

Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisée en France et au Québec

Analysis of regional flood models utilized in France and Québec

T. B.M.J. Ouarda, M. Lang, B. Bobée, J. Bernier and P. Bois

Volume 12, Number 1, 1999

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705347ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705347ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Ouarda, T. B., Lang, M., Bobée, B., Bernier, J. & Bois, P. (1999). Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisée en France et au Québec. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 12(1), 155–182. <https://doi.org/10.7202/705347ar>

Article abstract

Design flood estimates at ungauged sites or at gauged sites with short records can be obtained through regionalization techniques. Various methods have been employed in different parts of the world for the regional analysis of extreme hydrological events. These regionalization approaches make different assumptions and hypotheses concerning the hydrological phenomena being modeled, rely on various types of continuous and non-continuous data, and often fall under completely different theories. A research seminar dealing with "regional estimation methods in hydrology" took place in Lyon during the month of May 1997, and brought together various researchers and practitioners mainly from France and the Province of Québec (Canada). The present paper is based on the conferences and discussions that took place during this seminar and aims to review, classify, comparatively evaluate, and potentially propose improvements to the most prominent regionalization techniques utilized in France and Québec.

The specific objectives of this paper are :

- to review the main regional hydrologic models that have been proposed and commonly used during the last three decades ;
- to classify the literature into different groups according to the origin of the method, its specific objective, and the technique it adopts ;
- to present a comprehensive evaluation of the characteristics of the methods, and to point out the hypotheses, data requirements, strengths and weaknesses of each particular one ; and
- to investigate and identify potential improvements to the reviewed methods, by combining and extending the various approaches and integrating their particular strengths.

Regionalization approaches adopted in France include the Gradex method which represents a simplified rainfall-runoff model which provides estimates of flood magnitudes of given probabilities and is based on rainfall data which often cover longer periods and are more reliable than flow data (Guillot and Duband, 1967 ; CFGB, 1994). It is based on the hypotheses that beyond a given rainfall threshold (known as the pivot point), all water is transformed into runoff, and that a rainfall event of a given duration generates runoff for the same length of time. These hypotheses are equivalent to assuming that, beyond the pivot point, the rainfall-runoff relationship is linear and that the precipitation and runoff probability curves are parallel on a Gumbel plot.

In Québec (and generally in North America), regional flood frequency analysis involves usually two steps : delineation of homogeneous regions, and regional estimation. In the first step, the focus is on identifying and regrouping sites which seem sufficiently homogeneous or sufficiently similar to the target ungauged site to provide a basis for information transfer. The second step of the analysis consists in inferring flood information (such as quantiles) at the target site using data from the stations identified in the first step of the analysis. Two types of "homogeneous" regions can be proposed : fixed set regions (geographically contiguous or non-contiguous) and neighborhood type of regions. The second type includes the methods of canonical correlation analysis and of the regions of influence. Regional estimation can be accomplished using one of two main approaches : index flood or quantile regression methods.

The results of this work indicate that the philosophies of regionalization and the methods utilized in France and Québec are complementary to each other and are based on different needs and outlooks. While the approaches followed in France are characterized by strong conceptual and geographic aspects with an emphasis on the utilization of information related to other phenomena (such as precipitations), the approaches adopted in Québec rely on the strength of their statistical and stochastic components and usually condense the spatial and temporal information to a realistic functional form. This dissimilarity in the approaches being followed on either side may be originated by the distinct topographic and climatic characteristics of each region (France and Québec) and by the differences in basin sizes and hydrometeorologic network densities. The conclusions of the seminar point to the large potential of improvements in regional estimation methods, which may result from an enhanced exchange between scientists from both sides : indeed, there is much to gain from learning about the dissimilarities between the various approaches, comparing their performances, and devising new methods that combine their individual strengths. Hence, the Gradex method for example could benefit from an increased utilization of regional flood information, while flood regionalization methods utilized in Québec could gain much from the formalization of the use of rainfall information and from the integration of an improved modeling of physical hydrologic phenomena. This should result in the enhancement of the efficiency of regional estimation methods and their ability to handle various practical conditions.

It is hoped that this research will contribute towards closing the gap between French and Québec literature, and more generally between the European and the North American hydrological schools of thought, by narrowing the large literature that is available, by providing the necessary cross-evaluation of regional flood analysis models, and by providing comprehensive propositions for improved approaches for regional hydrologic modeling.

Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisés en France et au Québec

Analysis of regional flood models utilized in France and Quebec

T.B.M.J. OUARDA¹, M. LANG², B. BOBÉE^{1*}, J. BERNIER³ et P. BOIS⁴

Reçu le 5 novembre 1997, accepté le 6 juillet 1998**.

SUMMARY

Design flood estimates at ungauged sites or at gauged sites with short records can be obtained through regionalization techniques. Various methods have been employed in different parts of the world for the regional analysis of extreme hydrological events. These regionalization approaches make different assumptions and hypotheses concerning the hydrological phenomena being modeled, rely on various types of continuous and non-continuous data, and often fall under completely different theories. A research seminar dealing with "regional estimation methods in hydrology" took place in Lyon during the month of May 1997, and brought together various researchers and practitioners mainly from France and the Province of Quebec (Canada). The present paper is based on the conferences and discussions that took place during this seminar and aims to review, classify, comparatively evaluate, and potentially propose improvements to the most prominent regionalization techniques utilized in France and Quebec.

The specific objectives of this paper are:

- to review the main regional hydrologic models that have been proposed and commonly used during the last three decades;
- to classify the literature into different groups according to the origin of the method, its specific objective, and the technique it adopts;
- to present a comprehensive evaluation of the characteristics of the methods, and to point out the hypotheses, data requirements, strengths and weaknesses of each particular one; and

1 Chaire en Hydrologie Statistique. Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau, 2800, rue Einstein, CP 7500, Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7 Canada.

2 Cemagref Lyon, Division Hydrologie-Hydraulique, 3 bis quai Chauveau, 69336 Lyon, cedex 09, France.

3 INRS-Eau, Le Pech de Biaud, Saint-Martial de Nabirat, 24250 Domme, France.

4 Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, INPG, UJF, CNRS, URA 1512, BP 53, 38041 Grenoble, France.

* Correspondance : chaire_hydro@inrs-eau.quebec.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 septembre 1999.

– to investigate and identify potential improvements to the reviewed methods, by combining and extending the various approaches and integrating their particular strengths.

Regionalization approaches adopted in France include the Gradex method which represents a simplified rainfall-runoff model which provides estimates of flood magnitudes of given probabilities and is based on rainfall data which often cover longer periods and are more reliable than flow data (Guillot and Duband, 1967; CFGB, 1994). It is based on the hypotheses that beyond a given rainfall threshold (known as the *pivot point*), all water is transformed into runoff, and that a rainfall event of a given duration generates runoff for the same length of time. These hypotheses are equivalent to assuming that, beyond the pivot point, the rainfall-runoff relationship is linear and that the precipitation and runoff probability curves are parallel on a Gumbel plot.

In Quebec (and generally in North America), regional flood frequency analysis involves usually two steps: delineation of homogeneous regions, and regional estimation. In the first step, the focus is on identifying and regrouping sites which seem sufficiently homogeneous or sufficiently similar to the target ungauged site to provide a basis for information transfer. The second step of the analysis consists in inferring flood information (such as quantiles) at the target site using data from the stations identified in the first step of the analysis. Two types of “homogeneous” regions can be proposed: fixed set regions (geographically contiguous or non-contiguous) and neighborhood type of regions. The second type includes the methods of canonical correlation analysis and of the regions of influence. Regional estimation can be accomplished using one of two main approaches: index flood or quantile regression methods.

The results of this work indicate that the philosophies of regionalization and the methods utilized in France and Quebec are complementary to each other and are based on different needs and outlooks. While the approaches followed in France are characterized by strong conceptual and geographic aspects with an emphasis on the utilization of information related to other phenomena (such as precipitations), the approaches adopted in Quebec rely on the strength of their statistical and stochastic components and usually condense the spatial and temporal information to a realistic functional form. This dissimilarity in the approaches being followed on either side may be originated by the distinct topographic and climatic characteristics of each region (France and Quebec) and by the differences in basin sizes and hydrometeorologic network densities. The conclusions of the seminar point to the large potential of improvements in regional estimation methods, which may result from an enhanced exchange between scientists from both sides: indeed, there is much to gain from learning about the dissimilarities between the various approaches, comparing their performances, and devising new methods that combine their individual strengths. Hence, the Gradex method for example could benefit from an increased utilization of regional flood information, while flood regionalization methods utilized in Quebec could gain much from the formalization of the use of rainfall information and from the integration of an improved modeling of physical hydrologic phenomena. This should result in the enhancement of the efficiency of regional estimation methods and their ability to handle various practical conditions.

It is hoped that this research will contribute towards closing the gap between French and Quebec literature, and more generally between the European and the North American hydrological schools of thought, by narrowing the large literature that is available, by providing the necessary cross-evaluation of regional flood analysis models, and by providing comprehensive propositions for improved approaches for regional hydrologic modeling.

Key-words: regional model, flood, frequency analysis, gradex, flow-duration-frequency model, canonical correlations, regression, index flood, rainfall, runoff.

RÉSUMÉ

De nombreuses méthodes régionales ont été développées pour améliorer l'estimation de la distribution des débits de crues, en des sites où l'on dispose de peu d'information ou même d'aucune information. Cet article présente une synthèse de modèles hydrologiques utilisés en France et au Québec (Canada), à l'occasion d'un séminaire relatif aux « méthodes d'estimation régionale en hydrologie », à Lyon en mai 1997. Les modèles français sont fortement liés à une technique d'extrapolation de la distribution des crues, la méthode du Gradex, qui repose sur l'exploitation probabiliste conjointe des séries hydrométriques et pluviométriques. Ceci explique les deux principaux volets d'études régionales pratiquées en France : les travaux liés à la régionalisation des pluies et ceux liés à la régionalisation des débits. Les modèles québécois comprennent généralement deux étapes : la définition et la détermination de régions hydrologiquement homogènes, puis l'estimation régionale, par le transfert à l'intérieur d'une même région de l'information des sites jaugés à un site non-jaugé ou partiellement jaugé pour lequel on ne dispose pas d'information suffisante. Après avoir donné un aperçu des méthodes pratiquées dans les deux pays, une discussion dégage les caractéristiques principales et les complémentarités des différentes approches et met en évidence l'intérêt de développer une collaboration plus étroite pour mieux tenir compte des particularités et des complémentarités des méthodes développées de part et d'autre. Une des pistes évoquées consiste à combiner l'information régionale pluviométrique (approche française) et hydrométrique (approche québécoise).

Mots clés : modèle régional, crue, analyse fréquentielle, gradex, modèle débit-durée-fréquence, corrélation canonique, régression, indice de crue, précipitation, débit.

1 – INTRODUCTION : PROBLÉMATIQUE ET MOTIVATION

La conception, la construction et la gestion des ouvrages hydrauliques, la prévention des inondations et la gestion des réservoirs nécessitent une connaissance des écoulements aux sites où se posent ces problèmes de conception et de gestion. L'estimation adéquate des événements hydrologiques extrêmes, tels que les crues, est primordiale en raison des risques importants associés à une connaissance insuffisante de ces événements. En effet, le tiers des ruptures de barrages est imputable aux submersions des structures (CFGB, 1994) causées entre autres par une sous-estimation des débits de conception (ou crues de projet). L'analyse fréquentielle des données hydrologiques est une approche privilégiée pour obtenir de bonnes estimations des événements extrêmes dans le cas où une information suffisante est disponible au site d'intérêt (estimation au site). Cependant, en raison du coût important associé à la gestion des réseaux de mesure de données hydrométriques, et de la grande étendue des territoires à couvrir (particulièrement au Canada), on est souvent amené à estimer des événements extrêmes dans des sites où l'on dispose de peu ou même d'aucune information hydrologique. On a alors recours, au site cible où l'on ne dispose pas de suffisamment d'information, à une *procédure d'estimation régionale* (ou *modèle régional*) utilisant des données d'écoulements disponibles à d'autres stations appartenant à une même région hydrologique, et/ou à la prise en compte de l'information sur les phénomènes locaux et régionaux d'un autre type (tel que l'information pluviométrique). Les modèles régionaux sont aussi utilisés plus généralement pour permettre une description globale des caractéristiques de la

structure spatiale des écoulements et autres phénomènes hydrologiques dans une région donnée.

Différentes techniques et procédures d'estimation régionale ont été proposées et utilisées dans diverses régions du monde. Ces techniques font différents types d'hypothèses concernant les phénomènes modélisés, s'appuient sur une variété de types de données, et sont souvent basées sur des théories complètement distinctes. Il importe donc de faire un inventaire des différentes approches d'estimation régionale des phénomènes hydrologiques.

Dans le cadre des rencontres financées par le Fonds Jacques-Cartier et Hydro-Québec, un séminaire de recherche portant sur les méthodes d'estimation régionale en hydrologie a été organisé au Groupement de Lyon du Cemagref, du 26 au 28 mai 1997. Cette rencontre avait pour but de réunir des scientifiques francophones, provenant essentiellement de France et de la Province du Québec, Canada, afin de présenter les approches utilisées de part et d'autre pour la régionalisation des variables hydrologiques. La liste complète des participants au séminaire figure en annexe A. Le présent article est basé sur les présentations et discussions qui ont eu lieu durant ce séminaire, et tente de présenter une synthèse des principaux travaux français et québécois réalisés dans le domaine de l'estimation régionale. Cet article vise aussi à présenter quelques réflexions sur les méthodes couramment utilisées et à dégager des pistes de recherche future et de collaboration entre scientifiques français et québécois afin de proposer des améliorations éventuelles aux techniques présentées.

L'hypothèse de base des modèles de régionalisation les plus utilisés (BERNIER, 1997) est que à chaque site d'une région hydrologiquement homogène, les débits de crue suivent la même distribution à un paramètre d'échelle près. Il peut être intéressant de tester la robustesse des modèles de régionalisation vis-à-vis d'une hétérogénéité spatiale. BERNIER (1997) a réalisé une analyse de sensibilité afin d'examiner l'intérêt d'utiliser l'information régionale en fonction de la variabilité hydrologique spatiale. Il a pu montrer que le choix entre une estimation locale et une estimation régionale dépend du facteur d'hétérogénéité spatiale. Suivant le cas considéré, il est préférable de n'utiliser que l'information locale (données locales en nombre suffisant et forte hétérogénéité spatiale), ou au contraire de privilégier l'information régionale, ou encore d'exploiter conjointement les deux types d'information (cas intermédiaire). BERNIER (1997) a également mentionné l'intérêt de méthodes bayésiennes appliquées à des modèles hiérarchiques, dans lesquels on distingue le niveau d'aléa temporel responsable de la variabilité du phénomène selon les diverses échelles de temps, et le niveau d'aléa régional représentant la variabilité spatiale. Une application d'un tel modèle hiérarchique, appliqué à un problème de l'eau connexe, comme celui de l'apparition de colliformes dans un réseau de distribution d'eau, a été présenté par PARENT et FAHMY (1997).

2 – APERÇU SUR LES MÉTHODES D'ANALYSE HYDROLOGIQUE RÉGIONALE UTILISÉES EN FRANCE

Les méthodes d'analyse régionale utilisées en France sont fortement liées à une technique d'extrapolation de la distribution des crues, la méthode du Gradex

(GUILLOT et DUBAND, 1967 ; CFGB, 1994 ; NAGHETTINI *et al.*, 1996), qui repose sur l'exploitation probabiliste conjointe des séries hydrométriques et pluviométriques. Le paramètre d'échelle de la distribution des pluies, dénommé *gradex* (gradient des valeurs extrêmes), joue un rôle déterminant dans le comportement de la distribution des débits de crue. Ceci explique qu'une partie des travaux français concerne la régionalisation des pluies extrêmes, pour différents pas de temps d'étude, de quelques heures à plusieurs journées. Par ailleurs, différentes méthodologies de régionalisation de la distribution des crues ont été développées, dont les modèles débit-durée-fréquence (GALÉA et PRUDHOMME, 1997), qui permettent la reconstitution du régime des crues, selon une approche multi-durées et multi-fréquences des crues.

Après un rappel sur les techniques d'estimation des probabilités de crues issues de la méthode du Gradex, nous présentons les deux principaux volets d'études régionales pratiquées en France : les travaux liés à la régionalisation des pluies (cartographie du gradex ; relation pluie-relief ; loi régionale des pluies) et à la régionalisation des débits (modèles débit-durée-fréquence ; cartographie de l'écoulement ; utilisation de l'imagerie satellitale).

2.1 Rappel sur les méthodes fréquentielles issues de la méthode du Gradex

2.1.1 Méthode du Gradex

La méthode du Gradex a pour objectif la détermination de la crue de sécurité des grands barrages, dont la période de retour est d'au moins 1 000 ans. L'hypothèse de base de cette méthode concerne la capacité de rétention du sol, qui est supposée avoir une limite supérieure, à partir d'une certaine valeur de pluie. Il en découle, à partir d'une certaine période de retour seuil T_g (égale en général à 10 ou 20 ans, selon la rapidité de saturation du bassin), un parallélisme entre la distribution des pluies maximales PXd et des débits moyens maximaux $VCXd$ (en prenant la même unité pour les débits et les pluies, pour la même durée d) sur un graphique de Gumbel. Ceci revient à supposer que la loi conditionnelle des pertes ou infiltrations, à partir d'une certaine valeur de pluie, tend vers une limite supérieure liée uniquement aux conditions initiales d'humidification du sol du bassin versant (*figure 1*), pour un type de sol et de sous-sol donnés.

La deuxième hypothèse est relative à la distribution des pluies maximales sur une durée d , qui suit une loi de Gumbel, de paramètre d'échelle $a_p(d)$, appelé gradex des pluies. Dans la pratique, l'application de ces deux hypothèses, pour une durée d_H égale à la durée moyenne de l'hydrogramme de ruissellement direct, conduit à la relation suivante :

$$VCXd_H(T) = VCXd_H(T_g) + a_p(d_H) * \text{Log}(T/T_g) \quad (T > T_g) \quad (1)$$

Le principal intérêt de la méthode du Gradex est de pallier à une des limites de l'approche statistique classique sur les débits. Les informations locales en débit sont le plus souvent insuffisantes (20 à 30 ans d'observation en continu) et sujettes à caution pour les crues les plus fortes (extrapolation des courbes de tarage) : ceci ne permet pas de valider le choix d'une loi de probabilité, pour la queue de la distribution. L'hypothèse de base de la méthode du Gradex, portant sur la relation forte lors d'événements extrêmes entre les pluies et les débits, permet de conforter partiellement la distribution des débits à partir de celle des pluies.

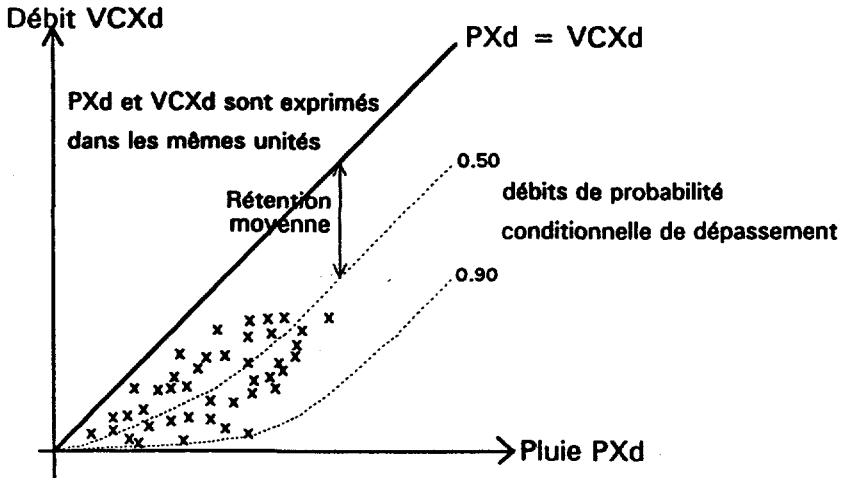


Figure 1 Illustration de la relation entre précipitations et volume de crues dans la méthode du Gradex.

Illustration of the relationship between storm rainfall and flood volume in the Gradex Method.

2.1.2 Modèle Agregée

Différents développements ont été proposés à la méthode du Gradex (CFGB, 1994), notamment pour élargir son domaine fréquentiel d'application aux événements de période de retour inférieure à 1 000 ans. Parmi ceux-ci on peut mentionner le modèle Agregée (MARGOUM, 1992, MARGOUM *et al.*, 1994 ; LANG, 1995, 1997a), qui respecte le parallélisme entre les distributions de pluie et de débit. Le modèle Agregée comporte trois domaines fréquentiels (*figure 2*) : *le domaine des crues observables*, utilisant l'information des débits observés en continu et éventuellement celle des crues historiques, *le domaine des crues rares*, issu d'un raccordement progressif entre le premier et le troisième domaine, *et le domaine des crues extrêmes*, piloté par la distribution des pluies :

$$VCXd(T) = VCXd(T_g) + \frac{a_e(d)}{K_p - K_q} \cdot \{K_p \cdot \text{Log}[(T + K_p)/(T_g + K_p)] - K_q \cdot \text{Log}((T + K_q)/(T_g + K_q))\} \tag{2}$$

$$K_p = [a_e(d)/a_p(T_g, d) - 1] \cdot T_g$$

$$K_q = [a_p(T_g, d)/a_q(T_g, d) - 1] \cdot T_g$$

pour $(T > T_g)$, avec :

$$a_p(T, d) = \frac{\partial PXd(T)}{\partial \text{Log}T} ; a_q(T, d) = \frac{\partial VCXd(T)}{\partial \text{Log}T} \tag{3}$$

$$a_e(d) = \lim_{T \rightarrow +\infty} a_p(T, d)$$

Les paramètres $a_p(T, d)$ et $a_q(T, d)$, appelés respectivement pseudo-gradex des pluies et des débits, représentent la pente de la distribution (des pluies ou

LE MODELE AGREGEE

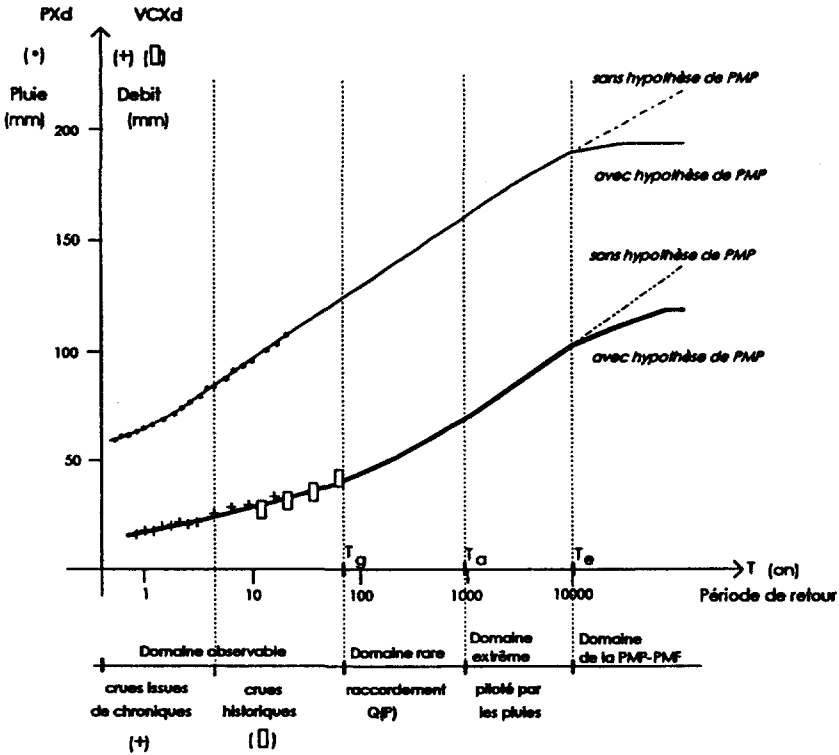


Figure 2 Domaines d'étude du modèle Agregée.
 Domains studied by the Agregée model.

des débits) dans un graphique de Gumbel, pour la période de retour T . Lorsque les pluies suivent une loi de Gumbel (pseudo-gradex $a_p(T, d)$ constant égal à $a_e(d)$), l'expression (3) devient (avec $K_p = 0$) :

$$VCXd(T) = VCXd(T_g) + a_e(d) \cdot \text{Log} \left[1 + \frac{a_q(T_g, d)}{a_e(d)} \cdot \frac{T - T_g}{T_g} \right] \quad (4)$$

Le modèle Agregée conserve donc l'hypothèse de base de la méthode du Gradex (sur la loi conditionnelle des pertes), tout en proposant quelques développements sur l'exploitation de l'information hydrométrique (crues historiques), l'extrapolation progressive de la distribution des crues à partir du seuil T_g , et enfin la généralisation de la loi des pluies à des distributions à caractère asymptotiquement exponentiel (existence d'une limite $a_e(d)$).

La méthode du Gradex et les approches dérivées telle que la méthode Agregée sont fortement tributaires de l'estimation du gradex des pluies. C'est pour cette raison qu'historiquement les estimations locales de la distribution des pluies ont été complétées par une approche régionale.

2.2 Méthodes d'estimation régionale de la distribution des pluies

2.2.1 Cartographie du gradex

De nombreux travaux (CTGREF ET MÉTÉOROLOGIE, 1979 ; CEMAGREF ET MÉTÉOROLOGIE, 1982 ; LABORDE, 1984) ont permis de dresser des cartes d'iso-valeurs du gradex des pluies $a_p(d)$, pour différentes durées ou pas de temps d . L'analyse des données disponibles à chaque poste de mesure fournit une estimation locale du gradex, obtenu par la méthode des moments :

$$a_p(d) = 0,78 \cdot \sigma(PXd) \quad (5)$$

où $\sigma(PXd)$ est l'écart-type des pluies maximales PXd . Il existe des techniques plus élaborées permettant d'améliorer la robustesse de l'estimation locale du gradex (CFGB, 1994), en travaillant suivant différents modes d'échantillonnage (pluies maximales sur l'année ou la saison ; pluies supérieures à un seuil ; pluies journalières), ou en raisonnant sur différentes échelles temporelles de pluie (consolidation des gradex $a_p(d)$ obtenus sur différents pas de temps). Il est possible également d'exploiter une méthode non-paramétrique pour l'estimation du gradex (THAO *et al.*, 1993).

La technique du krigeage (MATHERON, 1965) permet de caler les paramètres du variogramme, d'interpoler spatialement entre les postes pluviométriques et d'apprécier l'erreur résiduelle. BOIS *et al.* (1995) ont par exemple réalisé un atlas des risques de pluie intense, où figurent des cartes d'iso-gradex, au pas de temps d de 1, 2, 4, 6, 12 et 24 heures (*figure 3*), ainsi qu'une indication de la portée du variogramme (distance au-delà de laquelle un point de donnée n'apportera pas d'information).

2.2.2 Relation pluie-relief

L'analyse du champ spatio-temporel des précipitations extrêmes (LABORDE, 1984 ; SLIMANI, 1985 ; DESUROSNE, 1992 ; LEBLOIS, 1996 ; KIEFFER & BOIS, 1997) montre une forte influence du relief sur les pluies, sans pour autant conduire à des résultats simples, et généralisables spatialement. Les résultats de ces différents travaux montrent que les valeurs maximales de pluies à pas de temps fin (horaire par exemple) semblent les plus homogènes spatialement. À un tel pas de temps, les pluies rares sont essentiellement convectives et il semblerait que la notion d'épuisement des masses d'air joue un rôle important (distance à la mer ; blocage par des reliefs intermédiaires suffisamment marqués). À un pas de temps plus large (journalier par exemple), les pluies rares sont davantage expliquées par le relief et les conditions locales (exposition).

Une autre caractéristique dans le traitement des pluies réside dans la mauvaise représentativité du réseau de mesure pluviographique vis-à-vis du relief, en raison des contraintes opérationnelles d'accès aux sites dans les zones d'altitude. Or l'estimation de la variabilité du gradex des pluies sur un bassin versant nécessite une bonne connaissance du champ spatial des précipitations. Selon ces auteurs, les différentes pistes pour améliorer la cartographie du gradex des pluies, aux pas de temps inférieurs à la journée, sont les suivantes :

- calage de formules obtenues par corrélation multiple entre une variable à expliquer, par exemple le gradex en un point, et une altitude représentative du relief entourant chaque point ;



Figure 3 Cartographie du gradex des précipitations extrêmes d'automne. Cévennes-Vivarois. Pas de temps de six heures.

Six hour rainfall gradex in Cévennes-Vivarois (autumn season).

– utilisation de relations locales entre le quantile de pluie journalière $PX1J(T)$ et les quantiles sur des pas de temps plus courts $PXd(T)$ (DESUROSNE *et al.*, 1996 ; DESUROSNE et LEBLOIS, 1997 ; KIEFFER et BOIS, 1997).

2.2.3 Loi régionale des pluies

La cartographie des valeurs du gradex des pluies conduit à décrire spatialement la variabilité du risque lié au dépassement d'une valeur locale d'intensité pluviométrique. Elle repose sur le postulat d'une loi de Gumbel pour représenter

les pluies, qui semble plutôt vérifié à l'échelle locale. La question est plus controversée lorsque l'on s'intéresse à un risque pluviométrique sur une région donnée.

Une première technique consiste à agglomérer toutes les données de pluie disponibles sur la zone d'étude, en ayant au préalable transformé les séries locales (en les centrant et en les réduisant, ou à l'aide d'autres transformations). Ceci permet d'augmenter la taille de l'échantillon et éventuellement de faire apparaître une composante régionale, non accessible directement au niveau local en raison de la trop courte longueur des séries ou de la non-adéquation entre la taille des cellules convectives et la densité du réseau de mesure pluviographique. La liaison entre les différents postes est supposée n'intervenir que sur la longueur effective de la série agglomérée (inférieure au nombre total d'année-stations) et ne pas perturber l'estimation de la composante régionale. LANG (1997b) a présenté les résultats d'une simulation Monte-Carlo sur l'effet de la liaison inter-sites dans ce type d'agglomération, qui a mis en évidence la possibilité d'introduire artificiellement une courbure sur la fonction de répartition régionale des pluies (sur un papier de Gumbel). Cet artefact s'explique par la technique d'agglomération qui peut regrouper ensemble des intensités de pluie appartenant au même événement météorologique, alors que l'interprétation probabiliste classique suppose l'indépendance de toutes les valeurs de l'échantillon.

Une deuxième approche consiste à s'intéresser à l'espérance mathématique de la probabilité au dépassement $E[\text{Prob}(PX_d > x)]$, qui est interprétée comme le risque régional d'occurrence d'événement pluviométrique. GARÇON (1995) a réalisé une série de simulations qui montre qu'une loi locale de Gumbel pour les pluies conduit, pour l'observateur conscient de l'incertitude d'estimation des paramètres, à une distribution régionale donnant une plus forte probabilité aux valeurs extrêmes. Une analyse des séries pluviographiques françaises montre d'ailleurs que la loi régionale qui donnerait les meilleurs résultats sur l'échantillon disponible présenterait une courbure vers le haut sur un graphique de Gumbel.

2.3 Méthodes d'estimation de la distribution régionale des débits

2.3.1 Modèles débit-durée-fréquence

Les modèles débit-durée-fréquence, notés QdF (PRUDHOMME, 1995 ; GALÉA et PRUDHOMME, 1997) permettent la reconstitution du régime des crues en tout site non jaugé, à partir d'une technique de normalisation qui présente des analogies avec la méthode de l'indice de crue (DALRYMPLE, 1960). La procédure d'estimation des quantiles de crue est réalisée en trois étapes :

- 1) *Estimation de trois paramètres locaux, représentatifs du bassin versant* : la durée caractéristique de crue D , le débit décennal de pointe $Q_{IXA10} = Q(T = 10 \text{ ans} ; d = 0 \text{ sec})$ et le gradex des pluies $a_p(d)$. Les deux premiers paramètres, respectivement des descripteurs de la fonction de transfert et de production des crues, sont estimés directement à partir de mesures hydrologiques lorsqu'elles existent, ou autrement à l'aide de régressions linéaires établies à l'échelle nationale ou régionale et utilisant des variables explicatives facilement estimables comme la superficie du bassin versant et des valeurs caractéristiques de pluie (CTGREF *et al.*, 1980 ; CEMAGREF, 1989). Le gradex des pluies est estimé, pour différents pas de temps d , à partir de postes pluviographiques situés sur le bassin versant ou à partir de documents présentant la cartographie du gradex.

2) *Choix d'un modèle de référence QdF adimensionnel.* Pour différentes valeurs de durées d , le rapport $a_p(d)/QIXA10$, obtenu en première étape, est comparé à deux limites $L_1(d/D)$ et $L_2(d/D)$. Suivant la position de ce rapport (inférieur à L_1 ; compris entre L_1 et L_2 ; supérieur à L_2), on choisira respectivement un des trois modèles de référence (appelés Vandenesse, Florac ou Soyans, d'après les noms des bassins utilisés pour les constituer). Chaque modèle QdF de référence se présente sous la forme d'une famille de courbes adimensionnelles :

$$\begin{aligned} T \leq 10 \text{ ans} : \frac{Q(T, d)}{QIXA10} &= A(d/D) + B(d/D) \cdot \text{Log} T \\ T > 10 \text{ ans} : \frac{Q(T, d)}{QIXA10} &= \frac{Q(10, d)}{QIXA10} + C(d/D) \cdot \text{Log} \left[1 + \frac{B(d/D)}{C(d/D)} \cdot \frac{T - 10}{10} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Les fonctions L_1, L_2, L_3, A, B, C de d/D ont une forme homographique, $f(x) = 1/(ax + b) + c$, où les valeurs des paramètres a, b et c dépendent de chacune des limites L_1, L_2, L_3 , et des fonctions A, B et C des trois modèles de référence.

3) *Reconstitution du régime des crues par dénormalisation du modèle de référence.* Le quantile local de crue est alors estimé en dénormalisant la distribution adimensionnelle du modèle de référence :

$$Q(T, d)_{(\text{local})} = \left(\frac{Q(T, d)}{QIXA10} \right)_{(\text{modèle référence})} \cdot (QIXA10)_{(\text{local})} \quad (7)$$

Cette procédure de régionalisation comporte plusieurs aspects originaux :

- l'objectif de la méthode est de reconstituer la distribution des crues, pas seulement pour le débit de pointe, mais également pour des débits calculés sur une durée d quelconque (cf. quantile $Q(T, d)$ des équations 6 et 7). La variable Q du débit étudié est relative soit à un débit moyen maximum sur la durée d , débit moyen $VCXd(T)$, soit à un débit dépassé de façon continue pendant la durée d , débit seuil maximum $QCXd(T)$;

- la norme de débit $QIXA10$, utilisée pour travailler sur une distribution adimensionnelle des crues, est relative à une période de retour de 10 ans, bien plus élevée que celle utilisée par la méthode de l'indice de crue, où la moyenne (ou la médiane) des valeurs maximales annuelles de débits de crue a une période de retour voisine de 2 ans. Ce choix conduit à donner davantage de poids, dans la procédure de régionalisation, aux descripteurs locaux. En contrepartie, les modèles de référence ont un champ d'application beaucoup plus vaste. Actuellement, de nombreux régimes de crue en France et en Europe ont pu être reconstitués à l'aide d'un des trois modèles de référence adimensionnel et des deux descripteurs locaux ;

- la procédure de régionalisation intègre une information pluviométrique, par le gradex des pluies. Cette information est exploitée à deux niveaux : dans le choix du modèle de référence, par le critère $a_p(d)/QIXA10$, et dans la forme des courbes adimensionnelles de référence où la deuxième partie de l'équation (6) ($T > 10$ ans) a une forme issue du modèle Agréee (équation 4).

Ajoutons la possibilité de générer, à partir des courbes QdF en débit seuil $QCXd$, des hydrogrammes synthétiques monofréquence, fonctionnellement analogue à des crues de projet et relatifs à une période de retour. Ils sont utilisés pour la détermination des limites du champ d'inondation d'une crue de référence, à l'aide d'un modèle hydraulique en régime transitoire. Ces hydrogrammes présentent la propriété d'être homogènes en fréquence, quelle que soit la variable de

débit utilisée pour les caractériser (débit moyen VCXd ou débit seuil QCXd, de durée quelconque d).

Une procédure similaire de régionalisation par les modèles QdF a également été appliquée aux régimes d'étiage (GALÉA *et al.*, 1998), à partir des deux descripteurs suivants : le débit moyen minimal VCN(T = 2 ans, d = 1 jour) et la durée caractéristique d'étiage issue des courbes de tarissement.

2.3.2 Cartographie de l'écoulement

Un autre aspect de la régionalisation concerne la restitution d'informations locales sous une forme cartographique. L'objectif est davantage d'appréhender la variabilité spatiale des écoulements, que d'estimer ceux-ci en tout point. Une méthode classique, pour l'étude de la ressource en eau, consiste à cartographier le débit moyen annuel ou mensuel sous forme de lame d'eau écoulée. Elle présente cependant l'inconvénient de faire l'hypothèse implicite de l'homogénéité spatiale des processus d'écoulement, une fois la caractéristique de débit normée par la superficie du bassin versant. LEBLOIS et OBERLIN (1994) ont pu mettre en évidence, sur une trentaine de rivières françaises ayant chacune au moins 4 stations de jaugeage, un effet de réduction significative des écoulements disponibles vers l'aval (effet RESEDA) qui s'explique par la décroissance fréquente des pluies quand l'altitude décroît, la reprise de l'évaporation plus importante en aval (pour des raisons de hausse de température et de disponibilité de l'eau dans les vallées) et l'infiltration profonde le long des plaines alluviales. LEBLOIS et SAUQUET (1997) proposent d'interpoler la caractéristique de débit dans un espace à trois dimensions : la position géographique (deux dimensions x et y) et la taille du bassin versant (une dimension S). La cartographie est réalisée avec une technique de krigeage utilisant la distance d :

$$d^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + \lambda \cdot (\text{Log}S_2 - \text{Log}S_1)^2$$

$$\text{où : } \lambda = \frac{\text{Max}_{i,j}[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]}{\text{Max}_{i,j}[(\text{Log}S_j - \text{Log}S_i)^2]} \quad (8)$$

Cette technique de cartographie permet par exemple de visualiser le cycle annuel des écoulements et de mettre en évidence, pour chaque période de l'année, les zones présentant la plus forte production (*figure 4*). Elle évite dans la technique d'interpolation d'accorder le même poids à deux informations issues de points géographiquement voisins, mais relatifs à deux bassins versants de taille très différente (cas d'une confluence entre un affluent de faible taille et un grand cours d'eau sur la fin de son parcours).

2.3.3 Utilisation de l'imagerie satellitale

Grâce à sa vision synoptique et répétitive, la télédétection satellitale permet l'extrapolation spatiale et temporelle d'indicateurs relatifs aux états de surface. Or on sait depuis quelques années que dans certains contextes climatiques (ex. zones arides et semi-arides) et pour certaines échelles (petits et moyens bassins versants), ces états de surface sont des facteurs déterminants des écoulements. C'est pourquoi, en zone soudano-sahélienne par exemple, plusieurs études ont tenté de reconstituer les ruissellements de bassins non jaugeés en utilisant des cartographies d'états de surface obtenues par télédétection (MALEK, 1989 ; DEVINEAU *et al.*, 1992 ; GRÉSILLON, 1994).

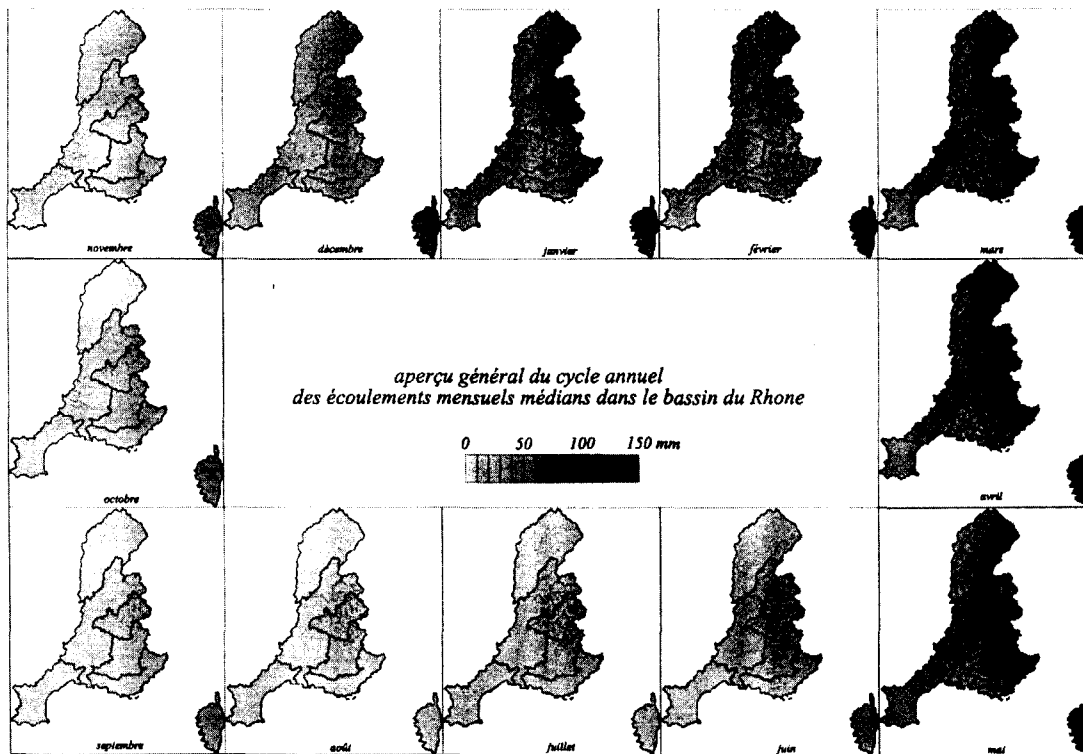


Figure 4 Écoulements mensuels médians – aperçu général du cycle annuel dans le bassin du Rhône.

Median monthly flow – annual cycle in the Rhône basin.

Scale from 0 to 200 mm as colour goes from white to black

Ces approches de type agrégatif (de l'unité du m^2 jusqu'à la taille du bassin versant) buttent le plus souvent sur la difficulté de prendre en compte les mécanismes hydrologiques intervenant à des niveaux d'organisation qui sont supérieurs à celui de la cellule élémentaire définie par le modèle (quelques m^2). Ces démarches conduisent alors à établir des fonctions de transition destinées à corriger ces « sauts » d'échelle. Une des voies possibles pour permettre le passage de l'échelle locale à l'échelle globale est de rechercher un niveau de description hydrodynamique des états de surface intermédiaire entre l'unité élémentaire (ici le m^2) et le bassin versant, autrement dit de réduire le saut d'échelle. VINÉ *et al.* (1997) proposent une approche désagrégative, en utilisant la télédétection satellitale comme outil de segmentation de l'espace, à partir du découpage du bassin versant en zones homogènes, suivant leur état de surface et le taux de végétation. Un coefficient d'écoulement $(Ce)_j$ est affecté à chaque zone homogène $n^\circ j$. Pour un bassin versant $n^\circ i$, de superficie S_i , constitué de sous-bassins homogènes de superficie S_{ij} , le modèle hydrologique transforme la pluie p_i en débit q_i , en additionnant les écoulements de chaque zone homogène :

$$q_i = \sum_j (Ce)_j \cdot (S_{ij}/S_i) \cdot p_i$$

avec :

$$(Ce)_j = (Ce_{réf})_j \cdot \{S_{ij}/(S_{réf})_j\}^{n-1} \quad (9)$$

Le coefficient d'écoulement $(Ce)_j$ est modulé en fonction de la superficie, à l'aide de l'exposant $(n - 1)$, pour tenir compte du laminage et de l'infiltration lors du transfert amont-aval. Après une phase de calibrage des paramètres du modèle, la procédure permet de reconstituer les écoulements à partir des mesures de pluie et de l'information spatiale issue de la télédétection. Cette technique permet de progresser dans le domaine de la régionalisation hydrologique, en exploitant la connaissance des états de surface obtenus par imagerie satellitale.

3 – APERÇU SUR LES MÉTHODES D'ANALYSE HYDROLOGIQUE RÉGIONALE UTILISÉES AU QUÉBEC

Le principe de base des méthodologies utilisées au Québec est d'ajouter à l'information locale limitée une information spatiale provenant des bassins ayant un régime hydrologique similaire à celui du bassin cible. Ces méthodologies d'estimation régionale de variables hydrologiques tels que les quantiles de crues comprennent généralement deux étapes :

1) définition et détermination des régions hydrologiquement homogènes : c'est-à-dire regroupement des stations ayant un comportement hydrologique semblable ; et

2) estimation régionale : transfert à l'intérieur d'une même région de l'information des sites jaugés à un site non-jaugé ou partiellement jaugé pour lequel on ne dispose pas d'information suffisante.

Différentes méthodologies d'estimation régionale peuvent alors être définies en considérant les couples formés par les différentes méthodes de détermination des régions homogènes et par les différentes méthodes d'estimation régionale des

débites $Q(T)$ de période de retour T . Par définition, la performance d'une méthodologie d'estimation régionale dépend des méthodes retenues durant ces deux étapes. Un projet de recherche a été mené par une équipe de scientifiques canadiens (GREHYS, 1996a, b), afin de comparer les modèles d'estimation régionale des crues utilisés en Amérique du Nord. Les résultats de l'intercomparaison indiquent que, pour la détermination des régions homogènes, la méthode des régions d'influence (BURN, 1990a, b) et la méthode d'analyse des corrélations canoniques (CAVADIAS, 1989, 1990) se distinguent des autres. Parmi les différentes méthodes d'estimation régionale, la méthode de l'indice de crue (DALRYMPLE, 1960) et la méthode de régression (NGUYEN et PANDEY, 1994) ont conduit à des estimations adéquates. Ces différentes méthodes s'appliquent aux sites partiellement jaugés ou non-jaugés. Les deux prochaines sections présentent un aperçu de ces méthodes.

3.1 Méthodes de détermination des régions hydrologiquement homogènes

La détermination des *régions homogènes* consiste à regrouper, pour une variable hydrologique donnée, les stations ayant le même comportement hydrologique. La définition d'homogénéité reste cependant assez vague et subjective, et les données disponibles ne permettent souvent pas d'effectuer des tests statistiques concluants. On distingue deux types d'approche pour la détermination des régions homogènes :

1) **approche basée sur des régions fixes** : ensemble de stations formant une même région homogène. Deux sous-groupes peuvent être considérés :

– *Régions géographiquement contiguës* : Ces régions peuvent être définies par exemple à partir de la similarité des densités non-paramétriques des débits de crue (HOSKING et WALLIS, 1993 ; GINGRAS et ADAMOWSKI, 1992 ; GINGRAS *et al.*, 1994 ; ADAMOWSKI *et al.*, 1994).

– *Régions non-contiguës* : Ces régions peuvent être déterminées par exemple par analyse factorielle des correspondances et classification ascendante hiérarchique (BENZECRI, 1973 ; JAMBU, 1976), et

2) **approche basée sur des régions du type voisinage** : où on associe à chaque station cible son propre voisinage. La méthode des *Régions d'influence* (BURN, 1988, 1990a, b ; ZRINJI et BURN, 1994) définit la proximité de deux sites par une distance dans un espace multidimensionnel dont les axes sont des caractéristiques hydrologiques, physiographiques et météorologiques. Les voisinages peuvent aussi être définis par *analyse des corrélations canoniques* (CAVADIAS, 1989, 1990).

La figure 5 illustre les différentes approches pour la détermination des régions homogènes. La définition des régions hydrologiques homogènes sur la base de la proximité géographique a été longuement pratiquée (NERC, 1975 ; BEABLE et MCKERCHAR, 1982). Cette approche peut être justifiée si les facteurs qui expliquent le régime d'écoulement, tels que le type de sol ou l'altitude, présentent une cohérence spatiale. En pratique, ceci n'est généralement pas le cas pour les variables physiographiques explicatives (telles que l'aire du bassin versant ou sa forme) et des améliorations substantielles sont alors possibles en adoptant des régions du type voisinage. Réalisant que la proximité géographique des bassins versants n'est pas une garantie de leur similarité hydrologique, plusieurs auteurs ont contesté le concept de régions géographiques homogènes (WILTSHIRE, 1986 ; CUNNANE, 1989 ; BURN, 1990a ; CAVADIAS, 1990). La méthode des régions d'influence et la méthode d'analyse des corrélations canoniques qui ont découlé de ces critiques sont présentées brièvement dans ce qui suit.

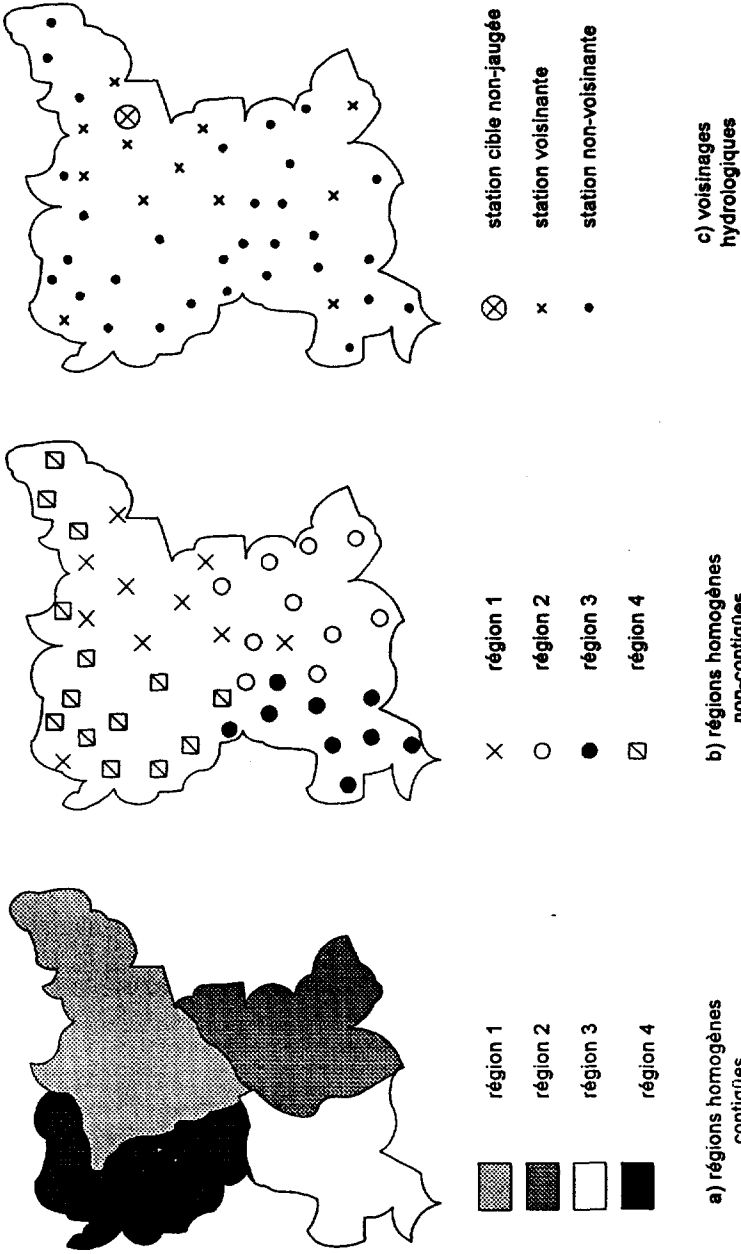


Figure 5 Approches pour la détermination des régions homogènes.
Approaches for the delineation of homogeneous regions.

3.1.1 Méthode des régions d'influence

La méthode des régions d'influence est une méthode de détermination des régions « homogènes » au sens hydrologique. Selon cette approche, chaque site peut être considéré comme le centre d'une région formée de sites dont les caractéristiques de crue sont similaires. Cette approche implique généralement que l'on dispose d'un minimum d'information hydrologique au site pour lequel on souhaite définir la région d'influence. Dans le cas contraire, les variables climatologiques et physiographiques susceptibles de pallier ce manque de données peuvent être identifiées et utilisées comme supplément d'information (MATHIER *et al.*, 1994). On calcule ensuite les distances entre les sites dans l'univers des variables (attributs) sélectionnées.

Dans l'espace des attributs physiographiques et/ou hydrologiques on définit la distance entre deux sites i et j par :

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{m=1}^M \omega_m (C_m^i - C_m^j)^2} \quad (10)$$

où M est le nombre d'attributs considérés, C_m^i est la valeur standardisée de l'attribut d'ordre m au site i , et ω_m est le poids associé à l'attribut C_m . Les attributs sont standardisés par division par leur écart-type calculé pour l'ensemble des stations. Dans le cas des sites cibles jaugés, une liste d'attributs hydrologiques peut inclure le coefficient de variation C_v des débits de crues, ou le débit spécifique du bassin. Plusieurs attributs physiographiques peuvent être considérés comme la longitude et la latitude de la station. De plus, des attributs météorologiques, tels que la précipitation totale moyenne annuelle, ou la profondeur moyenne de neige sur le sol 5 jours avant la crue, peuvent aussi être considérés. Plusieurs variantes de la méthode ont été présentées, en fonction des attributs utilisés et selon que le site cible est partiellement jaugé ou non-jaugé (BURN, 1988, 1990a, b ; ZRINJI et BURN, 1994 ; GREHYS, 1996a). Les poids ω_m permettent d'accorder davantage d'importance à un attribut de façon à tenir compte de l'importance relative de certaines variables descriptives dans la réponse hydrologique du bassin.

La région d'influence du site i ROI_i est définie par l'ensemble des sites j satisfaisant la relation :

$$ROI_i = \{ \text{sute } j \text{ tel que } D_{ij} \leq \theta_j \} \quad (11)$$

où θ_j est un seuil (distance limite) qui permet d'obtenir un compromis entre la quantité d'information (nombre de stations voisines) à considérer dans l'analyse régionale et l'homogénéité hydrologique du groupe de stations voisines sélectionnées. Une fonction de pondération peut aussi être calculée pour refléter la proximité relative des différents sites voisins du site cible. Une description plus détaillée de la méthode est présentée dans BURN (1990b), MATHIER *et al.* (1994) ou GREHYS (1996a). Il est important aussi de mentionner que la méthode des régions d'influence s'apparente à la méthode de classification du « diamètre critique » (JAMBU, 1978).

3.1.2 Méthode d'analyse des corrélations canoniques

La méthode d'analyse des corrélations canoniques permet d'identifier les sites dont le régime de crues est similaire au site cible (CAVADIAS, 1989, 1990 ;

RIBEIRO-CORRÉA *et al.*, 1995 ; OUARDA *et al.*, 1997). L'analyse des corrélations canoniques est un outil d'analyse statistique multivariée qui permet de décrire la relation de dépendance existant entre deux ensembles de variables aléatoires. Cette méthode permet de déterminer des paires de combinaisons linéaires de chaque ensemble de variables, que l'on appelle des variables canoniques, telles que la corrélation entre les variables canoniques d'une paire est maximisée, et la corrélation entre les variables de paires différentes est nulle. On obtient ainsi un ensemble de variables canoniques pour les deux ensembles de variables aléatoires associées à des coefficients de corrélation canonique. Il est alors possible d'inférer sur les variables canoniques d'un ensemble connaissant les variables canoniques de l'autre ensemble. On peut aussi calculer une distance entre deux variables canoniques ce qui permet de déterminer des voisinages hydrologiques. MUIRHEAD (1982) présente une description générale de la méthode d'analyse des corrélations canoniques dont nous résumons ici les principaux éléments.

On note $Y = (Y_1, \dots, Y_p)$ et $X = (X_1, \dots, X_q)$ respectivement l'ensemble des variables hydrologiques et l'ensemble des variables caractérisant la géomorphologie et la météorologie des bassins versants. On note aussi W le vecteur de variables canoniques hydrologiques, V le vecteur de variables canoniques physiographiques, $(\lambda_1, \dots, \lambda_p)$ les coefficients de corrélation canonique, et Λ la matrice diagonale formée par les coefficients de corrélation canonique. On suppose que les vecteurs de variables canoniques W et V suivent une distribution multi-normale. La distribution conditionnelle de W étant donné V est alors p-normale. Par conséquent, des bassins physiographiquement semblables et représentés par un vecteur canonique commun V , seront répartis autour d'une position moyenne ΛV dans l'espace canonique hydrologique. La distance à la position moyenne est contrôlée par la forme quadratique de la distribution conditionnelle représentée par une distance de MAHALANOBIS (1936) avec une distribution Khi-deux (χ^2) à p degrés de liberté. La position moyenne est alors estimée pour les bassins jaugés par le vecteur canonique hydrologique réel W_0 calculé en considérant ce bassin. Pour les bassins non-jaugés, la position moyenne est déterminée, en utilisant une estimation de Λ , par ΛV_0 , où V_0 est le vecteur canonique physiographique connu. On peut ainsi définir le voisinage d'un bassin jaugé à un niveau de confiance $(1 - \alpha)$ par l'ensemble de bassins dont la position W dans l'espace canonique hydrologique vérifie la relation :

$$(W - W_0)'(I_p - \hat{\Lambda}\hat{\Lambda}')^{-1}(W - W_0) \leq \chi_{\alpha, p}^2 \quad (12)$$

où I_p est la matrice identité d'ordre p. Le voisinage d'un bassin non-jaugé à un niveau de confiance $(1 - \alpha)$ peut être défini par l'ensemble des bassins dont la position W dans l'espace canonique hydrologique vérifie la relation :

$$(W - \hat{\Lambda}V_0)'(I_p - \hat{\Lambda}\hat{\Lambda}')^{-1}(W - \hat{\Lambda}V_0) \leq \chi_{\alpha, p}^2 \quad (13)$$

GREHYS (1996b) a montré que la méthode d'analyse des corrélations canoniques utilisée pour déterminer les régions homogènes produit de bonnes estimations des quantiles de crue à des sites jaugés ou non-jaugés, quelle que soit la méthode d'estimation utilisée ensuite dans la région. OUARDA *et al.* (1997) ont indiqué que la méthode d'analyse des corrélations canoniques n'est pas sensible à des facteurs tels que la méthode d'estimation au site ou la configuration du réseau hydrométrique.

3.2 Méthodes d'estimation régionale

Une fois la « région homogène » déterminée, le transfert d'information des sites jaugés à un site non-jaugé ou partiellement jaugé à l'intérieur d'une même région peut alors être effectué. Plusieurs approches d'estimation régionale peuvent être considérées. Les méthodes du type stations-années (STEDINGER et TASKER, 1985) consistent à regrouper les données standardisées des différents sites de la région pour obtenir un échantillon représentatif de la distribution régionale. Ces méthodes sont très sensibles à la corrélation spatiale entre les données des différents sites d'une région. Les méthodes d'estimation du type indice de crue (*index flood*) et par régression directe, identifiées comme les plus performantes par GREHYS (1996b), sont présentées brièvement dans les deux sections suivantes.

3.2.1 Méthode de l'indice de crue

La méthode de l'indice de crue pour l'estimation régionale a initialement été proposée par DALRYMPLE (1960). L'hypothèse de base de la méthode est que les données aux différents sites d'une région sont indépendantes et suivent la même distribution statistique à un facteur d'échelle près. Certaines caractéristiques statistiques (tel que le coefficient de variation ou le coefficient d'asymétrie) sont alors constantes à l'intérieur d'une même région homogène. La performance de la méthode d'estimation régionale dans le cas où les hypothèses de base ne sont pas bien respectées est meilleure que dans le cas de la méthode stations-années.

La méthode de l'indice de crue comprend les étapes suivantes :

1) *Standardisation des données.* À chaque site i , et pour chaque année t , les données Q_i^t sont standardisées en divisant par un indicateur de tendance centrale (l'indice de crue). La moyenne \bar{Q}_i a traditionnellement été utilisée comme indice de crue avec la loi des valeurs extrêmes de type I. Cependant, l'utilisation de la médiane pourrait être avantageuse avec d'autres lois.

$$X_i^t = Q_i^t / \bar{Q}_i \quad (14)$$

2) *Calage des paramètres de la distribution régionale.* La distribution « moyenne » standardisée de la région, $F_{\text{region}}(x)$, est alors déterminée en regroupant les données standardisées des différents sites, puis le quantile adimensionnel $X(T)$ de la distribution de X est estimé par :

$$\hat{X}(T) = F_{\text{region}}^{-1}(1 - 1/T; \hat{\theta}) \quad (15)$$

où T est la période de retour, et $\hat{\theta}$ l'estimateur du vecteur des paramètres du modèle.

3) *Estimation de la distribution en un point non jaugé.* La moyenne \bar{Q}_S au site cible S est estimée par régression sur les caractéristiques des bassins, et le quantile désiré $Q_S(T)$ au site cible S est obtenu par :

$$Q_S(T) = X(T) \cdot \bar{Q}_S \quad (16)$$

Différentes variantes de la méthode peuvent être présentées. Si un nombre limité d'années de données est disponible dans le site cible, la moyenne \bar{Q}_S peut être estimée directement à partir des données, ou bien comme une moyenne pondérée de l'estimation par régression sur les caractéristiques des bassins et de l'estimation à partir des données. La méthode de l'indice de crue a été délaissée

pendant longtemps en faveur des méthodes de régression directe. Ceci est principalement dû aux limites de l'algorithme présenté par DALRYMPLE (1960) qui a proposé la détermination des régions sur une base géographique et l'utilisation de la distribution de Gumbel comme « distribution régionale ». Cependant, cette approche fait l'objet d'un regain d'intérêt et de nouveaux développements durant les dernières années et elle est maintenant considérée comme l'une des méthodes d'estimation régionale les plus efficaces (WALLIS, 1980 ; CUNNANE, 1989 ; POTTER et LETTENMAIER, 1990 ; GREHYS, 1996b).

3.2.2 Méthode de régression multiple directe

La méthode de régression multiple permet d'établir une relation directe entre les variables hydrologiques (quantiles de crues) et les variables explicatives physiographiques ou météorologiques (surface de drainage, pente du cours d'eau principal, surface contrôlée par les lacs et marées, précipitation moyenne annuelle, etc.). Elle a l'avantage d'être simple, rapide et de permettre d'utiliser des distributions différentes pour représenter les débits de crue dans différents sites de la même région. De plus, la méthode n'est pas sensible à l'hétérogénéité qui peut exister dans la région considérée. On suppose souvent que la relation entre quantiles de crues et variables explicatives prend la forme d'une fonction puissance :

$$Q(T) = \beta_0 C_1^{\beta_1} C_2^{\beta_2} \dots C_p^{\beta_p} e^\varepsilon \quad (17)$$

où $Q(T)$ est le quantile de période de retour T , β_i sont des paramètres à estimer, et ε une erreur normale. On peut effectuer une transformation logarithmique des variables afin de linéariser la relation :

$$\text{Log}Q(T) = \text{Log}\beta_0 + \beta_1 \text{Log}C_1 + \beta_2 \text{Log}C_2 + \dots + \beta_p \text{Log}C_p + \varepsilon \quad (18)$$

Les paramètres β_i peuvent alors être estimés par la méthode classique des moindres carrés, ou par la méthode des moindres carrés généralisés (STEDINGER et TASKER, 1985, 1986) pour remédier à la corrélation entre les valeurs des quantiles $Q(T)$. Il faut noter que la transformation logarithmique introduit généralement un biais car :

$$E[Q(T)] = E([\exp(\text{Log}Q(T))] \neq \exp[E(\text{Log}Q(T))]) \quad (19)$$

OUARDA et ASHKAR (1994) ont appliqué la méthode de régression directe aux données de dépassements (pointes au-dessus d'un débit de base donné) en considérant les distributions Exponentielle, Weibull et Pareto Généralisée. La méthode a donné de bons résultats. On souligne que la linéarisation par transformation logarithmique ne peut pas être utilisée si l'équation de régression prend la forme d'une fonction puissance avec un terme d'erreur additif. Il est alors nécessaire d'utiliser un algorithme d'optimisation non-linéaire pour estimer les paramètres du modèle (NGUYEN et PANDEY, 1994). STEDINGER et FILL (1997) ont présenté la méthode de régression des quantiles normalisés, qui utilise la régression régionale pour améliorer l'approche de l'indice de crue.

Plusieurs autres directions de recherche intéressantes ont été explorées par certains travaux québécois. ROY (1993) a proposé l'approche HYBRIDS (acronyme pour Hydrology Based on Regional Information Involving Deterministic and Stochastic Approaches) qui combine les approches déterministe et stochastique

pour la régionalisation des caractéristiques de crue. FORTIN *et al.* (1995) ont développé une approche de délimitation des régions hydrologiques homogènes basée sur des concepts flous. Une étude québécoise en cours tente d'identifier les meilleures possibilités en vue de l'application des méthodologies régionales aux bassins gérés par Hydro-Québec (BOBÉE *et al.*, 1997). Ce problème est d'autant plus important que les régions qui présentent un potentiel important pour Hydro-Québec en terme de développement des ressources hydroélectriques sont situées dans les territoires du grand nord où l'on dispose en général d'une information hydrologique relativement restreinte. Cette étude vise aussi à adapter les méthodologies de régionalisation développées pour l'étude des crues pour la modélisation d'autres variables hydrologiques (étiages, volumes de crue, précipitations, etc.) et à étudier de nouvelles pistes de recherche pour la détermination de régions homogènes.

4 – DISCUSSION ET CRITIQUE

La présentation des travaux réalisés sur la régionalisation en hydrologie par les chercheurs français montre que la composante géographique/cartographique est prépondérante. Certaines caractéristiques ressortent de ces travaux :

1) la représentation des phénomènes par des modèles continus dans l'espace (tel que le traçage d'isohyètes) : l'interpolation permet ainsi la représentation continue des phénomènes de précipitation et d'écoulement. Dans ce sens, les données de télédétection satellitale peuvent s'avérer très utiles comme outils de segmentation de l'espace.

2) l'adoption systématique de certaines hypothèses de modélisation, comme l'hypothèse d'exponentialité asymptotique de la distribution des pluies maximales, ou de forme limite de la loi conditionnelle des pertes. Ces hypothèses, associées principalement à la méthode du Gradex, sont généralement vérifiées et justifiées dans le contexte français.

3) l'aspect conceptuel est assez prononcé dans les modèles utilisés en France alors que l'aspect de modélisation statistique et stochastique est plus prononcé dans les travaux québécois. Ainsi, les phénomènes de précipitation et d'écoulement sont presque toujours modélisés simultanément dans les études de régionalisation effectuées en France (utilisation des phénomènes locaux d'autre nature).

L'adoption d'une définition géographique de la notion de « région » dans les travaux français mène, jusqu'à un certain niveau, à l'abandon d'un degré de liberté par rapport aux approches nord-américaines. En effet, ces dernières adoptent une définition basée surtout sur la proximité hydrologique, qui est plus large que la notion de région géographique. Des cas particuliers de la notion de proximité hydrologique sont représentés par les définitions de régions « non contiguës » ou celles de « voisinages » (voir *figure 5*) qui représentent des généralisations de la notion classique de région géographique. Ceci peut être exprimé différemment en précisant que l'identification des « régions » sur la base d'une approche statistique (qui considère plusieurs attributs hydrologiques, météorologiques, physiographiques, géomorphologiques, etc.) permet de détecter des aspects physiques et géographiques s'ils sont dominants. Cependant l'inverse

n'est pas vrai : l'utilisation d'une approche géographique, ou plus généralement physique, pourrait conduire à omettre certains attributs qui peuvent avoir une importance capitale dans la description de l'homogénéité hydrologique dans la région d'étude.

La continuité spatiale qui caractérise les travaux français portant sur la régionalisation peut être justifiée par trois caractéristiques principales :

1) la densité des réseaux de mesure hydroclimatique. En effet, la densité des réseaux français est nettement plus forte que celle des réseaux québécois. Ceci permet d'assurer une certaine continuité spatiale de l'information.

2) la taille des bassins versants. Les bassins français (et en général les territoires à étudier) sont généralement d'une taille plus faible que les bassins québécois.

3) le relief et les caractéristiques d'échangeabilité. Une différence assez importante existe dans les reliefs et les caractéristiques d'homogénéité entre les deux régions France – Québec. En France, les régions sont généralement bien définies et mieux délimitées géographiquement.

Il faut remarquer que ces trois caractéristiques ne sont pas indépendantes. Ainsi, on peut indiquer par exemple que la densité des réseaux est largement inférieure au Québec qu'en France (caractéristique 1) principalement à cause de la grande étendue de la province du Québec (caractéristique 2) et de la grande homogénéité climatologique du territoire (caractéristique 3).

La synthèse des travaux français et québécois nous permet d'affirmer que les méthodes utilisées en France et au Québec sont de natures très différentes et peuvent être davantage complémentaires que concurrentes. Une des explications concerne la physique des phénomènes, avec une climatologie qui semble être plus homogène au Québec. En fait chaque groupe a adopté une philosophie de régionalisation qui est en accord avec les caractéristiques de sa situation/problématique. Cependant, ces méthodes peuvent être complémentaires, et une amélioration mutuelle par combinaison des approches devrait être envisagée. En effet, la diversité des approches renforce l'intérêt des scientifiques des deux bords à échanger et comparer leurs méthodes sur la base de données communes. Ceci s'apparente à l'esprit du projet FRIEND (Programme Hydrologique International n° 1 de l'Unesco), qui comprend deux pôles de recherche en Europe sur l'hydrologie régionale (FRIEND, 1997).

5 – CONCLUSION ET PISTES DE RECHERCHE FUTURE

Il est estimé qu'un grand pas dans le domaine de l'analyse hydrologique régionale résultera probablement de la combinaison des approches développées par des scientifiques provenant de différents pays. On souligne aussi l'importance de l'utilisation adéquate et optimale de toute l'information locale et régionale disponible (concernant des variables de différentes natures) et de l'intégration de la modélisation des caractères statistiques et des phénomènes physiques dans les mêmes outils.

Les pistes de recherche et de collaboration future entre scientifiques français et québécois sont les suivantes. On peut d'abord souligner que la méthode du

Gradex largement utilisée en France pour la détermination des débits de conception et qui prend en compte l'information sur les phénomènes locaux d'autre nature (l'information pluviométrique notamment), pourrait bénéficier d'une augmentation et d'une formalisation de l'utilisation de l'information régionale. Ceci pourrait aussi être accompagné par un renforcement de la modélisation des aspects statistiques et par une utilisation accrue des différents outils statistiques disponibles. D'autre part, les approches de régionalisation utilisées présentement au Québec (indice de crue, analyse canonique, méthode des régions d'influence, etc.) sont principalement basées sur l'utilisation de l'information régionale concernant les crues. L'amélioration de ces approches serait possible en augmentant et en formalisant l'utilisation de l'information concernant d'autres phénomènes (tels que les précipitations) et en intégrant la modélisation des phénomènes physiques hydrologiques dans les méthodologies de régionalisation.

Les améliorations des approches de régionalisation adoptées présentement en France et au Québec pourront faire l'objet de travaux de recherche communs entre scientifiques français et québécois. Pour atteindre ce but on a mis en évidence la nécessité d'impliquer chacune des deux équipes dans des travaux concrets utilisant les outils développés par l'autre équipe. Ceci permettra aux chercheurs des deux bords de se familiariser d'avantage avec les approches utilisées par l'équipe partenaire. Certaines pistes de recherche concrètes peuvent être proposées selon les grandes lignes suivantes :

- analyse de la structure spatiale des pluies par un modèle de simulations d'événements ;
- établissement des liens entre les méthodes de régionalisation utilisées en France et celles utilisées au Québec : on peut par exemple étudier l'équivalence entre les hypothèses de la méthode du Gradex et l'hypothèse d'existence d'une distribution régionale ;
- application de la méthode de transposition des pluies ;
- identification et modélisation de l'incertitude sur l'estimation des quantiles de crue, par la méthode du Gradex et le modèle Agregée ;
- modélisation de la distribution du débit par le modèle d'une double exponentielle, où la deuxième composante est représentée par le gradex des pluies ;
- test de l'applicabilité de la méthode du Gradex et du modèle Agregée sur des bassins québécois ;
- développement en commun d'une méthodologie de Gradex régional ;
- test de la méthode QdF sur des données du Québec (en particulier sur de grands bassins versants non influencés) ; et
- établissement d'un échange systématique et structuré sur les pratiques en hydrologie opérationnelle.

6 – REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier des Fonds Jacques-Cartier, du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), du Cemagref et d'Hydro-Québec. Les auteurs désirent également remercier leurs collègues participant au séminaire sur « les méthodes d'estimation régionale en hydrologie » pour leurs commentaires et suggestions. Une liste

complète des participants au séminaire est présentée dans l'Annexe A. Les commentaires des réviseurs anonymes ont contribué à améliorer la qualité de l'article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAMOWSKI K., GINGRAS D., PILON P.J. (1994). *Regional flood frequency analysis by nonparametric and L-Moment methods for Ontario and Quebec*. Report to NSERC Strategic Grant. University of Ottawa, Faculty of Engineering, 114 p.
- BEABLE M.E., MCKERCHAR A.I. (1982). *Regional flood estimation in New Zealand*. Nat. Water and Soil Conservation Org., Water Soil Tech. Publ., n° 20.
- BENZECRI J.P. (1973). *L'analyse des données. Tome 2 : L'analyse des correspondances*. Paris, Dunod, 619 p.
- BERNIER J. (1997). Quelques réflexions sur les analyses hydrologiques régionales au Québec et en France. *Séminaire hydrologique sur fonds Jacques-Cartier, « Les méthodes d'estimation régionale en hydrologie »*, Compte rendu, Lyon, Édition Cemagref, 26-28 mai.
- BOBÉE B., OUARDA T.B.M.J., HACHÉ M. (1997). *Régionalisation des événements hydrologiques extrêmes*. Chaire en Hydrologie Statistique Hydro-Québec/CRSNG, INRS-Eau, Univ. du Québec, Rapport de recherche, en préparation.
- BOIS P., MAILLOUX H., OBLED C., DE SAINTIGNON F. (1995). *Atlas expérimental des risques de pluie intense dans la région Cévennes Vivarais*. Pôle Grenoblois des Risques Naturels (LAMA BP53 38041 Grenoble cedex).
- BURN D.H. (1988). Delineation of groups for regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 104, 345-361.
- BURN D.H. (1990a). An appraisal of the « region of influence » approach to flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 35(2), 149-165.
- BURN D.H. (1990b). Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, 26(10), 2257-2265.
- CAVADIAS G.S. (1989). Regional flood estimation by canonical correlation. Paper presented to the 1989 Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, St-John's, Newfoundland.
- CAVADIAS G.S. (1990). The canonical correlation approach to regional flood estimation. Regionalisation in hydrology. *Proc. of the Ljubljana Symposium, IAHS, Publ. n° 91*, 171-178.
- CEMAGREF (1989). *Analyse des crues des petits bassins versants du Sud-Est de la France. Estimation sommaire des débits décennaux et biennaux par des méthodes de type CRUPEDIX et SOCOSE régionalisées*. Cemagref Lyon. IX^e contrat de plan État-Région Rhône-Alpes.
- CEMAGREF, MÉTÉOROLOGIE (1982). *Analyse des fortes pluies de 1 à 10 jours sur 300 postes du Sud-Est de la France*. Cemagref Antony, Paris, Grenoble ; Météorologie Nationale, Bureau de l'Eau., décembre.
- CFGB (1994). *Les crues de projet des barrages : la méthode du Gradex. Design Flood Determination by the Gradex method*. 18^e Congrès CIGB-ICOLD n° 2, nov., Bulletin du Comité Français des Grands Barrages, 96 p.
- CTGREF, MÉTÉOROLOGIE (1979). *Crues et Assainissement ; analyse des pluies de 1 à 10 jours sur 300 postes métropolitains*. CTREF Antony, Météorologie Nationale, Bureau de l'Eau, juillet.
- CTGREF, SRAE, DIAME S.H. (1980). *Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 2 : la méthode SOCOSE ; Information Technique n° 38-2 (juin 1980) ; Fascicule 3 : la méthode CRUPEDIX*.
- CUNNANE C. (1989). Methods and merits of regional flood frequency analysis, *J. Hydrol.*, 100, 269-290.

- DALRYMPLE T., 1960. Flood frequency analysis. *US Geol. Surv. Water Supply Pap.*, 1543A.
- DESUROSNE I. (1992). *Gradients d'intensités de pluie en zone à relief : expérimentations et premières modélisations des données d'un réseau rhonalpin, le TPG*. Thèse de Doctorat, Université L. Pasteur, Strasbourg, Cemagref Lyon, ENITRS Strasbourg, 255 p.
- DESUROSNE I., LEBLOIS E. (1997). Rain intensities in the french Alps. *Third FRIEND report 1994-1997, Flow Regimes from International Experimental and Network Data*, Unesco, Cemagref Editions, 255-262.
- DESUROSNE I., RIBOT-BRUNO J., WATREMEZ S., OBERLIN G. (1996). *Guide pratique des données pluviographiques et des résultats d'un réseau préalpin, le TPG*. Cemagref Lyon, LAMP Clermont-Ferrand, août.
- DEVINEAU J.L., FOURNIER A., LAMACHÈRE J.M., MALEK C. (1992). *Observations au sol, photointerprétation et traitements numériques d'images satellitaires sur la bassin de la mare d'Oursi, Colloque « Mare d'Oursi »*. CNRS, Orstom, LIP-TAKO-GOURMA, Ouagadougou, 17 au 21 février 1992.
- FORTIN V., BOBÉE B., DUCKSTEIN L., BARGAOUI Z., 1995. Détermination floue des zones hydrologiques homogènes, Dans : *Modeling and Management of Sustainable Basin-scale Water Ressource Systems*, IAHS Publ. 231, 367-375.
- FRIEND (1997). *Third FRIEND report 1994-1997, Flow Regimes from International Experimental and Network Data*. Unesco, Cemagref Editions, 432 p.
- GALÉA G., PRUDHOMME C. (1997). Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF. *Rev. Sci. Eau, Vol. 1*, 83-101.
- GALÉA G., MERCIER G., ADLER M.J. (1998). Modèles débit-durée-fréquence d'étiage, concept et usage pour une approche régionale des régimes de basses eaux des bassins hydrographiques de la Loire (France) et du Crisu-Alb (Roumanie). *Rev. Sci. Eau*, à paraître.
- GARCON R. (1995). Étude du risque de précipitations extrêmes de faibles pas de temps dans les Alpes. *Méthodes statistiques et bayésiennes en hydrologie, Conférence internationale en l'honneur de J. Bernier, Unesco, Paris, 11-13 sept., poster et exposé oral*.
- GINGRAS D., ADAMOWSKI K. (1992). Coupling of nonparametric frequency and L-moment analysis for mixed distribution identification. *Water Resources Bulletin*, 28(2), 263-272.
- GINGRAS D., ADAMOWSKI K., PILON P.J. (1994). Regional flood equations for the Provinces of Ontario and Quebec, *Water Resources Bulletin*, 30(1), 55-67.
- GREHYS (Groupe de recherche en hydrologie statistique) (1996a). Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 186, 63-84.
- GREHYS (Groupe de recherche en hydrologie statistique) (1996b). Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, 186, 85-103.
- GRÉSILLON J.M. (1994) *Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants, approches numériques et expérimentales à différentes échelles*. Document HDR, LTHE, Université Joseph Fourier Grenoble, 156 p.
- GUILLOT P., DUBAND D. (1967). La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. *Colloque International sur les crues et leur évaluation, Leningrad, 15-22 août, IASH, publication n° 84*, 560-569.
- HOSKING J.R.M., WALLIS J.R. (1993). Some statistics useful in regional frequency analysis, *Water Resources Research*, 29(2), 271-281.
- JAMBU M. (1976). Sur l'interprétation mutuelle d'une classification hiérarchique et d'une analyse des correspondances, *Revue de Statistiques Appl.*, 24(2), 45-73.
- JAMBU M. (1978). Classification automatique pour l'analyse des données, 1. Méthodes et algorithmes, Dunod, Paris, 310 p.
- KIEFFER A., BOIS P. (1997). Variabilité des caractéristiques statistiques des pluies extrêmes dans les Alpes françaises. *Rev. Sci. Eau, Vol. 2*, 199-216.
- LABORDE J.P. (1984). *Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie : éléments d'hydrologie lorraine*. Thèse Docteur d'État, INPL, Nancy.

- LANG M. (1995). Le modèle Agregée d'estimation des crues rares et extrêmes. *Séminaire « les modèles au Cemagref », session « observation et modélisation », Gif-sur-Yvette, 12-13 oct.*, Ed. Cemagref Antony, 99-108.
- LANG M. (1997a). New developments with Agregée, a statistical model using hydrometeorological information. *Third FRIEND report 1994-1997, Flow Regimes from International Experimental and Network Data*, Unesco, Cemagref Editions, 181-191.
- LANG M. (1997b). Estimation régionale du gradex des pluies : limites de l'approche par année-station. *Séminaire hydrologique sur fonds Jacques-Cartier, « Les méthodes d'estimation régionale en hydrologie », Compte rendu*, Lyon, Édition Cemagref, 26-28 mai.
- LEBLOIS E. (1996). Contribution au thème CV11b (Pluies rares) dans la prédétermination des risques de crues. *Rapport final de la convention M07314, Cemagref, Région Rhône-Alpes, X^e Contrat de Plan État-Région Rhône-Alpes*.
- LEBLOIS E., OBERLIN G. (1994). Quantification de la réduction significative des écoulements disponibles vers l'aval : effet RESEDA. *Actes des X^e Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 13-14 septembre*, 439-448.
- LEBLOIS E., SAUQUET E. (1997). Scale effects in runoff mapping. *Third FRIEND report 1994-1997, Flow Regimes from International Experimental and Network Data*, Unesco, Cemagref Editions, 109-118.
- MAHALANOBIS P.C. (1936). On the generalized distance in statistics, *Proc. Natl. Inst. Sci. India*, 12, 49-55.
- MALEK C. (1989). *Diagnostic du paysage à partir des données satellitaires – Application au sahel – Oudalan (Burkina Faso)*. Thèse Université Paris VII, 200 p.
- MARGOUM M. (1992). *Estimation des crues rares et extrêmes : le modèle Agregée. Conceptions et premières validations – Thèse de doctorat*, École des Mines de Paris, Cemagref Lyon, GIS Hydrologie FRIEND-AMHY, 252 p.
- MARGOUM M., OBERLIN G., LANG M., WEINGARTNER R. (1994). Estimation des crues rares et extrêmes : principes du modèle Agregée. *Hydrologie Continentale*, vol. 9 (1), 83-98.
- MATHERON, G. (1965). *Variables généralisées et leur estimation*. Masson et Cie, Éditeur.
- MATHIER L., ROY R., PERRON H., BOBÉE B. (1994). *Estimation régionale des débits de crue : Détermination des régions homogènes par la méthode des régions d'influence*. Rapport de recherche n° 420, INRS-Eau, Sainte Foy, 33 p.
- MUIRHEAD R.J. (1982). *Aspects of multivariate statistical theory*. J. Wiley, 673 p.
- NERC (Natural Environment Research Council) (1975). *Flood Studies Report*. NERC, London.
- NAGHETTINI M., POTTER K.W., ILLANGASEKARE T. (1996). Estimating the upper tail of flood-peak frequency distributions using hydrometeorological information. *Water Resour. Res.*, 32(6), 1729-1740.
- NGUYEN V.T.V., PANDEY G.R. (1994). *Regional flood estimation using regression methods : a comparative study*. Water Resources Management and Engineering Series, Research Report n° WRME94/1, McGill University, Montreal, 37 p.
- OUARDA T.B.M.J., ASHKAR F. (1994). *Regional multiple regression flood frequency estimation by the Peaks-Over-Threshold method*. Dep. of Math., Univ. of Moncton, N.-B., Canada. Res. report for the Strategic Grant n° STR0118482, 20 p.
- OUARDA T.B.M.J., BOUCHER G., RASMUSSEN P.F., BOBÉE B. (1997). Regionalization of floods by canonical correlation analysis. In « *Operational Water Management* », J.C. Refsgaard and E.A. Karalis Edts., A.A. Balkema Pub., Rotterdam, 297-302.
- PARENT E., FAMHY T. (1997). Apparition de coliformes sur un réseau de distribution d'eau potable : modèles hiérarchiques mélangeant lois continues et lois discrètes. *Séminaire hydrologique sur fonds Jacques-Cartier, « Les méthodes d'estimation régionale en hydrologie », Compte rendu*, Lyon, Édition Cemagref, 26-28 mai.
- POTTER K.W., LETTENMAIER D.P. (1990). A comparison of regional flood frequency estimation methods using a resampling method. *Water Resour. Res.*, 16(3), 415-424.
- PRUDHOMME C. (1995). *Modèles synthétiques des connaissances en hydrologie : application à la régionalisation des crues en Europe Alpine et Méditerranéenne*. Thèse de Doctorat. Univ. Montpellier II, Cemagref Lyon, déc., 397 p.

- RIBEIRO-CORRÉA J., CAVADIAS G.S., CLEMENT B., ROUSSELLE J., (1995). Identification of hydrological neighborhoods using canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology*, 173, 71-89.
- ROY R. (1993). *Régionalisation des caractéristiques de crue : utilisation d'une méthode combinant les approches déterministes et stochastiques*. Thèse Ph. D., INRS-Eau, Univ. Du Québec, 275 p.
- SLIMANI M. (1985). *Étude des pluies de fréquence rare à faible pas de temps sur la région Cévennes Vivarais : estimation, relation avec le relief, et cartographie synthétique*. Thèse de Docteur Ingénieur, LTHE-INPG Grenoble.
- STEDINGER J.R., FILL H.D. (1997). *Using regional regression within Index Flood procedures and an empirical Bayesian estimator*. Communication personnelle. 29 p.
- STEDINGER J.R., TASKER G. (1985). Regional hydrological analysis, 1, ordinary, weighted, and generalized least squares compared. *Water Resour. Res.*, 21(9), 1421-1432.
- STEDINGER J.R., TASKER G. (1986). Regional hydrologic analysis, 2, Model-error estimators, estimation of sigma and log Pearson type 3 distributions. *Water Resour. Res.*, 22(10), 1487-1499.
- THAO N.T. P., BOIS P., VILLASENOR J.A. (1993). Simulation in order to choose a fitting method for extreme rainfall data. *Atmospheric Research*, Vol. 30, 13-36.
- VINÉ P., GRÉSILLON J.M., PUECH C. (1997). La télédétection, un outil pour mettre en évidence le rôle hydrologique de la végétation et des états de surface. *Proceedings of Rabat Symposium S3 « Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems », IAHS Publ. n° 242, 205-217.*
- WALLIS J.R. (1980). *Risk and uncertainties in the evaluation of flood events for the design of hydraulic structures*. E. Guggino, G. Ross, et E. Tod dini (eds), Peine e Siccita, Fondazione Politecnica del Mediterraneo Catania, Erice, Italie, 3-36.
- WILTSHIRE S.W. (1986). Regional flood frequency analysis I. Homogeneity statistics. *Hydrol. Sci. J.*, 31(3), 321-333.
- ZRINJI Z., BURN D.H. (1994). Flood frequency analysis for ungauged sites using a region of influence approach. *Journal of Hydrology*, 153, 1-21.

ANNEXE A
Liste des participants

Une vingtaine de chercheurs ont participé au séminaire sur « les méthodes d'estimation régionale en hydrologie » qui s'est tenu au Cemagref (groupeement de Lyon) du 26 au 28 mai 1997 :

France :

Cemagref Lyon : G. Galéa, J.M Grésillon, M. Lang, E. Leblois, C. Poulard, E. Sauquet
EDF/DTG Grenoble : R. Garçon, C. Lallement, J. Miquel, P. Tourasse
ENGREF Paris : T. Famhy, E. Parent
INPG/LTHE Grenoble : P. Bois, A. Kieffer, B. Versiani
LAMP Clermont-Ferrand : I. Desurosne
LCT Cemagref/ENGREF Montpellier : P. Viné

Québec :

INRS-Eau, Chaire en Hydrologie Statistique : Titulaire : B. Bobée ; Professeurs invités : J. Bernier et G. Cavadias ; P.F. Rasmussen, T. B.M.J. Ouarda, V. Fortin
Hydro-Québec : R. Roy
Environnement Canada : P. Pilon
École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ÉNIT) : Z. Bargaoui