à 90% pour Delta	= [-558.01 1000.23]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Delta	= [-631.94 1000.23]

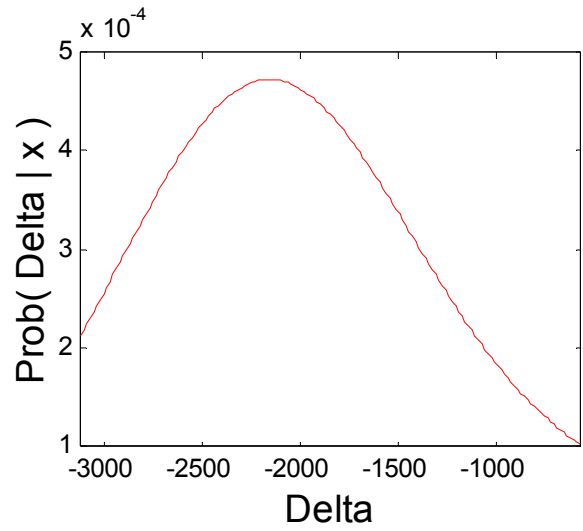
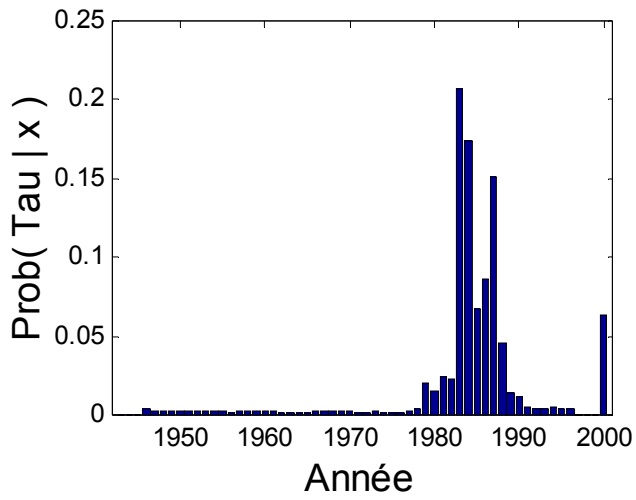
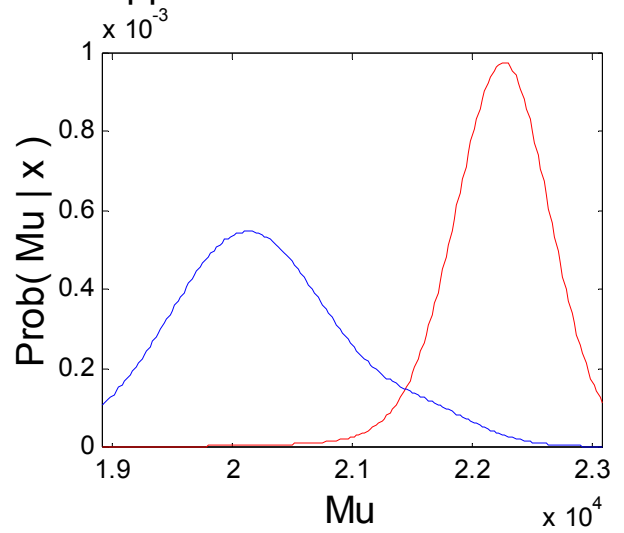
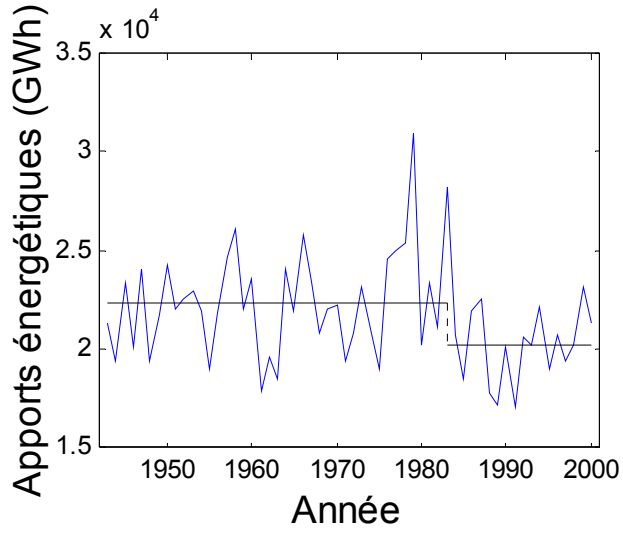
Détection d'un saut dans la série d'apports des Outardes



2.3f) Manic:

Facteur de Bayes	=	14.89
Prob[Tau = 2000]	=	0.0629
Prob[1943 < Tau < 2000]	=	0.9371
Mode a posteriori pour Tau	=	1983
Prob[Tau = ModeTau]	=	0.2204
Prob[ModeTau-1 < Tau < ModeTau+1]	=	0.4298
Prob[ModeTau-2 < Tau < ModeTau+2]	=	0.5272
Prob[ModeTau-3 < Tau < ModeTau+3]	=	0.6362
Moyenne a posteriori pour Tau	=	1983.03
Écart-type a posteriori pour Tau	=	7.42
Intervalle de crédibilité à 90% pour Tau	=	[1965 1988]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Tau	=	[1953 1991]
Mode a posteriori pour mu1	=	22272.49
Moyenne a posteriori pour mu1	=	22225.72
Écart-type a posteriori pour mu1	=	424.05
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu1	=	[21480.34 22901.56]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu1	=	[21270.65 23018.05]
Mode a posteriori pour mu2	=	20129.01
Moyenne a posteriori pour mu2	=	20254.48
Écart-type a posteriori pour mu2	=	647.71
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu2	=	[19010.67 21643.43]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu2	=	[18800.99 21923.01]
Mode a posteriori pour Delta	=	-2164.54
Moyenne a posteriori pour Delta	=	-1971.24
Écart-type a posteriori pour Delta	=	774.17
Intervalle de crédibilité à 90% pour Delta	=	[-2937.74 1919.99]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Delta	=	[-3038.60 1919.99]

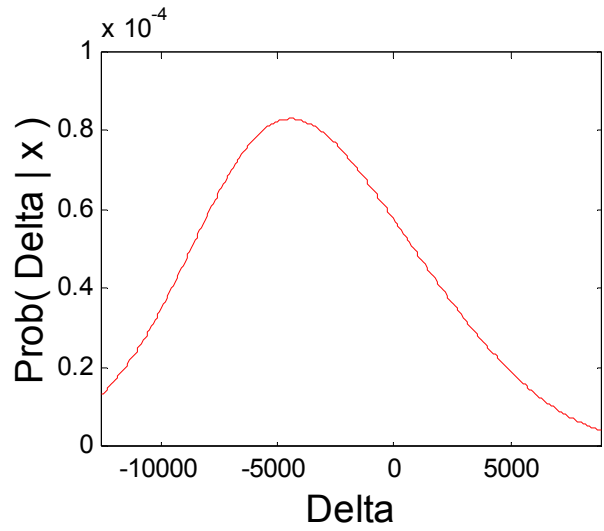
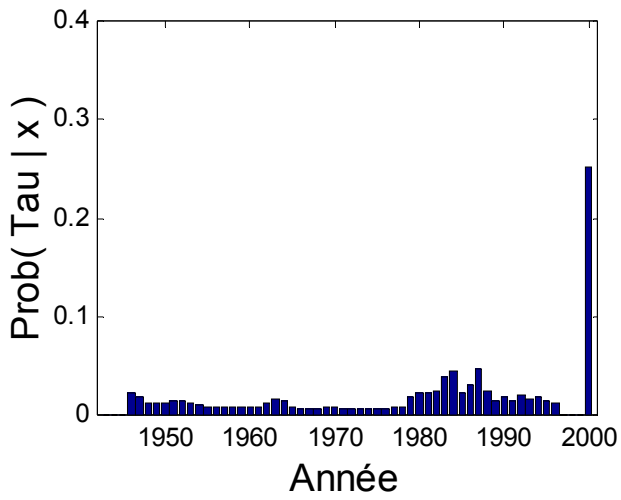
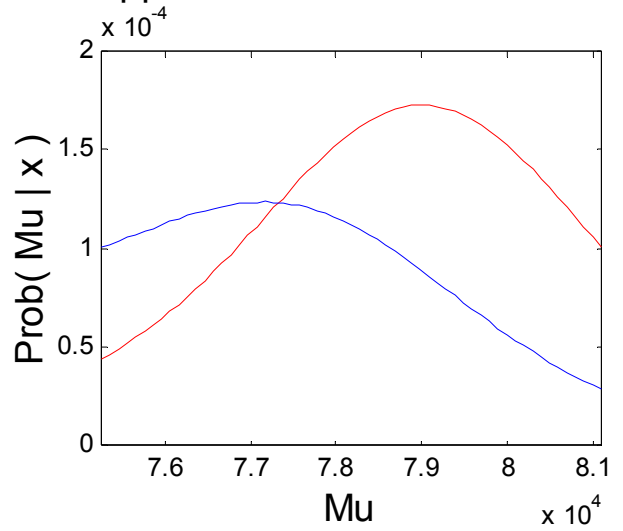
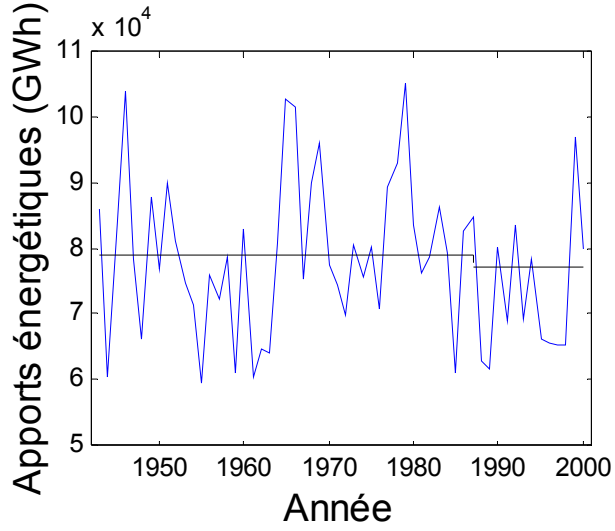
Détection d'un saut dans la série d'apports de la Manic



2.3g) La Grande:

Facteur de Bayes	=	2.98
Prob[Tau = 2000]	=	0.2515
Prob[1943 < Tau < 2000]	=	0.7485
Mode a posteriori pour Tau	=	1987
Prob[Tau = ModeTau]	=	0.0623
Prob[ModeTau-1 < Tau < ModeTau+1]	=	0.1355
Prob[ModeTau-2 < Tau < ModeTau+2]	=	0.1857
Prob[ModeTau-3 < Tau < ModeTau+3]	=	0.2685
Moyenne a posteriori pour Tau	=	1974.79
Écart-type a posteriori pour Tau	=	15.26
Intervalle de crédibilité à 90% pour Tau	=	[1946 1993]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Tau	=	[1945 1995]
Mode a posteriori pour mu1	=	78979.28
Moyenne a posteriori pour mu1	=	79114.54
Écart-type a posteriori pour mu1	=	2658.33
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu1	=	[74356.28 84104.79]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu1	=	[73150.27 86215.29]
Mode a posteriori pour mu2	=	77170.28
Moyenne a posteriori pour mu2	=	75551.39
Écart-type a posteriori pour mu2	=	2920.40
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu2	=	[69130.27 80587.28]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu2	=	[67823.77 81592.29]
Mode a posteriori pour Delta	=	-4414.80
Moyenne a posteriori pour Delta	=	-3563.16
Écart-type a posteriori pour Delta	=	3949.11
Intervalle de crédibilité à 90% pour Delta	=	[-10347.02 6449.03]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Delta	=	[-11276.17 8879.09]

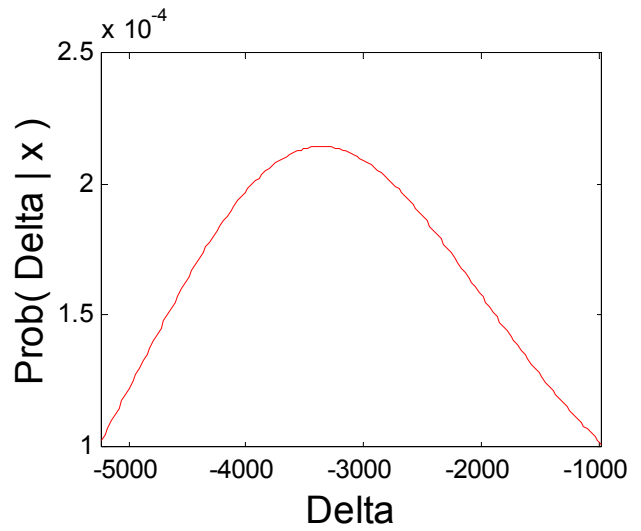
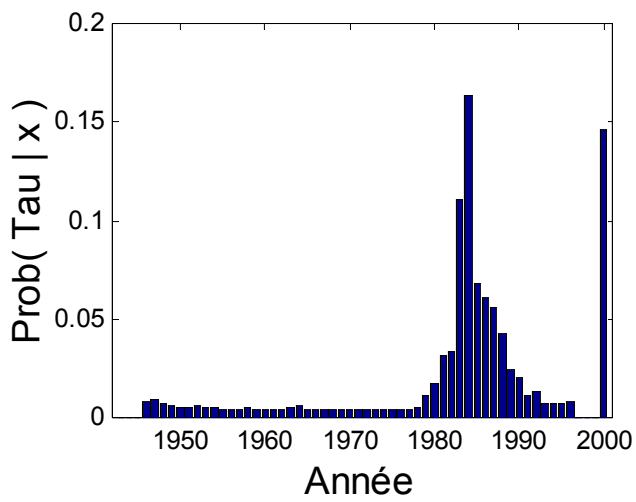
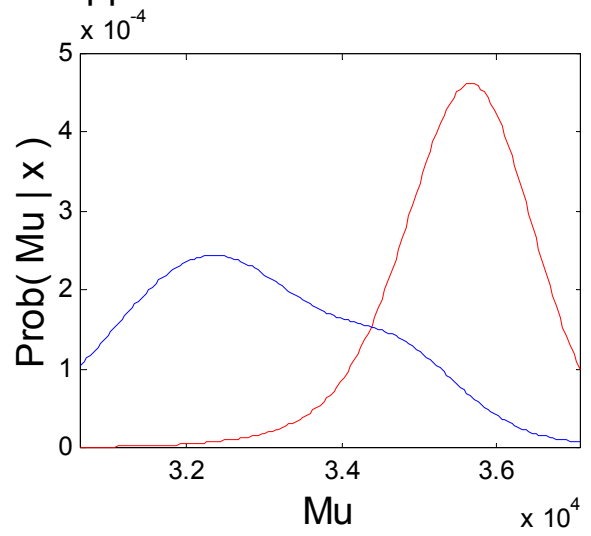
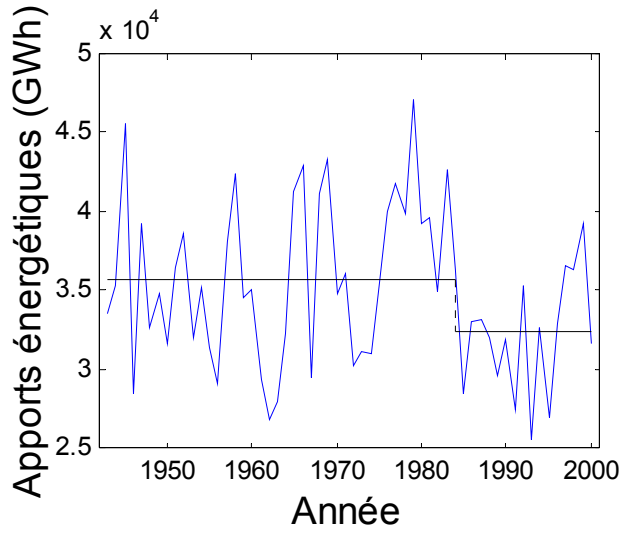
Détection d'un saut dans la série d'apports de La Grande



2.3h) Churchill Falls:

Facteur de Bayes	=	5.82
Prob[Tau = 2000]	=	0.1466
Prob[1943 < Tau < 2000]	=	0.8534
Mode a posteriori pour Tau	=	1984
Prob[Tau = ModeTau]	=	0.1918
Prob[ModeTau-1 < Tau < ModeTau+1]	=	0.4012
Prob[ModeTau-2 < Tau < ModeTau+2]	=	0.5115
Prob[ModeTau-3 < Tau < ModeTau+3]	=	0.6126
Moyenne a posteriori pour Tau	=	1980.54
Écart-type a posteriori pour Tau	=	11.07
Intervalle de crédibilité à 90% pour Tau	=	[1951 1990]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Tau	=	[1947 1994]
Mode a posteriori pour mu1	=	35663.10
Moyenne a posteriori pour mu1	=	35575.79
Écart-type a posteriori pour mu1	=	929.66
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu1	=	[33900.82 37028.86]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu1	=	[33416.20 37381.31]
Mode a posteriori pour mu2	=	32358.83
Moyenne a posteriori pour mu2	=	32868.98
Écart-type a posteriori pour mu2	=	1260.07
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu2	=	[30288.16 35530.92]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu2	=	[29803.54 36015.55]
Mode a posteriori pour Delta	=	-3357.23
Moyenne a posteriori pour Delta	=	-2706.81
Écart-type a posteriori pour Delta	=	1565.90
Intervalle de crédibilité à 90% pour Delta	=	[-4991.98 3508.72]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Delta	=	[-5200.04 3508.72]

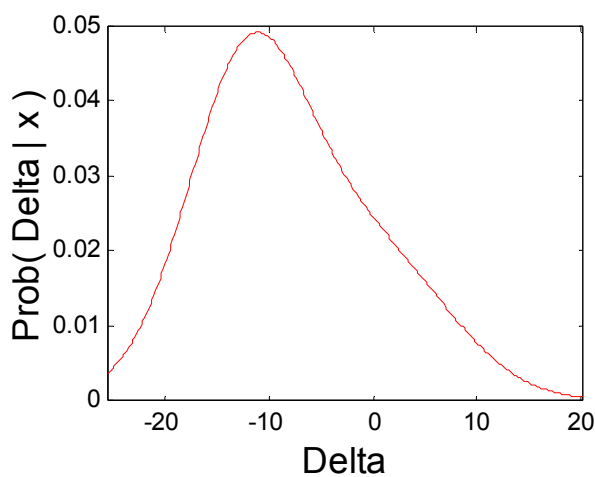
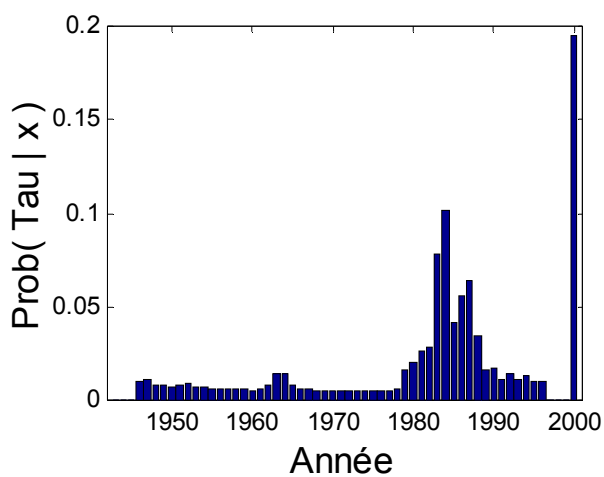
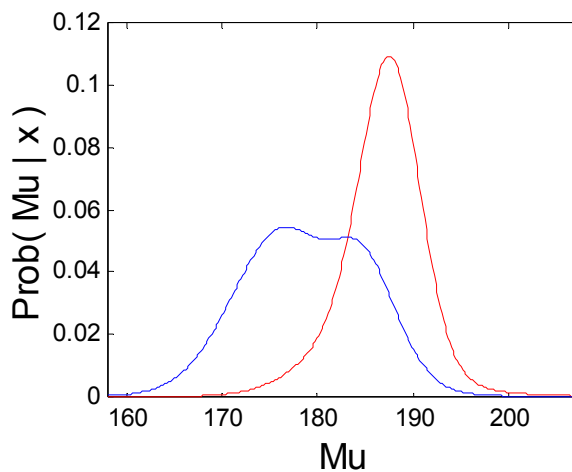
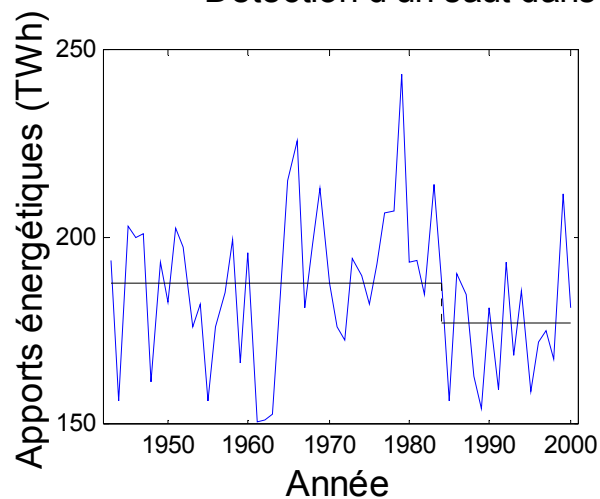
Détection d'un saut dans la série d'apports de Churchill Falls



2.3i) Série agrégée:

Facteur de Bayes	=	4.13
Prob[Tau = 2000]	=	0.1948
Prob[1943 < Tau < 2000]	=	0.8052
Mode a posteriori pour Tau	=	1984
Prob[Tau = ModeTau]	=	0.1260
Prob[ModeTau-1 < Tau < ModeTau+1]	=	0.2755
Prob[ModeTau-2 < Tau < ModeTau+2]	=	0.3808
Prob[ModeTau-3 < Tau < ModeTau+3]	=	0.4938
Moyenne a posteriori pour Tau	=	1978.38
Écart-type a posteriori pour Tau	=	12.89
Intervalle de crédibilité à 90% pour Tau	=	[1949 1992]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Tau	=	[1946 1994]
Mode a posteriori pour mu1	=	187.50
Moyenne a posteriori pour mu1	=	186.86
Écart-type a posteriori pour mu1	=	3.91
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu1	=	[179.08 193.12]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu1	=	[176.77 194.77]
Mode a posteriori pour mu2	=	176.77
Moyenne a posteriori pour mu2	=	178.99
Écart-type a posteriori pour mu2	=	4.92
Intervalle de crédibilité à 90% pour mu2	=	[168.18 188.99]
Intervalle de crédibilité à 95% pour mu2	=	[166.36 190.64]
Mode a posteriori pour Delta	=	-11.18
Moyenne a posteriori pour Delta	=	-7.87
Écart-type a posteriori pour Delta	=	6.29
Intervalle de crédibilité à 90% pour Delta	=	[-20.32 8.61]
Intervalle de crédibilité à 95% pour Delta	=	[-21.99 12.27]

Détection d'un saut dans la série des apports agrégés



2.4 Résultats de la procédure bayésienne multivariée de détection d'un saut dans la moyenne (modèle régressif d'attribution)

Les résultats de l'application de la procédure bayésienne multivariée de détection d'une rupture dans un modèle de régression linéaire (Ouarda et al., 2001) sont présentés dans les annexes envoyés à part.

Trois scénarios sont considérés :

- 1) Étude du cas de relation linéaire entre les apports énergétiques des différents systèmes et les précipitations.
- 2) Étude du cas de relation linéaire entre les apports énergétiques des différents systèmes et les températures. Et
- 3) Étude du cas de relation linéaire des apports énergétiques des différents systèmes avec les précipitations, les températures et les indices d'oscillations de l'arctique (indice AO).

On notera que seul le cas de saut du paramètre d'origine de la relation régressive est présenté dans ce rapport. Pour des fins d'illustration, on présente dans ce qui suit les résultats obtenus pour les systèmes de Saint-Laurent et La Grande pour les scénarios 1) et 2), et pour le système de Saint-Laurent pour le scénario 3).

Les stations climatiques prises en considération pour chaque système sont les suivants:

BASSIN	Température	Précipitations
St-Laurent	Welland (ON)	Welland (ON)
Outaouais	North Bay (ON)	Kipawa Lake (QC)
St-Maurice	La Tuque (QC)	La Tuque (QC)
Bersimis	Bagotville (QC)	Bagotville (QC)
Tous les autres systèmes	Wabush Lake (NF)	Shefferville (QC)

Les données de température et de précipitations ont été extraites du site : <http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/hccd/>. On notera que plusieurs données sont manquantes. A titre d'exemple, les données de précipitations arrêtent en 1992 pour plusieurs des stations considérées. La série de l'indice d'oscillations de l'arctique (indice AO) a été construite à partir des données présentées dans le site : http://www.atmos.colostate.edu/ao/Figures/AO_realtime.html. Ces données représentent des moyennes annuelles de l'index AO présenté au site pour les mois de janvier-mars.

St-Laurent: Apport énergétique en fonction des précipitations

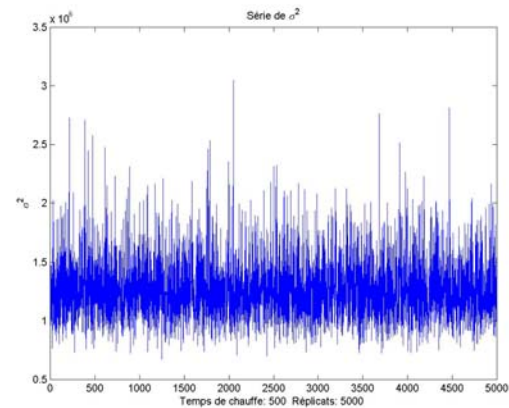
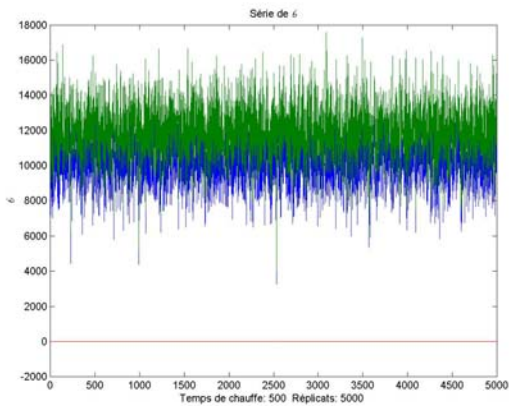
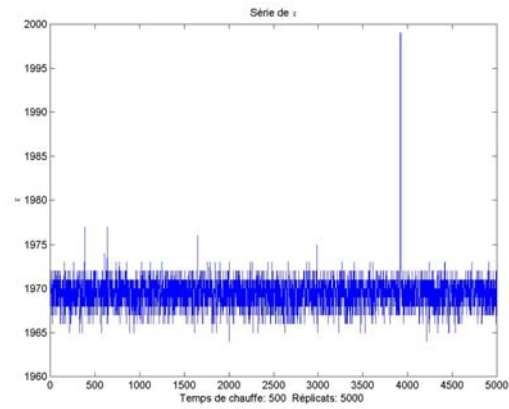
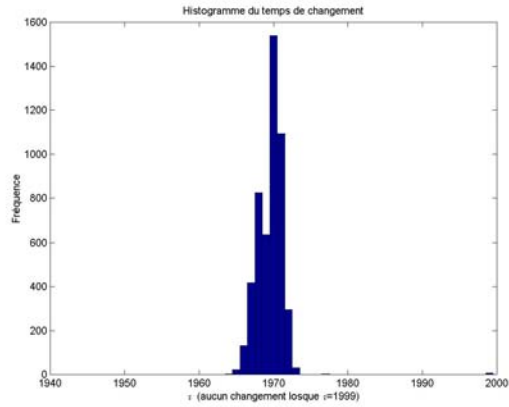
Temps le plus probable du changement: **1970**

$y = 10313.451 + 1.5519348 x$ avant τ

$y = 11906.49 + 1.5519348 x$ après τ

Distribution du point de changement

Année	fréquence	probabilité
1943	0	0
1944	0	0
1945	0	0
1946	0	0
1947	0	0
1948	0	0
1949	0	0
1950	0	0
1951	0	0
1952	0	0
1953	0	0
1954	0	0
1955	0	0
1956	0	0
1957	0	0
1958	0	0
1959	0	0
1960	0	0
1961	0	0
1962	0	0
1963	0	0
1964	2	0.0004
1965	23	0.0046
1966	135	0.027
1967	404	0.0808
1968	839	0.1678
1969	629	0.1258
1970	1546	0.3092
1971	1076	0.2152
1972	299	0.0598
1973	29	0.0058
1974	3	0.0006
1975	3	0.0006
1976	1	0.0002
1977	3	0.0006
1978	0	0
1979	0	0
1980	0	0
1981	0	0
1982	0	0
1983	1	0.0002
1984	0	0
1985	0	0
1986	0	0
1987	0	0
1988	0	0
1989	0	0
1990	0	0
1991	0	0
1992	0	0
1993	0	0
1994	0	0
1995	0	0



1996	0	0
1997	0	0
1998	0	0
1999	7	0.0014

La Grande: Apport énergétique en fonction des précipitations

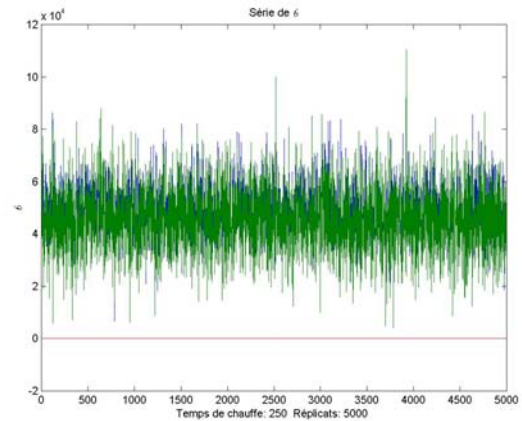
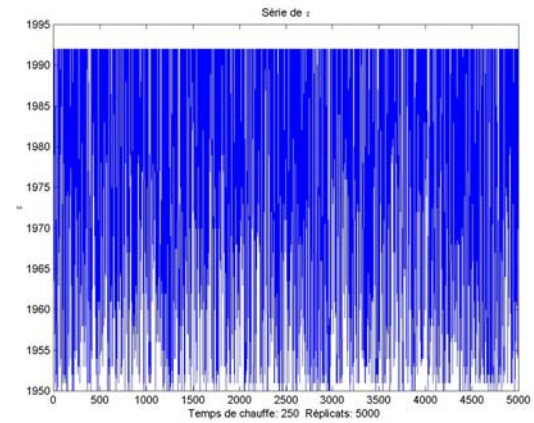
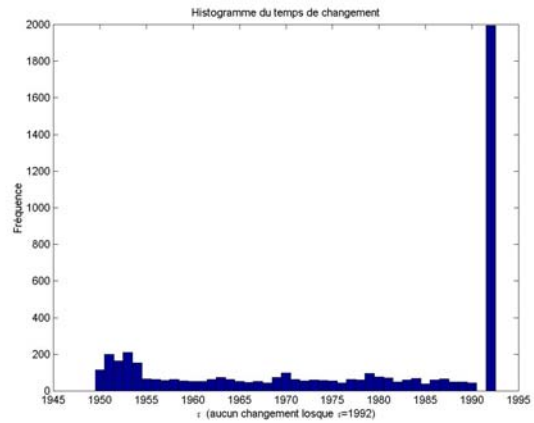
Temps le plus probable du changement : 1992
(pas de changement)

$y = 48263.886 + 33.88721 x$ avant τ

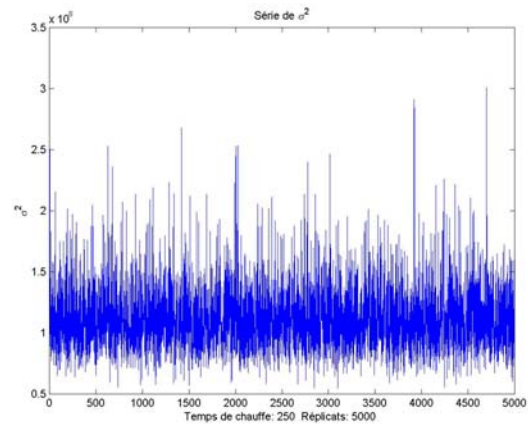
$y = 45998.681 + 33.88721 x$ après τ

distribution du point de changement

année	fréquence	probabilité
1949	0	0
1950	115	0.023
1951	200	0.04
1952	165	0.033
1953	210	0.042
1954	152	0.0304
1955	65	0.013
1956	63	0.0126
1957	58	0.0116
1958	63	0.0126
1959	56	0.0112
1960	51	0.0102
1961	52	0.0104
1962	63	0.0126
1963	74	0.0148
1964	63	0.0126
1965	53	0.0106
1966	46	0.0092
1967	52	0.0104
1968	44	0.0088
1969	75	0.015
1970	99	0.0198
1971	62	0.0124
1972	54	0.0108
1973	60	0.012
1974	57	0.0114
1975	55	0.011
1976	43	0.0086
1977	64	0.0128
1978	61	0.0122
1979	96	0.0192
1980	77	0.0154
1981	71	0.0142
1982	50	0.01
1983	61	0.0122
1984	68	0.0136



1985	38	0.0076
1986	60	0.012
1987	66	0.0132
1988	50	0.01
1989	49	0.0098
1990	44	0.0088
1991	0	0
1992	1995	0.399



St-Laurent: Apport énergétique en fonction de la température

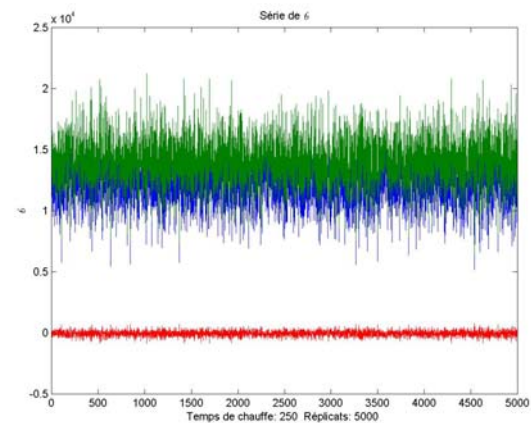
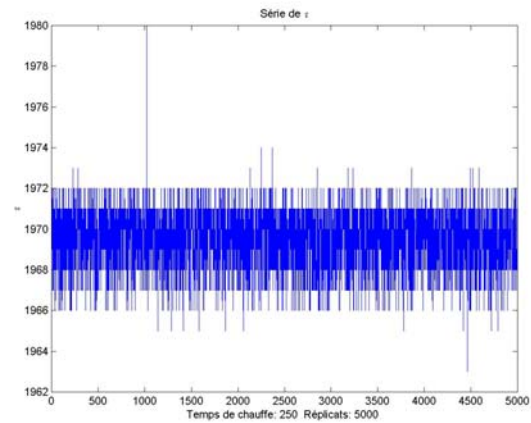
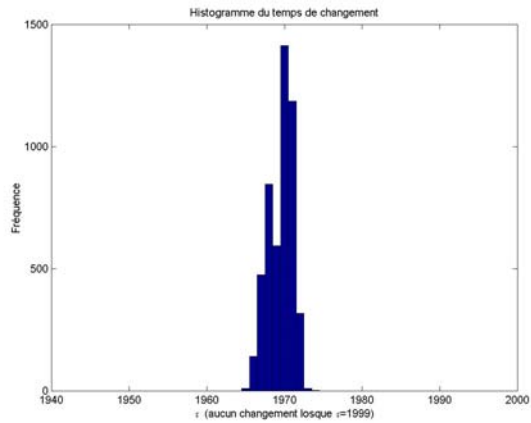
Temps le plus probable du changement: 1970

$$y = 12256.966 - 46.3163 \times \text{avant } \tau$$

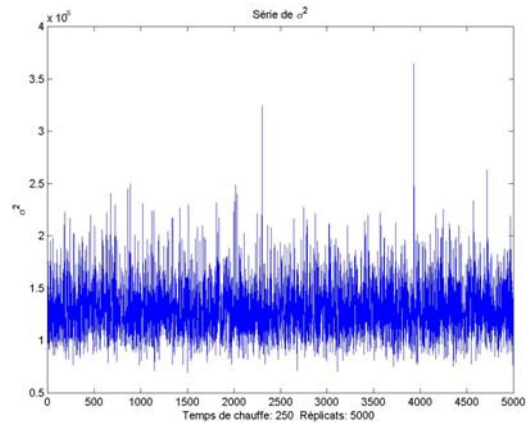
$$y = 13951.023 - 46.3163 \times \text{après } \tau$$

distribution du point de changement

année	fréquence	probabilité
1943	0	0
1944	0	0
1945	0	0
1946	0	0
1947	0	0
1948	0	0
1949	0	0
1950	0	0
1951	0	0
1952	0	0
1953	0	0
1954	0	0
1955	0	0
1956	0	0
1957	0	0
1958	0	0
1959	0	0
1960	0	0
1961	0	0
1962	0	0
1963	1	0.0002
1964	0	0
1965	10	0.002
1966	141	0.0282
1967	475	0.095
1968	846	0.1692
1969	595	0.119
1970	1414	0.2828
1971	1187	0.2374
1972	318	0.0636
1973	10	0.002
1974	2	0.0004
1975	0	0
1976	0	0



1977	0	0
1978	0	0
1979	0	0
1980	1	0.0002
1981	0	0
1982	0	0
1983	0	0
1984	0	0
1985	0	0
1986	0	0
1987	0	0
1988	0	0
1989	0	0
1990	0	0
1991	0	0
1992	0	0
1993	0	0
1994	0	0
1995	0	0
1996	0	0
1997	0	0
1998	0	0
1999	0	0



La Grande: Apport énergétique en fonction de la température

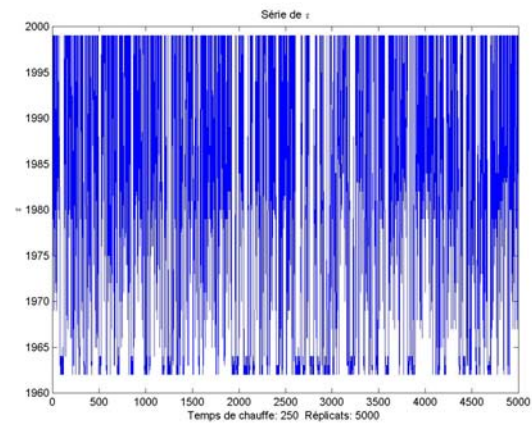
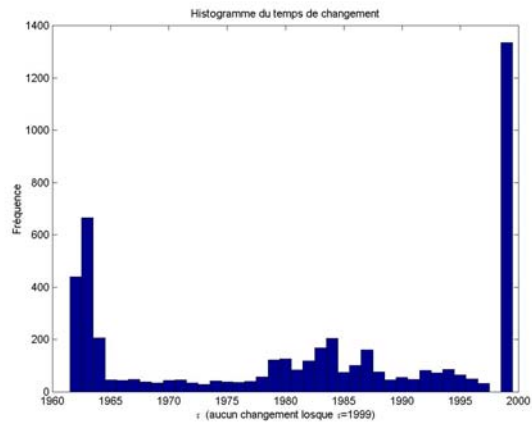
Temps le plus probable du changement: 1999
(pas de changement)

$y = 85058.442 + 2853.552 x$ avant τ

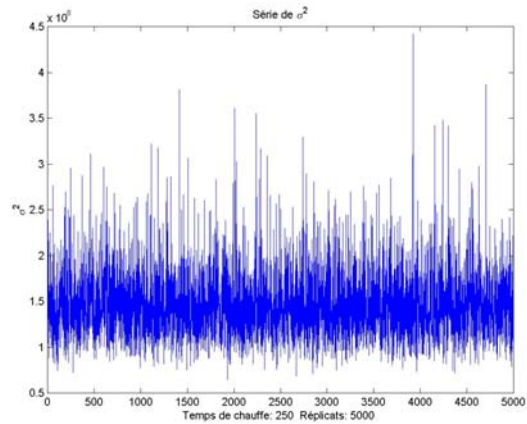
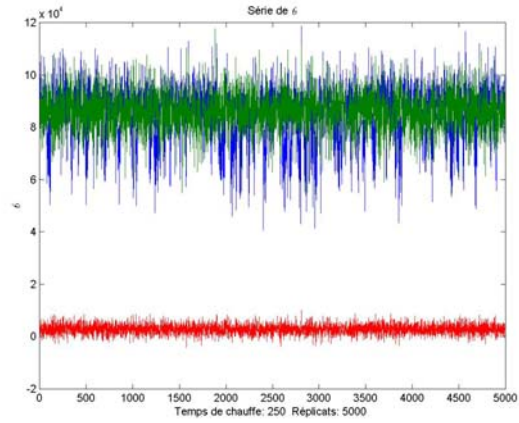
$y = 86176.713 + 2853.552 x$ après τ

distribution du point de changement

année	fréquence	probabilité
1961	0	0
1962	439	0.0878
1963	666	0.1332
1964	206	0.0412
1965	46	0.0092
1966	44	0.0088
1967	48	0.0096
1968	38	0.0076
1969	34	0.0068
1970	44	0.0088
1971	46	0.0092
1972	35	0.007
1973	29	0.0058
1974	42	0.0084
1975	39	0.0078
1976	36	0.0072
1977	40	0.008
1978	57	0.0114
1979	123	0.0246



1980	127	0.0254
1981	84	0.0168
1982	119	0.0238
1983	168	0.0336
1984	204	0.0408
1985	75	0.015
1986	101	0.0202
1987	160	0.032
1988	76	0.0152
1989	46	0.0092
1990	56	0.0112
1991	47	0.0094
1992	83	0.0166
1993	73	0.0146
1994	87	0.0174
1995	65	0.013
1996	49	0.0098
1997	33	0.0066
1998	0	0
1999	1335	0.267



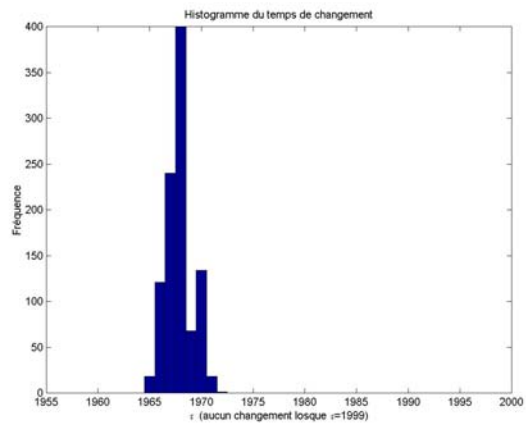
St-Laurent: Apport énergétique en fonction de T, P et Ao

7459.7689 10009.988 14.273589 3.1508017 44.654688 981120

Temps le plus probable du changement: 1968

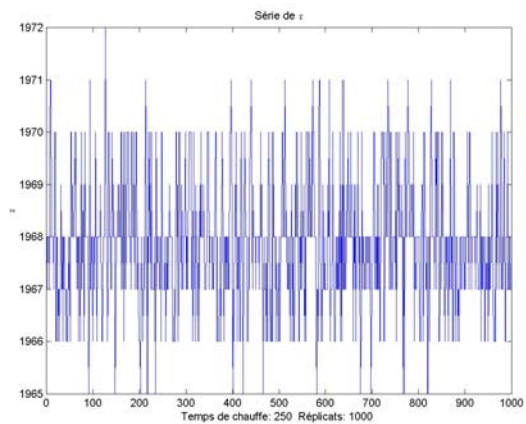
$$y = 7459.7689 + 14.273589 T + 3.1508017 P + 44.65469 A_o \text{ avant } \tau$$

$$y = 10009.988 + 14.273589 T + 3.1508017 P + 44.65469 A_o \text{ après } \tau$$

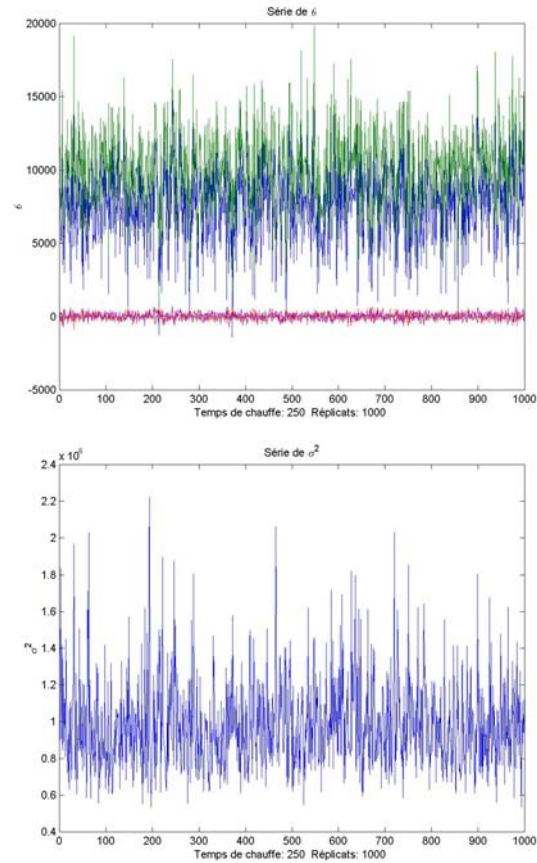


distribution du point de changement

année	fréquence	probabilité
1958	0	0
1959	0	0
1960	0	0
1961	0	0
1962	0	0
1963	0	0
1964	0	0
1965	18	0.018
1966	121	0.121
1967	240	0.24
1968	400	0.4
1969	68	0.068



1970	134	0.134
1971	18	0.018
1972	1	0.001
1973	0	0
1974	0	0
1975	0	0
1976	0	0
1977	0	0
1978	0	0
1979	0	0
1980	0	0
1981	0	0
1982	0	0
1983	0	0
1984	0	0
1985	0	0
1986	0	0
1987	0	0
1988	0	0
1989	0	0
1990	0	0
1991	0	0
1992	0	0
1993	0	0
1994	0	0
1995	0	0
1996	0	0
1997	0	0
1998	0	0
1999	0	0



2.5 Conclusions partielles

Les résultats présentés ci-dessus indiquent que

- Les coefficients d'autocorrélation d'ordre 1 des séries énergétiques des différents systèmes ne sont pas en fait aussi élevés que prévu, excepté pour la région du Saint-Laurent. Ce résultat pour la région du Saint-Laurent est attendu étant donné la grande capacité d'emménagement inter-annuelle des grands lacs et l'influence de cette capacité sur les débits du fleuve Saint-Laurent. Pour les autres systèmes les valeurs de ces coefficients (en valeur absolue) sont de l'ordre de 0.07 (pour l'Outaouais) à 0.26 (pour Churchill Falls) pour toute la période 1943 à 2000. Les coefficients d'autocorrélation d'ordre 2 sont encore plus faibles.
- Le test de stationnarité de Kendall indique que l'hypothèse nulle de non-tendance est acceptable pour tous les systèmes (à un seuil de 5%), incluant la série agrégée, excepté pour la région du Saint-Laurent.

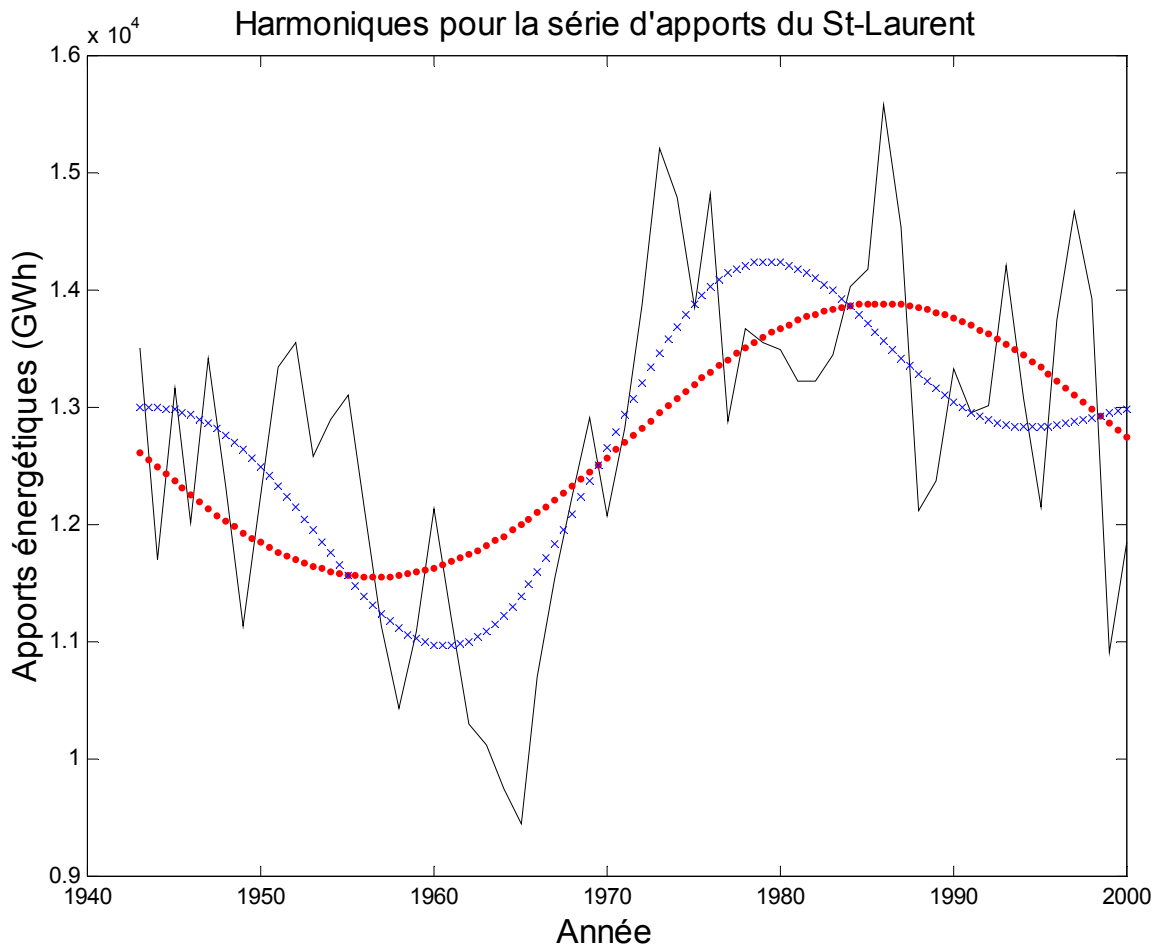
- L'analyse des résultats de l'application de la procédure bayésienne de détection d'un saut dans la moyenne (avec une distribution à priori non informative) aux séries des différents systèmes indique que :
 - Pour le Saint-Laurent, une augmentation de l'apport autour de l'année 1970 est très probable. Ceci confirme les résultats présentés par Perreault et al. (1999).
 - Pour la région de Bersimis, une augmentation de l'apport autour de l'année 1970 est relativement probable.
 - Pour la région de Manic, une diminution de l'apport vers le milieu des années 1980 (autour de l'année 1983) est relativement probable.
 - Pour le système de Churchill Falls, une diminution de l'apport vers le milieu des années 1980 est relativement probable.
 - Pour la série agrégée, une diminution de l'apport vers le milieu des années 1980 est possible.

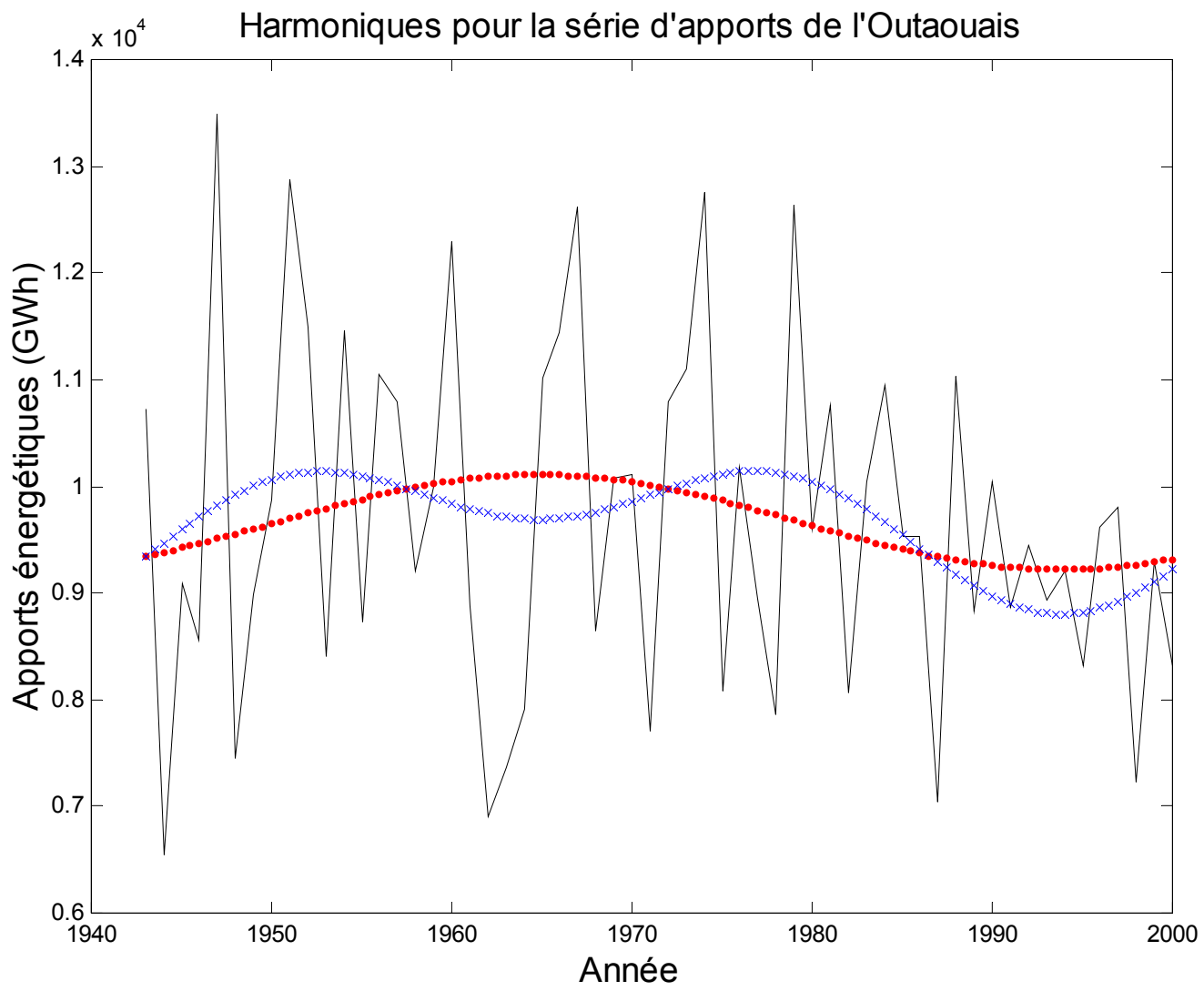
Il est important de noter que ces résultats confirment que la série agrégée est dominée par les régions du Saint-Laurent et de Churchill Falls. Ces conclusions sont basées sur les valeurs des facteurs de Bayes, les dates des ruptures détectées (en fonction de la durée de la série totale), et de la distribution de l'amplitude de changement. Les résultats de l'application de la procédure bayésienne multivariée de détection d'une rupture dans un modèle de régression linéaire confirment les conclusions obtenues ci-dessus. On notera que l'utilisation de l'indice d'oscillations de l'arctique (indice AO) dans la relation régressive tend à modifier légèrement la date de rupture la plus probable.

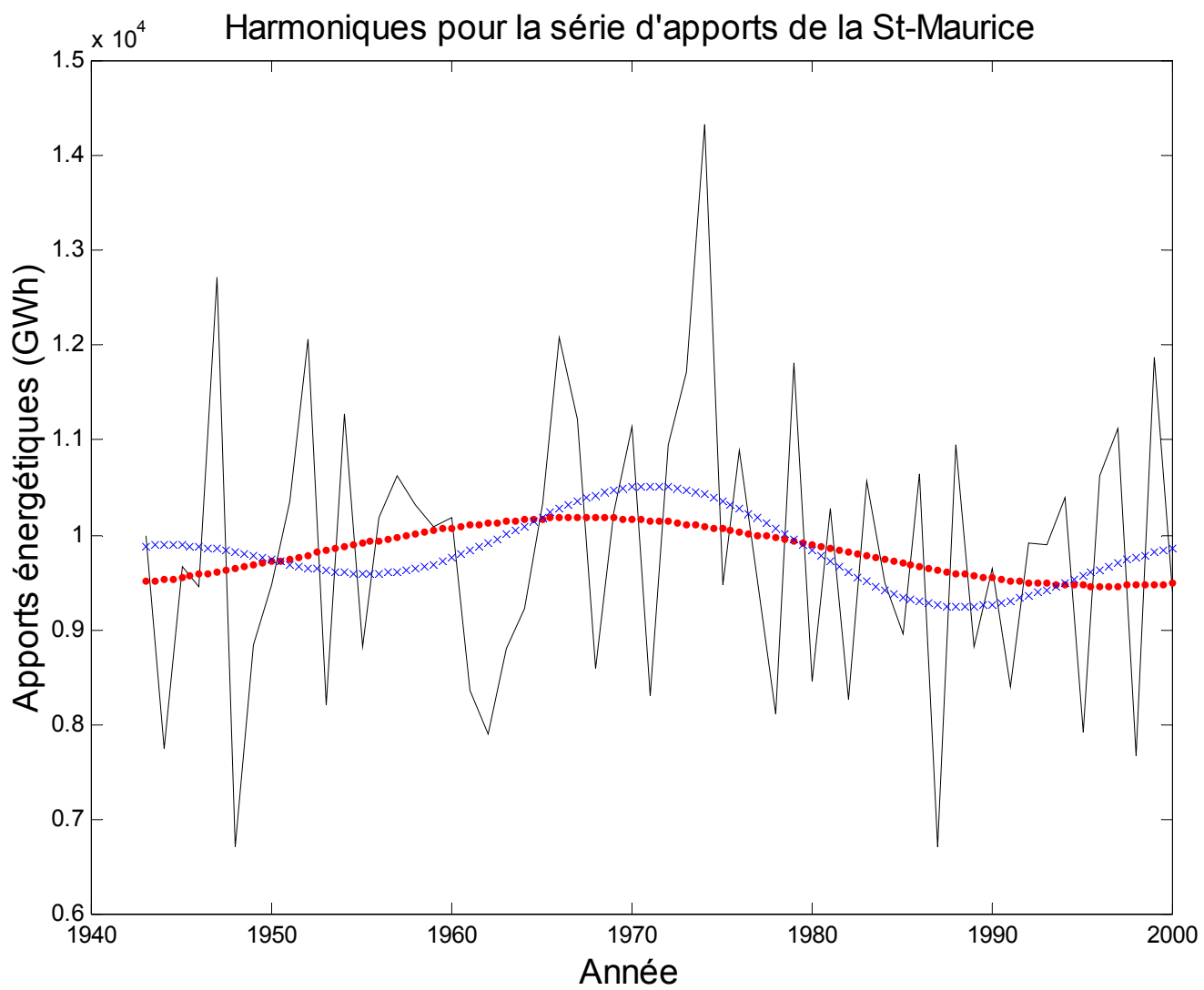
3 Analyse harmonique des séries d'apports énergétiques annuels

Pour étudier la présence de cycles significatifs dans les séries d'apports nous avons effectué une analyse harmonique des différentes séries. Les sections suivantes représentent les graphiques des différentes séries ainsi que les harmoniques d'ordre 1 et 2. Les harmoniques sont présentées pour les neuf séries d'apports énergétiques ainsi que pour la série d'oscillations de l'Arctique. Elles sont superposées aux données (ligne continue), les points (●) représentant l'harmonique d'ordre 1 et les x (×) représentant l'harmonique d'ordre 2.

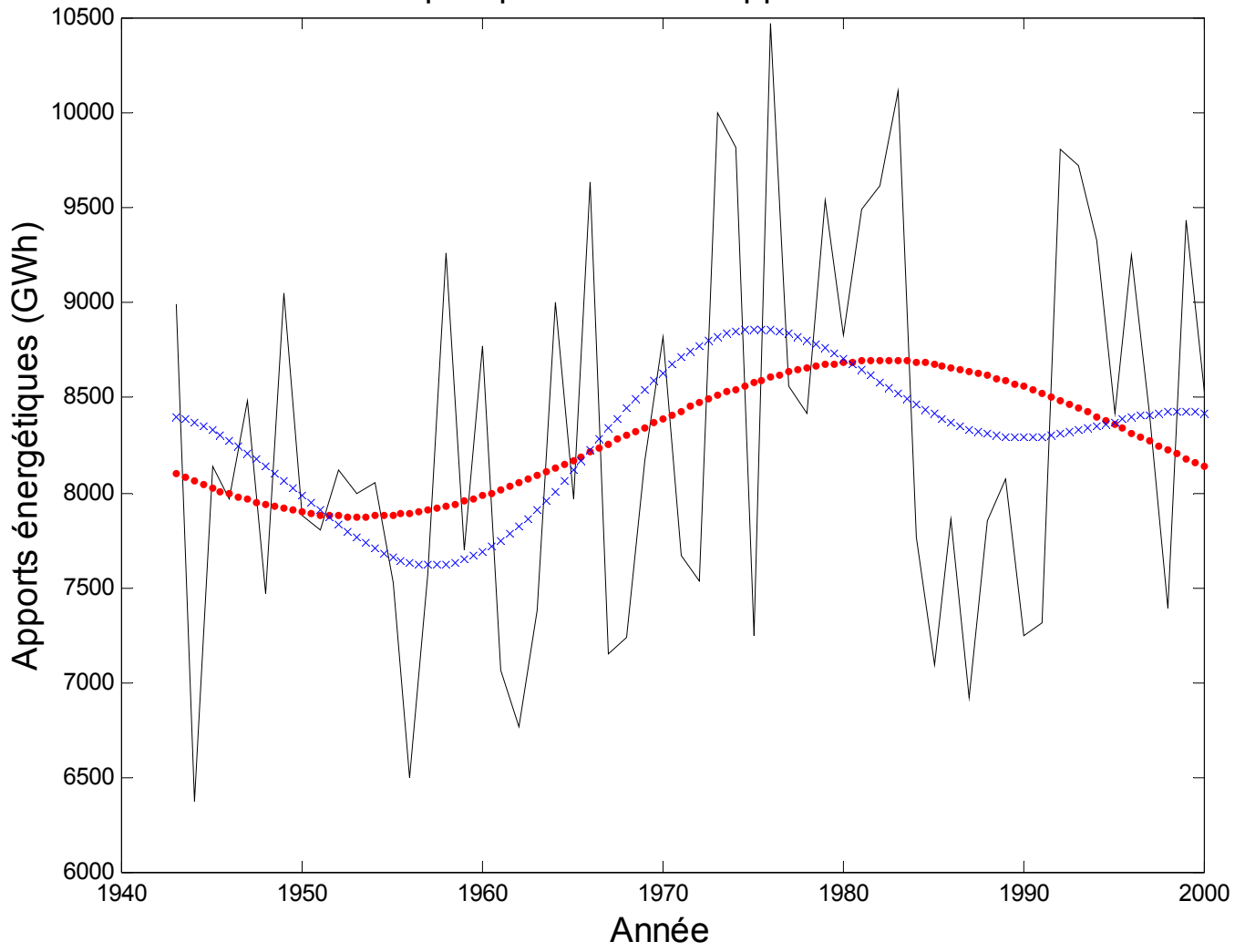
3.1 Harmoniques d'ordre 1 et 2 pour les séries d'apports énergétiques

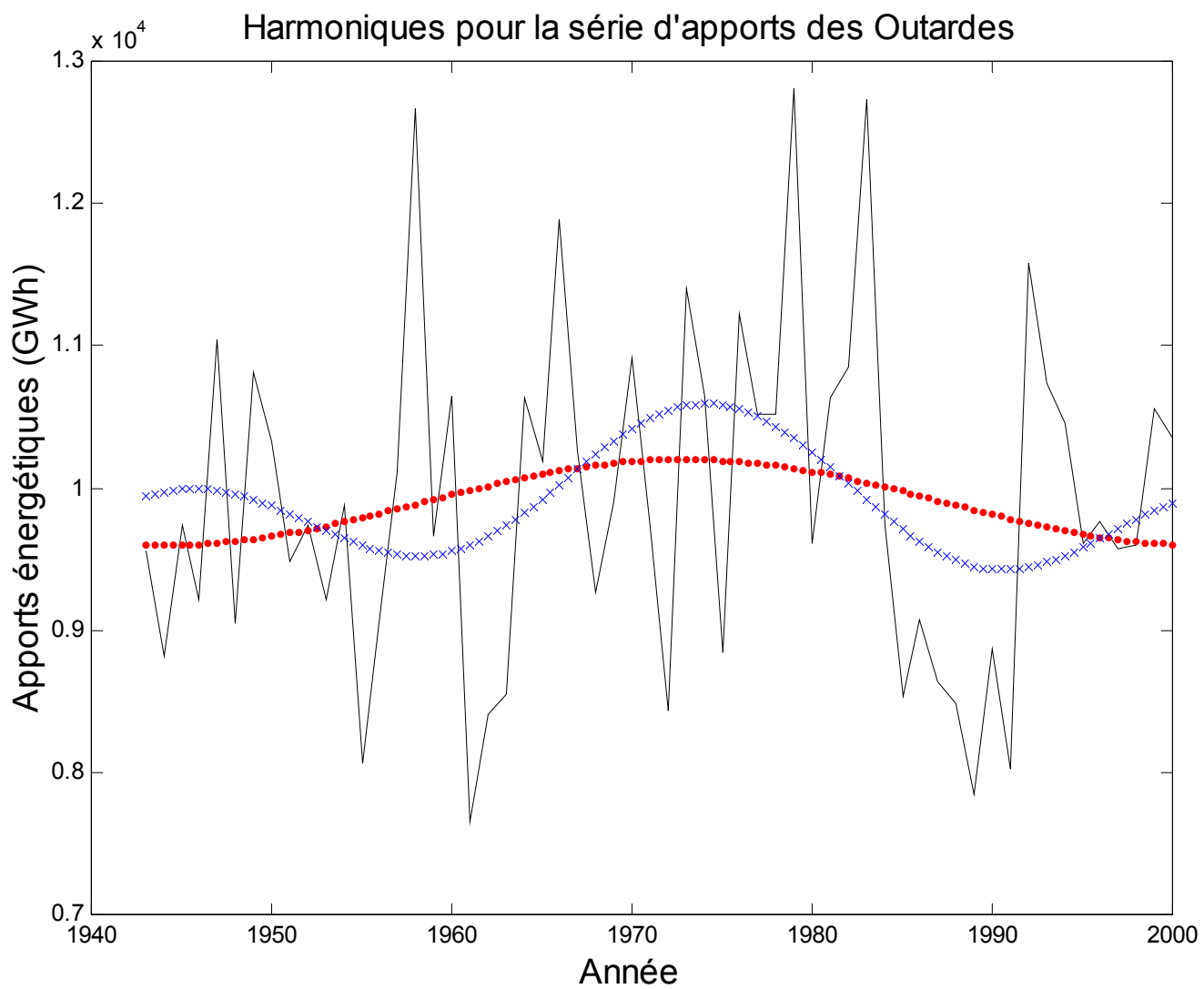


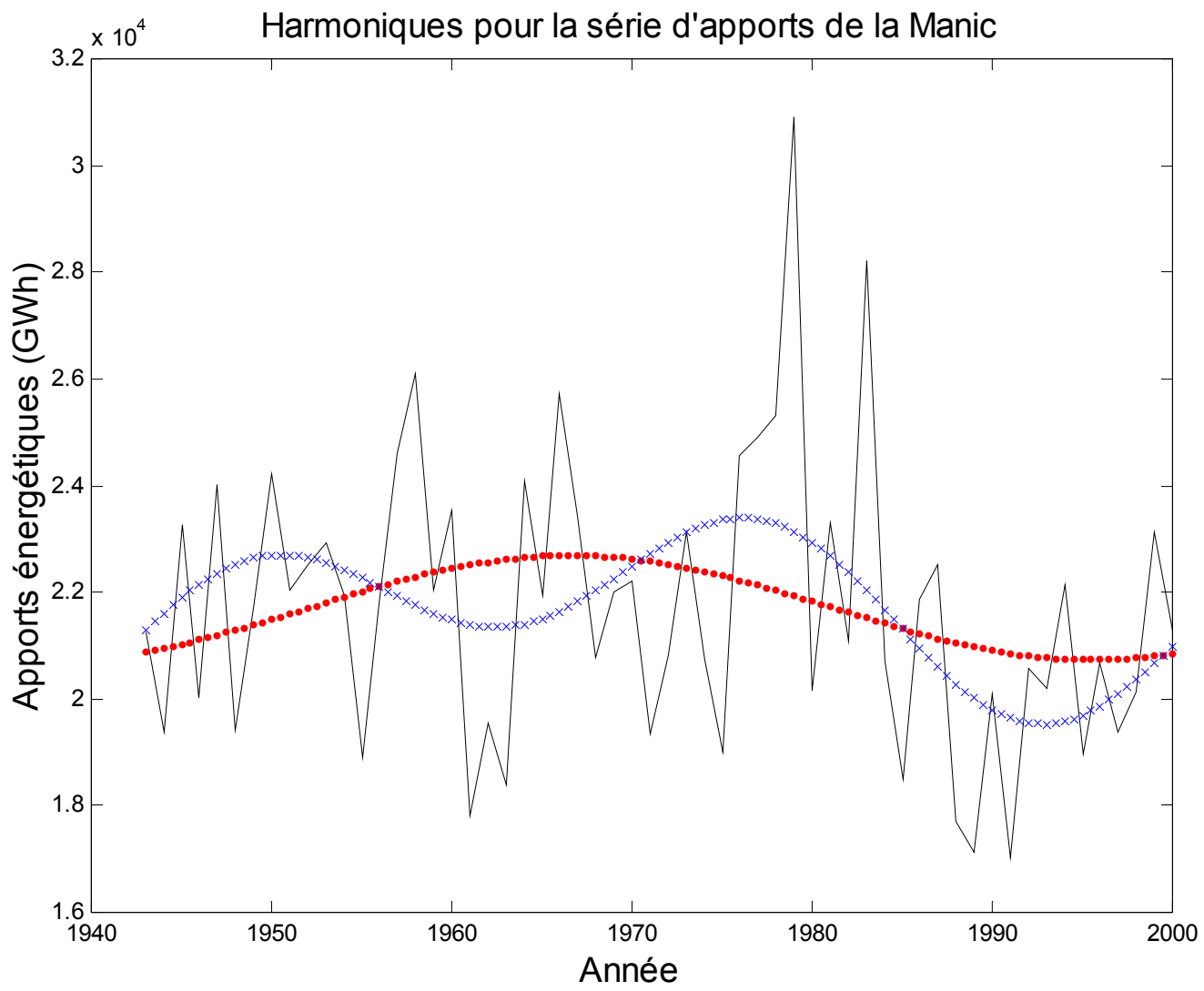


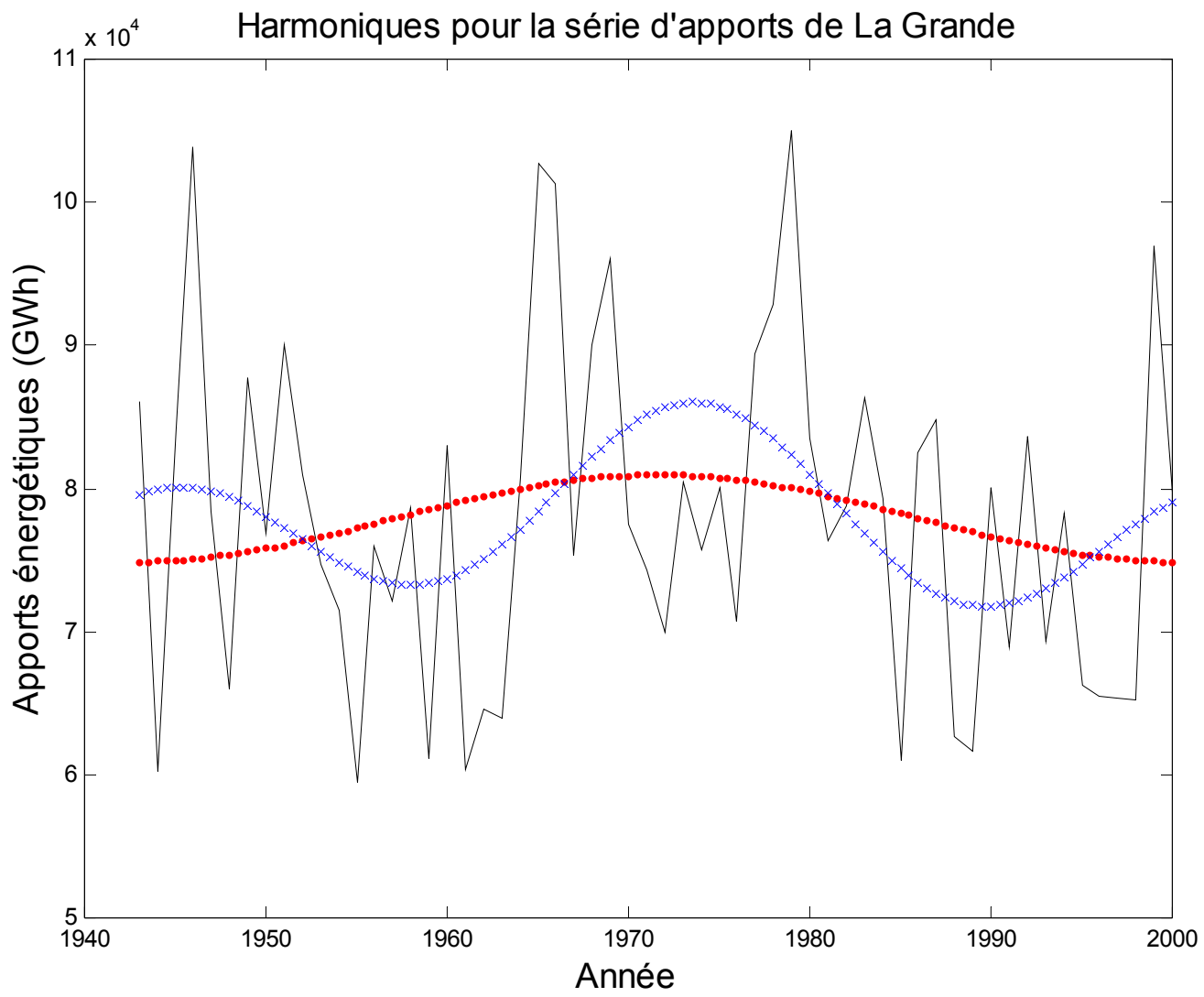


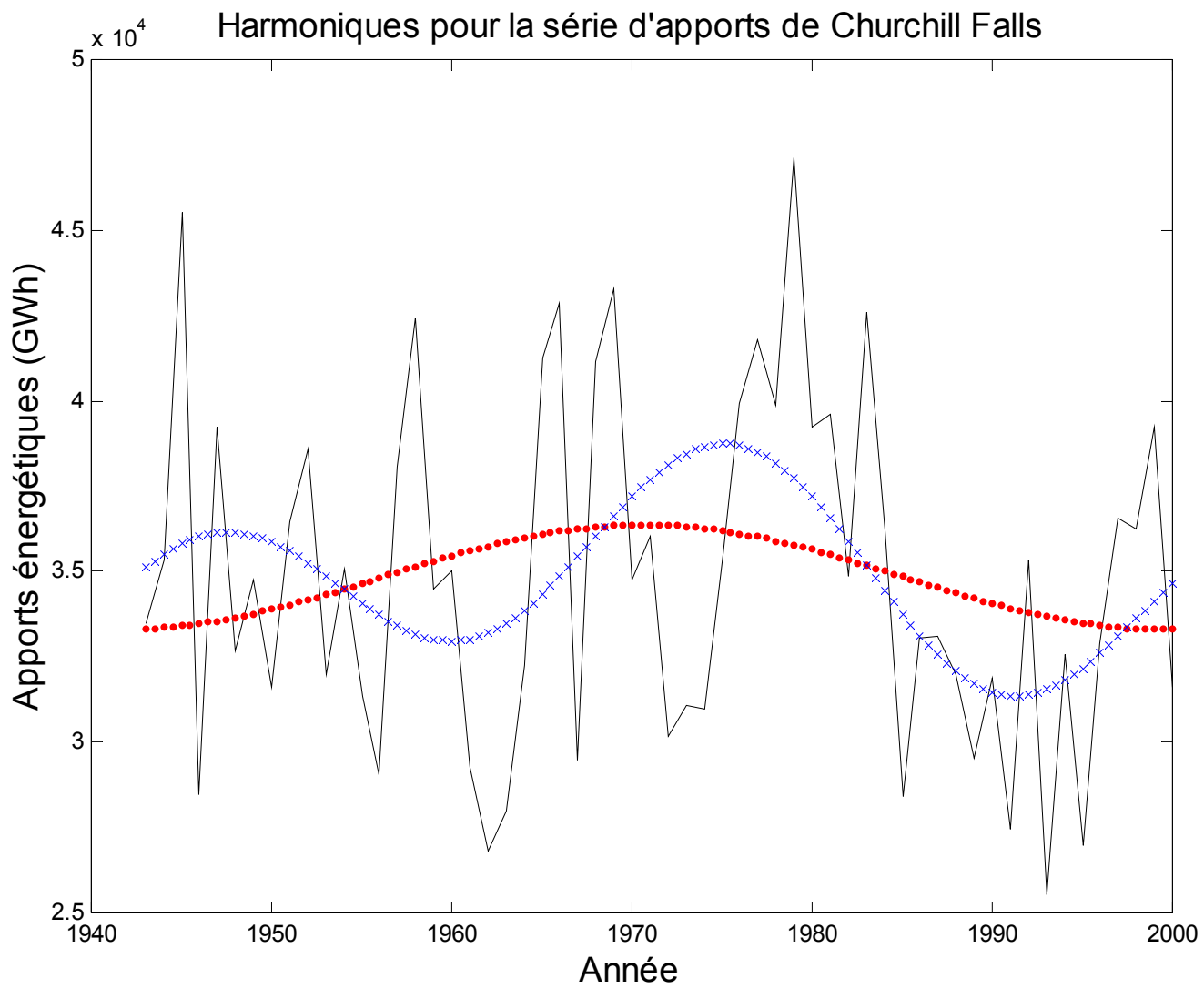
Harmoniques pour la série d'apports de Bersimis



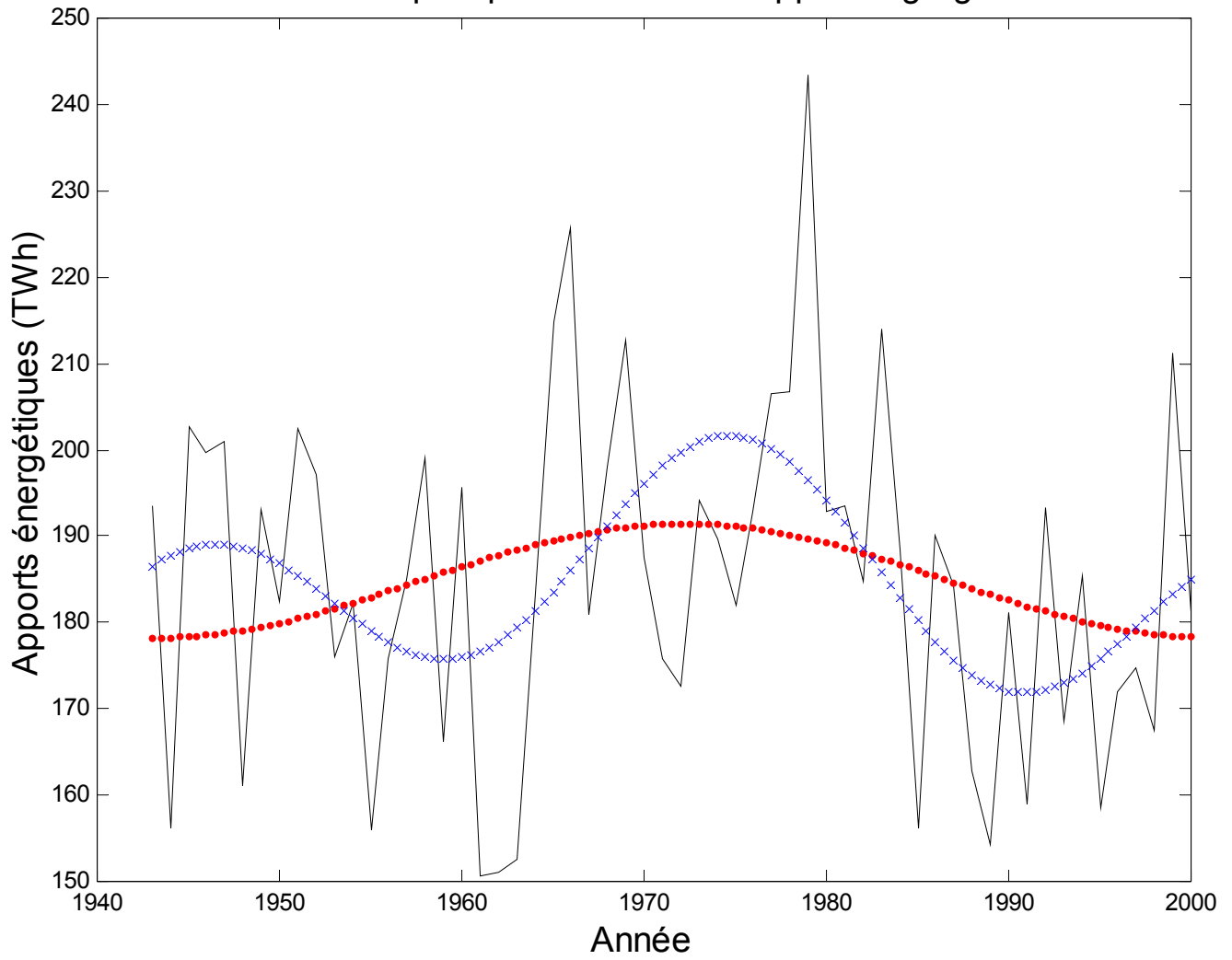






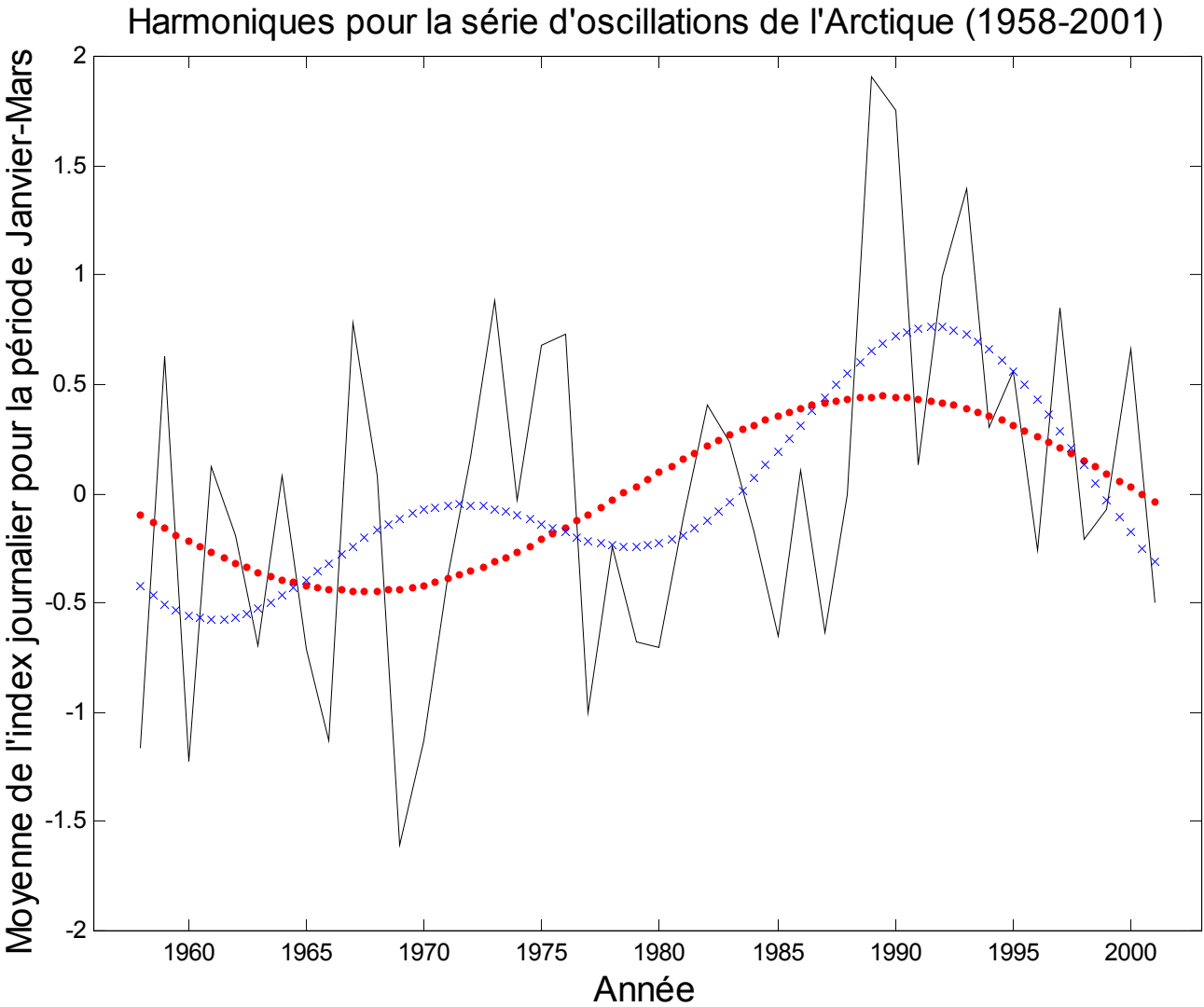


Harmoniques pour la série des apports agrégés



3.2 Harmoniques d'ordre 1 et 2 pour la série d'oscillations de l'Arctique (AO index)

Légende: Harmonique d'ordre 1 → ●●●
Harmonique d'ordre 2 → ×××

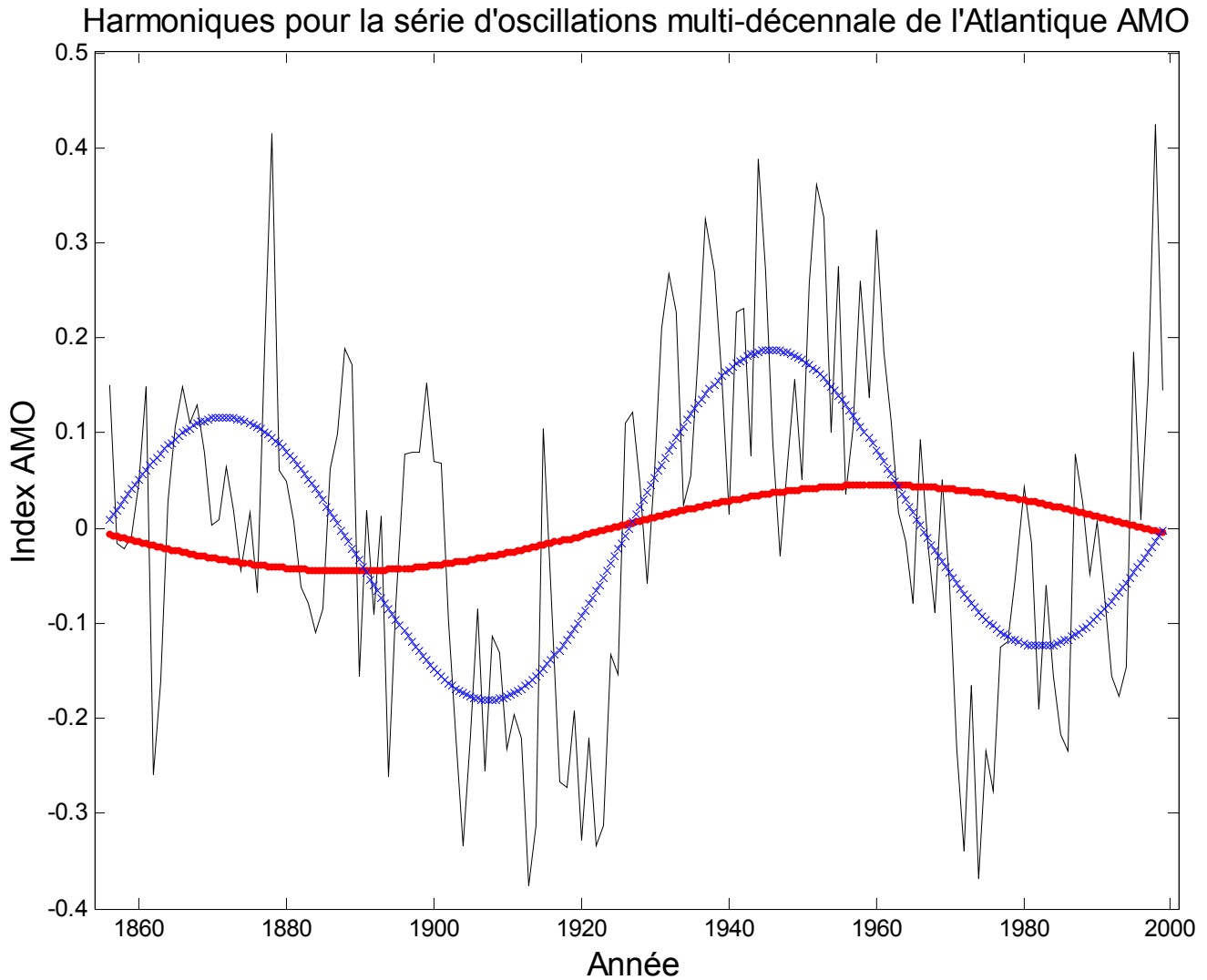


3.3 Corrélation croisée entre les séries d'apports énergétiques et la série d'oscillations de l'Arctique

Corrélations croisées entre les séries d'apports énergétiques et la série d'oscillations de l'Arctique
(AO index)

Région	Délai -1 (Apports → AO)	Délai 0	Délai +1 (AO → Apports)
St-Laurent	0.11	0.25	0.28
Outaouais	0.05	-0.09	-0.05
St-Maurice	0.14	-0.02	-0.04
Bersimis	0.15	0.03	0.10
Outardes	-0.13	-0.19	-0.02
Manic	-0.34	-0.33	-0.11
La Grande	-0.26	-0.39	0.00
Churchill Falls	-0.33	-0.47	-0.12
Série agrégée	-0.26	-0.39	-0.03

3.4 Harmoniques d'ordre 1 et 2 pour la série d'oscillations multi-décennale de l'Atlantique AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation)



3.5 Corrélation croisée entre les séries d'apports énergétiques et la série d'oscillations multi-décennale de l'Atlantique

Corrélations croisées entre les séries d'apports énergétiques et la série d'oscillations multi-décennale de l'Atlantique (AMO)

Région	Délai -1 (Apports → AMO)	Délai 0	Délai +1 (AMO → Apports)
St-Laurent	-0.21	-0.37	-0.47
Outaouais	0.08	-0.13	0.01
St-Maurice	-0.03	-0.24	-0.02
Bersimis	-0.22	-0.28	-0.24
Outardes	-0.13	-0.14	-0.20
Manic	0.07	0.01	-0.09
La Grande	-0.08	-0.10	-0.11
Churchill Falls	0.11	0.10	-0.06
Série agrégée	-0.04	-0.11	-0.15

3.6 Conclusions partielles

L'analyse en séries de Fourier des séries d'apports énergétiques indique qu'il est souvent difficile de modéliser de façon adéquate la variation des séries par un petit nombre de fonctions harmoniques. La représentation de la série avec 2 harmoniques conduit généralement à des variations qui ne sont pas présentes dans les données observées. On doit donc considérer un nombre relativement élevé d'harmoniques pour assurer une bonne cohérence avec les données observées. Ce problème serait probablement moins important si les séries d'apports énergétiques étaient plus longues. Ceci aurait également permis de mieux détecter les cycles possibles dans ces séries ainsi que les corrélations avec différents indices d'oscillations climatiques de basse fréquence. En effet, les séries énergétiques sont de longueur inférieure à 60 ans alors que la période du signal éventuel (tant pour les séries énergétiques que les séries de certains indices) semble être supérieure à 60 ans. On rappelle que la série de AMO présente un cycle de 65-80 ans pour la période 1856-1999 (Kerr, 2000 ; Enfield et al., 2001).

Les corrélations entre les séries d'apports énergétiques et la série AO sont relativement faibles. Les meilleures corrélations sont obtenues pour un délai de 0 ans pour Churchill Falls (-.47), La Grande, Manic, Saint-Laurent et pour la série agrégée (corrélations négatives excepté

pour le Saint-Laurent). Un potentiel de prévision pourrait également être présent pour le Saint-Laurent (corrélation de délai +1 de l'ordre de .28). Cependant, les corrélations linéaires à elles seules ne présentent pas toute l'image, et des études plus poussées sont nécessaires.

Les corrélations entre les séries d'apports énergétiques et la série AMO ne sont pas très importantes non plus. Cependant les corrélations croisées de délai 0 les plus significatives sont maintenant observées pour d'autres systèmes : Saint-Laurent (-.37), Bersimis et Saint-Maurice. **Le résultat le plus intéressant concerne la corrélation de délai +1 entre la série AMO et les apports énergétiques du Saint-Laurent. Cette corrélation est de -.47 et pourrait suggérer la possibilité d'obtenir de bonnes prévisions de longue durée pour le système du Saint Laurent. L'examen des graphiques des deux premières harmoniques confirme cette constatation. On notera également que la période 1970-1990 correspondant à la phase froide du AMO correspond à la période d'apports élevés pour le système Saint-Laurent. Par ailleurs la période 1940-1970 correspondant à la période tiède du AMO correspond également à la période d'apports faibles pour le système Saint-Laurent.** Une étude d'intérêt particulier consisterait à considérer la série de débits annuels du fleuve Saint-Laurent au lieu de la série d'apports énergétiques du système Saint-Laurent. En effet la série de débits du fleuve Saint-Laurent débute en 1861 et offre donc la possibilité d'observer une période supérieure au cycle établi pour l'indice AMO. Cet exercice est en phase d'exécution présentement par notre équipe.

L'hypothèse de périodicité des séries d'apports énergétiques annuels ne peut pas être rejetée à ce niveau. En fait, il n'est pas possible de faire une conclusion commune pour toutes les séries des différents systèmes : certains systèmes, tel que le Saint-Laurent, pourraient présenter un caractère cyclique plus prononcé que pour d'autres systèmes. Il n'est pas recommandé de considérer la série agrégée d'apports énergétique dans les analyses de cyclicité, puisque les différents signaux risquent de se perdre à travers l'agrégation. Des études plus poussées sont nécessaires pour établir les caractéristiques des cycles éventuels et pour bien établir les corrélations avec différents indices d'oscillations climatiques de basse fréquence et avec les composantes principales de certains de ces indices.

4 Prédiction des apports énergétiques annuels

Dans cette section on procédera à l'évaluation du modèle autoregressif d'ordre 1 sur la base des prévisions qu'il fournit pour 1998-2000. Ensuite on présentera les prévisions obtenues par ce modèle pour les années 2001-2003. Finalement, les résultats de l'application de la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA) sont présentés.

4.1 Modèle auto-régressif d'ordre 1, évaluation des prévisions pour 1998-2000

$$A_i = \mu + \phi(A_{i-1} - \mu) + \varepsilon_i$$

où μ est la moyenne de la série, les A_i représentent les apports et les ε_i sont les résidus que l'on suppose indépendants et distribués selon une normale de moyenne 0 et de variance σ_ε^2 . Le coefficient ϕ est donné par l'autocorrélation d'ordre 1 (voir section 2.1).

Le modèle est tout d'abord calé pour la période 1943-1997 afin d'observer s'il peut prédire adéquatement les dernières 3 observations de chaque série. Les résultats sont présentés dans les tableaux qui suivent. On indique au-dessus de ceux-ci la région considérée, en plus de donner l'estimation du coefficient ϕ , la moyenne de la série μ , ainsi que la variance estimée des résidus σ_ε^2 (i.e. la variance des termes d'erreur ε_i obtenus en reconstituant la série selon le modèle estimé) avec l'écart relatif moyen associé (dénoté par ERM).

a) St-Laurent [$\hat{\phi} = 0.74$; $\mu = 12746.4$; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 8.68 \times 10^5$ (ERM = 6.29%)]

Année	Valeur réelle (GWh)	Prévision	Erreur relative
1998	13918.0	14175.4	1.85%
1999	10907.4	13808.2	26.60%
2000	11844.0	13535.4	14.28%

b) Outaouais [$\hat{\phi} = -0.08$; $\mu = 9739.4$; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 2.68 \times 10^6$ (ERM = 13.83%)]

Année	Valeur réelle (GWh)	Prévision	Erreur relative
1998	7228.0	9734.6	34.68%
1999	9293.6	9739.8	4.80%
2000	8323.1	9739.3	17.02%

c) St-Maurice [$\hat{\phi} = -0.15$; $\mu = 9831.3$; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 2.15 \times 10^6$ (ERM = 11.97%)]

Année	Valeur réelle (GWh)	Prévision	Erreur relative
1998	7665.3	9632.7	25.67%
1999	11862.9	9861.7	16.87%
2000	9399.0	9826.7	4.55%

d) Bersimis [$\hat{\phi} = 0.18$; $\mu = 8276.8$; $\hat{\sigma}_e^2 = 9.91 \times 10^5$ (ERM = 9.92%)]

Année	Valeur réelle (GWh)	Prévision	Erreur relative
1998	7387.9	8299.4	12.34%
1999	9435.1	8280.8	12.23%
2000	8531.8	8277.5	2.98%

e) Outardes [$\hat{\phi} = 0.19$; $\mu = 9882.7$; $\hat{\sigma}_e^2 = 1.43 \times 10^6$ (ERM = 9.67%)]

Année	Valeur réelle (GWh)	Prévision	Erreur relative
1998	9591.0	9821.8	2.41%
1999	10557.1	9871.0	6.50%
2000	10349.1	9880.5	4.53%

f) Manic [$\hat{\phi} = 0.18$; $\mu = 21717.8$; $\hat{\sigma}_e^2 = 7.26 \times 10^6$ (ERM = 9.74%)]

Année	Valeur réelle (GWh)	Prévision	Erreur relative
1998	20134.9	21292.3	5.75%
1999	23132.2	21640.5	6.45%
2000	21295.0	21703.8	1.92%

g) La Grande [$\hat{\phi} = 0.25$; $\mu = 77742.1$; $\hat{\sigma}_e^2 = 1.30 \times 10^8$ (ERM = 12.44%)]

Année	Valeur réelle (GWh)	Prévision	Erreur relative
1998	65277.0	74660.6	14.38%
1999	96909.8	76978.6	20.57%
2000	79783.7	77552.9	2.80%

h) Churchill Falls [$\hat{\phi} = 0.27$; $\mu = 34782.2$; $\hat{\sigma}_e^2 = 2.51 \times 10^7$ (ERM = 11.90%)]

Année	Valeur réelle (GWh)	Prévision	Erreur relative
1998	36273.0	35261.4	2.79%
1999	39244.8	34912.1	11.04%
2000	31617.3	34817.4	10.12%

i) Série agrégée [$\hat{\phi} = 0.27$; $\mu = 184.7$; $\hat{\sigma}_e^2 = 373.13$ (ERM = 8.64%)]

Année	Valeur réelle (TWh)	Prévision	Erreur relative
1998	167.5	182.1	8.69%
1999	211.3	184.0	12.92%
2000	181.1	184.5	1.89%

4.2 Modèle auto-régressif d'ordre 1, Prévisions pour 2001-2003

Le même modèle qu'en 4.1 est utilisé. Cette fois, il est calé sur la période 1943-2000 afin d'obtenir les prévisions pour l'horizon 2001-2003. Les résultats sont présentés dans les tableaux qui suivent. Tout comme en 4.1, on indique au-dessus de ceux-ci la région considérée, l'estimation du coefficient ϕ , la moyenne de la série μ , ainsi que la variance estimée des résidus σ_e^2 avec l'écart relatif moyen associé (dénote par ERM).

a) St-Laurent [$\hat{\phi} = 0.71$; $\mu = 12719.4$; $\hat{\sigma}_e^2 = 9.55 \times 10^5$ (ERM = 6.45%)]

Année	Prévision (GWh)
2001	12096.9
2002	12276.7
2003	12404.6

b) Outaouais [$\hat{\phi} = -0.07$; $\mu = 9664.0$; $\hat{\sigma}_e^2 = 2.69 \times 10^6$ (ERM = 13.97%)]

Année	Prévision (GWh)
2001	9759.7
2002	9657.1
2003	9664.5

c) St-Maurice [$\hat{\phi} = -0.21$; $\mu = 9821.6$; $\hat{\sigma}_e^2 = 2.15 \times 10^6$ (ERM = 11.92%)]

Année	Prévision (GWh)
2001	9908.4
2002	9803.7
2003	9825.2

d) Bersimis [$\hat{\phi} = 0.15$; $\mu = 8285.8$; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 9.83 \times 10^5$ (ERM = 9.90%)]

Année	Prévision (GWh)
2001	8323.6
2002	8291.6
2003	8286.7

e) Outardes [$\hat{\phi} = 0.19$; $\mu = 9897.4$; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 1.37 \times 10^6$ (ERM = 9.40%)]

Année	Prévision (GWh)
2001	9984.7
2002	9914.2
2003	9900.6

f) Manic [$\hat{\phi} = 0.18$; $\mu = 21707.6$; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 6.95 \times 10^6$ (ERM = 9.51%)]

Année	Prévision (GWh)
2001	21633.1
2002	21694.2
2003	21705.2

g) La Grande [$\hat{\phi} = 0.22$; $\mu = 77892.8$; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 1.33 \times 10^8$ (ERM = 12.44%)]

Année	Prévision (GWh)
2001	78314.2
2002	77986.8
2003	77913.8

h) Churchill Falls [$\hat{\phi} = 0.26$; $\mu = 34830.2$; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 2.44 \times 10^7$ (ERM = 11.75%)]

Année	Prévision (GWh)
2001	33987.4
2002	34609.1
2003	34772.2

i) Série agrégée [$\hat{\phi} = 0.24$; $\mu = 184.8$; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 376.04$ (ERM = 8.66%)]

Année	Prévision (TWh)
2001	183.9
2002	184.6
2003	184.8

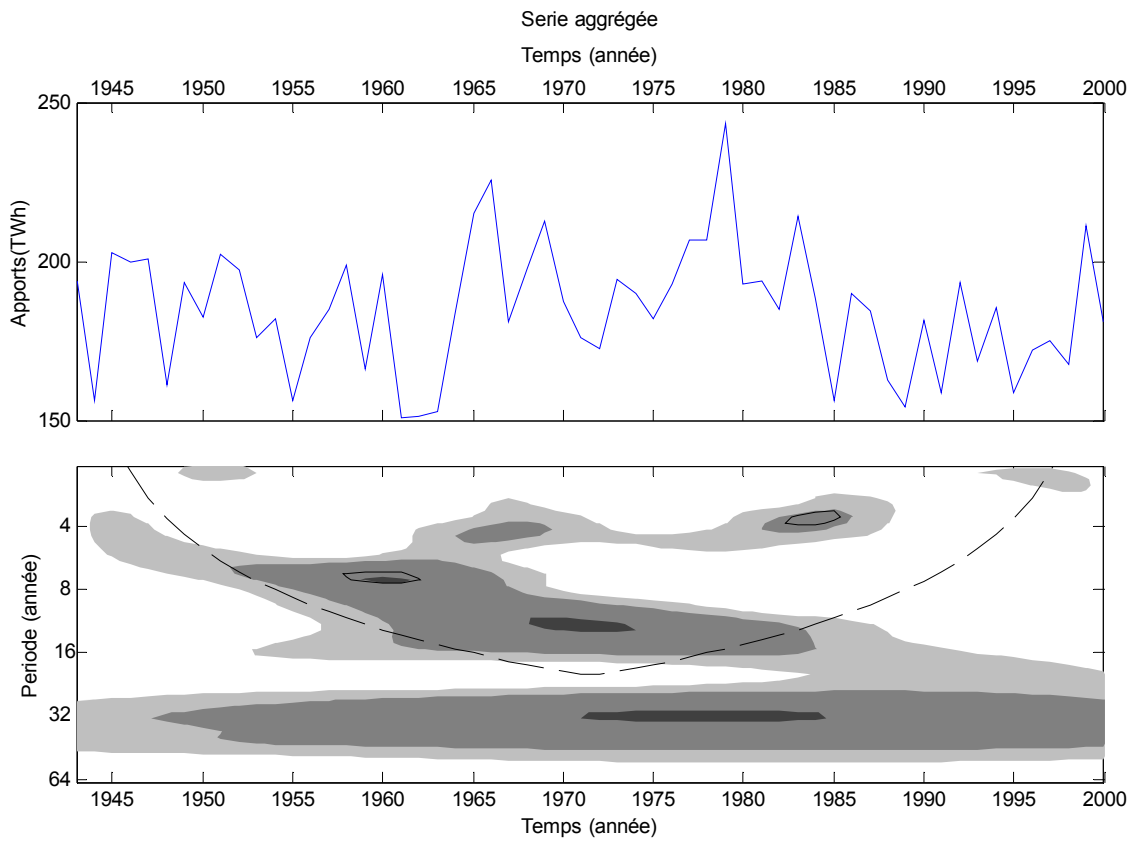
4.3 Prévision par la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA)

La méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA) est en phase d'être une alternative intéressante pour la prévision hydrologique pour les systèmes hydriques complexes. Il s'agit d'une méthode de régression nonlinéaire et dynamique dans le sens qu'elle est auto-adaptative. Un modèle neuronal récursif propos e par Coulibaly et al. (2000) pour la prévision des apports énergetiques en tenant compte des indices climatiques, a montré un grand potentiel dans ce contexte.

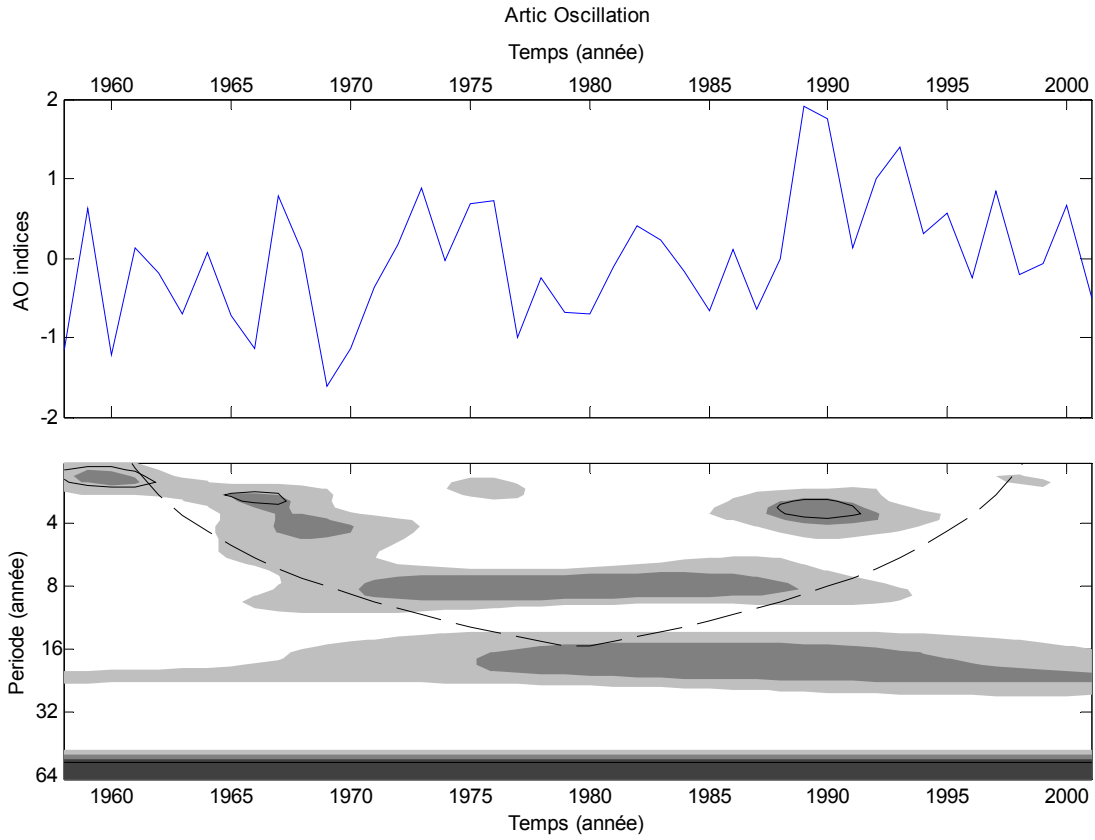
Dans cette étude, un modèle neuronal récursif avec un délai temporel est utilisé pour la prévision des apports énergetiques totaux (série agrégée) des trois prochaines années (2001 à 2003). Les données utilisées sont les apports annuels de chacun des huit systèmes (ou régions). Un délai temporel de longueur $p=3$ est utilisé à l'entrée du modèle. Le nombre de variables d'entrées résultant pour les huit systèmes est de 24. Le modèle a une seule couche cachée avec trois n oeuds et un n oeud de sortie. Il peut être notée RNA(24, 3, 1).

Pour prévoir l'apport total de l'année t (i.e. EnT_t), les apports annuels par système des années $t-1$, $t-2$, $t-3$; (i.e. EnS_{t-i} , $i=1,..,3$), sont utilis es. L'analyse par ondelettes des principaux systèmes hydriques montre une variabilité spatio-temporelle qui est masquée par l'agrégation des apports (série agrégée). Les liens entre la variabilité des apports et les lentes fluctuations climatiques peuvent être mis en évidence à l'aide de spectres d'ondelettes croisées (Coulibaly et al., 2000).

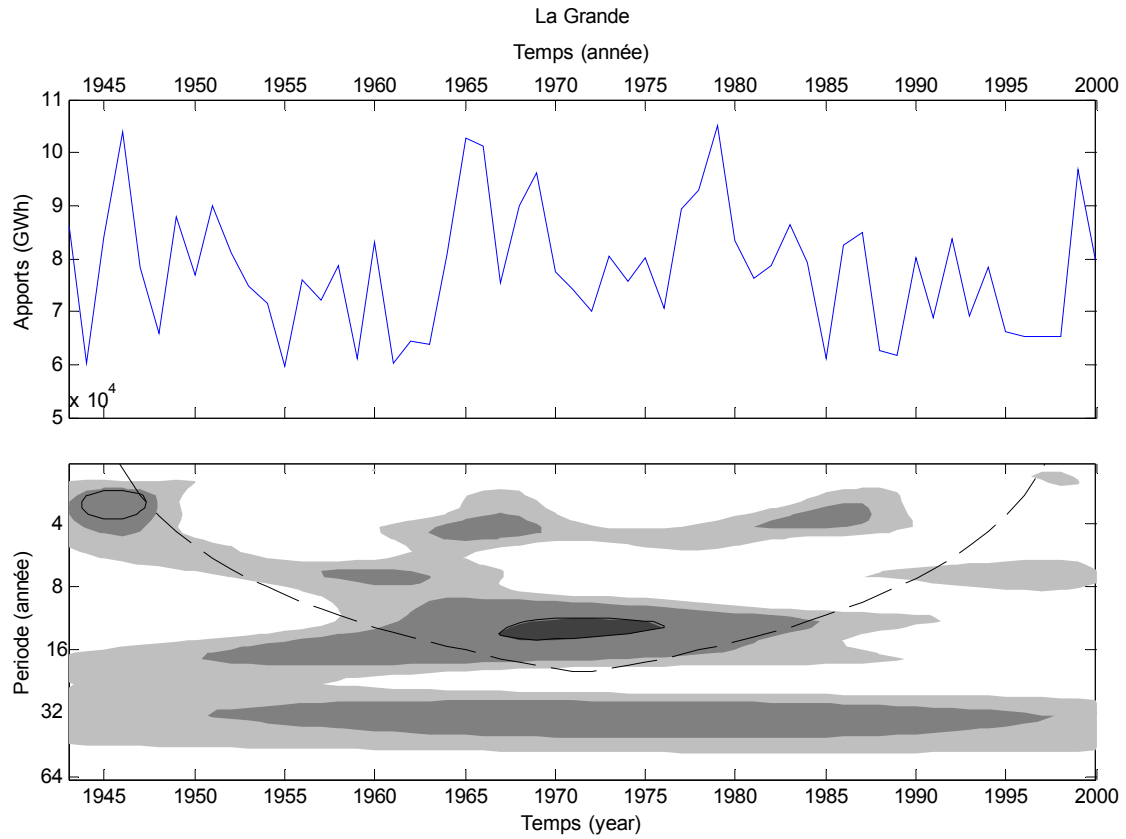
Analyse par ondelettes de la série agrégée.



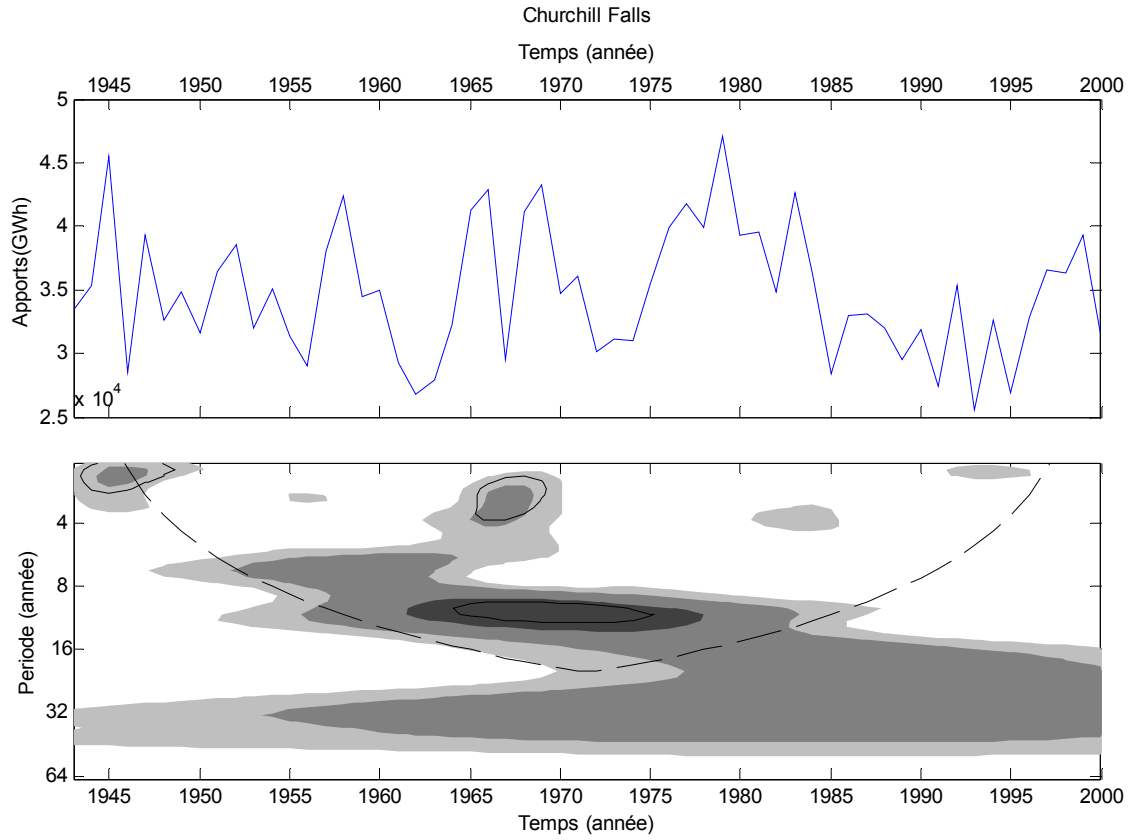
Analyse par ondelettes de la série de l'indice 'Artic Oscillation' (AO).



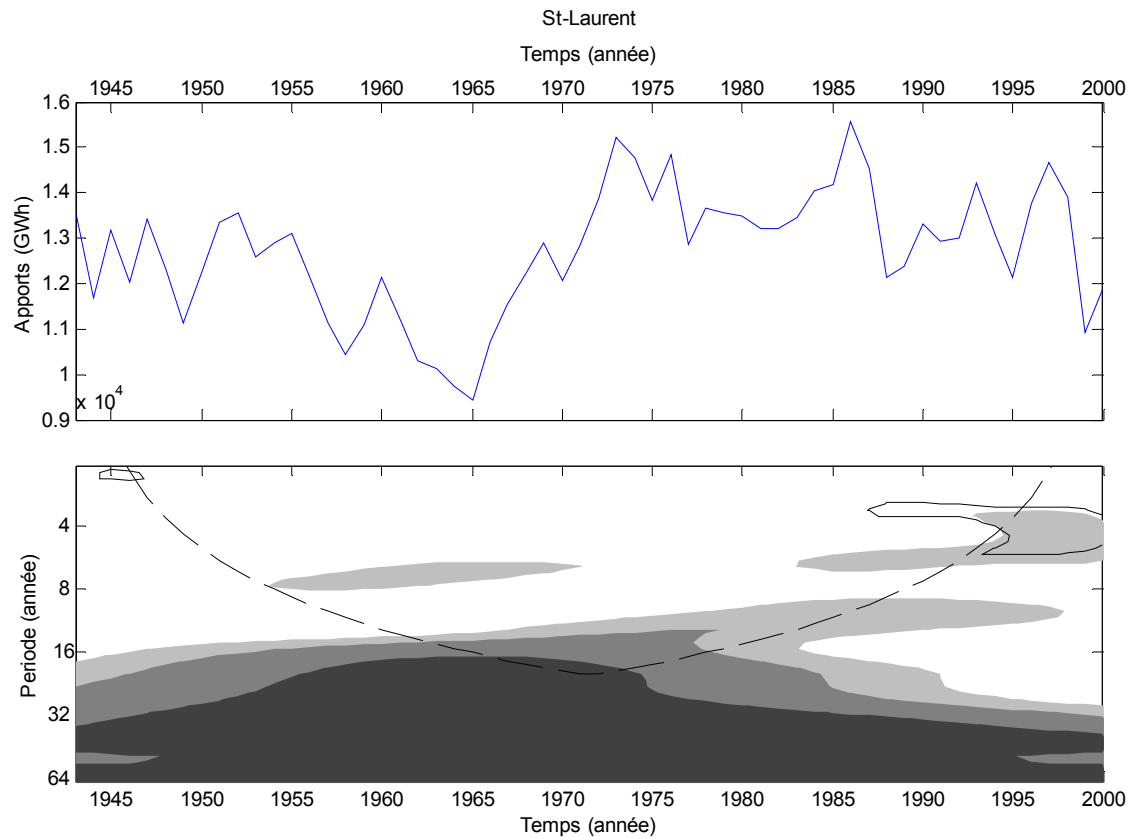
Analyse par ondelettes de la série des apports annuels de La Grande.



Analyse par ondelettes de la série de Churchill Falls.



Analyse par ondelettes de la série du système Saint-Laurent.

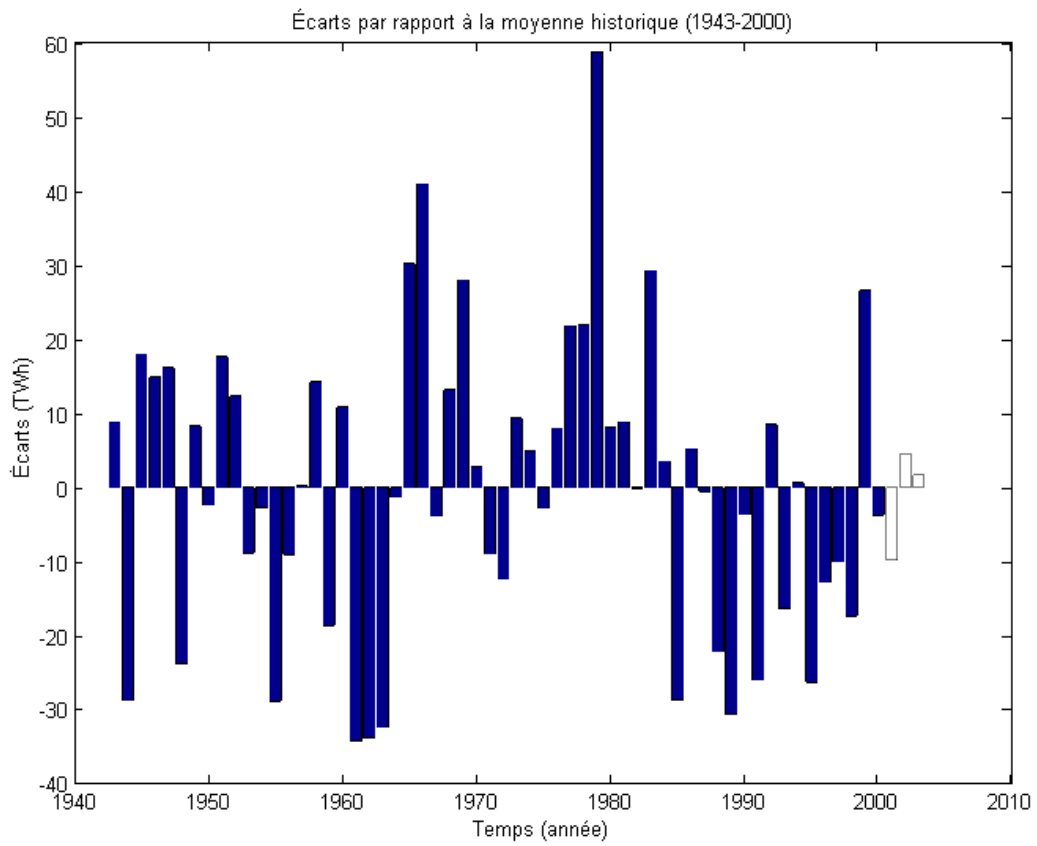


Le modèle RNA(24, 3, 1) est calibré à l'aide des données de 1943 à 1997, et une validation est faite sur la période 1998-2000, et finalement une prévision ('blind forecasting') est faite de façon itérative pour les trois prochaines années. Les résultats de prévision pour la série agrégée sont les suivants :

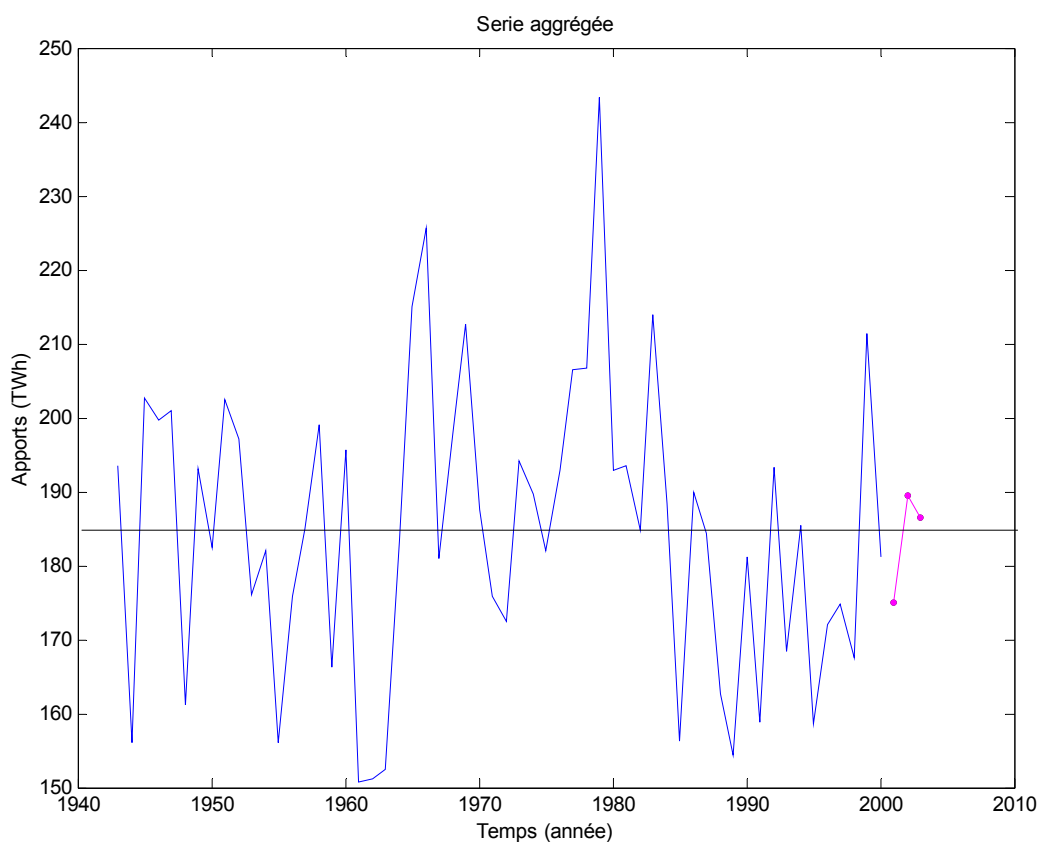
2001	175.02 TWh
2002	189.40 TWh
2003	186.50 TWh

Ces résultats sont illustrés par le graphique ci dessous. Le modèle prévoit une légère baisse des apports totaux pour l'année 2001 par rapport à la moyenne historique des apports, et une petite augmentation des apports pour les années 2002 et 2003.

Prévision du modèle RNA(24, 3, 1) des apports énergétiques pour l'horizon 2001 – 2003.



Prévision du modèle RNA(24, 3, 1) des apports énergétiques pour l'horizon 2001 – 2003.



4.4 Conclusions partielles

Les résultats présentés dans ce chapitre mènent aux conclusions et recommandations suivantes :

- La performance du modèle auto-régressif n'est pas toujours très bonne. Des erreurs de prévision aussi larges que 35% (pour l'Outaouais) sont obtenues lors de l'exercice de prévision des apports de 1998-2000. Pour certains systèmes, tel que celui des Outardes et de Manic, la performance est acceptable (erreurs relatives au dessous de 7%).
- La prévision obtenue avec le modèle auto-régressif d'ordre 1, pour les différents systèmes et pour la série agrégée, pour les années 2001-2003, tend vers la moyenne historique. Ceci est attendu d'un modèle auto-régressif d'ordre 1.
- La modélisation par l'approche RNA des apports mensuels par système (ou région) permettra une meilleure estimation des apports totaux futurs. L'étude réalisée par Coulibaly et al. (2000) montre un fort potentiel de cette approche.
- Une analyse complète par ondelettes croisées pour les apports, les données météorologiques (température, précipitation), et les indices climatiques (AO, NAO, PNA, ENSO, BWA) par région, permettra de mieux comprendre l'origine des tendances et variabilité des apports, et cela pourrait aider aux choix des variables explicatives et des méthodes appropriées pour une meilleure estimation des apports futurs. A titre d'exemple, les ondelettes de la Grande et de Churchill Falls montrent un impact possible de l'Oscillation Artique (AO).
- Le potentiel des réseaux de neurones dynamiques (Coulibaly et al. 2001) devrait être évalué dans le cadre d'une étude pilote visant à développer un modèle neuronal adaptatif pour la prévision à moyen et long terme des apports énergétiques des différents systèmes d'Hydro-Québec.

5 Conclusions

Est-ce qu'il existe une tendance dans la série d'apports énergétiques annuels;

Le test de stationnarité de Kendall indique que l'hypothèse nulle de non-tendance est acceptable pour tous les systèmes (à un seuil de 5%), incluant la série agrégée, excepté pour la région du Saint-Laurent. Cependant, il est difficile d'affirmer qu'on est effectivement en présence d'une tendance dans le cas du Saint-Laurent. Il peut s'agir d'une rupture, une cyclicité, etc.. Pour tous les autres systèmes aucun résultat ne supporte catégoriquement l'hypothèse de présence de tendance.

Est-ce qu'il existe des ruptures de moyenne dans la série d'apports énergétiques annuels;

L'analyse des résultats de l'application de la procédure bayésienne de détection d'un saut dans la moyenne et de la procédure bayésienne multivariée de détection d'une rupture dans un modèle de régression linéaire, aux séries des différents systèmes mène aux conclusions suivantes concernant la présence de ruptures possibles :

- Pour le Saint-Laurent, une augmentation de l'apport autour de l'année 1970 est très probable.
- Pour la région de Bersimis, une augmentation de l'apport autour de l'année 1970 est relativement probable.
- Pour la région de Manic, une diminution de l'apport vers le milieu des années 1980 (autour de l'année 1983) est relativement probable.
- Pour le système de Churchill Falls, une diminution de l'apport vers le milieu des années 1980 est relativement probable.
- Pour la série agrégée, une diminution de l'apport vers le milieu des années 1980 est possible.

Rappelons que la série agrégée est dominée par les régions du Saint-Laurent et de Churchill Falls.

Est-ce qu'on peut mettre en évidence des cycles significatifs dans la série d'apports énergétiques annuels;

L'hypothèse de périodicité des séries d'apports énergétiques annuels ne peut pas être rejetée à ce niveau. En fait, il n'est pas possible de faire une conclusion commune pour toutes les séries des différents systèmes : certains systèmes, tel que le Saint-Laurent, pourraient présenter un caractère cyclique plus prononcé que pour d'autres systèmes. Il n'est pas recommandé de considérer la série agrégée d'apports énergétique dans les analyses de cyclicité, puisque les différents signaux risquent de se perdre à travers l'agrégation. Des études plus poussées sont nécessaires pour établir les caractéristiques des cycles éventuels et pour bien établir les corrélations avec différents indices d'oscillations climatiques de basse fréquence et avec les composantes principales de certains de ces indices.

Notons que les séries énergétiques sont de longueur inférieure à 60 ans alors que la période du signal éventuel (tant pour les séries énergétiques que les séries de certains indices climatiques) semble être supérieure à 60 ans. On rappelle que la série de AMO présente un cycle de 65-80 ans pour la période 1856-1999. On note la correspondance qui semble exister entre la série du Saint-Laurent et celle de l'indice AMO. Cette correspondance pourra être exploitée pour des fins de prévision. La période 1970-1990 correspondant à la phase froide du AMO correspond à la période d'apports élevés pour le système Saint-Laurent, alors que la période 1940-1970 correspondant à la période tiède du AMO correspond également à la période d'apports faibles pour le système Saint-Laurent. Pour plus de détails veuillez vous référer à la section 3.6.

Si les données d'apports énergétiques annuels récentes ne s'inscrivent pas dans la continuité des précédentes (réponse affirmative à l'une des 3 premières questions); quel modèle et quel estimateur de l'apport énergétique moyen proposez vous, et comment peut-on prendre en compte cette non-stationnarité en mode prévisionnel;

En fait, notons qu'une réponse positive à la question 3 (cycles significatifs) n'indique pas que les données d'apports énergétiques annuels récentes ne s'inscrivent pas dans la continuité des précédentes, mais indique plutôt une continuité dans le signal. Si ces cycles sont bien identifiés et modélisés et si leurs causes sont bien identifiées, ceci pourrait être très utile pour des fins de prévision. Par exemple, les résultats présentés dans la section 3.5 indiquent que la corrélation de délai +1 entre la série AMO et les apports énergétiques du Saint-Laurent est de -.47. Ceci pourrait suggérer un potentiel pour améliorer les prévisions de longue durée pour le système du Saint Laurent. En fait, une réponse unique pour tous les systèmes n'est pas possible. Alors qu'une approche prenant en compte l'autocorrélation d'ordre 1 pourrait être utile pour les systèmes de Outardes et Manic (à titre d'exemples), une approche basée sur les RNA serait recommandée pour d'autres systèmes. Il est par ailleurs déconseillé de tenter de modéliser la série d'apports agrégée dans laquelle les différents signaux sont embrouillés et qui est dominée par certains systèmes.

Quelle est la prévision de l'apport énergétique annuel des 3 prochaines années, et quelle en est l'incertitude;

Les résultats complets, pour tous les systèmes, en considérant un modèle auto-régressif sont présentés dans la section 4.2. Les résultats de prévision pour la série agrégée sont les suivants :

Année	méthode des RNA	modèle auto-régressif d'ordre 1
2001	175.02 TWh	183.9 TWh
2002	189.40 TWh	184.6 TWh
2003	186.50 TWh	184.8 TWh

Un niveau de confiance plus élevé est accordé à la méthode des RNA

Recommandez-vous de prendre en compte le caractère autorégressif des apports énergétiques annuels, si oui, quelle serait la cause d'une telle persistance.

Je recommande de prendre en compte le caractère autorégressif d'ordre 1 des apports pour certains systèmes (voir les coefficients d'autocorrélation d'ordre 1 dans la section 2.1, et la performance des prévisions obtenues par un modèle auto-régressif d'ordre 1 dans la section 4.1). la cause d'une telle persistance pourrait être la présence d'un cycle significatif de longue période (supérieure à 60 ans) ou l'influence (combinée) de certaines oscillations climatiques de basse fréquence. Une réponse définitive à la deuxième partie de la question n'est pas possible présentement avec la longueur des séries disponibles.

6 Bibliographie

- Coulibaly, P., Anctil, F., Rasmussen, P., et Bobée, B. (2000). A Recurrent Neural Networks Approach Using Indices of Low-Frequency Climatic Variability to Forecast Regional Annual Runoff. *Hydrological Processes*, 14: 2755-2777.
- Coulibaly, P., Baldwin, C.K., Rasmussen, P.F., et Bobée, B. (2001). Nonstationary Geophysical Time Series Forecasting Using Nonlinear Dynamic Methods. *Geophysical Research Letters*, soumis (en mai 2001).
- Enfield, David B.; Mestas-Nuñez, Alberto M.; Trimble, et Paul J., (2001) The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S., *Geophys. Res. Lett.* Vol. 28 , No. 10 , p. 2077-2080.
- Kerr, R.A., (2000) A North Atlantic climate pacemaker for the centuries, *Science*, 288 (5473), 1984-1986,
- Ouarda, T.B.M.J., Pietroniro, A., Demuth, M. N., Asselin, J., Gingras, H. and B. Bobée (2001). The impacts of climate change on the glaciers of the Canadian Rocky Mountain eastern slopes, à soumettre à *J. Hydrology*.
- Perreault, L., Haché, M., Slivitsky, M., Bobée, B., (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.