

Record Number: 12080
Author, Monographic: Ouarda, T. B. M. J.//Rasmussen, P. F.//Bobée, B.
Author Role:
Title, Monographic: Rationalisation du réseau hydrométrique de la province de Québec pour le suivi des changements climatiques
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1996
Original Publication Date: Juillet 1996
Volume Identification:
Extent of Work: ii, 80
Packaging Method: pages incluant un annexe
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, rapport de recherche
Series Volume ID: 476
Location/URL:
ISBN: 2-89146-422-2
Notes: Rapport annuel 1996-1997
Abstract: Rapport de la Chaire en hydrologie statistique rédigé pour Environnement Canada, division de l'Environnement atmosphérique.
Call Number: R000476
Keywords: rapport/ ok/ dl

**RATIONALISATION DU RÉSEAU
HYDROMÉTRIQUE DE LA PROVINCE
DE QUÉBEC POUR LE SUIVI DES
CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

**RATIONALISATION DU RÉSEAU HYDROMÉTRIQUE DE
LA PROVINCE DE QUÉBEC POUR LE SUIVI DES
CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Rapport préparé pour

Environnement Canada
Division Monitoring et Technologies
Direction de l'Environnement atmosphérique
100 boulevard Alexis-Nihon - suite 300, Saint-Laurent (Québec) H4M 2N8

À l'attention de Monsieur Richard Laurence

par

**Taha B.M.J. Ouarda
Peter F. Rasmussen
Bernard Bobée**

Chaire 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 No R-476

Juillet 1996

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Ont participé à la réalisation de cette étude:

Environnement Canada
Division Monitoring et Technologies
Direction de l'Environnement atmosphérique

Jean-François Cantin
Richard Laurence
Gérard Desjardins

Chaire en Hydrologie statistique
Institut national de la Recherche scientifique, INRS-Eau

Taha B.M.J. Ouarda
Peter F. Rasmussen
Bernard Bobée

Ministère de l'Environnement et de la Faune
Direction du milieu hydrique

Gilles Barabé
Van Diem Hoang
Normand Trempe
Jean-Paul Boucher

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Table des matières | i |
| Avant-propos | ii |
| 1 Problématique..... | 1 |
| 1.1 Introduction | 1 |
| 1.2 Suivi des changements climatiques..... | 2 |
| 1.3 Importance des changements climatiques..... | 3 |
| 2 Techniques de détection des changements climatiques..... | 5 |
| 2.1 Types de changements climatiques..... | 5 |
| 2.2 Techniques de détection | 6 |
| 2.3 Modélisation des changements climatiques..... | 8 |
| 2.4 Indicateurs des changements climatiques et variables à utiliser | 9 |
| 3 Méthodologie | 13 |
| 3.1 Réseau hydrométrique national de référence | 13 |
| 3.2 Critères de sélection du réseau hydrométrique national de référence..... | 14 |
| 3.3 Ajustements aux critères de sélection pour le réseau québécois | 15 |
| 4 Application et résultats | 19 |
| 4.1 Base de données..... | 19 |
| 4.2 Application et résultats | 20 |
| 5 Analyse bayésienne des séries choisies..... | 39 |
| 5.1 Bases théoriques..... | 39 |
| 5.2 Application de la méthode | 41 |
| 6 Conclusions..... | 44 |
| 7 Bibliographie | 47 |
| Annexe A Résultats de la procédure bayésienne | 51 |

Avant-propos

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du deuxième volet d'un contrat accordé à la Chaire en Hydrologie statistique à l'INRS-Eau par la Division Monitoring et Technologies de la Direction de l'Environnement atmosphérique d'Environnement Canada. Ce volet traite de la rationalisation du réseau hydrométrique de la province de Québec dans le but de permettre le suivi des changements climatiques et l'étude de leurs impacts sur l'évolution des ressources en eau. Les auteurs du rapport tiennent à exprimer leur reconnaissance à MM. Jean-François Cantin, Richard Laurence, et Gérard Desjardins pour leurs commentaires et leurs réflexions, lors des réunions tenues conjointement au cours de la réalisation de ce travail. Les auteurs tiennent spécialement à remercier M. Jean-François Cantin pour avoir fourni une partie des données utilisées dans cette étude et pour avoir suivi de très près le déroulement des travaux. Les auteurs veulent aussi remercier le Professeur Michel Slivitzky pour ses précieuses suggestions, leurs collègues MM. Mario Haché et Luc Perreault de la Chaire en Hydrologie statistique à l'INRS-Eau pour avoir fourni le code de la procédure bayésienne et pour leurs commentaires, leurs collègues du groupe d'étude du réseau hydrométrique national de référence, et leurs collègues du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEFQ) pour leur précieuse collaboration. Les auteurs tiennent à remercier plus spécialement MM. Gilles Barabé et Van Diem Hoang du MEFQ pour leur collaboration dans la réalisation de ce travail. Leur connaissance approfondie du réseau hydrométrique de la province de Québec a été un apport essentiel pour la réalisation de ce projet.

1 Problématique

1.1 Introduction

La bonne gestion des ressources hydriques et le développement durable dans les secteurs associés à l'eau nécessitent une base de données hydrométéorologique fiable et de bonne qualité. Suite à la révision des programmes fédéraux (Pilon *et al.*, 1996), les réseaux hydrométriques canadiens sont soumis à des coupures importantes. Cette situation étant irréversible, il importe d'effectuer les coupures de façon rationnelle, c'est-à-dire de garder les stations de jaugeage les plus importantes pour la compréhension du cycle d'eau et des changements climatiques dans les bassins considérés. Ceci permet d'éliminer les stations qui ne participent que peu à notre connaissance des régimes hydrologiques canadiens. Lors de la rationalisation, il importe aussi de considérer plusieurs critères pour s'assurer que le réseau final réponde aux objectifs fixés, dans ce cas du suivi des changements climatiques. Certains objectifs peuvent avoir une importance prioritaire et doivent être considérés séparément. Les types de critères que l'on peut considérer lors de l'exercice de rationalisation sont les suivants:

1. *Critères hydrologiques*: longueur des séries, période de données, disponibilité des données en temps réel, régime, proximité de stations météorologiques et mesure de la qualité de l'eau, précision des données;
2. *Critères hydrauliques*: correction de l'effet de glace, stabilité du contrôle, courbe de tarage;
3. *Objectifs de la station*: prévision des crues et étiages, étude environnementale, recherche, suivi des changements climatiques, gestion des ouvrages, production hydroélectrique, navigation, faune, etc.;
4. *Clientèle*: Environnement Canada, autres ministères, Hydro-Québec, Alcan, consultants, municipalités, universités, etc.;
5. *Critères socio-économiques*: population, loisirs, activités économiques (agricoles, industrielles, touristiques), etc.; et
6. *Coûts*: coût d'opération, de la télémétrie, d'entretien, de traitement des données, etc.

Le réseau hydrométrique de la province de Québec a subi des modifications majeures depuis sa première rationalisation en 1973 (Villeneuve *et al.*, 1973). Plusieurs stations ont été déplacées ou fermées et de nouvelles stations ont été ajoutées. Compte tenu des coupures budgétaires prévues, il est important de réduire les coûts d'acquisition et de transmission des données hydrométriques tout en maintenant un programme de collection de données fiable. La répartition optimale des stations du réseau hydrométrique doit assurer l'obtention de données qui répondent aux besoins des utilisateurs actuels et futurs. C'est dans cette optique que l'INRS-Eau a été consulté pour participer au processus de rationalisation du réseau hydrométrique de la province et donner des recommandations sur le choix des stations à éliminer. La présente étude représente une partie des travaux en cours à l'échelle nationale pour la détermination de la nouvelle configuration du réseau de mesure national (Burn et Goulter, 1991; Rasmussen *et al.*, 1995; Ouarda *et al.*, 1996a, 1996b). Ce présent travail concerne plus particulièrement le suivi des changements climatiques qui est l'une des grandes priorités immédiates d'Environnement Canada (EC).

1.2 Suivi des changements climatiques

Le suivi de l'évolution à long terme des ressources en eau implique l'étude approfondie des changements climatiques. Ainsi, la détection d'éventuelles variations climatiques significatives demeure une priorité d'Environnement Canada. L'importance du cycle de l'eau exige que l'on tienne compte dans la révision des réseaux de mesure. Idéalement, ce suivi doit s'effectuer sur des cours d'eau non régularisés et non influencés par des activités humaines d'envergure (telle que la coupe forestière, par exemple). Il s'agit plus particulièrement de déterminer le nombre et la répartition des stations hydrométriques requises afin de détecter tout changement climatique significatif, et d'étudier l'évolution de la ressource résultant de ces changements. Bien que la rationalisation du réseau soit orientée vers la diminution du nombre de stations existantes en raison des réductions de budget, les possibilités de déplacer certaines stations ou d'installer quelques nouvelles stations (en remplacement de celles qui seront supprimées) pour atteindre l'objectif visé ne doit pas être exclue *a priori*. Cette étude traitera aussi des variables physiques à suivre pour détecter et étudier les changements climatiques dans la province de Québec.

1.3 Importance des changements climatiques

Le réchauffement du climat terrestre est de plus en plus une réalité acceptée par la communauté scientifique et par le public. Des prévisions généralement admises (Environnement Canada, 1995) estiment que la température moyenne de la terre pourrait augmenter d'environ 0,3°C par décennie au cours des 100 prochaines années. La température actuelle de la terre pourrait ainsi être dépassée de 1°C d'ici l'an 2025 et de 3°C d'ici la fin du prochain siècle. Ceci représente un réchauffement de grande ampleur qui pourrait modifier considérablement les caractéristiques climatiques de la terre, et notamment les régimes hydrologiques. Des secteurs importants de l'économie québécoise et canadienne, tels que les secteurs de l'agriculture, de l'hydroélectricité, de la navigation et des forêts pourraient ainsi être touchés. Des écosystèmes entiers pourraient ainsi être modifiés ou disparaître. La fonte des calottes glaciaires et l'élévation du niveau de mer qui en résulterait pourraient forcer le déplacement de milliers de résidents côtiers. Globalement, il est difficile de faire une prévision exacte des impacts économiques de ces changements climatiques. En effet, certaines régions pourraient voir leur production agricole augmenter ou leur saison touristique s'allonger. Cependant, mondialement, les coûts économiques seraient énormes. Dans le contexte décrit ci-dessus, il est donc d'une importance capitale de suivre d'assez près tous les changements climatiques qui seraient en train de se produire sur le territoire de la province et d'estimer leurs impacts sur l'évolution des ressources en eau et sur la distribution spatiale et temporelle des variables hydrologiques extrêmes.

2 Techniques de détection des changements climatiques

2.1 Types de changements climatiques

Dans un rapport préparé pour l'Organisation météorologique mondiale, Cavadias (1992) identifie les différents types de changements climatiques possibles et présente la classification suivante:

1. Saut brusque de la moyenne;
2. Changement graduel de la moyenne;
3. Succession de changements de la moyenne (*shifting levels*);
4. Tendance de la moyenne;
5. Changements cycliques; et
6. Changement de la variabilité.

L'existence réelle de changements brusques de la moyenne peut être contestée sur des bases physiques. En effet, ce type de changement peut être considéré comme un changement graduel "assez rapide" de la moyenne. Solow (1988) indique qu'il est souvent difficile de distinguer entre les changements de types 1) et 2). La définition des *shifting levels* a été donnée par Salas et Boes (1980). En regroupant les différents types de changements de la moyenne, on peut considérer qu'il existe deux grands types de changements climatiques à suivre:

- changements de la moyenne (incluant la tendance en saut si l'on accepte l'existence de tel changement); et
- changements de la variance (augmentation ou diminution).

Il est important, au début de cette étude, de faire la distinction entre la variabilité climatique et les changements climatiques. La première fait référence à la variabilité inhérente à tout processus stochastique stationnaire, alors que la seconde indique une altération des valeurs

moyennes, à long terme, des caractéristiques statistiques de la série sur des intervalles de longue durée. La variabilité climatique décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport aux moyennes temporelles, et implique alors l'hypothèse de stationnarité, alors que les changements climatiques sont détectés sur une succession d'intervalles de plusieurs dizaines d'années et reposent sur l'hypothèse d'un processus non stationnaire. Il est aussi relativement important de mentionner qu'un changement apparent de la moyenne peut en fait être dû tout simplement à une longue persistance de la corrélation (Perreault *et al.*, 1996b). Cette considération nécessite une attention particulière lors de l'analyse des séries climatiques.

2.2 Techniques de détection

La référence de base sur les méthodes de détection des changements climatiques est le rapport de l'Organisation météorologique mondiale (WMO, 1966). Le rapport WCAP-3 de l'Organisation météorologique mondiale (WMO, 1988) propose un nombre de tests développés plus récemment pour la détection du temps de changement. Cependant, les sous-intervalles utilisés dans ce rapport représentent des sous-divisions de longueur égale de la période d'enregistrement, et peuvent ainsi ne pas coïncider avec les périodes de débits faibles et forts. Mitosek (1992) et Cavadias (1992) ont présenté des revues des approches disponibles pour la détection et la modélisation de la variabilité et des changements climatiques dans les séries temporelles hydrologiques. Les tests statistiques à utiliser pour la détection de la non-stationnarité des séries temporelles dépendent, en général, du type de changement à détecter. Dans ce sens, la classification de la section 2.1. risque d'être fort utile.

Dans ce qui suit, nous présentons une liste des tests de détection disponibles dans la littérature. Cette liste reprend la classification présentée par Cavadias (1992) avec un réarrangement mineur et identifie, chaque fois, une référence au test.

Tests décrits dans le rapport de WMO (1966)

1. coefficient d'autocorrélation
2. rapport de Von-Neumann
3. test de Student pour la différence entre les moyennes
4. spectrum
5. test de Cramer pour la comparaison des moyennes partielles avec la moyenne globale

6. test de Mann-Kendall pour détection des tendances
7. test de rangs de Spearman
8. test de Bartlett pour la comparaison des variances
9. calcul de la longueur effective de la période
10. analyse de fonctions orthogonales
11. filtre Gaussien

Tests décrits dans l'article de Srikanthan *et al.* (1983)

1. *runs test*
2. *turning point test* de Kendall
3. test de Gold
4. test du périodogramme cumulatif

Tests décrits dans le rapport de WMO (1988)

1. écart type du coefficient d'autocorrélation
2. *rescaled adjusted range*
3. coefficient de Hurst
4. test de Mann pour la tendance de la moyenne
5. test de Mann pour la tendance de la variance
6. test de Kruskal-Wallis pour l'égalité des moyennes partielles
7. test de Kruskal-Wallis pour l'égalité des variances partielles
8. test des déviations cumulées pour la détection des temps des sauts de la moyenne
9. test du rapport de vraisemblance de Worsley pour la détection des sauts de la moyenne

Tests décrits dans l'article de Srikanthan et Stewart (1991)

1. test de Mann-Kendall de corrélations de rangs
2. test de CUSUM
3. test du rapport de vraisemblance
4. régression à deux phases

Différentes études ont aussi été effectuées pour l'intercomparaison partielle de certains des tests identifiés ci-dessus (Rasmussen et Bobée, 1993, par exemple). La revue des résultats de ces études comparatives ne tombe pas dans le cadre de ce rapport. De nouveaux tests ont aussi été

proposés plus récemment, tels que le test de robustesse pour les processus AR (*autoregressive*), les tests basés sur les modèles ARIMA (*autoregressive integrated moving average*), le test de Fuller pour la non-stationnarité, le modèle linéaire dynamique de Harrison-Stevens, le test de Hubert *et al.* (1989) et le test basé sur le filtre de Kalman adaptable. D'autres tests, qui suivent l'approche de l'analyse descriptive exploratoire (plutôt que les tests d'hypothèse) ont aussi été présentés dans la littérature récente. Ces tests reposent sur l'approche régionale, les statistiques robustes, la méthode bayésienne ou les algorithmes adaptatifs. Il serait intéressant de classer et de comparer d'une façon systématique toutes les approches disponibles et d'étudier les hypothèses de base sur lesquelles elles reposent. L'utilisation de données observées et simulées (contenant des changements) peut s'avérer fort utile dans le cadre de la comparaison des méthodes disponibles. Pour une revue détaillée de toutes les approches disponibles pour la détection de changements dans les séries climatiques et hydrologiques, le lecteur est référé à Cavadias (1992) et Mitosek (1992). Ces deux rapports présentent aussi une liste de leurs applications dans le domaine ainsi qu'une revue des méthodologies utilisées dans leurs applications.

2.3 Modélisation des changements climatiques

Lorsqu'un changement climatique est détecté, il faut procéder à la modélisation mathématique de ce changement et des processus le causant pour identifier les variables responsables de ce phénomène (activités humaines, causes astronomiques, activités et mouvements tectoniques et litosphériques, etc.) et quantifier les relations existant entre ces différentes variables: l'objectif final étant une meilleure compréhension du phénomène des changements climatiques et de leurs caractéristiques et impacts. Les extraits de ces modèles permettent, entre autres, de quantifier l'impact des changements climatiques sur le cycle hydrologique et les ressources hydriques.

Différentes méthodologies de modélisation des changements climatiques ont été proposées dans la littérature. Parmi ces différentes méthodologies, les modèles de circulation générale (*global circulation models* ou GCM) ont acquis une grande popularité car les équations qui les régissent décrivent des principes physiques concrets (Grotch, 1991; Morin et Slivitzky, 1992; IPCC, 1995; Loaiciga *et al.*, 1996, par exemple). Cependant, les modèles GCM ne sont pas encore capables de simuler adéquatement les scénarios de changements climatiques à des échelles régionales et subrégionales. On peut espérer que les efforts actuels pour le développement de modèles climatiques régionaux permettront d'obtenir dans le futur des simulations climatiques

régionales et globales de qualité acceptable. Pour une description plus complète des différents types de modèles de changements climatiques, le lecteur est référé à WMO (1987) et Cavadias (1992).

2.4 Indicateurs des changements climatiques et variables à utiliser

Différents indicateurs de changements climatiques ont été proposés dans la littérature. La majorité de ces indicateurs reflètent des considérations environnementales. Les principaux indicateurs du changement climatique sont les émissions de dioxyde de carbone attribuables à l'utilisation des combustibles fossiles, les concentrations atmosphériques mondiales de gaz à effet de serre et les températures moyennes mondiales et canadiennes (Environnement Canada, 1995). On estime que la température moyenne mondiale a augmenté d'environ 0,5°C depuis 1895 et que la température moyenne canadienne a augmenté de 0,9°C entre 1895 et 1993 (Environnement Canada, 1995). Même si, au Canada, on a globalement observé une tendance au réchauffement, certaines régions de la côte Est ont subi un refroidissement depuis 1950 environ. À l'échelle mondiale, les onze années les plus chaudes jamais enregistrées ont eu lieu depuis 1976 (Environnement Canada, 1995). Les concentrations atmosphériques mondiales de gaz à effet de serre représentent des indicateurs du changement climatiques reliés aux activités humaines ou aux sources anthropiques. Le dioxyde de carbone, le gaz à effet de serre le plus préoccupant, est à l'origine d'environ 75% de l'intensification de l'effet de serre attribuable aux activités humaines. Easterling et Kates (1995) indiquent que le choix d'indicateurs pour l'étude du climat dépend des capacités scientifiques, de la tradition et de l'utilité pratique, et proposent cinq indicateurs allant des extrêmes climatiques aux ressources naturelles renouvelables.

Le choix des variables à utiliser a une influence majeure sur les résultats des études de suivi des changements climatiques. En fait, la configuration du réseau même (quelles stations seront retenues) est conditionné par le choix de variables à utiliser. La détection des changements climatiques peut être effectuée en utilisant des variables associées aux domaines de l'hydrologie et des ressources hydriques. Boden *et al.* (1994) ont publié un résumé de données utilisées pour l'étude des changements climatiques. Ce document contient, entre autres, des résumés de dix analyses de données de précipitations de différentes parties du monde incluant le Canada. Mitosek (1992) indique que les variables les plus adaptées pour le suivi des changements climatiques sont, par ordre d'importance:

1. les débits de rivières;
2. les niveaux de lacs;
3. les précipitations;
4. la température de l'air;
5. le niveau d'eau de rivière;
6. la température de l'eau;
7. la date de cassure de la couverture de glace;
8. le nombre total de jours dans la saison de couverture de glace; et
9. le niveau d'eau souterraine.

Les quatre premières variables sont les variables prioritaires et les cinq suivantes sont des variables secondaires.

Kite et Harvey (1992) identifient aussi l'évaporation, la végétation, l'humidité du sol, l'opération des structures hydrauliques, la date d'occurrence des événements extrêmes, les indices de qualité d'eau et l'état des glaciers comme variables à considérer dans l'analyse et la compréhension des changements climatiques. Lawford (1992) ajoute à cette liste de variables les données des sédiments en rivières. Slivitzky et Mathier (1994) et Perreault *et al.* (1996a) ont considéré les séries de précipitations annuelles et les séries d'apports naturels (d'eau) pour étudier l'homogénéité des conditions climatiques dans le bassin des Grands Lacs. Les apports naturels (ou intermédiaires) sont définis par les résidus de l'équation de balance de masse et sont exprimés en millimètres d'équivalent en eau sur la surface de drainage. Les séries d'apports naturels provenaient du *U.S. Army Corps of Engineers* dans le cadre du comité de coordination des données hydrauliques et hydrologiques des Grands Lacs. D'autres études ont aussi utilisé les séries d'apports naturels pour étudier les tendances climatiques (IGLLB, 1973; Quinn, 1982; Quinn et Guerra, 1986).

D'autres études ont porté sur des séries de données équivalentes, telles que les séries historiques d'apports énergétiques (Perreault *et al.*, 1996b). Ces séries sont obtenues en transformant le stock d'eau emmagasinée et les apports naturels en valeur énergétique exprimée en gigawatts-heure (GWh), à partir de la connaissance des capacités de production de chaque centrale dans le système d'envergure. Ces séries d'apports énergétiques sont actuellement employées pour la planification de la production à Hydro-Québec. Les données atmosphériques et océanographiques peuvent aussi être utilisées pour le suivi des changements climatiques.

Les séries de débits de rivières ont été utilisées pour la détection des changements climatiques. Cependant, les séries de maximums annuels et de minimums annuels semblent contenir des "bruits" assez importants qui risquent de masquer les changements climatiques quand ils sont présents. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser les séries de débits annuels moyens. Ces séries permettent de "filtrer" les bruits et les phénomènes de courte échelle et sont, par conséquent, plus adéquates pour ce genre d'analyse. Dans la section 5, une méthode bayésienne est appliquée aux séries de débits annuels moyens des stations qui ont été sélectionnées dans la section 4 pour le suivi des changements climatiques dans la province de Québec.

Un problème d'importance majeure concerne la disponibilité des données nécessaires pour effectuer les études de changements climatiques. Cavadias (1995, page 15) indique que les trois pays participants dans le projet A2 (*Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability and change*) de l'Organisation météorologique mondiale (France, Canada et les États-Unis d'Amérique) possèdent des bases de données destinées à la détection et la modélisation des changements climatiques mais, toutes ces bases de données ne sont pas généralement disponibles et ne contiennent pas toutes les variables adéquates.

3 Méthodologie

3.1 Réseau hydrométrique national de référence

La documentation et l'étude des changements climatiques et de leurs impacts sur les ressources hydriques à l'échelle nationale est l'une des priorités d'Environnement Canada. Reconnaissant l'importance de disposer de bonnes séries de données historiques, le Canada a établi, depuis le début des années soixante, un réseau de référence de stations climatiques composé de six stations climatiques de suivi à long terme. Depuis, le réseau climatique s'est développé pour inclure 254 stations à travers le pays.

En 1991, un atelier a eu lieu pour examiner l'intérêt de l'utilisation des données hydrologiques pour la détection des changements climatiques (Kite et Harvey, 1992). Cet atelier a permis d'identifier le besoin urgent de concevoir un réseau national pour le suivi des changements climatiques. Une étude a alors été lancée pour identifier et conserver les stations de jaugeage les plus adéquates pour accomplir cette tâche. Ce travail est d'autant plus important que des coupures importantes sont prévues dans les réseaux actuels de mesure. Il est donc capital de bien identifier les stations ayant le plus grand potentiel et de les conserver dans le cadre d'un programme destiné spécialement à la détection des changements climatiques. Ce réseau, encore en phase d'élaboration, est connu sous le nom de "réseau hydrométrique national de référence". La présente étude entre dans le cadre général de ce programme et a pour objectif d'identifier la partie du réseau hydrométrique national de référence qui se situera dans la province de Québec. On doit souligner qu'un travail semblable a déjà été effectué aux États-Unis d'Amérique (Slack et Landwehr, 1992) menant à la sélection de 1 659 sites à travers le pays. Ce réseau est connu sous le nom de *Hydro-Climatic Data Network (HCDN)*.

3.2 Critères de sélection du réseau hydrométrique national de référence

Le problème des changements climatiques est, en général, un problème régional à large échelle impliquant que ce qui peut être détecté dans une station devrait, en principe, pouvoir aussi être détecté dans une autre station de la région. Ce degré de liberté additionnel devrait nous donner un certain niveau de flexibilité et nous permettre de choisir les stations qui possèdent de longues séries de données fiables. Cependant, le changement qui a déjà eu lieu au Canada (en moyenne, environ 1°C durant les dernières 100 années) est reconnu ne pas être uniforme à travers tout le territoire du pays (Gullett et Skinner, 1992). Une bonne répartition spatiale du réseau de stations devient donc un facteur important. Il faut aussi noter que certains changements climatiques à petite échelle (phénomènes non globaux) peuvent avoir lieu. Ainsi, on peut parfois avoir un refroidissement local alors que la région est en train de subir un réchauffement global. Une attention particulière devra être portée à ce phénomène.

Ashfield et Phinney (1992) ont présenté une procédure de développement de critères d'identification des stations applicables à l'étude des changements climatiques. Ils proposent des formules de classement des stations sur la base de la pondération de plusieurs facteurs tels que la distance de la station au centre de gravité de la région éoclimatique, la distance au centre de gravité du bassin de drainage, la distance à la station climatique représentative de la zone, ou la longueur de l'historique. Le tamisage initial des quelque 2 500 stations hydrométriques du territoire canadien est basé sur les critères ci-dessus présentés. Une station qui ne vérifie pas l'un de ces critères de sélection est automatiquement éliminée durant cette première phase de définition du réseau. Les critères utilisés sont les suivants:

1. la station est présentement active (non discontinue);
2. la station possède un historique d'au moins 20 années de données. Sinon, la station doit être l'unique représentant d'une région géographique ou climatique non représentée dans le réseau;
3. les structures de contrôle affectent moins de 5% de la surface totale ou du débit total du bassin;
4. le bassin n'est pas urbanisé (pristine). Moins de 10% de la surface du bassin est développée ou modifiée par rapport aux conditions naturelles. Sinon, le bassin doit être stable: Très peu de changements ont eu lieu dans le bassin durant la vie de la station;
5. moins de 5% des données sont estimées. Les séries ne sont pas construites par addition ou soustraction de données à partir d'autres sites;

6. la qualité des données est bonne: approximativement 95% des données enregistrées sont d'un niveau de précision assez élevé (pas plus de 10% de différence estimée avec les vraies valeurs); et
7. les prévisions futures ne prévoient pas de changements majeurs dans le bassin (pour un horizon de 5 à 20 ans, si possible).

3.3 Ajustements aux critères de sélection pour le réseau québécois

Les discussions avec les membres de l'équipe de recherche d'Environnement Canada et du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec ont démontré que l'opinion générale est que les critères du groupe national doivent être retenus avec des nuances reflétant les besoins de la province de Québec. Les critères nationaux doivent être respectés autant que possible dans le but de conserver une certaine uniformité des approches dans le pays. Ceci peut être achevé tout en ayant une vision spéciale plus adaptée aux réalités de la province (étendue, nature du réseau, activités économiques impliquées, etc.). L'approche générale qui a été adoptée est de considérer des critères moins restrictifs que les critères nationaux chaque fois que le besoin le nécessite, et d'être plus restrictif si les réalités de la province le permettent.

Ainsi, la condition que la station doit être active n'est pas nécessairement importante et peut être abandonnée dans le cas d'une station d'intérêt particulier. En effet, une "bonne" station qui a été discontinuée depuis quelques années et dont le bassin n'a pas subi de changements durant ces années peut être réactivée et utilisée dans le but du suivi des changements climatiques, spécialement si elle possède déjà une série de longueur adéquate. D'autre part, le critère de longueur des séries (20 ans ou plus) peut être plus restrictif si le nombre de stations vérifiant le critère est assez large. L'augmentation du critère de longueur minimum des séries à 30 ans, par exemple, peut faciliter le processus d'élimination tout en garantissant que l'on retienne des séries encore plus utiles en raison de leur taille plus élevée.

Il faut souligner l'importance d'utiliser les stations où les données ne sont pas influencées par les activités humaines. À cet égard, les stations du Grand Nord de la province sont particulièrement privilégiées. Il faut cependant trouver un équilibre entre les stations du Nord, peu nombreuses mais caractérisées par des données de bonne qualité, et les stations du Sud, plus nombreuses mais qui sont souvent très influencées par les activités humaines. D'autre part, l'aspect de contrôle est relié aux variables étudiées: quand on travaille avec des séries d'apports (volumes)

annuels, le contrôle journalier ou mensuel devient peu important. Une station ne devrait pas être automatiquement rejetée parce que le cours d'eau qu'elle représente est contrôlé. Cependant, à conditions égales, les stations non contrôlées devront être avantagées. D'autre part, il est important d'éviter les stations saisonnières afin d'obtenir des données pour toute l'année. Il est bon de se rappeler que l'étude des changements climatiques déjà réalisée sur le territoire canadien indique que ces changements ne sont pas uniformes durant l'année, et que les changements les plus prononcés semblent avoir lieu durant l'hiver.

La proximité d'une station hydrométrique d'une autre station climatique représente un atout pour la station en question. En effet, la station climatique duale peut être utilisée pour des raisons de validation des données, d'estimation de données manquantes si le besoin le nécessite un jour (panne d'appareillage de mesure) ou, simplement pour vérifier tout changement climatique détecté. Nous proposons de superposer le réseau hydrométrique de référence du Québec sélectionné à la fin de cette étude (portion du réseau national) avec la partie québécoise du réseau de référence de stations climatiques. Cette superposition géographique des deux réseaux de référence nous permettra de nous assurer de suivre une approche aussi rationnelle et intégrée que possible pour aborder le problème complexe des changements climatiques.

Un autre détail relié à la réalité de la province de Québec concerne le suivi de certaines rivières particulières. À titre d'exemple, on peut mentionner la rivière Richelieu (région hydrographique 03): cette rivière peut avoir une importance particulière étant donné que c'est une rivière transfrontalière reliée aux Grands Lacs (donc permettant leur suivi), possédant une longue série et drainant un grand bassin dont une partie se trouve dans les États-Unis. Cependant, il ne faut pas oublier que des stations situées sur de telles rivières peuvent aussi être maintenues dans le cadre d'autres objectifs que le suivi des changements climatiques.

Finalement, un aspect que nous avons considéré d'une grande importance physique concerne la surface du bassin versant. En effet, il est recommandé de garder les stations situées sur des rivières drainant de grands bassins versants. En effet, la grande taille d'un bassin de drainage peut agir comme un filtre vis-à-vis des variations locales qui ne sont pas d'intérêt pour le suivi des changements climatiques; les petits bassins versants pouvant enregistrer tous les bruits et toutes les variations microclimatiques, camouflant ainsi des phénomènes de plus grande importance. De plus, les petits bassins versants sont plus vulnérables aux phénomènes naturels imprévus et à l'influence des humains: un feu de forêt relativement petit pourrait anéantir tout un petit bassin ainsi que les bassins voisins changeant ainsi complètement le régime hydrologique

de la région et rendant du même coup la station inutile pour le suivi des changements climatiques. Par contre, les grands bassins versants sont davantage à l'abri de ces modifications hydrologiques.

4 Application et résultats

4.1 Base de données

L'application des critères de sélection présentés dans la section précédente s'est avéré être assez complexe. En effet, le processus de filtrage proposé présuppose une connaissance assez poussée des caractéristiques et de l'historique de chaque station du réseau. Une grande partie de cette information est peu accessible ou encore non disponible. Notre source primaire d'information à ce sujet a été l'expérience de nos collègues du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec dont l'aide a été inestimable.

La base de données de départ a été fournie par M. Jean-François Cantin d'Environnement Canada et contenait les caractéristiques de 182 stations financées totalement (types A ou CA) ou partiellement (type B) par le ministère fédéral. Les stations du type CA sont exploitées par la Direction de l'Environnement atmosphérique d'Environnement Canada ou par le Service d'Hydrographie du Canada. L'information concernant les stations du type C, financées par le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, a été fournie par nos collègues de ce ministère. Cette information a dû être rentrée manuellement dans un chiffrier pour compléter l'information déjà disponible. Au total, 122 stations du type C ont été ajoutées à la base de données. D'autres stations existent sur le territoire de la province, telles que les stations opérées par Hydro-Québec ou par la Société d'électrolyse et de chimie Alcan limitée. Cependant, ces stations sont d'un intérêt limité pour le problème que nous traitons puisqu'elles sont presque toujours situées au voisinage des centrales hydroélectriques et sont très contrôlées. Les données récoltées pour chaque station de la province incluent les caractéristiques suivantes: numéros fédéral et provincial de la station, nom complet de la station, source de financement, exploitant, type de données enregistrées, surface du bassin drainé, type de régime (rivière naturelle ou influencée), année de début des enregistrements, type d'instruments de mesure et nombre de déplacements. Chaque fois que cela était possible, les données secondaires suivantes ont aussi été récoltées: latitude, longitude, débit moyen, existence de radio transmission, information sur les coûts d'opération et toute autre information qui pourrait s'avérer utile.

Tout le travail décrit dans la section suivante a été effectué en utilisant le chiffrier Quattro Pro pour Windows (version 5.0). Une disquette contenant toute la base de données ainsi que les fichiers d'analyse et des résultats est jointe à ce rapport. Cette information pourrait s'avérer utile dans le futur si des analyses additionnelles doivent être effectuées. La procédure bayésienne d'analyse des séries de données, appliquée dans le chapitre 5, est basée sur des données de débits moyens annuels pour les stations sélectionnées. Ces séries de données sont extraites à partir de la base de données HYDAT (version 4.94) avec de l'information allant jusqu'en 1994 (Environnement Canada, 1996).

4.2 Application et résultats

Après avoir préparé la base de données sur chiffrier, la première étape de l'analyse a consisté à appliquer une série de filtres automatiques à l'ensemble des 304 stations de l'étude. Le premier filtre sélectionne les stations pour lesquelles les conditions suivantes sont satisfaites:

1. station de mesure de débit;
2. conditions naturelles; et
3. longueur de la série est au moins 20 ans.

Une liste de 76 stations a ainsi été sélectionnée. Ensuite, la troisième condition du filtre a été modifiée pour être plus restrictive en imposant une longueur minimum de 25 ans de données. Une liste de 51 stations est ainsi sélectionnée faisant partie de la liste des 76 stations obtenue originalement. Finalement, une condition encore plus restrictive de 30 années de données est imposée menant à la liste de 30 stations présentée dans le tableau 1. Une liste complète de tous les résultats intermédiaires est présentée sur disquette. Il est important de garder ces résultats intermédiaires pour les prochaines étapes de l'étude fédérale (préparation du réseau hydrométrique national de référence). En effet, certaines des stations intermédiaires, qui ne seront pas placées sur la liste finale de la présente étude, vérifient tous les critères de sélection du réseau hydrométrique national de référence. Dans les prochaines étapes de l'analyse fédérale, et durant la superposition de tous les réseaux provenant des différentes provinces, certaines des stations sélectionnées seront sans doute éliminées pour différentes raisons (proximité d'autres stations des provinces voisines, répartition géographique, répartition sur les régions écoclimatiques du Canada, analyses exploratoires, etc.). C'est durant cette étape que certaines des stations intermédiaires

initialement écartées pourront être considérées pour remplacer les stations qui seront alors éliminées.

Tableau 1. Stations de mesure de débits naturels possédant au moins 30 ans de données.

| No. Provincial | No. Fédéral | Nom de la station | Financement* | Exploitant | Surface (Km ²) | Début d'enreg. | Catégorie [#] |
|----------------|-------------|------------------------------|--------------|------------|----------------------------|----------------|------------------------|
| 020802 | 02QC001 | Madeleine | A | MEFQ | 1200 | 1953 | RJ05 |
| 022003 | 02QA002 | Rimouski | A | MEFQ | 1610 | 1962 | RJ05 |
| 043012 | 02JB013 | Kinojevis | A | MEFQ | 2590 | 1965 | RJ05 |
| 072301 | 02UC002 | Moisie | A | MEFQ | 19000 | 1965 | RJ40 |
| 073801 | 02VC001 | Romaine | A | MEFQ | 13000 | 1956 | RJ40 |
| 080101 | 04NA001 | Harricana | A | MEFQ | 3680 | 1933 | RJ05 |
| 103702 | 03LF002 | Caniapiscou | A | MEFQ | 48500 | 1954 | RJ40 |
| 011201 | 01BF001 | Nouvelle | B | MEFQ | 1140 | 1964 | RJ05 |
| 023401 | 02PJ007 | Beaurivage | B | MEFQ | 704 | 1925 | RJ05 |
| 023422 | 02PJ030 | Famine | B | MEFQ | 691 | 1964 | RJ05 |
| 030234 | 02OE027 | Eaton | B | MEFQ | 642 | 1953 | RJ05 |
| 040814 | 02LH004 | Picanoc | B | MEFQ | 1290 | 1926 | RJ05 |
| 050119 | 02NF003 | Matawin | B | MEFQ | 1390 | 1931 | RJ05 |
| 050135 | 02NE011 | Croche | B | MEFQ | 1570 | 1965 | RJ05 |
| 050409 | 02PB006 | Sainte-Anne (Bras du Nord) | B | MEFQ | 642 | 1965 | RJ05 |
| 051002 | 02PD012 | Ruisseau des Eaux Volées | B | MEFQ | 3.94 | 1965 | PJ23 |
| 061901 | 02RF001 | Chamouchouane | B | MEFQ | 15300 | 1915 | RJ05 |
| 062101 | 02RD002 | Mistassibi | B | MEFQ | 9320 | 1953 | RJ05 |
| 080707 | 03AC004 | Bell | B | MEFQ | 22000 | 1962 | RJ04 |
| 081002 | 03BC002 | De Rupert | B | MEFQ | 40800 | 1963 | RJ40 |
| 093801 | 03ED001 | Grande Rivière de la Baleine | B | MEFQ | 36300 | 1961 | PJ40 |
| 094206 | 03FC008 | Petite Rivière de la Baleine | B | MEFQ | 10400 | 1963 | RJ40 |
| 094207 | 03FC007 | Boutin | B | MEFQ | 10400 | 1965 | RJ40 |
| 103605 | 03KC004 | Aux Mélézes | B | MEFQ | 42700 | 1965 | RJ40 |
| 104001 | 03MB002 | À la Baleine | B | MEFQ | 29800 | 1956 | RJ40 |
| 030401 | 02OJ007 | Richelieu aux Rapides Fryers | CA | DEA | ? | 1937 | GJ |
| 040810 | | Desert | C | MEFQ | 1780 | 1926 | GJ04 |
| 061502 | | Metabetchouane | C | MEFQ | 2280 | 1964 | PJ05 |
| 061905 | | Chamouchouane | C | MEFQ | 11100 | 1962 | PJ05 |
| 062102 | | Mistassini | C | MEFQ | 9870 | 1915 | PJ05 |

* Voir Section 4.1 pour détails

Réfère au type d'instruments de mesure et aux données mesurées

Une évaluation détaillée s'impose pour chacune des stations du tableau 1, ainsi que pour les stations obtenues avec les conditions moins restrictives (20 ans et 25 ans de données) et autres stations d'intérêt (moins de 20 ans de données). Nos collègues du MEFQ ont été contactés à cet égard. Il doit être noté que la majorité des stations du type C (financées par le MEFQ) sont situées sur des rivières influencées. Le tableau 2 présente des résultats résumés pour une large sélection de stations situées sur des rivières naturelles (non influencées) et qui satisfont en grande partie les critères adoptés pour le réseau hydrométrique national de référence. Ces stations sont classées par région hydrographique et assurent une bonne représentation spatiale des différentes régions de la province de Québec. La figure 1 représente la carte des différentes régions hydrographiques de la province de Québec définies par le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (1994). Trois indices d'évaluation sont présentés dans le tableau 2, pour chaque station, pour refléter les trois critères suivants:

1. la stabilité de contrôle;
2. l'effet de glace; et
3. le niveau de précision de la courbe de tarage.

La valeur des indices d'évaluation varie entre 0 et 10, des valeurs élevées représentant les meilleures conditions: par exemple, le contrôle le plus stable est ainsi assuré lorsque l'indice correspondant est égal à 10. En général, la stabilité de contrôle est reliée à la stabilité du fond. Un lit en sable ou en gravier fin est assez instable et est associé à une valeur de l'indice 1 de l'ordre de 2. Les lits formés de grandes pierres se voient attribuer un indice de l'ordre de 5, et les lits en roche solide se font affecter une valeur maximale de 10. Pour l'effet de glace, la valeur maximale de l'indice est associée aux sites où le pourcentage de correction du débit observé pour obtenir le débit réel est inférieur à 15 %. Les valeurs entre 30 % et 50 % sont associées à une valeur de l'indice de 5 et les corrections dépassant 50% se font attribuer un indice de 2. L'indice associé aux courbes de tarage reflète le niveau d'extrapolation des débits minimums et maximums par rapport au débit jaugé. Les extrapolations faibles (moins d'une fois le débit jaugé de chaque côté) se font affecter un indice de l'ordre de 10. Les extrapolations moyennes (une à deux fois le débit dans la partie gauche et droite de la courbe) sont associées à des valeurs de l'indice de l'ordre de 5, et les extrapolations fortes (plus que 2 fois le débit) se font attribuer des indices de l'ordre de 2. Le tableau 3 présente les détails des calculs de l'indice 3 relié aux courbes de tarage. Pour chaque station, la moyenne définissant les niveaux d'extrapolation des débits minimums et maximums est effectuée pour déterminer la cote globale de la courbe de tarage, comprise entre 0 et 10.

Tableau 2. Caractéristiques des stations naturelles d'intérêt dans les différentes régions hydrographiques de la province de Québec.

| Région hydrographique | Station | Indice d'évaluation | | |
|-----------------------|---------|-----------------------|----------------|------------------|
| | | Stabilité de contrôle | Effet de glace | Courbe de tarage |
| 1 | 010902 | 5 | 2 | 3 |
| | 011003 | 5 | 5 | 5 |
| | 011508 | 8 | 10 | 7.5 |
| 2 | 020602 | 10 | 10 | 5 |
| | 020802 | 5 | 7 | 3 |
| | 021502 | 2 | 2 | 3.5 |
| | 021601 | 2 | 2 | 6 |
| | 022003 | 10 | 10 | 2 |
| | 022507 | 10 | 2 | 7.5 |
| | 022704 | 2 | 10 | 6 |
| | 023422 | 2 | 2 | 2 |
| | 024003 | 10 | 5 | 4.5 |
| | 023401 | 10 | 2 | 6 |
| 3 | 030103 | 10 | 7 | 3 |
| | 030215 | 10 | 7 | 3.5 |
| | 030234 | 7 | 5 | 2 |
| | 030282 | 10 | 2 | 3.5 |
| | 030304 | 10 | 7 | 4.5 |
| | 030314 | 5 | 10 | 4.5 |
| | 030905 | 10 | 7 | 10 |
| 4 | 040204 | 10 | 10 | 8.5 |
| | 040212 | 10 | 7 | 3.5 |
| | 040814 | 10 | 10 | 3.5 |
| | 040830 | 10 | 10 | 7 |
| | 042103 | 10 | 10 | 2 |
| | 043012 | 10 | 7 | 5 |

Tableau 2. (suite)

| Région hydragraphique | Station | Indice d'évaluation | | |
|--------------------------|---------|--------------------------|----------------|------------------|
| | | Stabilité de contrôle | Effet de glace | Courbe de tarage |
| 5 | 050119 | 5 | 7 | 3 |
| | 050135 | 5 | 5 | 7.5 |
| | 050144 | 10 | 10 | 6 |
| | 050304 | 10 | 5 | 6.5 |
| | 050408 | 10 | 7 | 7.5 |
| | 050409 | 10 | 7 | 5 |
| | 051001 | 10 | 5 | 4 |
| | 051502 | 2 | 10 | 6 |
| | 052219 | 10 | 10 | 5 |
| 6 | 061901 | 10 | 10 | 7 |
| | 061905 | 10 | 2 | 5 |
| | 062101 | 10 | 7 | 5 |
| | 062102 | 10 | 5 | 4.5 |
| 7 | 072301 | 10 | 2 | 5 |
| | 073503 | 10 | 10 | 4 |
| | 073801 | 10 | 7 | 5 |
| | 074903 | 10 | 2 | 3 |
| | 076601 | 10 | 5 | 4 |
| 8-9-10 | 080101 | 10 | 10 | 7.5 |
| | 080104 | 10 | 2 | 2 |
| | 080809 | 10 | 7 | 6 |
| | 095003 | 10 | 10 | 6 |
| | 103605 | 10 | 2 | 3.5 |
| | 104001 | 10 | 2 | 4.5 |
| | 104803 | 10 | 7 | 2 |



Figure 1. Carte des différentes régions hydrographiques de la province de Québec (MEFQ, 1994)

Tableau 3. Cotes minimum, maximum et moyenne pour les courbes de tarages des stations d'intérêt

| Station | Courbe de tarage minimum | Courbe de tarage maximum | TOTAL | Cote moyenne |
|---------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------|
| 10902 | 2 | 4 | 6 | 3 |
| 11003 | 5 | 5 | 10 | 5 |
| 11508 | 5 | 10 | 15 | 7.5 |
| 20602 | 5 | 5 | 10 | 5 |
| 20802 | 2 | 4 | 6 | 3 |
| 21502 | 5 | 2 | 7 | 3.5 |
| 21601 | 2 | 10 | 12 | 6 |
| 22003 | 2 | 2 | 4 | 2 |
| 22507 | 10 | 5 | 15 | 7.5 |
| 22704 | 10 | 2 | 12 | 6 |
| 23401 | 2 | 10 | 12 | 6 |
| 23422 | 2 | 2 | 4 | 2 |
| 24003 | 2 | 7 | 9 | 4.5 |
| 30103 | 2 | 4 | 6 | 3 |
| 30215 | 2 | 5 | 7 | 3.5 |
| 30234 | 2 | 2 | 4 | 2 |
| 30282 | 2 | 5 | 7 | 3.5 |
| 30304 | 2 | 7 | 9 | 4.5 |
| 30314 | 2 | 7 | 9 | 4.5 |
| 30905 | 10 | 10 | 20 | 10 |
| 40204 | 10 | 7 | 17 | 8.5 |
| 40212 | 2 | 5 | 7 | 3.5 |
| 40814 | 5 | 2 | 7 | 3.5 |
| 40830 | 10 | 4 | 14 | 7 |
| 43012 | 5 | 5 | 10 | 5 |
| 50119 | 2 | 4 | 6 | 3 |
| 50135 | 10 | 5 | 15 | 7.5 |
| 50144 | 5 | 7 | 12 | 6 |
| 50304 | 5 | 8 | 13 | 6.5 |
| 50408 | 5 | 10 | 15 | 7.5 |
| 50409 | 5 | 5 | 10 | 5 |
| 51001 | 2 | 6 | 8 | 4 |
| 51002 | 2 | 6 | 8 | 4 |
| 51502 | 5 | 7 | 12 | 6 |
| 52219 | 2 | 8 | 10 | 5 |
| 61901 | 5 | 9 | 14 | 7 |
| 61905 | 5 | 5 | 10 | 5 |
| 62101 | 2 | 8 | 10 | 5 |
| 62102 | 2 | 7 | 9 | 4.5 |

Tableau 3. (suite)

| Station | Courbe de tarage minimum | Courbe de tarage maximum | TOTAL | Cote moyenne |
|---------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------|
| 72301 | 2 | 8 | 10 | 5 |
| 73503 | 2 | 6 | 8 | 4 |
| 73801 | 2 | 8 | 10 | 5 |
| 74903 | 2 | 4 | 6 | 3 |
| 76601 | 2 | 6 | 8 | 4 |
| 80101 | 5 | 10 | 15 | 7.5 |
| 80104 | 2 | 2 | 4 | 2 |
| 80809 | 2 | 10 | 12 | 6 |
| 95003 | 2 | 10 | 12 | 6 |
| 103605 | 2 | 5 | 7 | 3.5 |
| 104001 | 2 | 7 | 9 | 4.5 |
| 104803 | 2 | 2 | 4 | 2 |

La courbe de tarage représente la relation graphique entre le niveau d'eau dans une section transversale de la rivière et le débit correspondant; la construction d'une courbe de tarage fiable suppose la présence de plusieurs observations niveau-débit correspondant à des conditions extrêmes. Ceci permet, en général, d'obtenir de bonnes extrapolations de la courbe. Les courbes de tarage doivent idéalement être recalibrées continuellement en raison de leur variation possible dans le temps. Ces variations sont dues à plusieurs facteurs tels que l'instabilité des fonds, les phénomènes d'érosion et de sédimentation, les changements du régime, la croissance des plantes et l'effet de glace. Cependant, le recalibrage des courbes de tarage n'est souvent pas effectué aussi fréquemment que nécessaire, largement à cause des contraintes budgétaires, et les extrapolations sont parfois entachées d'erreurs importantes. La figure 2 illustre les variations des courbes de tarage pour la station 030421 (l'Acadie à 3 km en amont du pont de l'autoroute 10). Chaque point de la courbe est identifié par deux nombres: le premier réfère au numéro du jaugeage correspondant et le deuxième indique l'année dans laquelle il a été effectué.

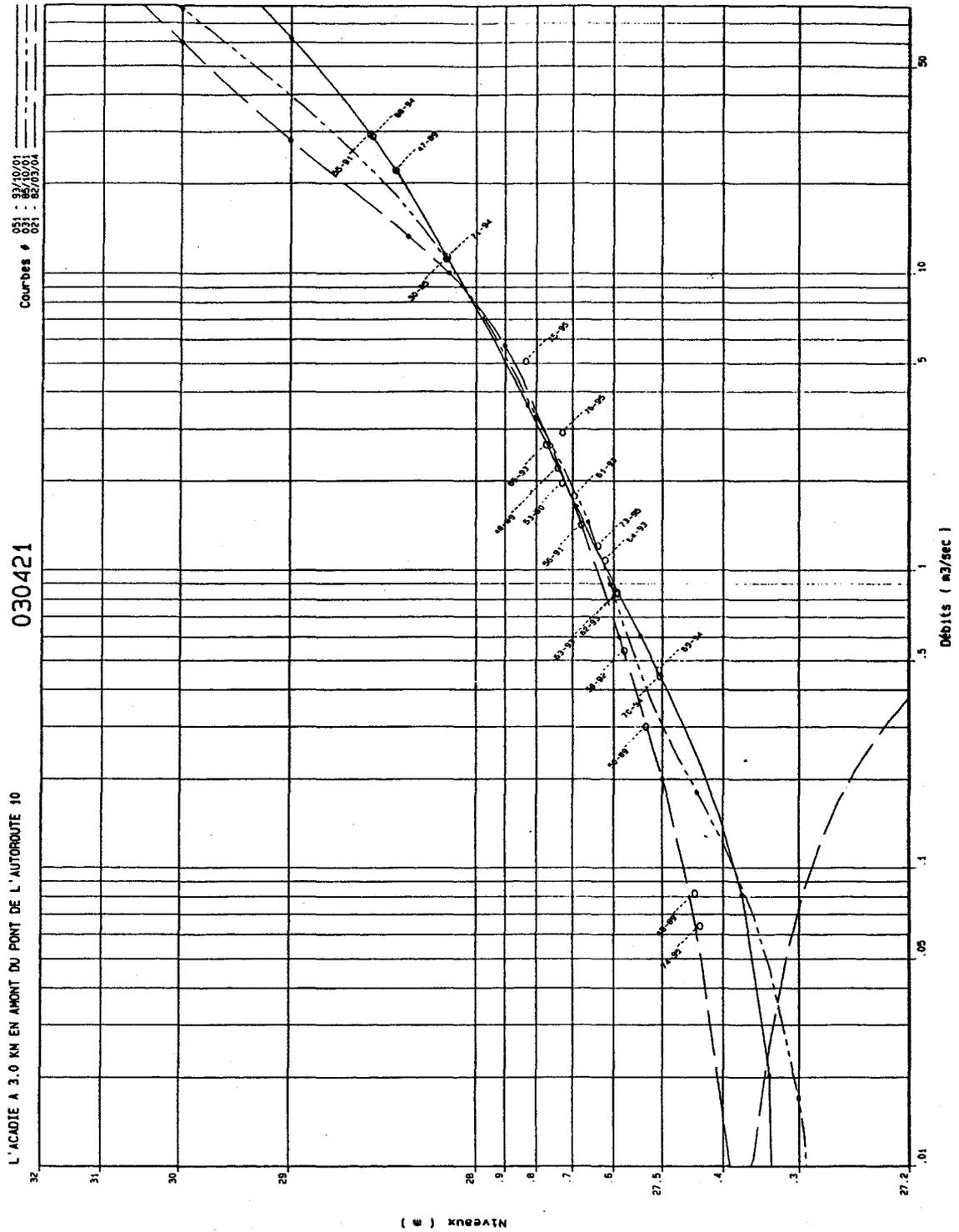


Figure 2. Courbe de tarage pour la station 030421

Il est important de souligner que l'effet de glace représente une contrainte avec laquelle il ne faut pas être trop rigide, sinon la majorité des stations risquent être écartées: ceci est justifié par le fait que l'estimation de l'erreur due à l'effet de glace est souvent marginale comparée à d'autres sources d'erreurs. Les régions agricoles couvrent une partie assez importante du Sud de la province et doivent être représentées dans la répartition finale du réseau sélectionné (une carte représentant les régions agricoles de la province du Québec est remise avec ce rapport). Cependant, il est délicat de choisir des stations dans ces régions en raison des changements de régimes causés par les activités d'irrigation et de drainage, et aux différentes structures de contrôle situées sur les rivières de ces bassins. Il est convenu qu'une station ne devrait pas être écartée automatiquement si elle est située dans une région agricole. En effet, si le régime a été stable durant la période d'enregistrement de la station et s'il n'y a pas de changements prévus pour le futur (dus aux activités agricoles), la série de données enregistrée à cette station sera de qualité adéquate pour l'étude des changements climatiques et de leurs impacts sur la ressource hydrique de la région.

L'étape suivante consiste à effectuer une évaluation individuelle de chacune des stations d'intérêt identifiées précédemment. La liste de stations est étendue pour inclure les 16 stations témoins identifiées par le MEFQ (Rasmussen *et al.*, 1995; Ouarda *et al.*, 1996a). Ces stations sont considérées comme très importantes par le MEFQ et par conséquent, doivent être absolument retenues lors du processus de rationalisation. La majorité de ces stations stratégiques sont utilisées pour le calcul des apports en eau et la surveillance des crues. Ces 16 stations témoins sont précédées d'un astérisque (*) dans la liste générale suivante:

Station 011201, Nouvelle: Station à rejeter. Le contrôle est très instable; il y a trop de sédiments et l'effet de glace est assez important.

***Station 020602, Dartmouth:** Excellente station pour le suivi des changements. Très bonne stabilité de contrôle et effet de glace. Absence presque totale d'urbanisation et d'agriculture (bassin à 95 % naturel).

Station 020802, Madeleine: La station offre une courbe de tarage de qualité insatisfaisante.

***Station 021601, Matane:** Station dont l'objectif est le suivi et la gestion de la rivière Matane. Le bassin est très contrôlé et le régime est très influencé.

***Station 022003, Rimouski:** C'est une très bonne station pour le suivi des changements climatiques. Cependant, il y a une petite probabilité qu'une étude de construction d'une mini centrale soit réalisée; ceci influencerait les débits de la rivière au niveau de la station.

Station 023401, Beaurivage: C'est une assez bonne station pour le suivi du climat. Cependant, l'effet de glace n'est pas excellent.

***Station 023402, Chaudière:** C'est une station quasi naturelle. Elle est influencée par le lac Mégantic. Située dans une région assez agricole (bassin de la Chaudière).

Station 023422, Famine: Les caractéristiques de la station sont assez mauvaises. À rejeter.

***Station 030103, Nicolet:** Station située dans une région agricole. Objectif: étude des inondations et de la pollution.

Station 030234, Eaton: Station très étudiée dans le cadre de la décennie hydrologique. Donc, a été révisée. Très bonne station, mais problème avec la courbe de tarage. Rivière très rapide donc difficile à jauger.

Station 030401, Richelieu: Draine une partie des États-Unis. Cette station peut être intéressante, bien que contrôlée (Lac Champlain, contrôle naturel) mais aussi régularisée. Les hydrologues d'Environnement Canada pourraient donner un avis à ce sujet.

***Station 030905, Châteauguay:** Station utilisée pour la prévision et la surveillance des crues et la gestion de l'eau à l'amont de Montréal.

***Station 040204, Rouge:** Régime influencé antérieurement.

Station 040810, Desert: Saisonnière.

Station 040814, Picanoc: Très bonne station mais dans une région agricole. On ne prévoit pas de développements futurs.

Station 040830, Gatineau: Bonne station. On ne prévoit pas de développements futurs.

Station 042103, Maganasipi: Assez bonne station pour le suivi des conditions climatiques.

***Station 043012, Kinojevis:** Assez bonne station pour le suivi des conditions climatiques mais assez proche de la station 042103. Cette station est située complètement en haut du bassin de l'Outaouais et a une importance majeure pour la gestion du bassin (temps réel).

Station 050119, Matawin: Assez bonne station pour le suivi des changements climatiques. Le seul problème risque d'être la qualité de la courbe de tarage.

Station 050135, Croche: Bonne station pour le suivi du climat. La qualité de la courbe de tarage est moyenne.

Station 050144, Vermillon: Très bonne qualité pour corriger l'effet de glace et la stabilité de contrôle. Existence d'un vieux barrage d'Hydro-Québec à l'amont.

***Station 050408, Sainte-Anne:** Située à l'aval du barrage de la Chute-Panet.

Station 050409, Sainte-Anne: Très bonne station pour le suivi des changements climatiques. Le seul problème risque d'être la qualité de la courbe de tarage.

***Station 051001, Montmorency:** C'est la seule station sur la rivière Montmorency. Existence de beaucoup de déboisement dans le bassin. Il y a un risque que la station soit déplacée vers l'amont pour aider au niveau des prévisions des crues.

Station 051002, Ruisseau des Eaux volées: Intérêt limité: très petit bassin expérimental (3,94km²).

Station 051011, Ruisseau Laflamme: Cette station est située à la sortie du lac Laflamme (forêt Montmorency). Représente une bonne station avec des bonnes mesures de débits même durant l'hiver. Ce bassin a été très bien suivi lors de recherches antérieures. Cependant, la surface de drainage est très petite (0,69 km²). L'existence d'une station climatique dans le même secteur représente aussi un atout.

**Station 051502, Malbaie:* Cette station est située sur une rivière assez importante. Manque de stations dans le secteur qu'elle représente. Assez stable.

**Station 052219, L'Assomption:* Très bonne stabilité de contrôle et effet de glace mais, bassin agricole et présence d'une prise d'eau. C'est une station primordiale pour la rivière l'Assomption.

Station 061502, Métabetchouane: C'est une station intéressante pour le suivi des changements climatiques à cause de sa position (répartition spatiale des stations). Correction de l'effet de glace douteuse.

**Station 061901, Chamouchouane:* C'est l'une des meilleures stations du réseau mais, Hydro-Québec l'étudie pour des développements hydroélectriques futurs possibles.

Station 061905, Chamouchouane: Cette station a été mise en place pour les études d'Hydro-Québec et d'Alcan. Elle est située plus au nord que la station 061502. Possibilité de construction de barrage par Hydro-Québec.

Station 062101, Mistassibi: Très bonne station.

Station 062102, Mistassini: Très bonne station. Il faudrait garder une station parmi les 3 stations suivantes pour le suivi des changements climatiques: 061502, 061905, et 062102.

**Station 072301, Moisie:* L'effet de glace n'est pas excellent. Il y a une possibilité, bien que très lointaine, de construction d'un grand barrage à long terme. L'étude est déjà complétée mais la construction de l'ouvrage est contesté.

Station 073503, Magpie: Très bonne stabilité de contrôle et effet de glace. Courte série.

**Station 073801, Romaine:* Très bonne station. Un côté du bassin est dans le Labrador (bassin limitrophe). Il faudrait une entente avec Terre-Neuve.

**Station 080101, Harricana:* Excellente station. Rien de prévu dans le futur.

Station 080707, Bell: Cette station pourrait être intéressante mais, ne sera pas considérée à cause des développements futurs qui y sont planifiés.

Station 081002, de Rupert: Hydro-Québec l'étudie pour de gros développements hydroélectriques futurs. Étant donné que la probabilité de ces développements est assez grande, la station devrait être écartée.

Station 093801, Grande rivière de la Baleine: Développements hydroélectriques futurs.

Station 094206, Petite rivière de la Baleine et station 094207, Boutin: Ces stations représentent deux sorties du même lac. En plus, elles seront affectées par le projet de la Petite Baleine. Elles devraient être écartées.

Station 095003, Lac des Loups Marins: Très bonne stabilité de contrôle et effet de glace. Grand bassin. Très bonne station pour le suivi des changements climatiques.

Station 103605, Aux Mélézes: Bonne station mais, la qualité inférieure de l'effet de glace et de la courbe de tarage. Peut être retenue.

Station 103702, Caniapiscu: Station à rejeter. Il y a eu une dérivation d'une grande partie du bassin (38 300 km²) vers la Grande Rivière en octobre 1981.

Station 104001, À la Baleine: Très bonne station. Cependant la qualité de l'effet de glace n'est pas exceptionnelle.

Station 104803, George: Bonne station pour le suivi du climat. La qualité de la courbe de tarage n'est pas excellente.

Partant de la liste de 30 stations du tableau 1 et compte tenu des considérations précédemment présentées et du besoin de sélectionner une liste de stations représentant une bonne répartition spatiale, une liste de 19 stations a été sélectionnée et est présentée dans le tableau 4. Cette liste inclut 15 stations du tableau 1 et 4 stations additionnelles discutées ci-dessus. Il a été décidé d'enlever la station 020802 (Madeleine) surtout à cause de la qualité médiocre de sa courbe de tarage et de la remplacer par la station 020602 (Dartmouth) dont le lit de roche solide offre un bon contrôle. Les stations 072301 (Moisie) et 073801 (Romaine) de la région 7 représentent toutes les deux des stations adéquates pour le suivi des changements climatiques. Dans un premier temps, elles sont toutes les deux conservées. Cependant, si les contraintes budgétaires ou la taille du réseau de référence imposent l'élimination de l'une de ces deux stations, il est convenu que la station Moisie sera écartée surtout en raison des projets planifiés par Hydro-Québec. Il est décidé de ne pas garder la station 051011 (Laflamme) dans le cadre du réseau de suivi climatique surtout à cause de la petite taille du bassin qu'elle draine et de la courte série qui y est disponible (15 ans). Cette station sera cependant conservée dans le cadre d'autres objectifs tels que le réseau de suivi écologique EMAN (*Ecological Monitoring and Assessment Network*, voir Roberts-Pichette, 1994).

Tableau 4. Liste de stations retenues dans le cadre du réseau de suivi des changements climatiques de la province de Québec.

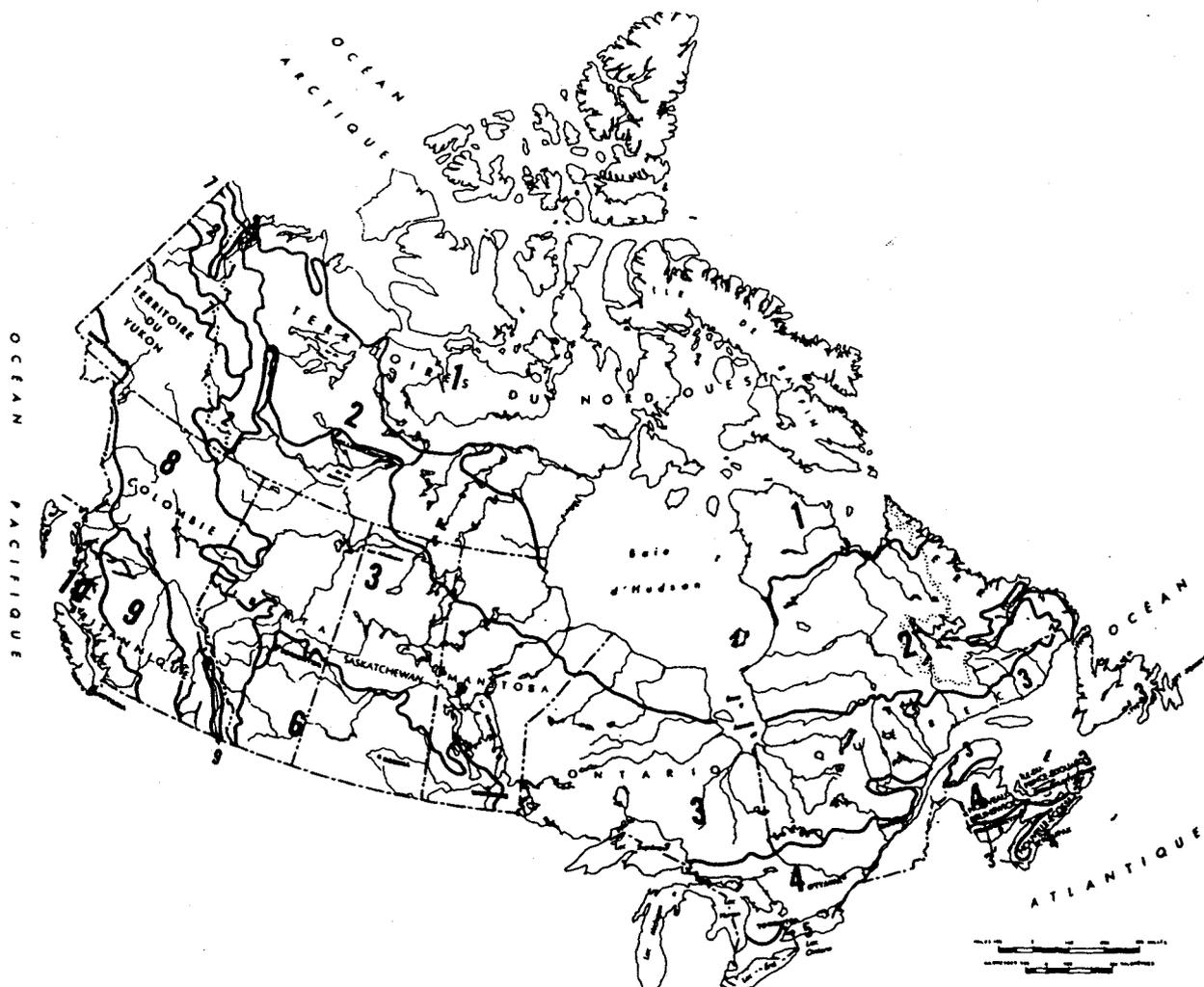
| No. Provincial | No. Fédéral | Nom de la station | Financement* | Exploitant | Surface (Km ²) | Début d'enreg. | Q Moyen | Télémetrie [#] |
|----------------|-------------|----------------------|--------------|------------|----------------------------|----------------|---------|-------------------------|
| 022003 | 02QA002 | Rimouski | A | MEFQ | 1610 | 1962 | 31.5 | 1 |
| 072301 | 02UC002 | Moisie | A | MEFQ | 19000 | 1965 | 429 | 1 |
| 073801 | 02VC001 | Romaine | A | MEFQ | 13000 | 1956 | 298 | 1 |
| 080101 | 04NA001 | Harricana | A | MEFQ | 3680 | 1933 | 59.5 | 0 |
| 095003 | 03FA003 | Lac des Loups Marins | A | MEFQ | 8390 | 1974 | 192 | 1 |
| 020602 | 01BH005 | Darmouth | B | MEFQ | 645 | 1970 | 14.6 | 1 |
| 023401 | 02PJ007 | Beaurivage | B | MEFQ | 704 | 1925 | 14.4 | 1 |
| 030234 | 02OE027 | Eaton | B | MEFQ | 642 | 1953 | 13.1 | 1 |
| 040814 | 02LH004 | Picanoc | B | MEFQ | 1290 | 1926 | 18.6 | 0 |
| 040830 | 02LG005 | Gatineau | B | MEFQ | 6840 | 1974 | 127 | 1 |
| 050119 | 02NF003 | Matawin | B | MEFQ | 1390 | 1931 | 24.1 | 0 |
| 050135 | 02NE011 | Croche | B | MEFQ | 1570 | 1965 | 29.5 | 1 |
| 050409 | 02PB006 | Sainte-Anne | B | MEFQ | 642 | 1965 | 19 | 0 |
| 061901 | 02RF001 | Chamouchouane | B | MEFQ | 15300 | 1915 | 298 | 1 |
| 062101 | 02RD002 | Mistassibi | B | MEFQ | 9320 | 1953 | 240 | 1 |
| 103605 | 03KC004 | Aux Mélèzes | B | MEFQ | 42700 | 1965 | 615 | 1 |
| 104001 | 03MB002 | A la Baleine | B | MEFQ | 29800 | 1956 | 515 | 1 |
| 104803 | 03MD001 | George | B | MEFQ | 24200 | 1975 | 520 | 1 |
| 061502 | 02RG005 | Metabetchouane | C | MEFQ | 2280 | 1964 | 46.4 | 0 |

* Voir Section 4.1 pour détails.

la valeur 1 indique la disponibilité de radio transmission des données, la valeur 0 indique le contraire.

La région hydrographique 2 (figure 1) est une région principalement agricole. Trois stations sont conservées dans cette région. Cependant, la station 023422 (Famine) ne fera pas partie de ces stations dû à son mauvais contrôle. Dans la région 4, la station 043012 (Kinojevis) est abandonnée aux dépens de la station 040830 (Gatineau). En effet, la station Kinojevis est très proche de la station 080101 (Harricana) qui est retenue et est située dans un secteur agricole, alors que la station Gatineau est stratégiquement proche de Montréal et n'est pas affectée par les activités agricoles. Dans la région 5, on a procédé à une comparaison des deux stations 050408 et 050409, toutes deux sur la rivière Sainte-Anne: la station 050408 est influencée sur une base journalière (une usine de papier influence le débit) et draine une surface de 1 550 km² alors que la station 050409 est naturelle et draine une surface de 642 km². Cette dernière est située à l'amont de la station 050408 et semble être plus adéquate pour l'objectif de cette étude et a donc été retenue. Il est finalement décidé de garder *a priori* les stations 050119, 050135 et 050409. Dans la région 6, trois stations ont été identifiées pour inclusion dans le réseau hydrométrique de suivi des changements climatiques. Certaines questions demeurent concernant la station 061901 (Chamouchouane) qui semble *a priori* être de bonne qualité mais qui risque d'être affectée par les projets futurs d'Hydro-Québec. Dans le cas où cette station semble être sérieusement menacée par ces nouveaux développements, la station 061905 pourrait lui être substituée. Dans la région 9, il est proposé d'ajouter la station 095003 (lac des Loups Marins) dans le réseau. Cette station a reçu une évaluation positive mais est caractérisée par une série relativement courte: les enregistrements ont débuté en 1974. Dans la région 10, la station 104803 (George) caractérisée par un bon effet de glace est ajoutée à la liste. Deux autres stations 103605 (Aux Mélézes) et 104001 (À la Baleine) font partie de la liste initiale. Cependant, la configuration finale du réseau de suivi des changements climatiques ne contiendra probablement qu'une de ces deux stations. Notre priorité se dirige alors vers la station 103605 à cause de son emplacement géographique.

La liste de 19 stations présentée dans le tableau 4 permet donc globalement de représenter toutes les régions géographiques et écoclimatiques de la province de Québec. La figure 3 représente la carte des différentes régions écoclimatiques du Canada (Environnement Canada, 1989). Cette carte indique que la province de Québec est partagée entre quatre régions écoclimatiques: arctique, subarctique, boréale et tempérée froide.



Légende:

- | | |
|---------------------|---------------------------|
| 1. Arctique | 6. Prairies |
| 2. Subarctique | 7. Cordillère subarctique |
| 3. Boréale | 8. Cordillère |
| 4. Tempérée froide | 9. Cordillère intérieure |
| 5. Tempérée modérée | 10. Cordillère pacifique |

Figure 3. Carte des régions écoclimatiques du Canada (Environnement Canada, 1989)

Toutes les régions hydrographiques de la province de Québec sont relativement bien représentées, sauf la région 1 (sud de la Gaspésie) où aucune station n'a été retenue. Dans cette région, les rivières sont typiquement larges, peu profondes, et mobiles (très instables) à cause de la nature de leurs lits souvent sableux ou en gravier. Cependant, la région 2 (nord de la Gaspésie et bas Saint-Laurent), géographiquement proche de la région 1 et caractérisée par des stations relativement plus stables, est bien représentée. La coordination avec le groupe de travail des provinces maritimes, incluant la province du Nouveau-Brunswick, peut assurer que la partie nord de cette province, caractérisée par des stations plus stables, soit bien représentée. Ainsi, quelques stations pourraient être considérées dans la région de la rivière de la Restigouche, par exemple. La région 3 avec une seule station n'est pas très bien représentée non plus. Cette région représente une surface relativement petite et est caractérisée par des niveaux d'urbanisation et de développement agricole très élevés. La pollution agricole est aussi un facteur important dans les rivières de cette région. La station Eaton qu'on a gardé dans cette région est une station qui a été très bien étudiée dans le passé dans le cadre de la décennie hydrologique.

Finalement, il faut noter que 6 des 19 stations sélectionnées figurent dans la liste des 15 stations stratégiques que le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec a spécifié comme stations à ne pas éliminer dans le cadre de l'étude de rationalisation du réseau hydrométrique du Québec. Ces stations sont les suivantes: 020602, 022003, 061901, 072301, 073801, et 080101. Les prochaines étapes du travail présenté dans ce rapport consistent à tracer les limites des bassins drainés par les 19 stations sélectionnées et à superposer les réseaux de stations hydrométriques et des stations climatiques sélectionnées pour le suivi des changements climatiques. Ces étapes seront effectuées par nos collègues d'Environnement Canada et seront d'une grande importance lors de l'intégration des stations sélectionnées dans les différentes provinces pour la détermination du réseau national de référence.

5 Analyse bayésienne des séries choisies

Le but du travail présenté dans cette section est de relier l'étude effectuée dans le cadre de ce projet aux travaux futurs de suivi des changements climatiques. Ainsi dès que le réseau national de référence sera identifié, on pourra commencer à analyser les données en vue de l'étude des changements climatiques. L'analyse bayésienne que nous proposons représente un premier pas dans l'évaluation du contenu d'information (concernant les changements climatiques) de ce groupe de stations et de la capacité de ce réseau à fournir un bilan des changements contenus dans le signal hydrologique déjà enregistré dans le passé. D'autre part, en étudiant le comportement hydrologique des bassins sous des conditions climatiques assez bien connues, on espère pouvoir prévoir l'évolution de ces bassins dans le cadre des changements climatiques anticipés.

5.1 Bases théoriques

La procédure bayésienne proposée par Lee et Heghenian (1977) et généralisée par Bernier (1994) est suggérée pour détecter les changements de la moyenne dans les séries de données. En partant de l'hypothèse qu'un changement de moyenne est effectivement présent dans la série, la procédure calcule la probabilité que ce changement survienne dans chaque période, et détermine la date t pour laquelle la probabilité de réalisation du changement est maximale. Les bases théoriques de la méthode sont présentées brièvement dans cette section. Pour une référence complète à la méthode et ses hypothèses, le lecteur est référé à Lee et Heghenian (1977), Bernier (1994) et Perreault *et al.* (1996a).

Si l'on fait l'hypothèse qu'aucune information n'est disponible *a priori*, on considère une série de n valeurs de la variable aléatoire X : X_1, X_2, \dots, X_n correspondant aux observations pour différentes valeurs du temps. On suppose que la série des n valeurs de la variable aléatoire est composée de deux parties dont les moyennes respectives sont μ et $\mu + \delta$. Notre objectif est de

dégager des conclusions concernant τ and δ , respectivement la date et le niveau de changement de la moyenne. Un modèle représentant la structure de la séquence X_1, X_2, \dots, X_n est donné par:

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i, & i = 1, 2, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i, & i = \tau + 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

où ε_i , ($i = 1, \dots, n$), sont indépendants et normalement distribués avec une moyenne nulle et une variance constante σ^2 . Ce modèle suppose qu'aucun changement de la variance n'est présent.

En faisant certaines hypothèses sur les distributions non informatives *a priori* des paramètres indépendants τ, μ, δ et σ du modèle (1), Lee et Heghenian, (1977) donnent la fonction de probabilité *a posteriori* de τ :

$$f(\tau | x_1, \dots, x_n) \propto \left[\frac{n}{\tau(n-\tau)} \right]^{1/2} [R(\tau)]^{-(n-2)/2}, \quad \tau \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (2)$$

où:

$$R(\tau) = \left[\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_{\tau})^2 + \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2 \right]^{-1} \quad (3)$$

et \bar{x}_{τ} , $\bar{x}_{n-\tau}$ et \bar{x}_n représentent respectivement les moyennes des premières τ observations, des dernières $n - \tau$ observations et de la série entière.

L'examen de la distribution discrète $f(\tau | x_1, \dots, x_n)$ nous permet d'identifier la date correspondant à la probabilité maximum de changement de la moyenne. Une attention particulière doit être donnée à l'interprétation des résultats pour les dates τ ayant lieu vers le début ou la fin de la période d'enregistrement ($\tau = 1, 2, 3$, or $n-3, n-2, n-1$) étant donné que le changement de moyenne est estimé en utilisant un nombre limité d'observations. La distribution *a posteriori* de δ peut être utilisée pour estimer le niveau de changement de la moyenne. Lee et Heghenian (1977) ont démontré que la distribution conditionnelle *a posteriori* $f(\delta | \tau, x_1, \dots, x_n)$ de δ , étant donné τ , est une distribution non centrale de Student avec une moyenne $\mu_{\tau}(\delta)$, une variance $\sigma_{\tau}^2(\delta)$ et $(n-2)$ degrés de liberté. Une expression pratique de $f(\delta | \tau, x_1, \dots, x_n)$ basée sur Epstein (1985) est donnée par:

$$f(\delta | \tau, x_1, \dots, x_n) = \frac{(n-4)^{-1/2}}{\sigma_\tau(\delta) B\left(\frac{1}{2}, \frac{n-2}{2}\right)} \left[1 + \frac{(\delta - \mu_\tau(\delta))^2}{(n-4)\sigma_\tau^2(\delta)} \right]^{-\frac{n-1}{2}} \quad (4)$$

où $B(x, y)$ est la fonction bêta définie par $B(x, y) = \Gamma(x)\Gamma(y)/\Gamma(x+y)$, et $\Gamma(x) = (x-1)!$ indique la fonction gamma. Des estimations de la moyenne et de la variance de la distribution $f(\delta | \tau, x_1, \dots, x_n)$ sont données par:

$$\hat{\mu}_\tau(\delta) = \bar{x}_{n-\tau} - \bar{x}_\tau \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_\tau^2(\delta) = \frac{R(\tau)}{(n-\tau)(n-2)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2 \quad (5)$$

Le niveau de signification du degré de changement δ peut être estimé en utilisant l'intervalle de crédibilité proposé par Berger (1985). Ceci nous permet d'examiner si la valeur spécifique $\delta_0 = 0$, représentant l'hypothèse d'absence de changement de la moyenne, est crédible. Pour une référence détaillée au développement de l'expression de l'intervalle de crédibilité $C_{1-\alpha}(\delta)$, le lecteur est référé à Berger (1985) ou Perreault *et al.* (1996a).

5.2 Application de la méthode

La procédure présentée ci-dessus a été appliquée aux 19 stations retenues dans le cadre de cette étude. Les données utilisées dans cette analyse sont les débits moyens annuels pour les stations sélectionnées et sont extraites de la base de données HYDAT (version 4.94) (Environnement Canada, 1996). Cette analyse nous a permis en particulier de déterminer la quantité d'information réellement disponible pour chacune des stations choisies. En effet pour plusieurs stations, des données manquantes empêchent le calcul des débits moyens annuels pour certaines années et rendent l'étude impossible pour ces années. Ainsi, des "trous" d'information sont créés dans les séries. La procédure est programmée pour interpoler les valeurs des probabilités pour les années manquantes et une attention particulière doit être donnée à l'interprétation des résultats pour ces années, ainsi que pour les limites de la période d'enregistrement. Ainsi pour 8 stations, on obtient des périodes de données manquantes au milieu de la série.

Ces stations sont:

| Station | Années |
|---------|-----------------------------|
| 040814 | 1931 à 1975 |
| 050119 | 1940 à 1941, 1943, et 1972 |
| 062101 | 1962 |
| 072301 | 1967 et 1992 |
| 073801 | 1960 |
| 103605 | 1982 à 1983, et 1991 à 1992 |
| 104001 | 1956 à 1962 |
| 104803 | 1988 et 1990 |

Il est important de mentionner que la reconstitution de ces données manquantes est possible, mais affecte la qualité globale de la série.

Les graphiques des résultats pour toutes les stations retenues sont présentés dans l'annexe A. Pour chaque station, deux graphiques sont générés représentant les fonctions de probabilité *a posteriori* de la date de changement et de l'amplitude de la rupture (la probabilité de changement versus la date d'enregistrement et versus le niveau de changement). Dans ces graphiques, τ (Tau) représente la date du changement et δ (Delta) indique le niveau de changement. Certaines indications assez significatives de non-stationnarité ont été détectées individuellement dans certaines des séries de débits moyens annuels. Ainsi pour la station 072301, l'année 1984 représente la date la plus probable d'occurrence d'une non-stationnarité. Des dates voisines ont aussi été détectées pour d'autres stations: l'année 1985 pour les stations 073801, 104001 et 104803, et l'année 1983 pour la station 020602. L'analyse a aussi démontré qu'en supposant que la série de la station 080101 admet effectivement une non-stationnarité de la moyenne, la date la plus probable du changement est 1942. Pour la station 050135, cette date correspond à 1977. Il est difficile de conclure à ce niveau si une certaine cohérence régionale existe au niveau de la date la plus probable du changement. Rappelons que Perreault *et al.* (1996b) ont identifié l'année 1984 comme étant l'année la plus probable pour un changement de la moyenne des apports énergétiques agrégés du parc d'équipements d'Hydro-Québec. Pour les stations 022003, 030234 et 062101, la distribution *a posteriori* de l'amplitude de la rupture est bimodale ce qui pourrait indiquer la présence d'un double changement de la moyenne.

Il est extrêmement important de souligner qu'on ne peut pas conclure à un changement climatique, dans une station donnée, juste sur la base de l'application d'un test singulier. L'exercice

effectué dans cette section est tout simplement destiné à faire un premier pas dans la direction de l'analyse des séries des stations sélectionnées. Même dans le cas où les résultats semblent indiquer avec une certaine certitude qu'un "changement" s'est produit durant une certaine période, il faudrait valider les résultats avec d'autres tests, vérifier l'existence d'un tel changement dans d'autres séries, expliquer les causes du phénomène observé, et essayer de répondre aux questions concernant la cyclicité et la fréquence de ce phénomène. On réitère, à l'occasion, notre conviction que l'étude et la détection des changements climatiques doivent se faire sur une base régionale rigoureuse plutôt que sur la base de séries de données provenant de différents sites et étudiées indépendamment les unes des autres.

6 Conclusions

Loaiciga *et al.* (1996) ont démontré que le cycle hydrologique joue un rôle clé dans le bilan du système surface - atmosphère de la terre. Des changements relativement peu prononcés dans les températures et les précipitations peuvent avoir des effets importants et souvent non linéaires sur le ruissellement et le niveau des lacs, surtout dans les régions arides et semi-arides (CPCC et PCCEG, 1995). Ceci aurait par conséquent des répercussions sur d'autres facteurs tels que la demande en eau et le taux d'évapotranspiration. Des études canadiennes et américaines concluent que le niveau des Grands Lacs risque de baisser ce qui aura des conséquences pour la navigation et la production hydroélectrique (CPCC et PCCEG, 1995). Loaiciga *et al.* (1996) prédisent que dans les conditions de réchauffement actuelles et pour certaines régions des États-Unis, on observera des saisons d'hiver plus courtes, des crues plus importantes, des saisons d'été plus sèches et, en général, une variabilité hydrologique plus importante.

L'étude présentée dans ce rapport a permis d'identifier une liste de stations hydrométriques qui semblent plus adaptées au suivi des changements climatiques et de leurs impacts sur le cycle hydrologique. La capacité des séries de débits de fournir une indication des changements climatiques dépend de l'absence d'autres "bruits" qui peuvent diminuer ou masquer le signal climatique. Ainsi, les stations retenues doivent satisfaire certaines conditions assez rigoureuses pour assurer une qualité adéquate des données hydrométriques recueillies. Pour ce faire, on s'est basé essentiellement sur la série de critères de sélection du réseau hydrométrique national de référence, tout en apportant des nuances qui reflètent la réalité et les besoins de la province de Québec. Une condition additionnelle a été ajoutée par exemple pour favoriser les stations drainant de grands bassins versants. Ceci nous permet d'intégrer les phénomènes de pente et de rester à l'abri des variations microclimatiques et des imprévus naturels et induits par les humains. Il est aussi décidé de conserver des stations dans les régions agricoles développées. En effet, le facteur le plus important est que le niveau de développement et que les pratiques d'utilisation de la terre soient restés constants durant une longue période, et qu'il n'y ait pas de développements futurs importants qui soient prévus. Il faut cependant s'assurer de bien documenter le nombre de

structures de contrôle qui existent et d'identifier comment elles affectent le régime hydrologique tant au niveau des crues qu'au niveau des débits de base.

Enfin, il est important de souligner la subjectivité de certains des critères utilisés, tel que le critère que moins de 10% de la surface du bassin soit développée ou modifiée par rapport aux conditions naturelles. Les stations présentées dans ce rapport représentent le résultat d'un premier tamisage (*screening*) et des modifications pourront être apportées à la suite de la compilation de toutes les stations sélectionnées par les groupes des différentes provinces, et à la superposition des réseaux de stations hydrométriques et climatiques. Une expansion possible des critères de sélection pourrait être envisagée durant la prochaine étape de ce projet national.

7 Bibliographie

- Ashfield, D. and R. Phinney (1992). Criteria for identifying streamflow stations applicable to climate change studies *in* Proceedings of the NHRI Workshop, no. 8: Using hydrometric data to detect and monitor climatic change, Environnement Canada, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan: 165-180
- Berger, J.O. (1985). Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis. Berlin, Springer.
- Bernier, J. (1994). Statistical detection of changes in geophysical series *in* Engineering Risk in Natural Resources Management. Duckstein L. and E. Parent (eds.), NATO Advanced Studies Institute Series, Series E - Vol.275, Kluwer: 159-176.
- Boden, T. A., D. P. Kaiser, R. J. Sepanski and F. W. Stoss (1994). Trends 93: A compendium of data on global change. ORNL/CDIAC-65, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA.
- Burn, D.H. and I.C. Goulter (1991). An approach to the rationalization of streamflow data collection networks. *J. Hydrol.*, vol. 122: 71-91.
- Cavadias, G. S. (1992). A survey of current approaches to modelling of hydrological time-series with respect to climate variability and change. Report prepared for the World Climate Programme - Water - Project A2, WMO/TD-No. 534, 50 pp.
- Cavadias, G. S. (1995). Mission Report: Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability and change. WCP-Water - Project A2, 39 pp.
- C.P.C.C. (Conseil du Programme Climatologique Canadien) et P.C.C.E.G. (Programme Canadien des Changements à l'Échelle du Globe), (1995). Répercussions pour le Canada des rapports d'évaluation du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat - Tour d'horizon, *Delta*, 6(3): 10-20
- Easterling, W. E. and R. W. Kates (1995). Indexes of leading climate indicators for impact assessment. *Climatic Change*, 31: 623-648.
- Environnement Canada (1989). Régions écoclimatiques du Canada. Direction du développement durable, série de classification écologique du territoire, no 23, 118 pp.
- Environnement Canada (1995). Le changement climatique. Série nationale d'indicateurs environnementaux. *Bulletin EDE*, service de la Conservation de l'environnement, (95)2, 10 pp.
- Environnement Canada (1996). HYDAT CD ROM: Données sur les eaux de surface et sur les sédiments jusqu'en 1994. ROM 2245.
- Epstein, E.S. (1985). Statistical inference and prediction in climatology: A Bayesian approach, *Meteorological Monographs*. American Meteorological Society.
- Grotch, S. L. (1991) The use of GCM to predict regional climatic change. *J. Clim.*, 4(3): 286-303

- Gullett, D. W. et W. R. Skinner (1992). L'état du climat au Canada: les variations de la température au Canada 1895-1991. Rapport sur l'état de l'environnement no 92-2, Environnement Canada, 36 pp.
- Hubert, P., J.P. Carbonnel et A. Chaouche (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques: application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110: 349-367.
- I.G.L.L.B. (International Great Lakes Levels Board), (1973). Regulation of Great Lakes Water Levels, Appendix B, Lake Regulation, no. 3, 16 pp.
- I.P.C.C. (International Panel on Climate Change), (1995). Hydrology and freshwater ecology - Chapter 10: Review Draft. IPCC Working Group II, 65 pp.
- Kite, G. W. and K. D. Harvey (eds.), (1992). Proceedings of the NHRI Workshop, no. 8: Using hydrometric data to detect and monitor climatic change. Environnement Canada, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan, 247 pp.
- Lawford, R. G. (1992). Hydrological indicators of climatic change: Issue or opportunity ? *in* Proceedings of the NHRI Workshop, no. 8: Using hydrometric data to detect and monitor climatic change. Environnement Canada, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan: 9-20
- Lee, A.S.F. and S. M. Heghinian (1977). A Shift of the Mean Level in a Sequence of Independent Normal Random Variables: A Bayesian Approach. *Technometrics*, 19(4), 503-506.
- Loaiciga, H. A., J. B. Valdes, R. Vogel, J. Garvey and H. Schwarz (1996). Global warming and the hydrological cycle. *J. Hydrol.*, 174: 83-127.
- M.E.F.Q. (Ministère de l'Environnement et de la Faune), (1994). Annuaire hydrologique 1992-1993. Direction du milieu hydrique, AH-34, Québec, 148 pp.
- Mitosek, H. T. (1992). Occurrence of climate variability and change within the hydrological time series: A statistical approach. Report prepared for the World Climate Programme - Project A2, CP-92-05, IIASA, Laxenburg, Austria, 167 pp.
- Morin, G. et M. Slivitzky (1992). Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique: Le cas de la rivière Moisie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 5(2): 179-195.
- Ouarda, T. B.M.J., P. F. Rasmussen and B. Bobée (1996a). On the rational reduction of hydrometric networks. Proceedings of the 16th Annual American Geophysical Union, Hydrology Days, H. Morel-Seytoux (ed.), Hydrology Days Publications, California: 383-394.
- Ouarda, T. B.M.J., P. F. Rasmussen, B. Bobée and J. Morin (1996b). Ontario hydrometric network rationalisation: Statistical considerations. Chaire industrielle en Hydrologie statistique, INRS-Eau rapport de recherche no R-470, 75 pp.
- Perreault, L., M. Haché and M. Slivitzky (1996a). Shifts in average precipitation and runoff over Eastern Canada and U.S. during the twentieth century. *Climatic Change*, 19 pp. (soumis).
- Perreault, L., M. Haché et B. Bobée (1996b). Analyse statistique des séries d'apports énergétiques. Rapport final du projet C2 de la Chaire industrielle en Hydrologie statistique. INRS-Eau, rapport de recherche no R-474, 183 pp.
- Pilon, P. J., T.J. Day, T. R. Yuzyk and R. A. Hale (1996). Challenges facing surface water monitoring in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 21(2): 157-164.

- Quinn, F. H. (1982). Trends and extremes of Lake Erie water supplies *in* International Symposium on Hydrometeorology, AWRA: 267-270.
- Quinn, F. H. and B. Guerra (1986). Current perspectives on the Lake Erie water balance. *J. Great Lakes Res.*, 12(2): 109-116.
- Rasmussen, P.F. and B. Bobée (1993). Detection of trend in annual flood series. NATO Advanced Study Institute *on* Engineering Risk and Reliability in a Changing Physical Environment, Deauville, France, May 24 - June 4.
- Rasmussen, P.F., T. B.M.J. Ouarda et B. Bobée (1995). Méthodologie de rationalisation du réseau hydrométrique du Québec. Chaire industrielle en Hydrologie statistique. INRS-Eau, rapport de recherche no R-456, 99 pp.
- Roberts-Pichette, P. (1994). Canada's ecosystem monitoring and assessment initiative: Building a network of ecological science centres. *Northern Perspectives*, 22(1).
- Salas, J.D. and D.C. Boes (1980). Shifting level modelling of hydrologic series. *Advances in Water Resources*, vol. 3.
- Slack, J. R. and J. M. Landwehr (1992). Hydro-Climatic Data Network (HCDN): A U. S. Geological Survey streamflow data set for the United States for the study of climate variations, 1874-1988. U. S. Geological Survey, Open-File Report 92-129, Reston, Virginia, 171 pp.
- Slivitzky, M. and L. Mathier (1994). Climatic changes during the 20th century on the Laurentian Great Lakes and their impacts on hydrologic regime *in* Engineering Risk in Natural Resources Management, L. Duckstein and E. Parent (eds.), NATO ASI Series E, Vol. 275, Kluwer: 235-251.
- Solow, A.R. (1988). A Bayesian approach to statistical inference about climatic change. *J. of Climate*, (1)5: 512-521.
- Srikanthan, R., T.A. McMahon and J.L. Irish (1983). Time series analysis of annual flows of Australian streams. *J. of Hydrology*, 66:213-226.
- Srikanthan, R. and B.J. Stewart (1991). Analysis of maximum daily rainfall with regard to climatic change. International Hydrology and Water Resources Symposium, Perth, 2-4 October.
- Villeneuve, J.P., B. Bobée, H. St-Martin et M. Slivitzky (1973). Méthodologie de rationalisation des réseaux hydrométriques. *Bulletin des Sciences Hydrologiques*, XVIII, (4)12: 459-471.
- W.M.O. (World Meteorological Organization) (1966). Climatic change. Technical Note, no. 79, WMO no. 195, TP 100.
- W.M.O. (World Meteorological Organization) (1987). Water resources and climatic change: Sensitivity of water-resource systems to climate change. WCAP-4, WMO/TD - no. 247.
- W.M.O. (World Meteorological Organization) (1988). Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability and change. World Climate Program, WCAP-3, WMO/TD - no. 224.

ANNEXE A

RÉSULTATS DE LA PROCÉDURE BAYÉSIENNE

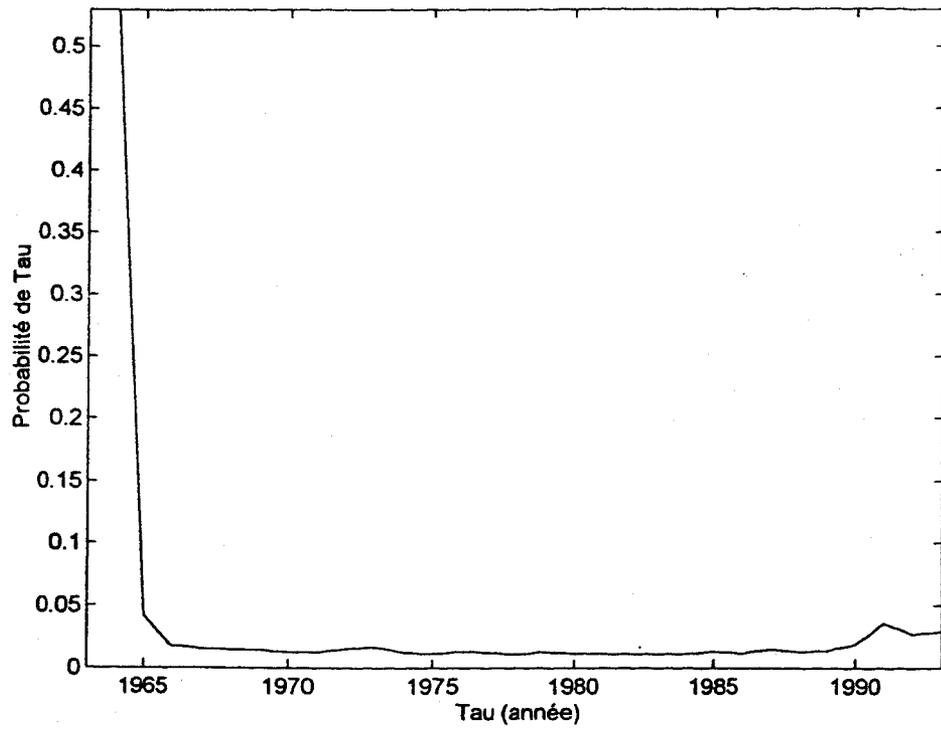


Figure A1.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02QA002

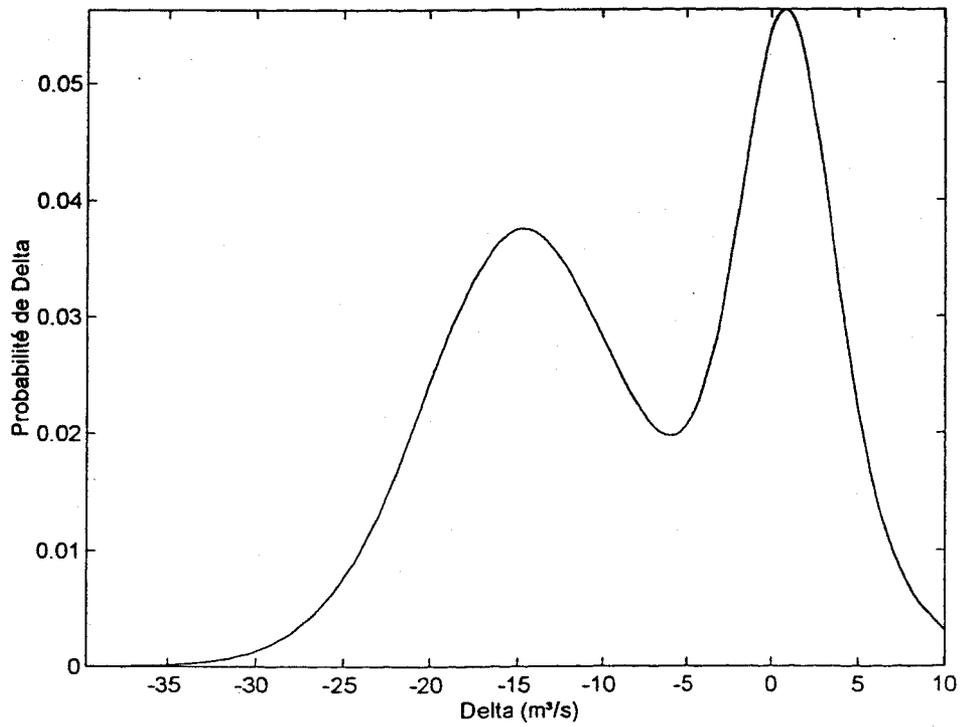


Figure A1.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02QA002

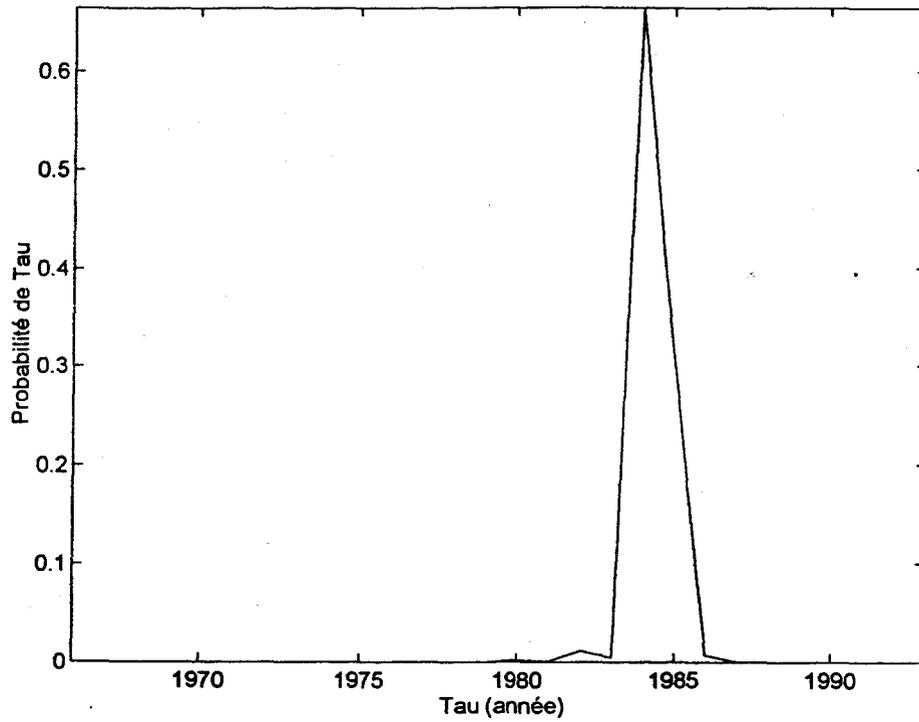


Figure A2.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02UC002

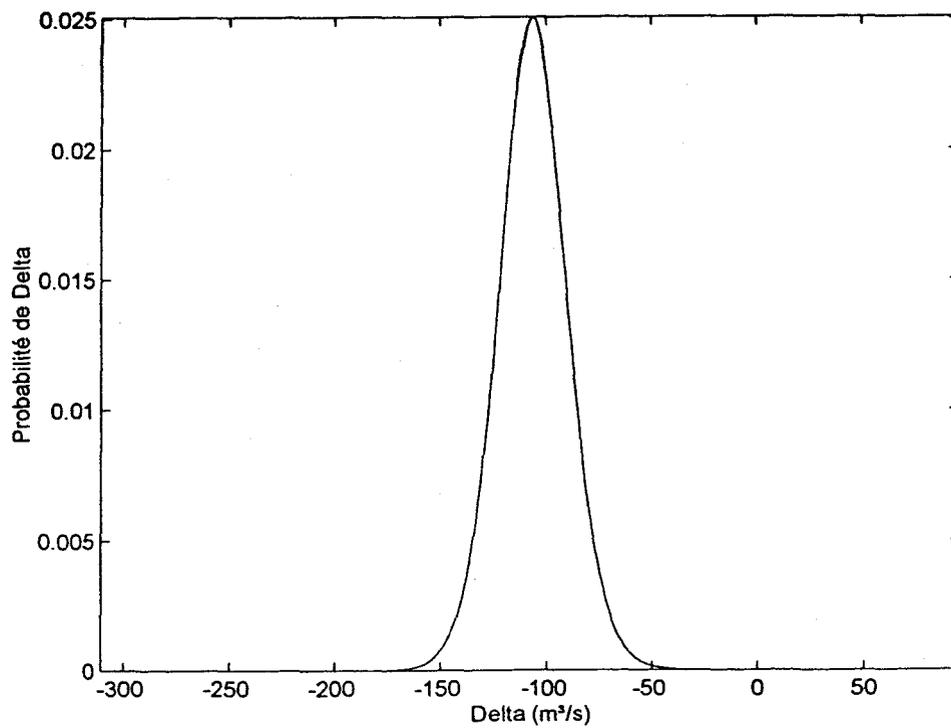


Figure A2.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02UC002

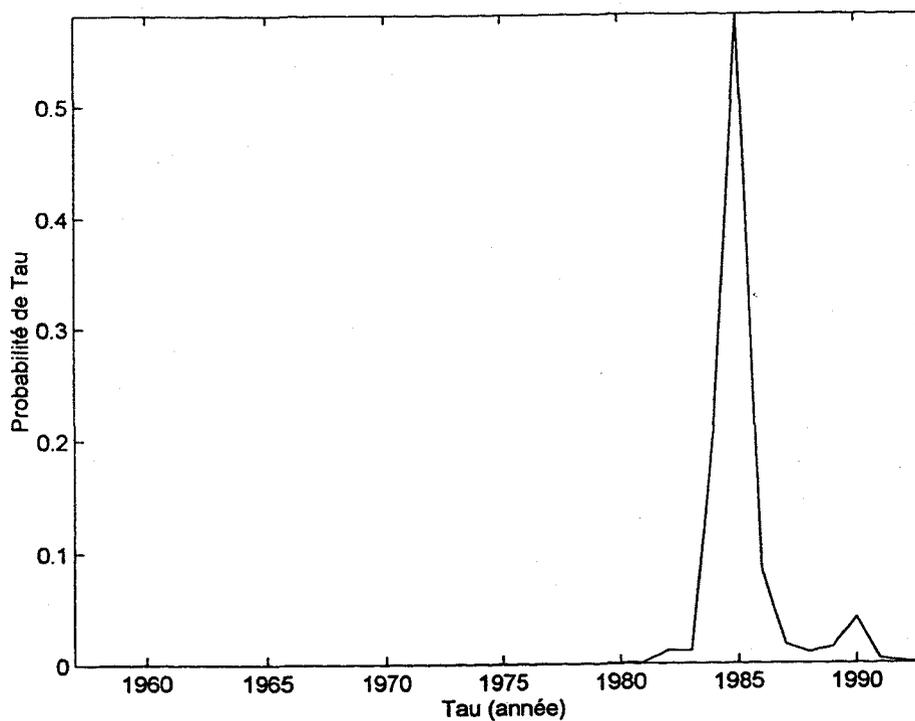


Figure A3.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02VC001

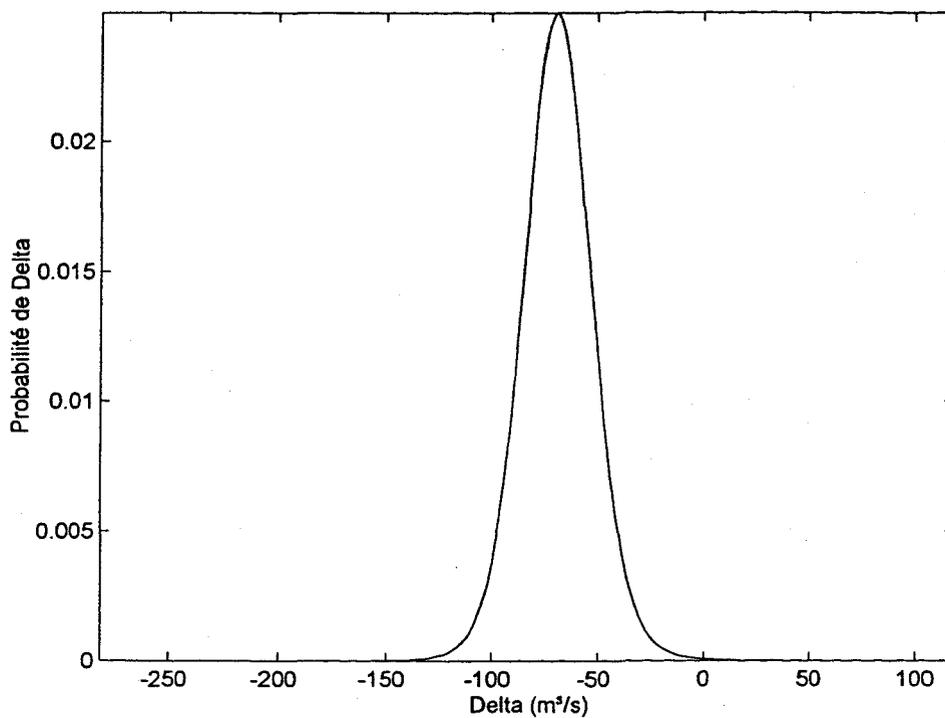


Figure A3.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02VC001

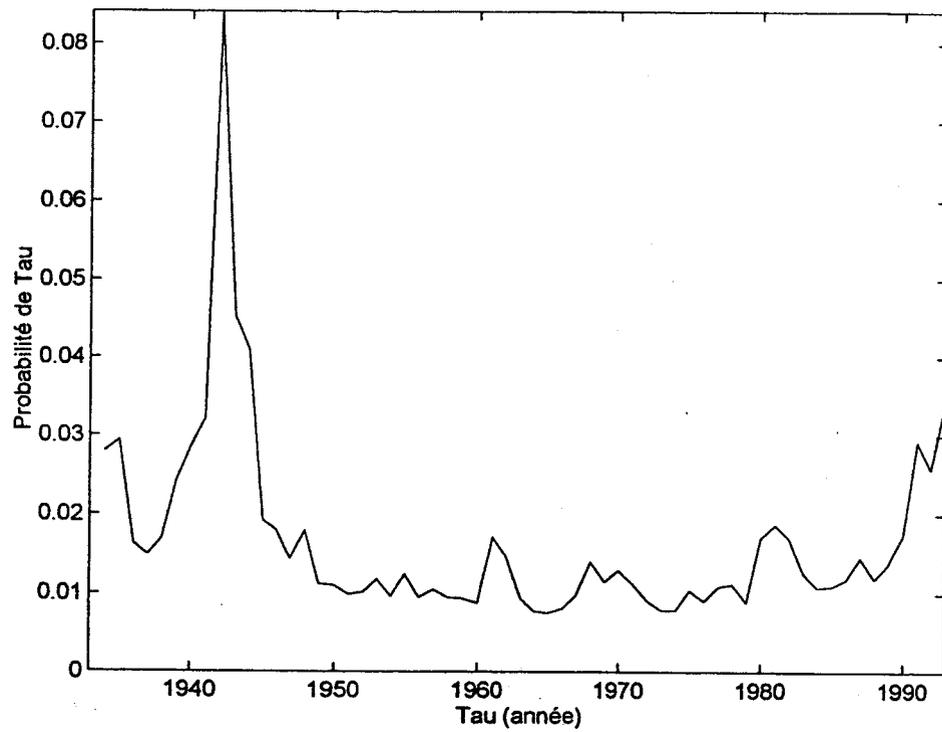


Figure A4.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 04NA001

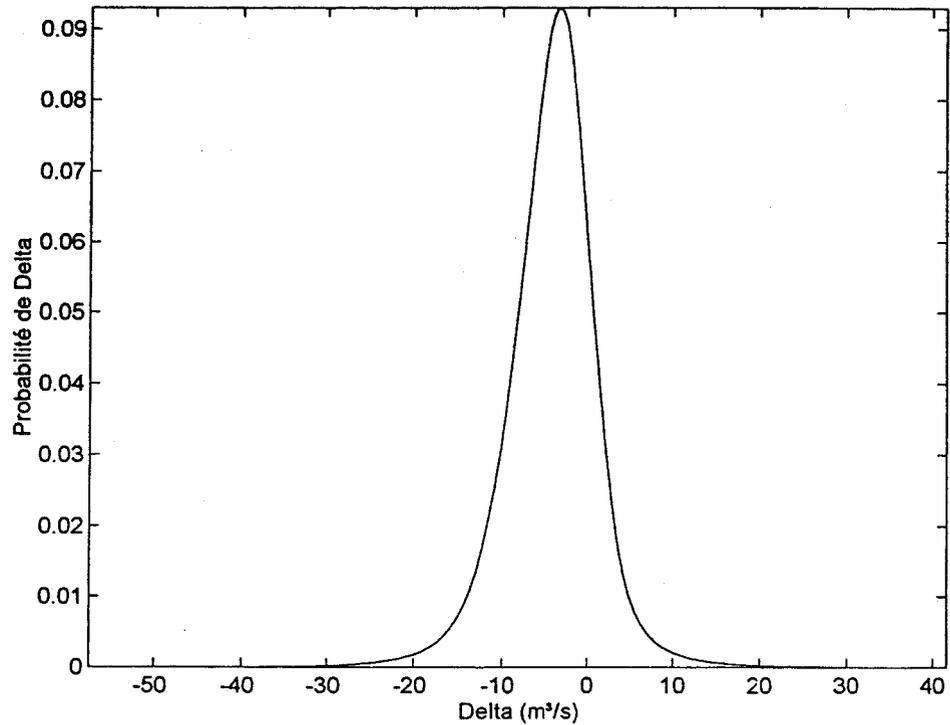


Figure A4.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 04NA001

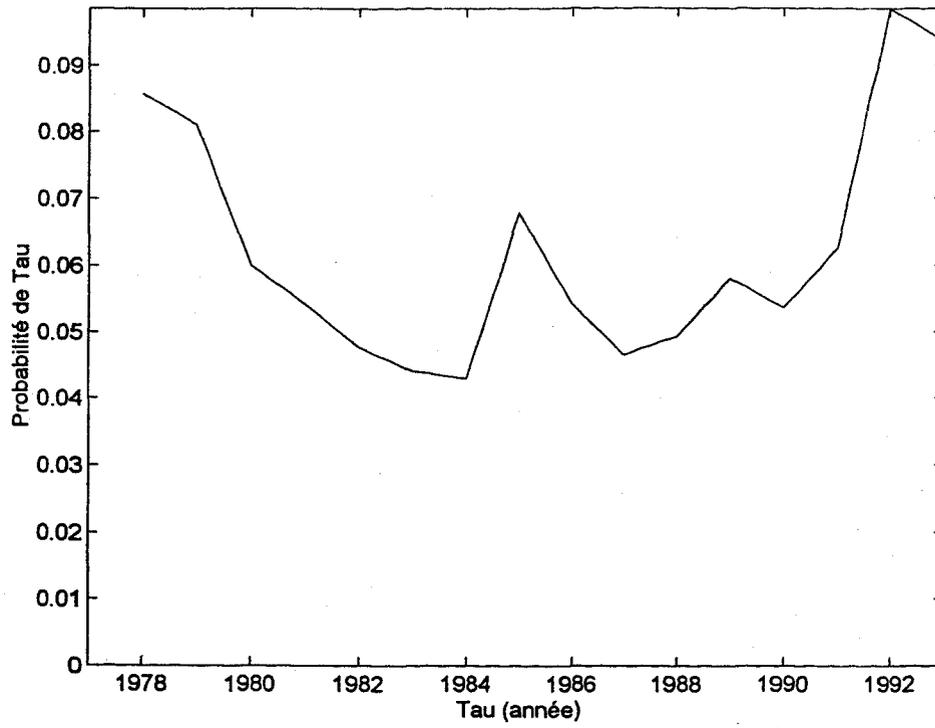


Figure A5.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 03FA003

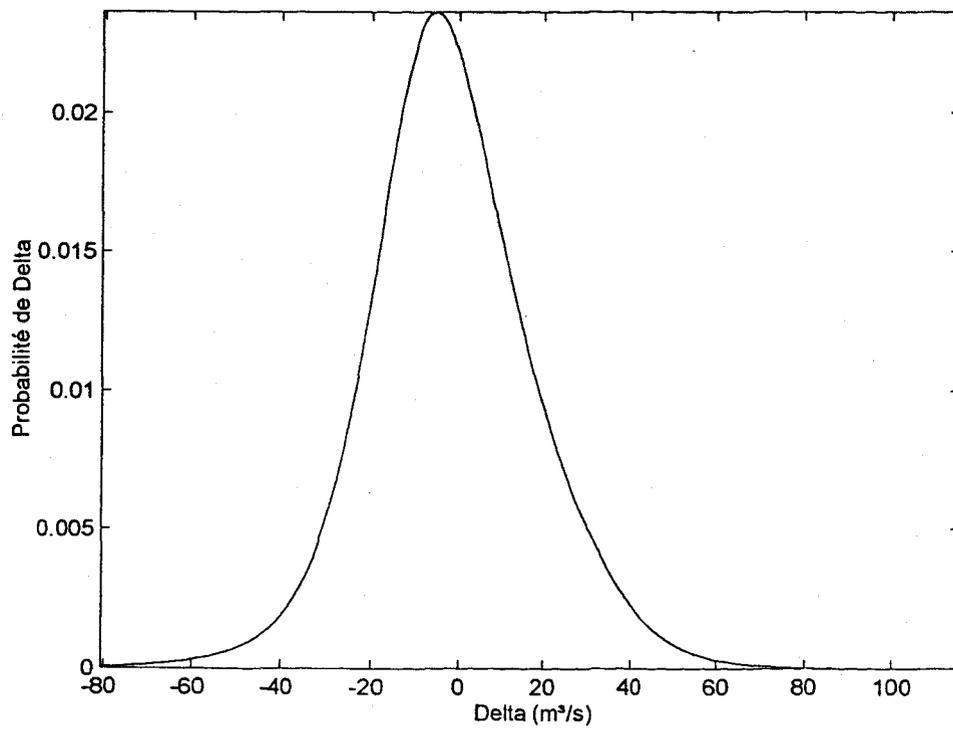


Figure A5.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 03FA003

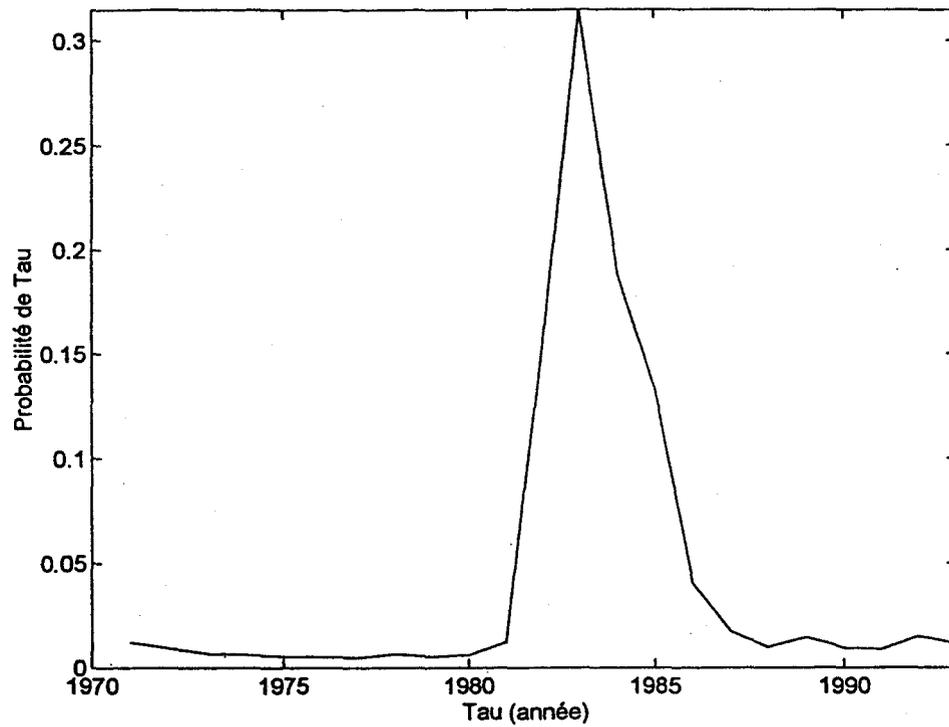


Figure A6.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 01BH005

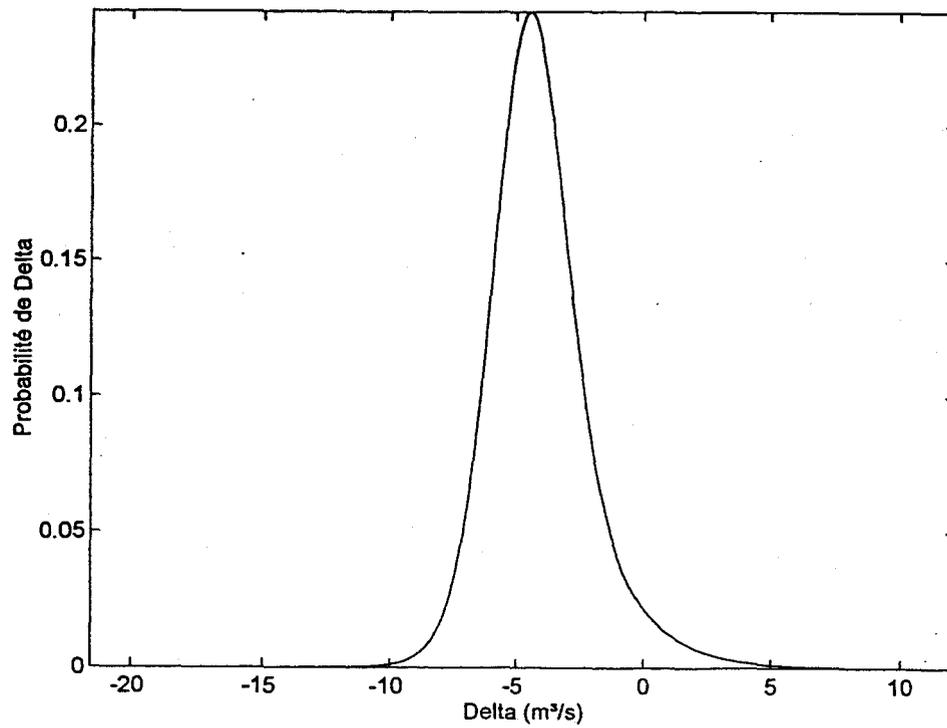


Figure A6.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 01BH005

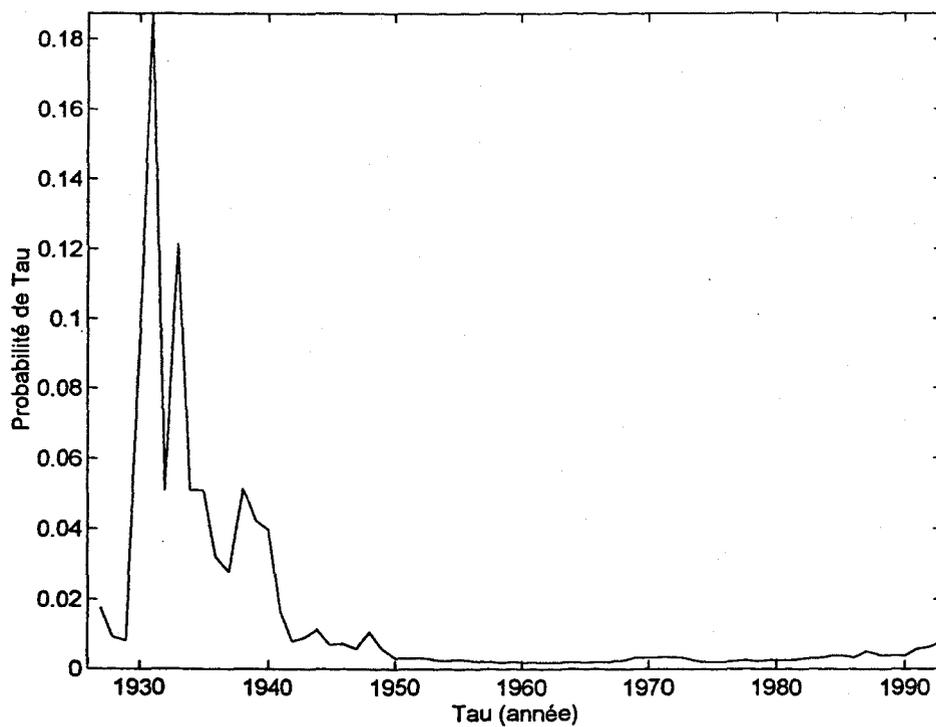


Figure A7.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02PJ007

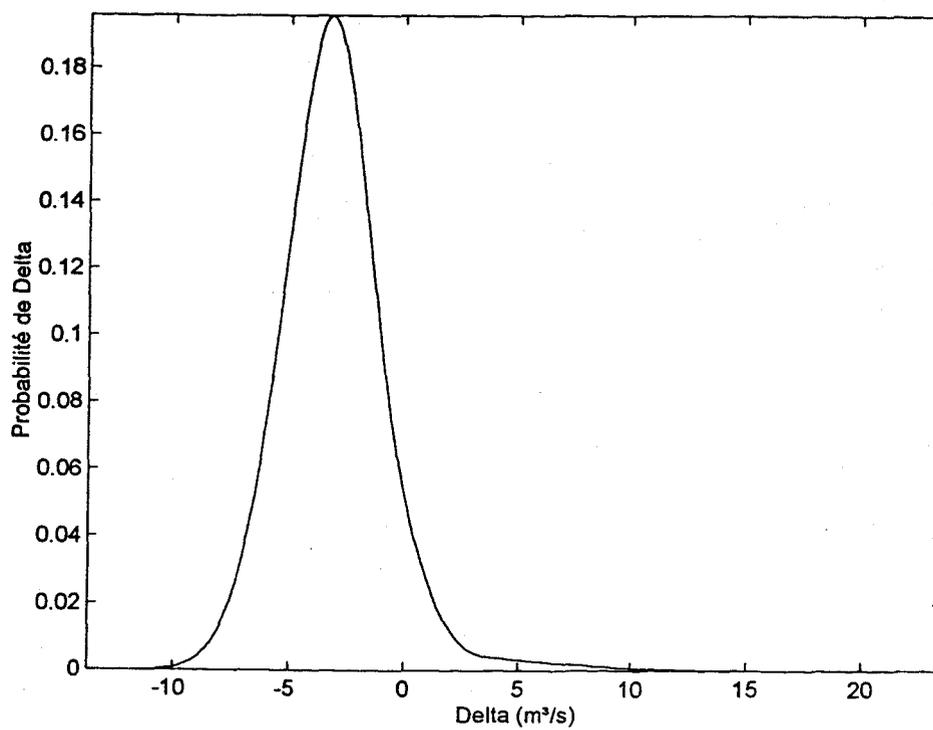


Figure A7.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02PJ007

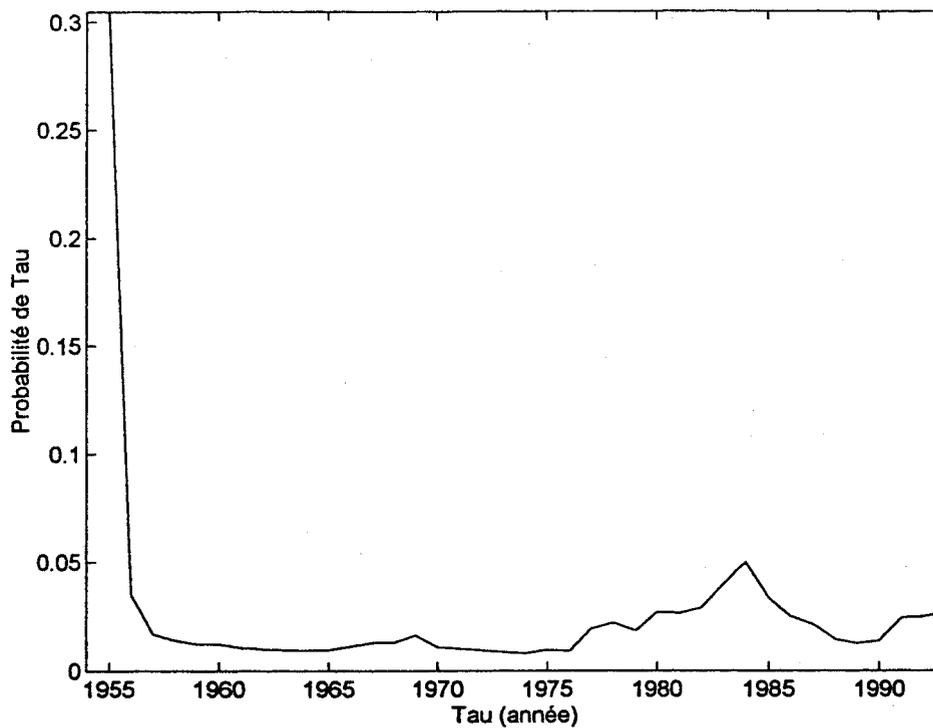


Figure A8.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02OE027

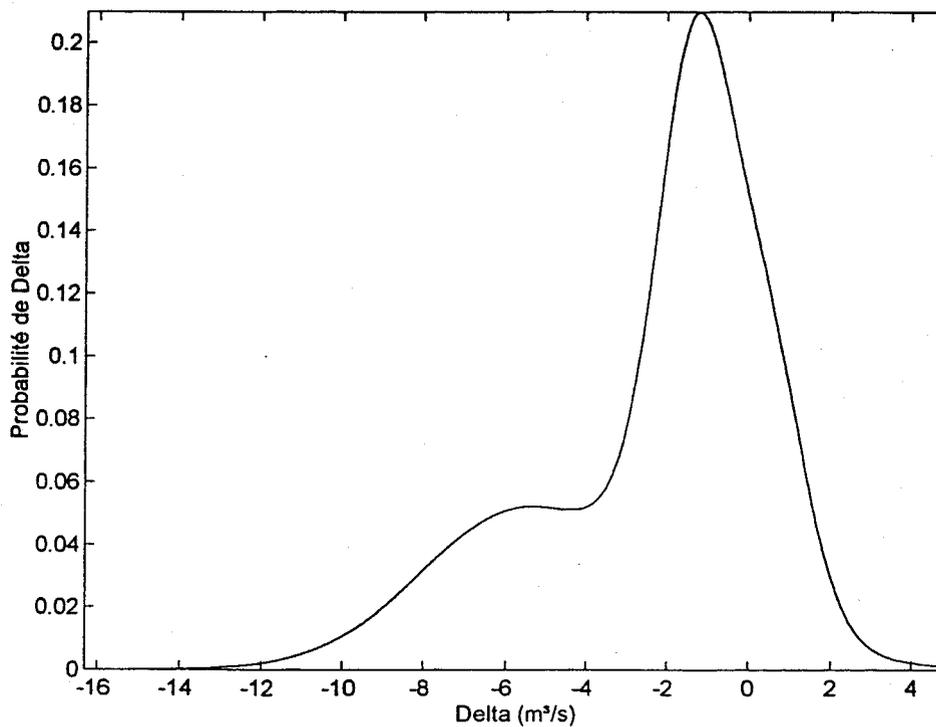


Figure A8.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02OE027

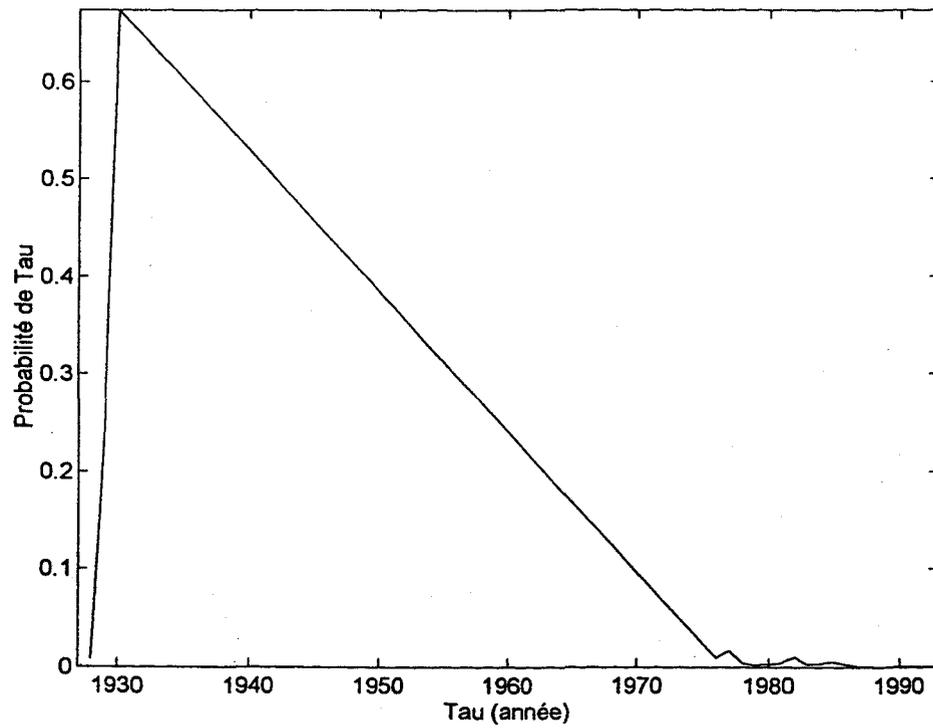


Figure A9.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02LH004

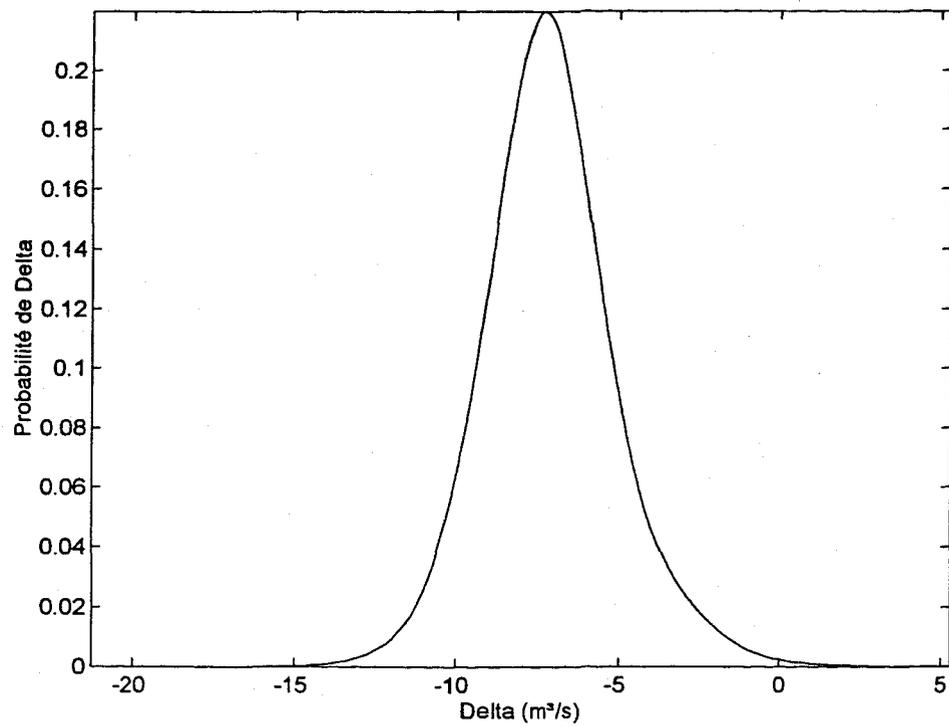


Figure A9.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02LH004

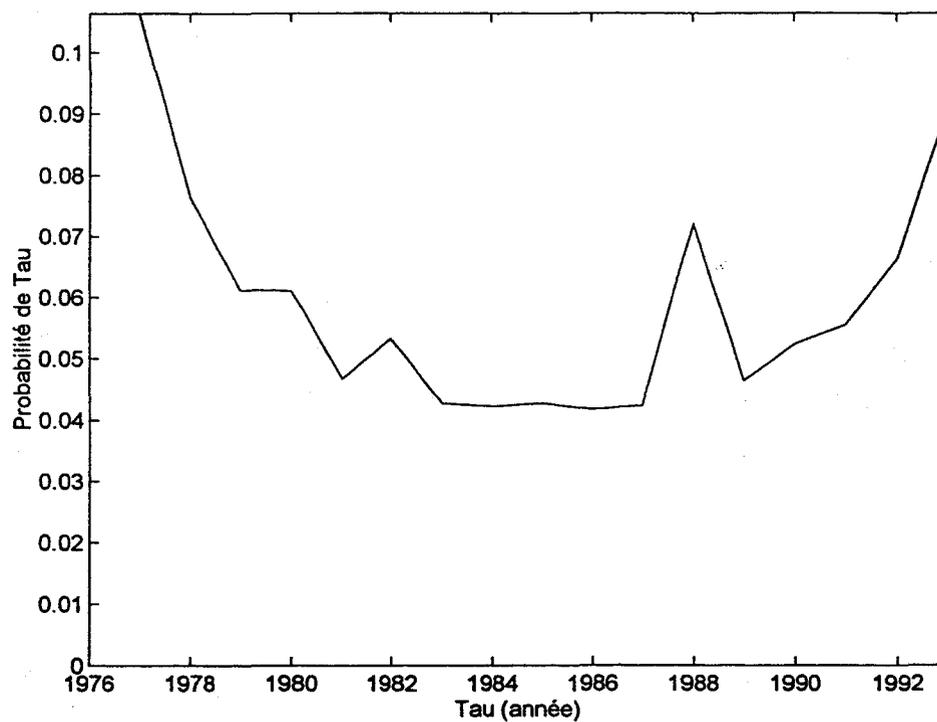


Figure A10.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02LG005

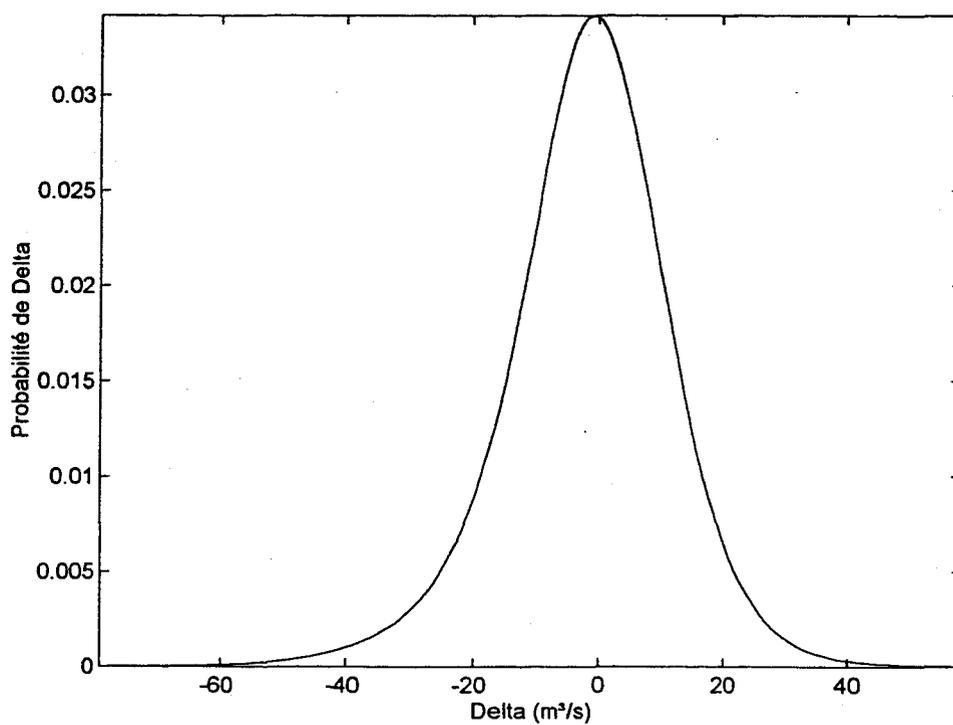


Figure A10.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02LG005

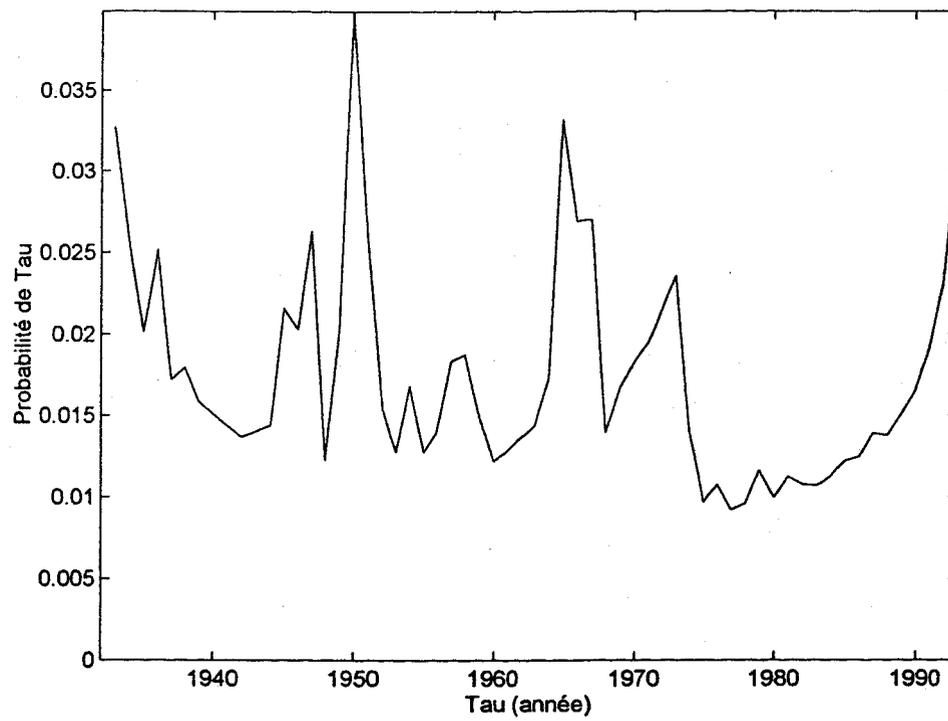


Figure A11.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02NF003

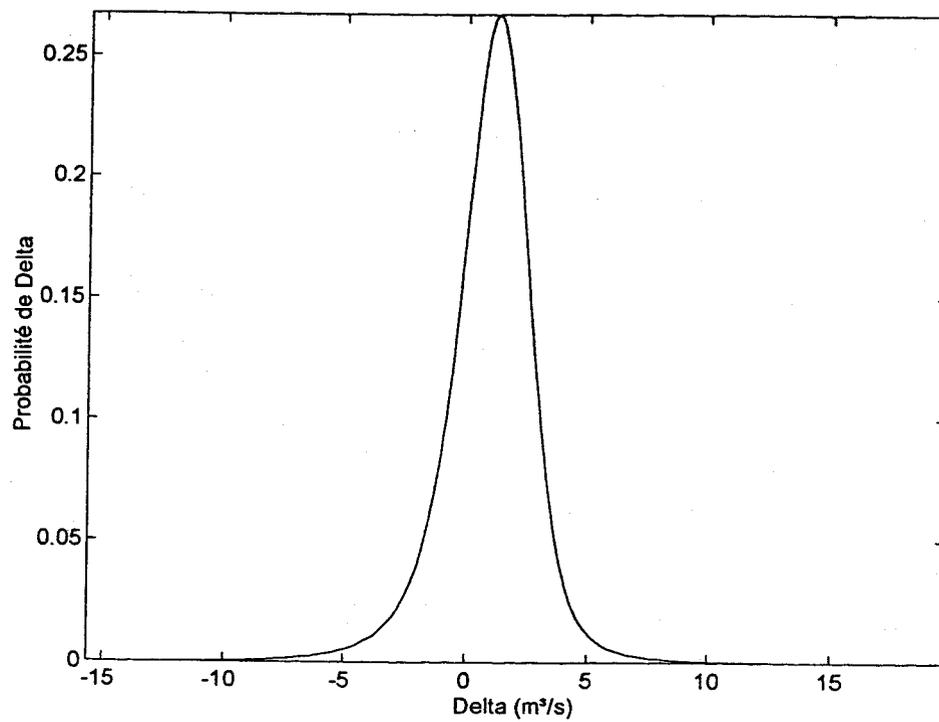


Figure A11.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02NF003

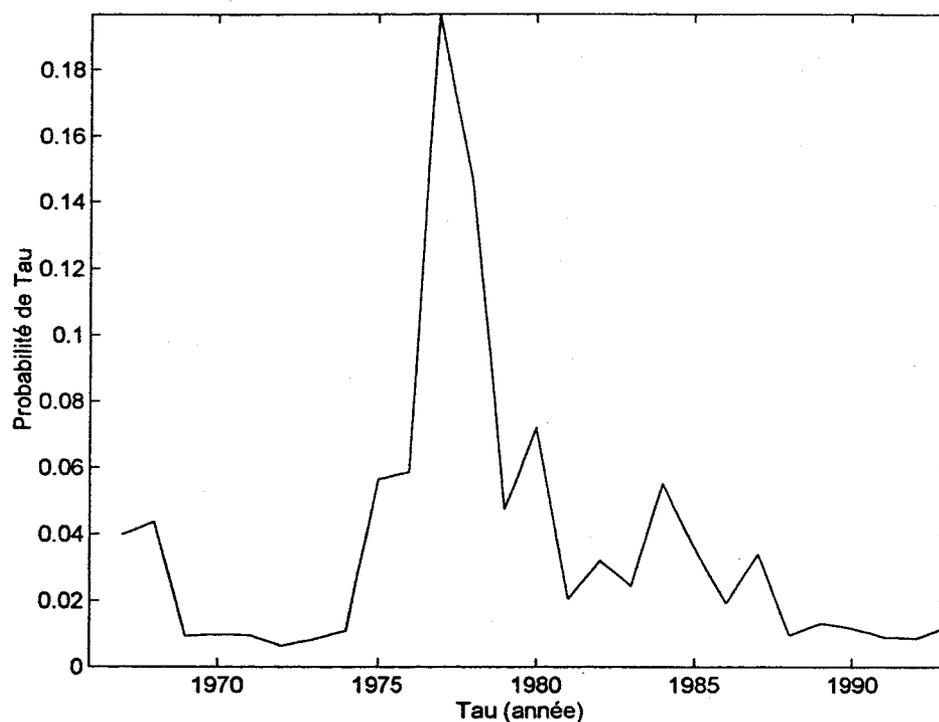


Figure A12.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02NE011

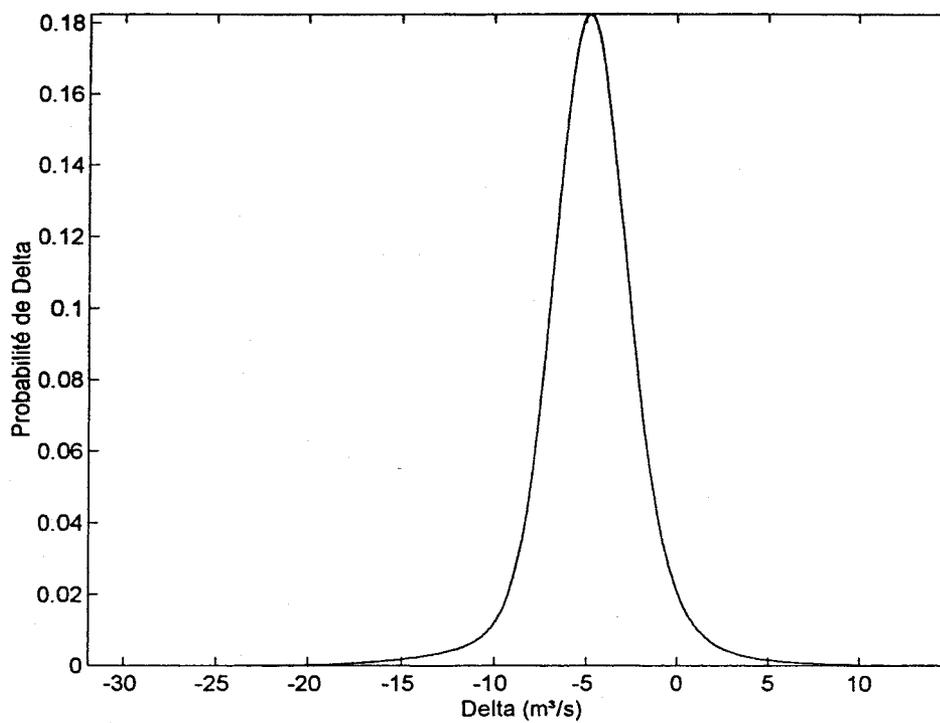


Figure A12.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02NE011

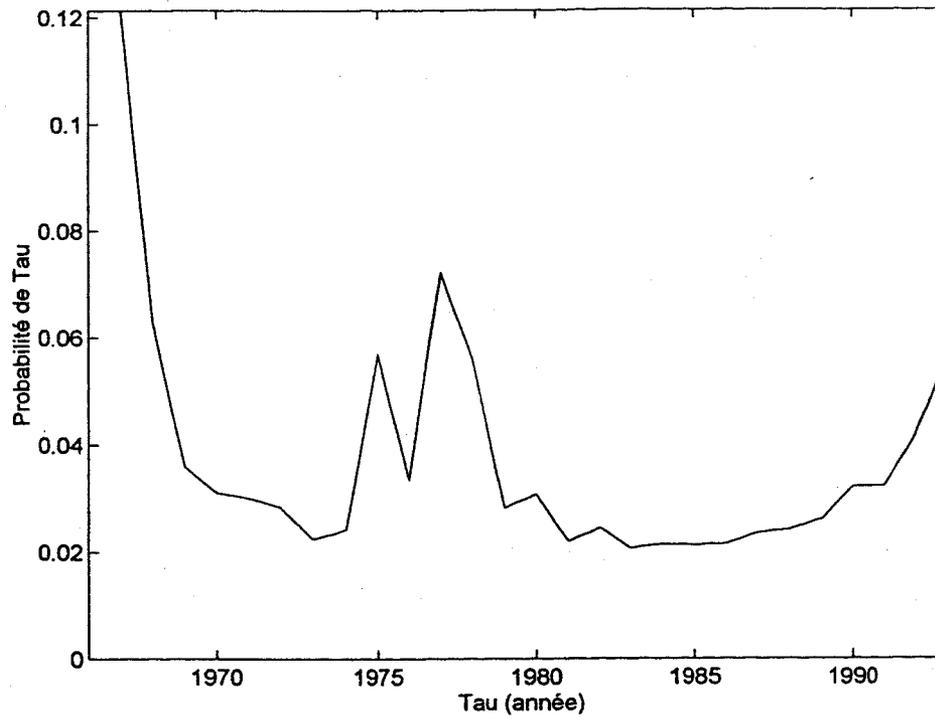


Figure A13.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02PB006

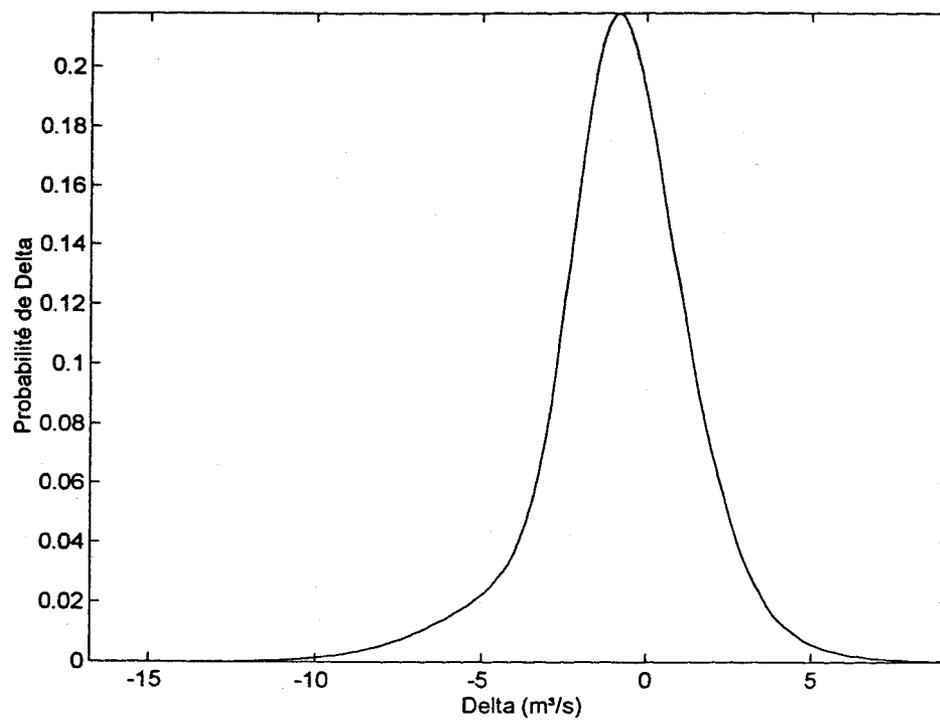


Figure A13.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02PB006

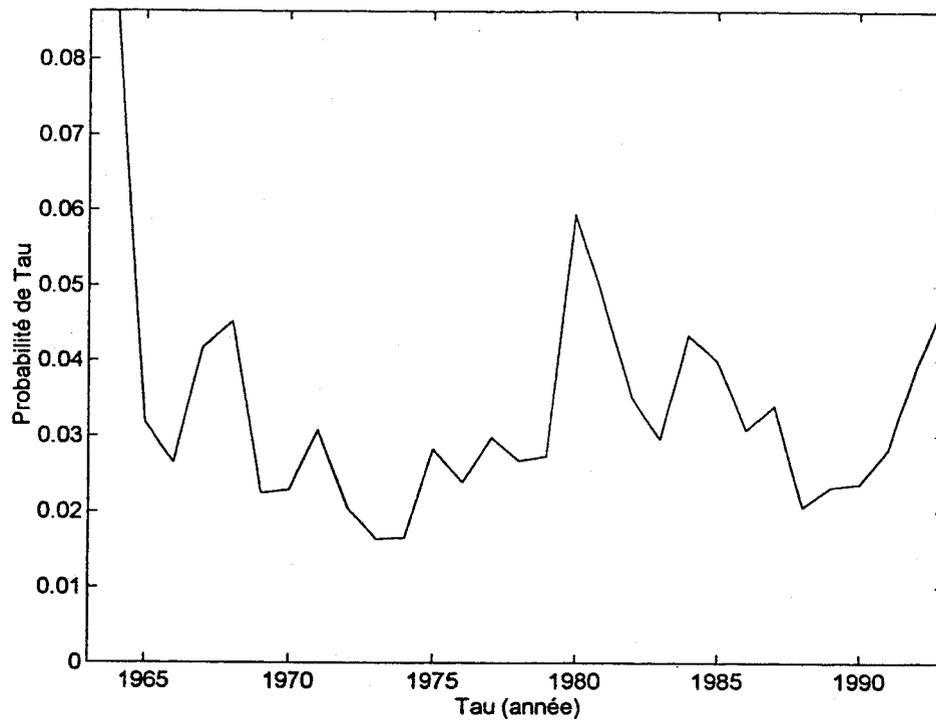


Figure A14.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02RF001

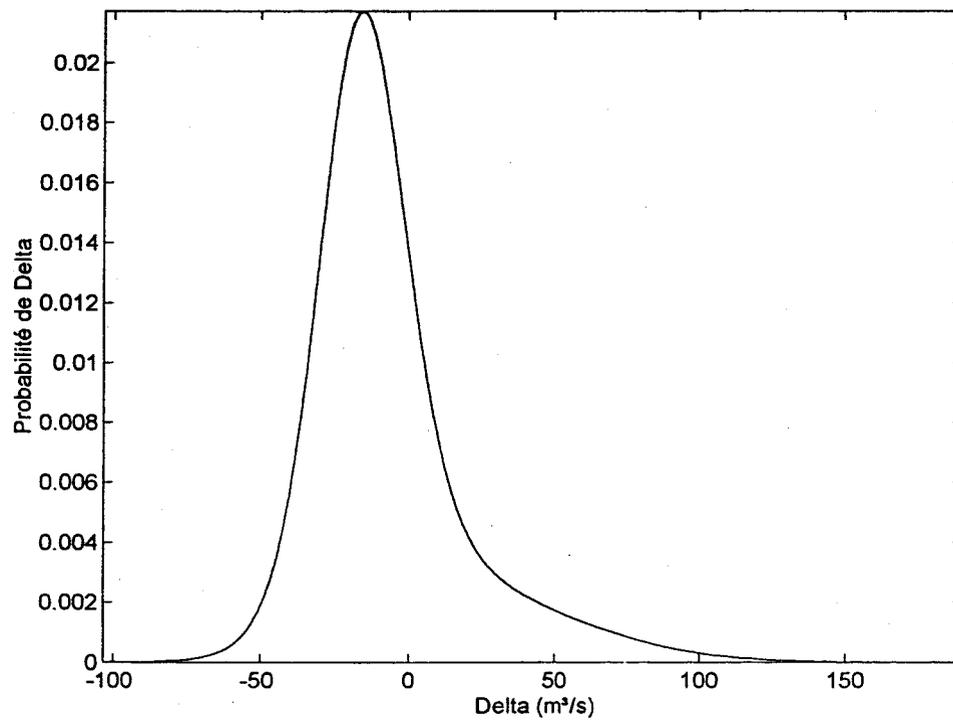


Figure A14.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02RF001

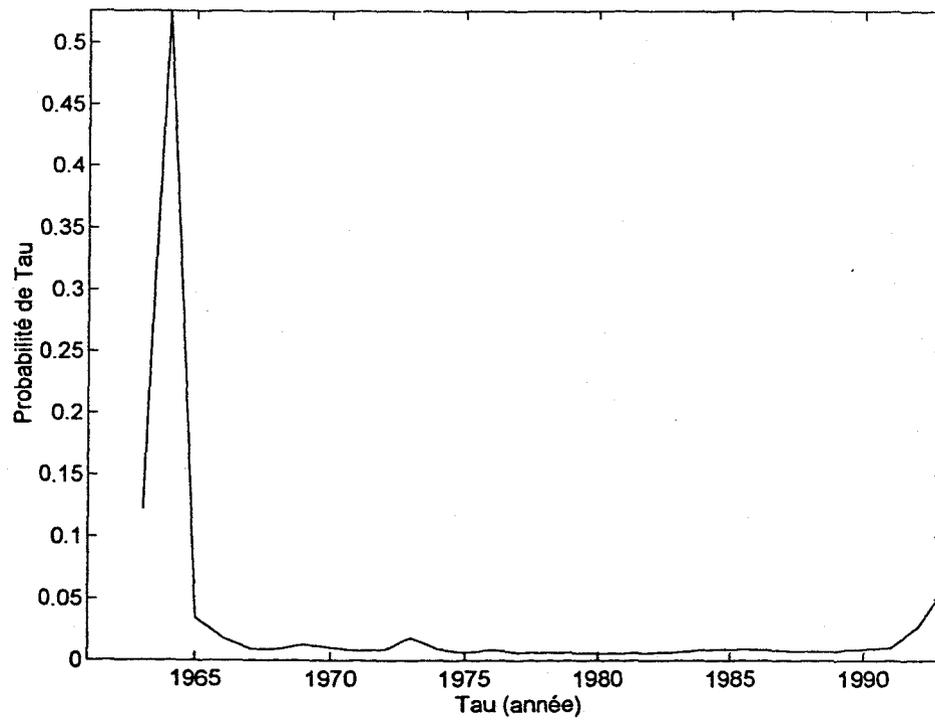


Figure A15.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02RD002

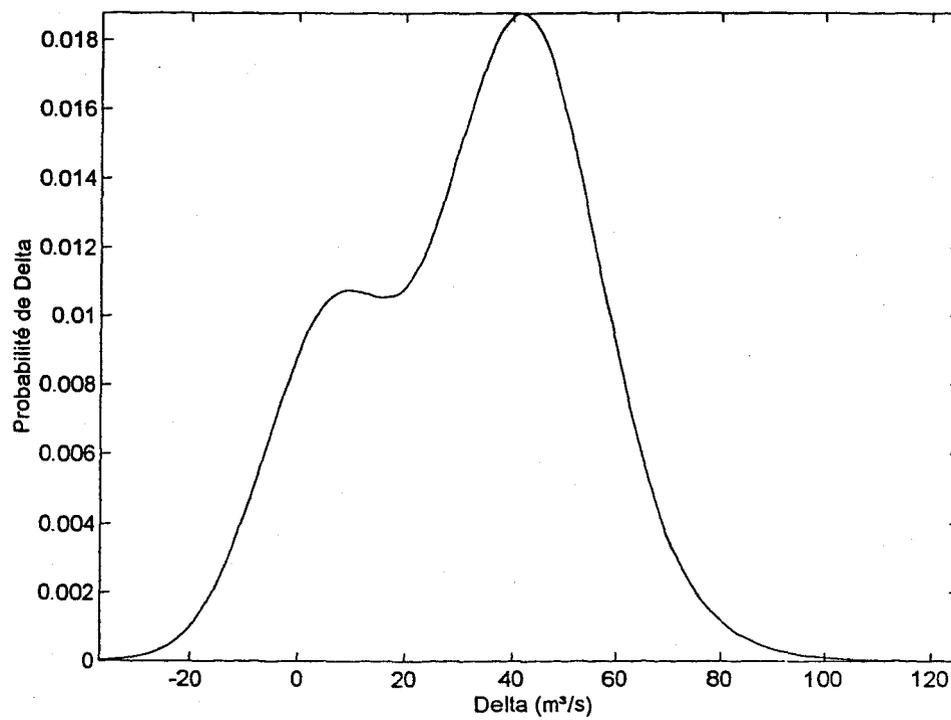


Figure A15.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02RD002

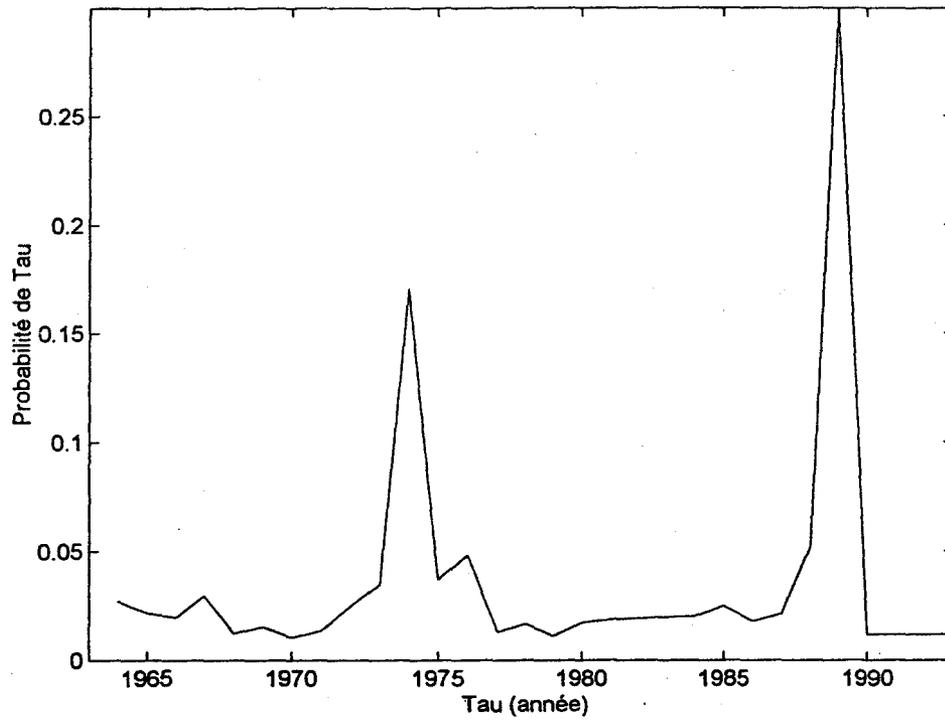


Figure A16.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 03KC004

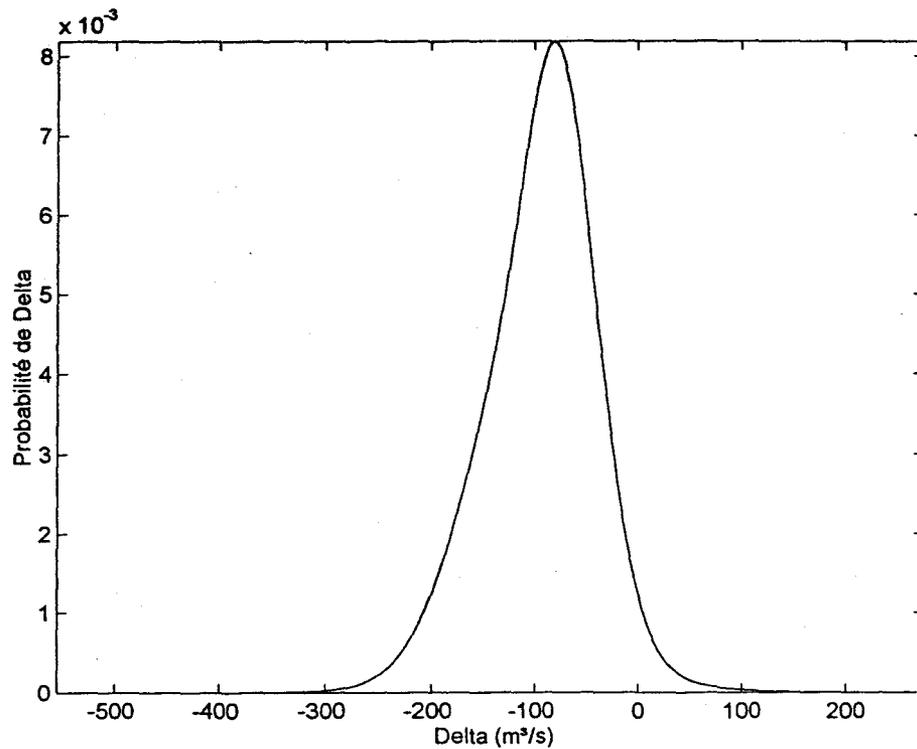


Figure A16.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 03KC004

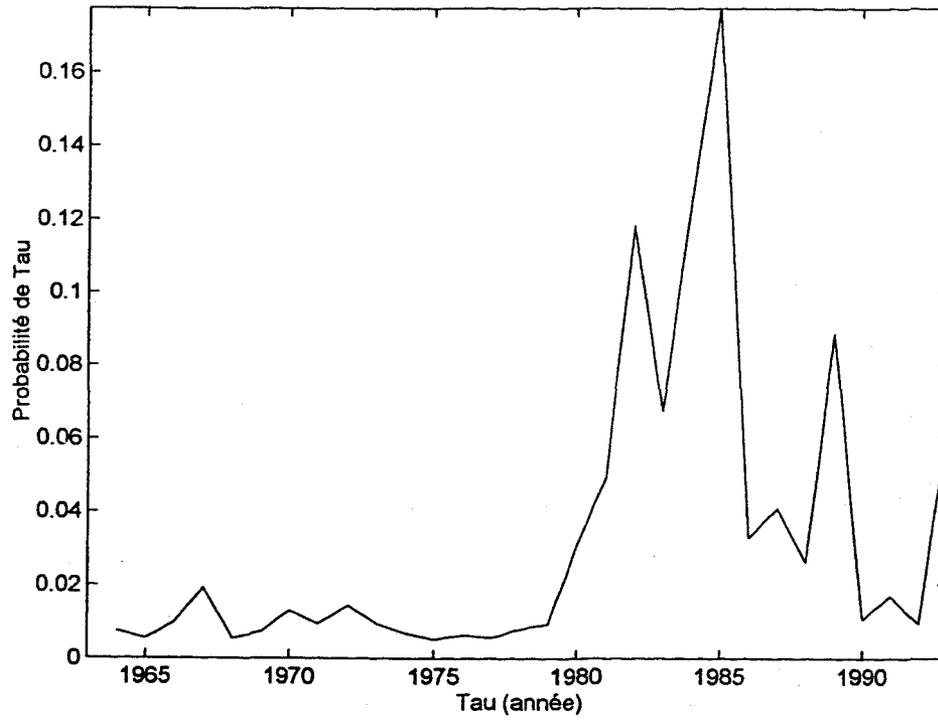


Figure A17.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 03MB002

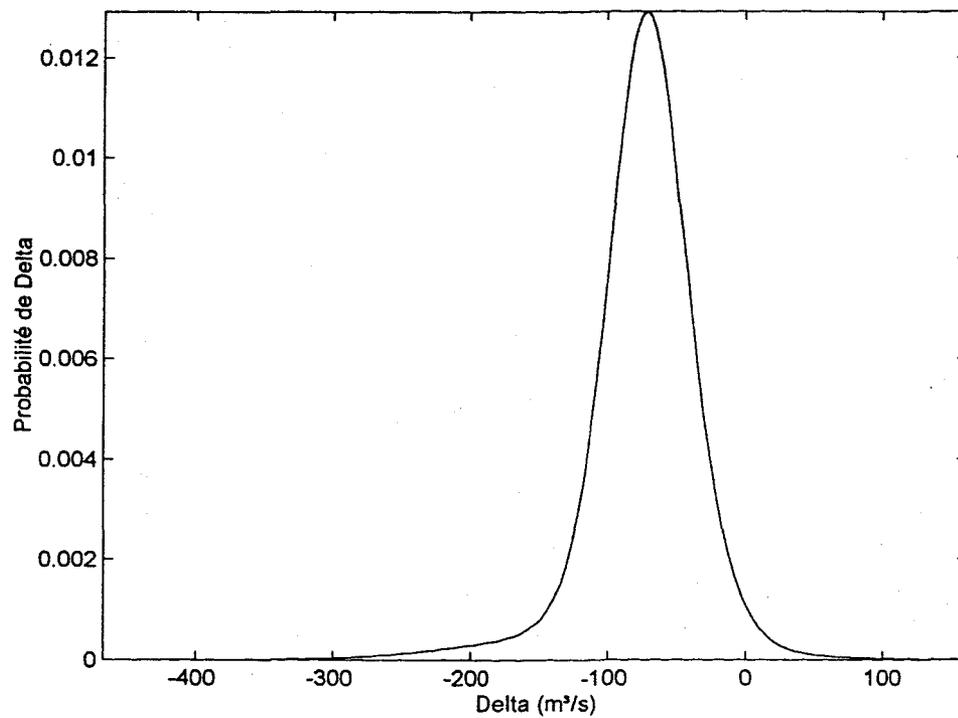


Figure A17.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 03MB002

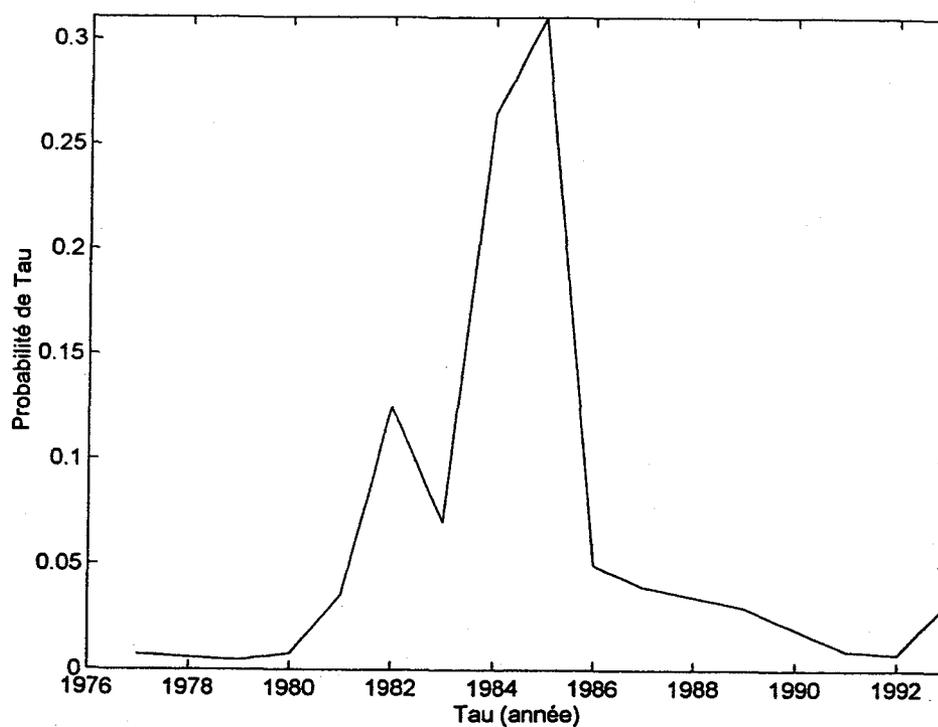


Figure A18.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 03MD001

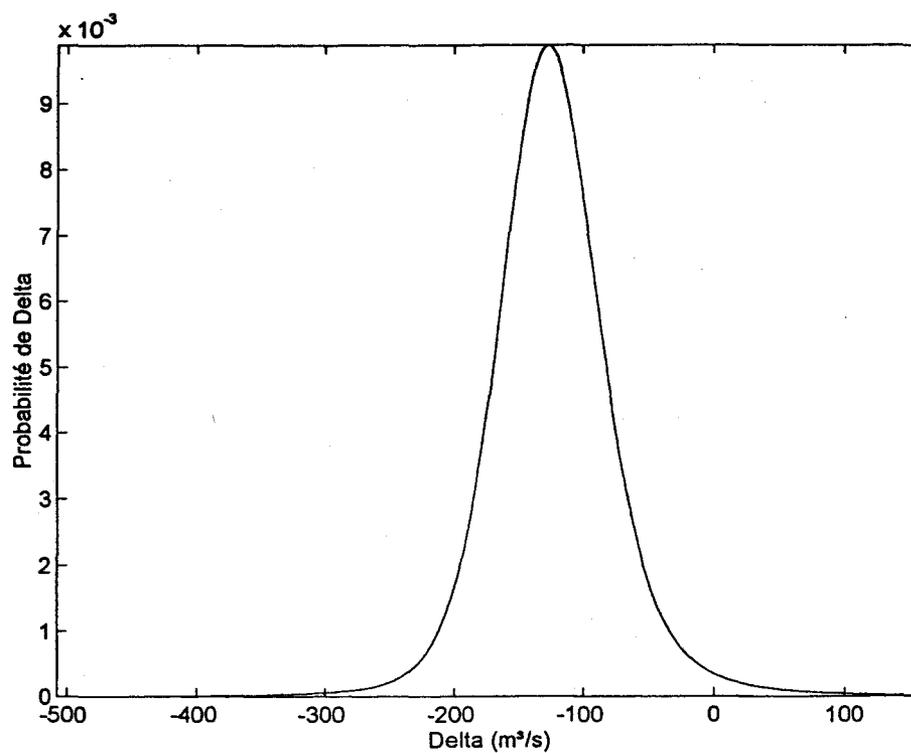


Figure A18.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 03MD001

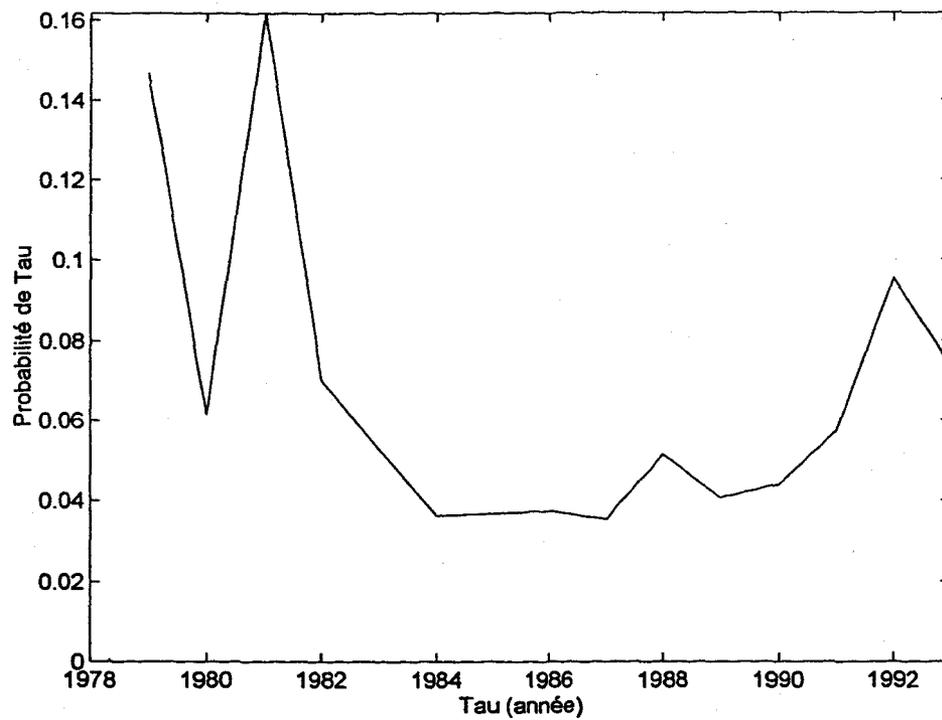


Figure A19.a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 02RG005

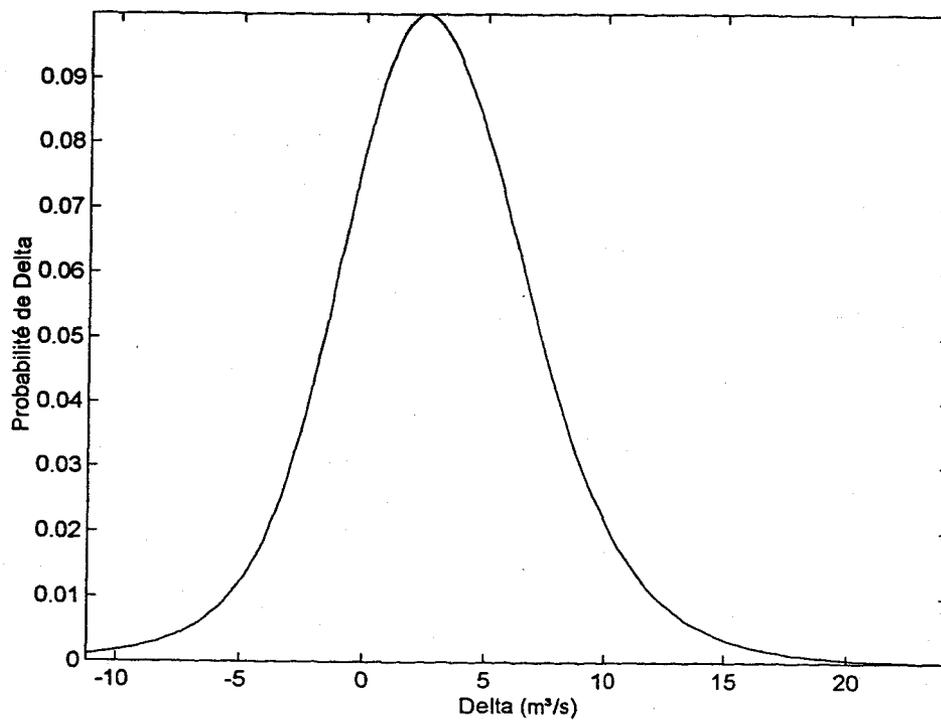
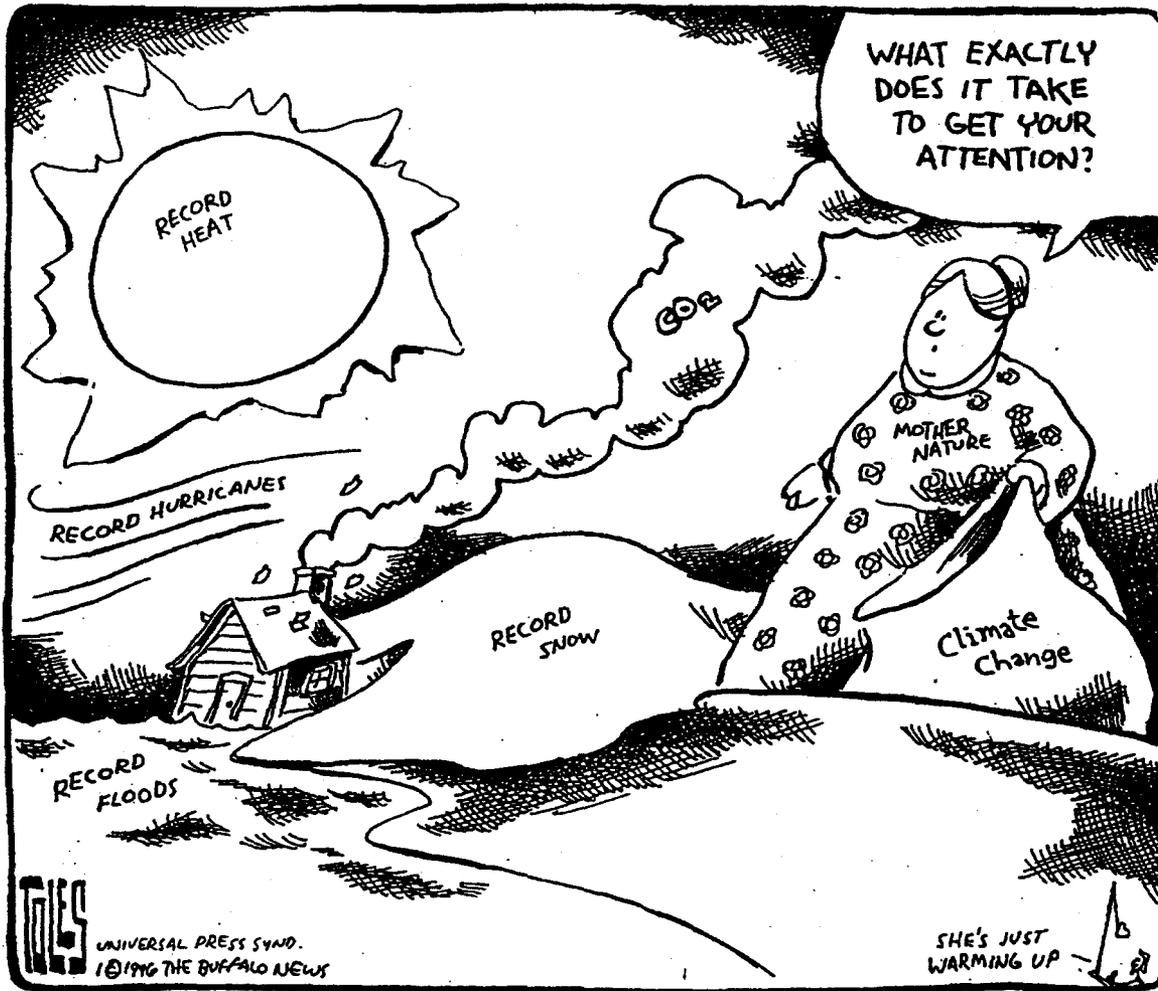


Figure A19.b Fonction de probabilité *a posteriori* de l'amplitude de la rupture pour la station 02RG005

Weather at a glance



TOM TOLES

Globe & Mail, 25 janvier 1996