

Colloque de Varsovie
5^{ème} Symposium Canadien

Proceedings of Symposium No 3
Hydrology ANALYSE 954
DOCUMENTATION

1971 CAN

PRECISION ET SENSIBILITE DES MODELES PARAMETRIQUES

Par:

Raymond Charbonneau¹, Jean Pierre Fortin¹, et George Girard²

RESUME

Après avoir décrit un modèle paramétrique simple permettant de reconstituer les crues de printemps dues aux apports de la fonte de la neige seule ou additionnée de pluie, les auteurs démontrent l'influence des données et des paramètres sur les résultats obtenus. Plus précisément, ils analysent, à l'aide de variations arbitraires, les répercussions sur les résultats du pourcentage de couverture forestière, de la représentativité des mesures ponctuelles et enfin de la représentativité des stations utilisées par rapport au bassin étudié. Procédant aussi par variations arbitraires, ils évaluent la sensibilité de certains paramètres du modèle, puis discutent l'interdépendance de paramètres pris deux à deux, en fonction de la surface de réponse d'un critère d'optimisation. Ils concluent avec une appréciation des avantages et désavantages de ce genre de modèle pour l'étude des débits provenant de la fonte, et des suggestions quant aux perspectives de travaux futurs dans ce domaine.

SYNOPSIS

A description is given of a simple parametric model which simulates the high river flows caused by snowmelt alone or snowmelt accompanied by rain fall; the influence of the input data and the parameter values on the results is demonstrated. More precisely the authors present an analysis of the effects introduced by arbitrary variations in the extent of forest cover, the representativity of point measurements and of the stations with respect to the whole basin. In a similar manner, the sensitivity of the model to changes in certain of the model parameters is evaluated, and the interdependence of the parameters, taken in pairs is considered in terms, of the response surface of an optimisation criterium. The advantages and disadvantages of this type of model in studying snowmelt runoff are discussed, and some possibilities for future works are suggested.

- 1.- Professeur, Centre québécois des sciences de l'eau, Univ. du Québec.
- 2.- Directeur de recherche, ORSTOM, France.

9 JUN 1971

80617

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 39629

Cote ? B

13 JUIN 1994

INTRODUCTION

Pendant que certains chercheurs développaient des modèles exclusivement hydropluviométriques, d'autres entreprirent d'intégrer la simulation de la fonte de neige à un modèle d'écoulement de façon à reproduire les crues de printemps dues à la fonte de la neige et/ou aux précipitations liquides. C'était compliquer les modèles existants et en même temps accepter une nouvelle source d'eau en ajoutant à l'incertitude provenant de la partie écoulement du modèle, l'erreur découlant de la simulation de la fonte de neige

Visant à reproduire les crues de printemps avec une précision satisfaisante, mais aussi à pouvoir appliquer leur modèle sur le plus grand nombre possible de bassins, Charbonneau (1969) et Girard (1970) travaillant ensemble au Québec, développèrent des modèles de fonte de plus en plus complexes, tenant compte du couvert forestier, de l'orientation des pentes, de l'élévation du terrain, de la radiation pour ne nommer que ces paramètres. L'une des idées sous-jacentes à ces différents modèles était de pouvoir établir des comparaisons et de vérifier l'influence de divers paramètres sur le résultat de la simulation. Ces études ont permis de ne garder de ces différents modèles que l'essentiel, compte tenu encore une fois des objectifs à attendre.

Dans cet article, nous désirons démontrer l'influence de certaines données et de certains paramètres sur les résultats obtenus avec le modèle actuel de fonte alimentant le modèle d'écoulement d'Ayers légèrement modifié.

DESCRIPTION DU MODELE

Le but de l'étude étant l'analyse de l'influence des paramètres sur la reconstitution des débits, il est avantageux sinon nécessaire d'utiliser un modèle qui relie clairement la cause à l'effet. Ce modèle doit être simple et complet, en d'autres mots, contenir toutes les phases importantes du processus de formation du débit et utiliser des relations linéaires.

Les équations différentielles régissant le comportement de l'eau dans les divers systèmes qu'elle traverse, entre l'atmosphère et le passage à la station de jaugeage, sont plus faciles à exprimer sous forme de différences finies, c'est-à-dire en pratique sous forme de bilan de flux conditionnés par des potentiels.

Dans ces conditions; il est plus facile de symboliser l'ensemble du bassin par un système équivalent. Il est commode (mais parfaitement injustifié physiquement) de donner à ces circuits la forme de réservoirs de capacité donnée, percolant les uns dans les autres à un taux qui est aussi fonction de la charge ou niveau de remplissage du réservoir qui se vidange (Y. Cormary Nov. 1969).

Etant intéressé à étudier le comportement de bassins en périodes d'étiages, le professeur H.D. Ayers (1963) a développé un modèle lui permettant d'analyser ces périodes. Considérant la simplicité de ce modèle et le fait qu'il fonctionne bien en été, ce qui implique que le schéma du jeu des réserves contient toutes les phases importantes du processus de formation des débits, il nous a paru très intéressant de l'utiliser dans la présente étude pour la simulation de la partie écoulement reliée aux crues dues à la fonte de la neige. Bien entendu, au printemps, l'écoulement rapide ou de surface est beaucoup plus susceptible de se produire. Le modèle a été complété en imposant à cet écoulement particulier un cheminement qui est fonction des caractéristiques physiques du bassin.

Finalement on a simplifié le processus de vidange des réservoirs souterrains en adoptant une loi purement exponentielle.

A l'aide de la figure 1, examinons rapidement le processus de reconstitution des débits à la station de jaugeage à partir des données météorologiques.

La formation et l'évolution du stock de neige au cours de la saison froide sont prises en compte sur chaque polygone de Thiesen, par le bilan quotidien en eau de ce stock. Plus précisément pour une journée donnée, le stock de neige augmente de la chute de neige de la journée ramenée à son équivalent en eau et diminue de la fonte produite, si la température moyenne dépasse le seuil de température de la zone, forestière ou déboisée.

La température de l'air n'est qu'un des facteurs affectant la fonte (Corps of Engineers, 1956), toutefois, cette donnée météorologique est un assez bon indice de l'action de plusieurs des autres facteurs. Enfin, sa disponibilité et la simplicité de son application ont fait que la température moyenne quotidienne a été choisie comme indice de fonte.

La radiation solaire joue un rôle de premier plan en zone déboisée. C'est par une diminution du seuil de température de fonte que nous tenons compte de cet apport supplémentaire d'énergie.

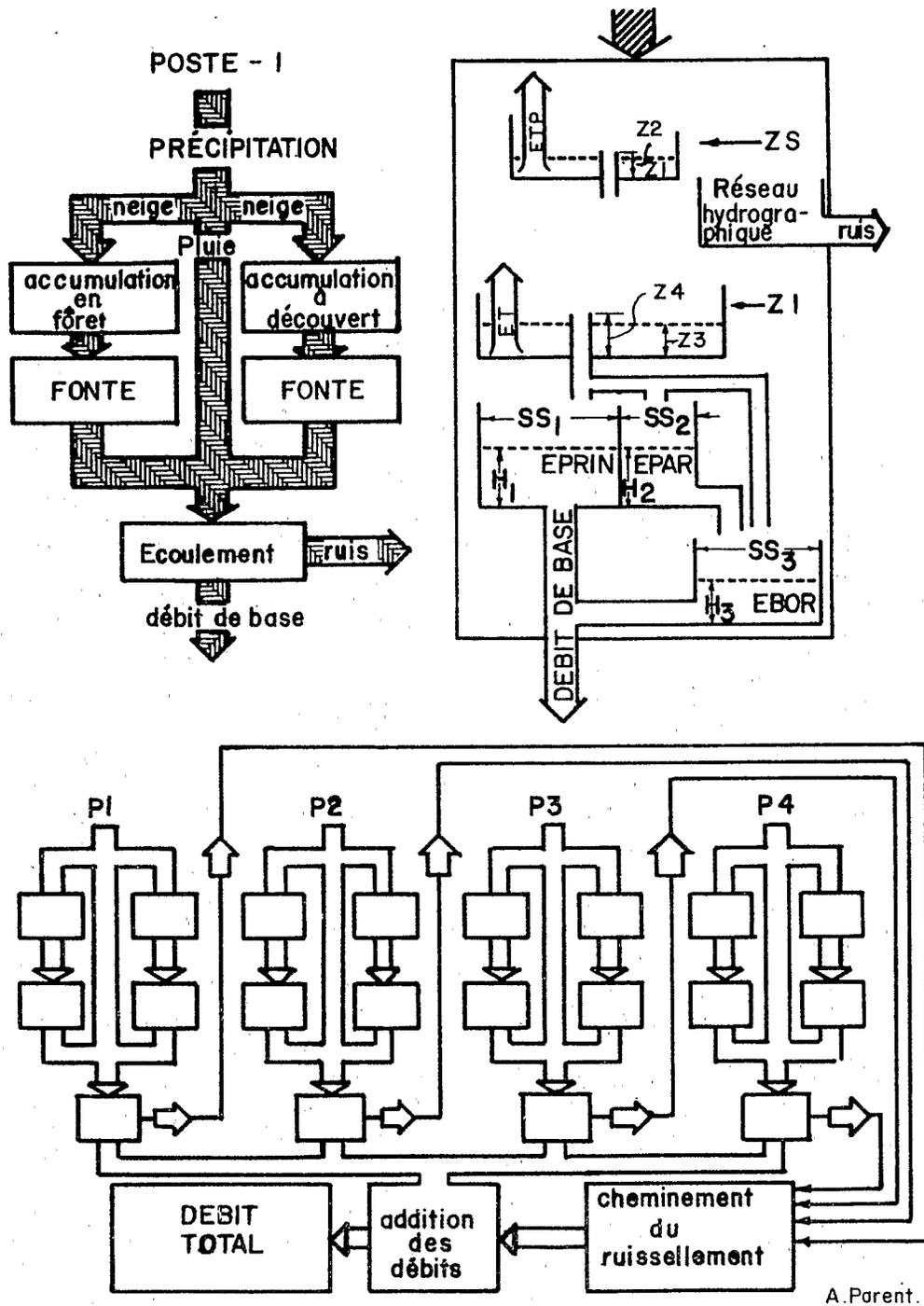


Figure - 1 -

Représentation schématique du modèle

Les relations 1 et 2 ont été utilisées respectivement en zone forestière et en zone déboisée.

$$\text{Fonte en zone forestière} = 0.06 \text{ (T moyen - } 32^{\circ}\text{F)} \quad (1)$$

$$\text{Fonte en zone déboisée} = 0.06 \text{ (T moyen - } 27^{\circ}\text{F)} \quad (2)$$

La fonte quotidienne additionnée s'il y a lieu d'eau de pluie constitue l'apport ou l'intrant à la partie écoulement du modèle, apport qui subit un premier emmagasinement au niveau de l'interception, de la rétention dans le stock de neige et des quelques premiers pouces du sol. C'est la zone supérieure d'emmagasinement "ZS". Cette zone est sujette aux pertes par évapotranspiration au taux potentiel ETP. Un deuxième réservoir en série représentant la frange capillaire se recharge après saturation de "ZS", d'une lame égale à la différence entre le niveau Z1 atteint par l'addition du nouvel apport et la capacité Z2 de la zone supérieure. Cette zone inférieure d'emmagasinement "Z1" subit des pertes par évapotranspiration à un taux réduit ET après dessèchement du réservoir "ZS".

$$\text{ET} = \text{ETP} (Z3/Z4) \quad (3)$$

où: Z3 est le niveau de la lame d'eau stockée dans le réservoir Z1

Z4 est la capacité du réservoir "Z1".

Les éléments qui symbolisent les nappes d'eau souterraines ne sont rechargés qu'après saturation des deux réservoirs précités, le vidange de Z1, se produisant de façon identique à celle de ZS.

Ce sont:

- 1.- un élément profond principal EPRIN qui se déverse directement à la rivière avec un temps de délai TD_1 de l'ordre de deux mois.
- 2.- un élément profond parallèle EPAR qui se déverse dans l'élément de bordure avec le même temps de délai TD_1 .
- 3.- un élément peu profond (en bordure) EBOR) en série avec le précédent qui se déverse directement à la rivière avec un temps de délai TD_2 de quelques jours.

La vidange de ces trois derniers éléments est représentée mathématiquement par la relation:-

$$Q_i = H_i \times SS_i \times C_i \quad (4)$$

où: H_i est le niveau d'eau du réservoir "i"

SS_i est la surface contrôlée par le réservoir "i"

C_i est l'ajutage calculé par l'équation
- 1/TD

$$C_i = 1 - E$$

La lame ruissellée est ce qui reste de l'apport après saturation des zones supérieure et inférieure, satisfaction de l'évapotranspiration et finalement du taux maximum de percolation vers les nappes souterraines.

Utilisant les lames d'eau de ruissellement obtenues sur chacun des polygones, nous calculons les hauteurs d'eau moyennes sur les zones isochrones. C'est par une cumulation en cascade des contributions de chaque zone, après étalement dans le temps des hauteurs de lame sur ces zones, qu'on arrive à reconstituer l'hydrogramme de ruissellement direct (Charbonneau, 1969).

DESCRIPTION DU BASSIN

Le réservoir Kénogami est alimenté par la rivière Chicoutimi et la rivière Cyriac, l'écoulement se faisant dans une direction nord-nord-est. L'ensemble du réseau draine une superficie totale de 1,270 milles carrés.

L'élévation du bassin varie de 600 pieds au niveau du réservoir à près de 3,500 pieds à la crête la plus élevée. L'étude de la répartition des altitudes du bassin montre qu'environ 50% de la surface est comprise entre 2,000 et 3,000 pieds, 40% entre 1,000 et 2,000 pieds et 10% est située à une élévation moindre que 1,000 pieds.

Les lacs ne sont pas particulièrement importants et occupent environ 2% de la surface totale du bassin.

Tel que mentionné plus haut, nous disposons de quatre stations météorologiques (figure 2) représentant chacune une portion du bassin délimitée à l'aide de polygones de Thiessen.

Stations	Pourcentage du bassin	Couverture		Altitude (en pi.)
		forestière %	déboisée %	
Portage des Roches	14.5	30	70	540
Mésy	16.7	40	60	1260
Mont Apica	51.4	60	40	2840
Lac J.-Cartier	17.4	80	20	2620

LES DONNEES

Les stations météorologiques fournissent quotidiennement les données des températures maximale et minimale ainsi que la précipitation solide ou liquide. Les chutes de neige sont introduites dans le modèle par leur équivalence en eau en assumant de façon constante que dix pouces de neige donnent un pouce d'eau.

Les débits observés naturels, utilisés comme références dans cette étude, sont reconstitués à partir des cotes du réservoirs Kénogami et des débits d'évacuation.

INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT

Dans quelle mesure et comment des paramètres comme la superficie d'un bassin, son hypsométrie, sa surface (forêt, prairie, ville), sa densité de drainage, ses pentes, pour ne nommer que ceux là contribuent-ils à façonner l'hydrogramme de ce bassin? Certains paramètres sont-ils prépondérants au point de contrôler presque à eux seuls la forme de l'hydrogramme? Woodruff et Hewlett (1970) ont tenté de prédire le rapport entre le ruissellement direct annuel et la précipitation annuelle par corrélation multiple avec quinze paramètres morphométriques. Ils sont arrivés à la conclusion que le pourcentage moyen de la précipitation annuelle d'un bassin qui s'écoule sous forme de ruissellement direct ne peut être prévu à l'aide des caractéristiques morphométriques de ce bassin et que la réponse est contrôlée en grande partie par son revêtement poreux.

Nous en sommes venus pratiquement aux mêmes conclusions en ce qui regarde la fonte de la neige. Les différents paramètres qui furent ajoutés, n'ont apporté en moyenne que des améliorations relativement faibles.

D'autre part, notre désir de parvenir à un modèle fiable et simple nous a amené à ne retenir de ces paramètres que les plus importants. Si l'on excepte le découpage du bassin en zones isochrones destinées au cheminement de l'onde de crue, nous n'avons gardé comme paramètre morphométrique que la division du bassin en deux zones, l'une couverte de forêts et l'autre pas.

L'influence du nombre de lignes isochrones sur la forme de l'hydrogramme étant par ailleurs très connue et d'autre part n'étant pas reliée à la fonte, nous n'en discuterons pas ici.

L'énergie nécessaire à la fonte est principalement fournie au stock de neige par la radiation, l'advection d'air chaud et la condensation de la vapeur d'eau. Toutefois les apports de chaleur sont différents en forêts et en milieu découvert. Les arbres (conifères ou autres) formant un écran plus ou moins important contre la radiation et le vent, il s'en suit que la neige fond plus rapidement à découvert qu'en forêt. Les équations de fonte du Corps of Engineers expriment ce fait par un seuil de température plus élevé en forêt qu'à découvert.

La figure 3 permet de constater l'importance primordiale de ce paramètre sur la distribution de la fonte. Si l'on suppose que tout le bassin est déboisé, les crues importantes dues à la fonte de la neige ont lieu en avril. Même si la première crue calculée est en phase avec la première crue observée, le volume écoulé est beaucoup plus important.

Par contre, en mai, les débits calculés sont constamment inférieurs aux débits observés. Si tout le bassin est boisé, la première crue est trop faible et l'ensemble des crues de printemps est retardé. Une comparaison des deux hydrogrammes calculés indique clairement le déphasage qui s'opère lorsque nous passons d'un bassin totalement déboisé à un bassin complètement boisé. Cette même comparaison permet aussi de constater l'importance de la variation des débits d'une situation à l'autre et par suite, l'influence du couvert sur les résultats. Deux crues, celle du 29 avril et celle des 10 et 11 mai (bassin boisé uniquement) relèvent de conditions particulières à certaines stations. Nous reviendrons sur ces crues à l'occasion de notre discussion sur la représentativité des stations.

Le tableau 1 permet de constater de façon plus quantitative l'influence du couvert sur les résultats. Dans les deux cas extrêmes, le critère de Nash diminue lorsque nous le comparons à la valeur qui caractérise une simulation normale.

Notons ensemble que cette diminution est davantage marquée dans le cas où tout le bassin est considéré déboisé, par suite du déphasage de la crue calculée par rapport à la crue observée.

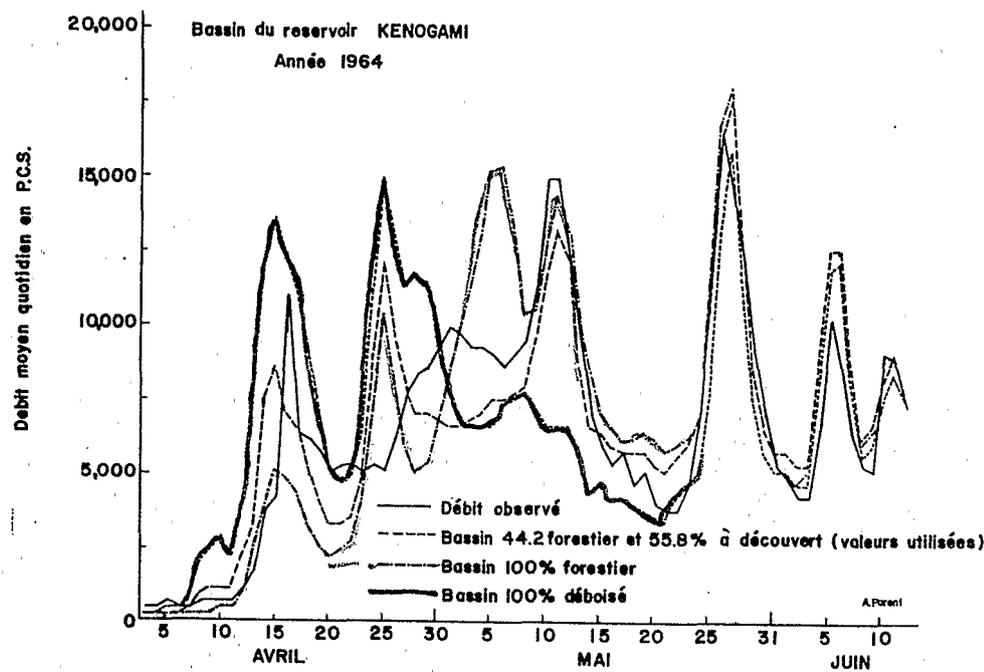


Figure. 3 Influence du couvert forestier.

REPRESENTATIVITE DES MESURES PONCTUELLES

Non-représentativité systématique.

Supposant qu'à l'échelle journalière l'amplitude des variations spatiales de la température est beaucoup plus faible que celle des précipitations, sur une région représentée par un poste météorologique, voyons l'influence de ces dernières sur les résultats.

Il peut arriver pour diverses raisons que les valeurs des données mesurées à une station soient systématiquement plus faibles ou plus fortes que les valeurs qui auraient dû être mesurées sur l'ensemble du polygone de Thiessen relié à cette station. Ceci peut être particulièrement vrai, si les stations utilisées en simulation ont été choisies exploitées en fonction de besoins différents auxquels on tente de les faire servir. Ainsi, les mesures prises à un aéroport, peuvent ne pas être représentatives des valeurs réelles qui pourraient être enregistrées dans une région boisée et vallonneuse encerclant ce site. La précipitation enregistrée dans une vallée peut être plus faible que la précipitation enregistrée sur les pentes plus élevées entourant cette vallée.

TABLEAU I : Comparaison quantitative des essais

No de l'essai	Σ Débits	$\frac{\Sigma \text{ Débits}}{\Sigma Q \text{ obs}}$	Critère de Nash ^①	Erreur quadratique moyenne
Débit observé (Q obs)	462113	1.00	1.00	0
Simulation normale	470428	1.02	.73	1941
Bassin 100 % forestier	485745	1.05	.64	2242
Bassin 100 % déboisé	479948	1.04	.21	3317
Précipitation réduite de 25 %	333023	.72	.34	3029
Variation aléatoire \pm 20 %	474477	1.03	.78	1738
Variation aléatoire \pm 40 %	496964	1.08	.55	2500
Un seul poste : Lac J. Cartier	549949	1.19	-.89	5123
Un seul poste : Mésy	390998	0.85	.41	2863
Un seul poste : Mont Apica	533088	1.15	.34	3035
Un seul poste: Portage des Roches	261778	0.57	-1.61	6028

① Définition du Critère de Nash : $(F_0 - F_1) / F_0$

ou : $F_0 = \Sigma (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{obs moyen}})^2$; $F_1 = \Sigma (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{cal}})^2$

Dans le but de savoir dans quelle mesure ce fait pourrait affecter les résultats, nous avons réduit la précipitation à tous les postes à 75% de la valeur mesurée. Une observation des hydrogrammes de la figure 4 permet de constater que la forme de la crue calculée est assez bien conservée. Toutefois, comme il fallait s'y attendre, les débits simulés sont plus faibles que les précédents, sauf pour la première crue, entre le 10 et le 20 avril. Cette crue a été précédée les 8 et 9 avril par une pluie d'environ 0.3 à 0.4 pouce qui se superpose à une fonte, amorcée vers le 6 avril, conséquence du premier coup de chaleur de l'année qui comprend des températures de l'ordre de 55 à 60°F entre le 12 et le 15. Comme pendant cette crue, le sol est encore complètement couvert de neige et que la fonte n'est pas fonction de la hauteur de neige au sol, la réduction de la précipitation n'affecte pas la partie de la crue due à la fonte de la neige. Il s'en suit que les deux hydrogrammes sont à peu près identiques pour cette crue, indiquant par le fait même, tout au moins dans la simulation, que l'apport dû à la pluie est de beaucoup inférieur à l'apport provenant de la fonte.

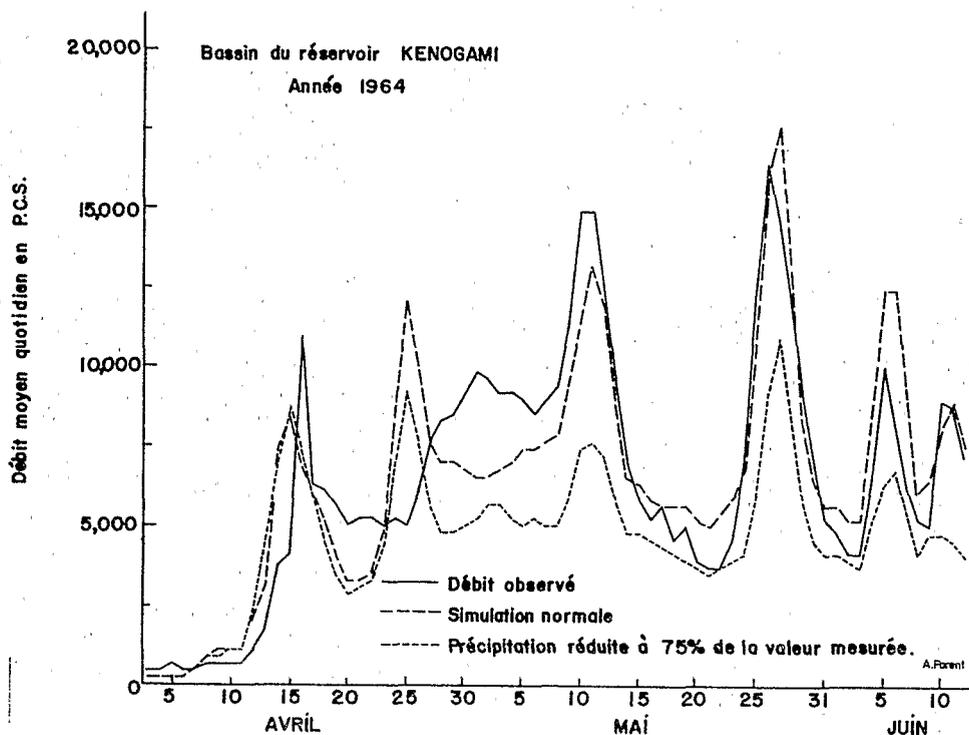


Figure 4 Représentativité des mesures ponctuelles : sensibilité du modèle à une diminution de la précipitation à tous les postes à 75% de la valeur mesurée.

Si maintenant, nous nous reportons au tableau 1, nous constatons que le rapport de la somme des débits simulés à la somme des débits observés passe de 1.02 dans le cas d'une simulation normale à 0.72 pour une réduction de la précipitation de 25%. Nous constatons donc une diminution du volume écoulé du même ordre de grandeur que celui de la diminution des précipitations, soit 30% par rapport à 25%. La précision de la reproduction des débits observés s'en ressent aussi puisque le critère de Nash passe de .73 à .34.

La représentativité de la station à l'intérieur du polygone de Thiessen qui lui est attribué a donc une importance marquée sur les résultats.

Variation aléatoire des précipitations réelles.

Il arrive qu'une station puisse être presque constamment sur-représentative ou sous-représentative d'un polygone de Thiessen, mais ce n'est pas l'unique source d'erreur à considérer. La précipitation, surtout sous forme liquide, a une distribution spatiale aléatoire et il est possible qu'une station normalement représentative reçoive une hauteur de précipitation notablement différente de la hauteur moyenne effectivement tombée sur le polygone qu'elle représente. (Dawdy, 1969).

A supposer que nous puissions effectuer une mesure parfaite en un point, ce succès ne serait pas un gage de résultats vraiment meilleur puisqu'en pratique l'erreur de mesure est négligeable par rapport à la variation spatiale de la précipitation.

Essayons donc de voir l'influence de ce phénomène. Pour cela, à chacune des données de précipitations, faisons subir dans un premier temps une variation aléatoire de 0 à 20%, à l'aide d'une sous-routine CDC conçue à cet effet, puis utilisons la nouvelle série de précipitations pour obtenir une simulation. Répétons le même procédé mais en portant le maximum à 40%. Traçons ensuite les hydrogrammes dans les deux cas et comparons-les aux valeurs observées et à la simulation normale dans la figure 5. L'observation des divers hydrogrammes amène à la conclusion, attendue d'ailleurs, que ce sont surtout les débits de pointe qui sont affectés par ces variations. Cet effet est très marqué dans la crue du 27 mai, lorsque la variation maximale est de 40%. Par contre, une comparaison visuelle de la simulation normale et de la simulation reliée à des variations aléatoires maximales de $\pm 20\%$, permet de constater que cette dernière simulation est aussi bonne sinon meilleure que la première. En fait, le tableau 1 confirme cette idée.

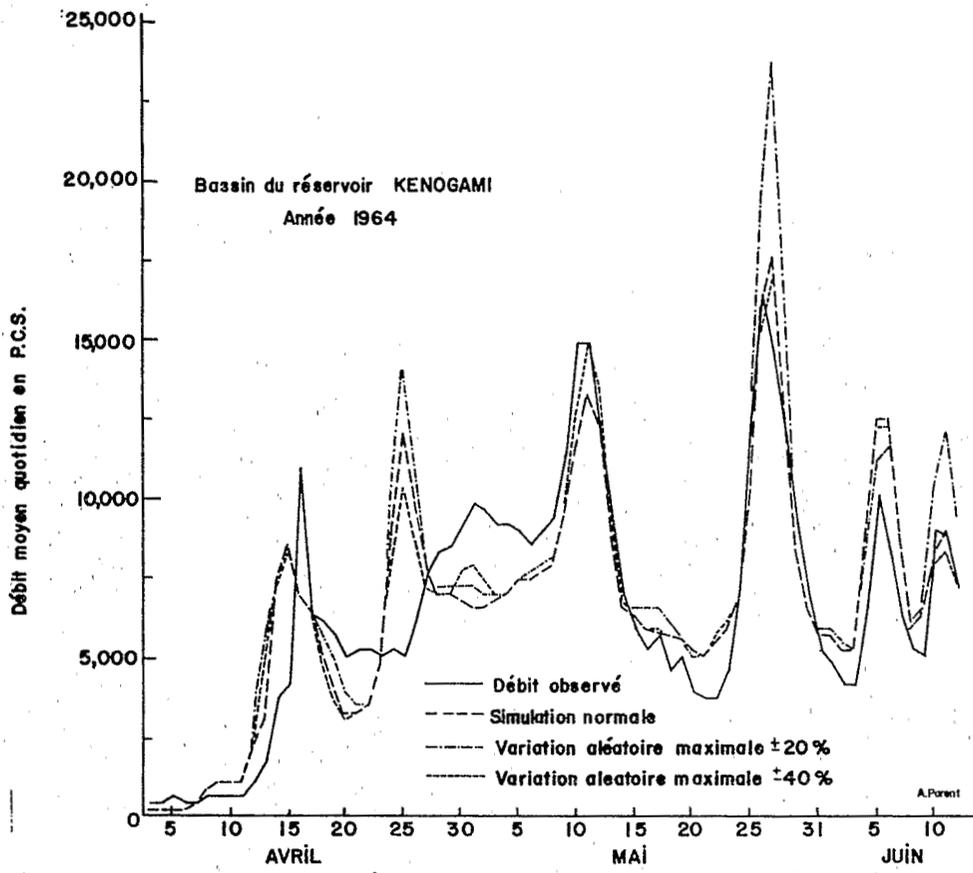


Figure 5: Représentativité des mesures ponctuelles: sensibilité du modèle à des variations aléatoires d'amplitude maximale $\pm 20\%$ (ou $\pm 40\%$) appliquées aux valeurs mesurées.

Alors que le rapport entre la somme des débits calculés et la somme des débits observés demeure essentiellement inchangé, 1.03 plutôt que 1.02, la valeur de critère de Nash dénote une amélioration avec la nouvelle série de données, passant de 0.73 à 0.78. Ce gain pourrait être aussi bien souligné par les valeurs respectives de l'erreur quadratique moyenne.

Si dans ce cas précis, l'essai 6 a mené à une détérioration de la précision de la simulation, l'essai 5 avec des variations aléatoires maximales de $\pm 20\%$ a conduit à une nette amélioration. Il se dégage donc de ces essais la possibilité de ne pas connaître la valeur moyenne des précipitations sur une région déterminée avec une précision inférieure à 20%. Ce fait est lourd de conséquences

pour quelqu'un qui tente d'ajuster un modèle sur un bassin. Nous ne pouvons penser atteindre une précision de reproduction des débits qui serait supérieure à la précision des données elles-mêmes.

REPRESENTATIVITE DES STATIONS, PRISES INDIVIDUELLEMENT, PAR RAPPORT AU BASSIN.

Même si en tout temps, une station pouvait être parfaitement représentative des hauteurs de précipitation tombées sur une certaine région de 100 milles carrés, par exemple, les valeurs mesurées à cette station ne sauraient être attribuées à une région plus vaste qu'avec circonspection.

Nous avons vu précédemment comment ce manque de représentativité à l'intérieur d'un polygone de Thiessen pouvait se faire sentir sur les résultats, lorsqu'un certain nombre de stations est utilisé. Il est par conséquent facile d'imaginer quel pourrait être le résultat, si nous tentions de simuler le comportement d'un bassin comme celui du réservoir Kénogami à l'aide des données provenant d'une seule station. Justement, c'est ce que nous avons voulu démontrer en procédant à une série d'essais en supposant qu'un seul poste était disponible sur le bassin. Les hydrogrammes de ces essais ont été portés sur la figure 6, de même que l'hydrogramme observé.

La première idée qui nous vient à l'esprit en observant la figure 6 est qu'aucun des postes ne permet une simulation satisfaisante des débits observés. Cette impression est confirmée par le tableau 1, où nous remarquons qu'aucun essai ne donne un critère de Nash supérieur à 0.41. De même, la comparaison des autres valeurs obtenues dans les autres cas, démontre une détérioration très nette de la simulation.

Une première conclusion s'impose donc dès maintenant. Il serait illusoire de tenter d'ajuster les paramètres d'un modèle sur un bassin, si au départ, nous ne pouvons compter sur un nombre et une distribution géographique de postes, adéquats. C'est à dessein que nous parlons de distribution, car le nombre n'est pas tout. Dans le cas qui nous intéresse, la station du Mont Apica représente 51.4% du bassin. Il est évident que les valeurs mesurées à cette station auront un impact beaucoup plus important sur les résultats que les valeurs des autres stations.

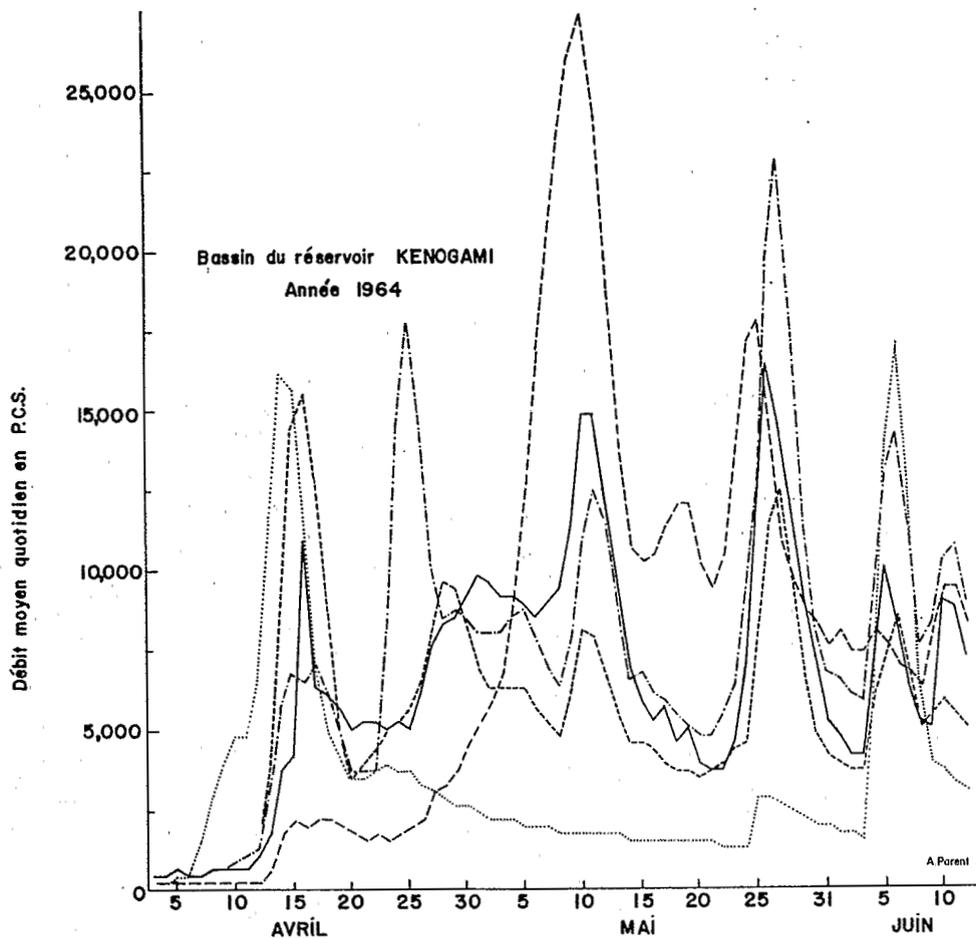


Figure 6. Représentativité des stations par rapport au bassin.

- Débit observé
- - - La station du lac Jacques-Cartier représente 100% du bassin.
- · - La station de Mésy représente 100% du bassin.
- · · La station du Mont Apica représente 100% du bassin.
- - - La station de Portage des Roches représente 100% du bassin.

A titre d'exemples, regardons plus attentivement quelques crues. Dans le cas de la première crue, celle du 16 avril, les valeurs mesurées aux stations de Portage des Roches et de Mésy provoquent une crue trop importante, alors que les valeurs de la station du Mont Apica conduisent à une crue trop faible. Le résultat normal, que nous pouvons revoir à la figure 4, se rapproche davantage de la crue reliée aux valeurs du Mont Apica. Si nous passons

à la crue simulée du 25 avril, crue qui correspond à un minimum relatif de l'hydrogramme observé, nous constatons que cette crue est due à une pluie de 1.52 pouce au Mont Apica par une température variant entre 32 et 38°F. Le même jour, les stations de Portage des Roches et de Mésey rapportaient des températures identiques à celles du Mont Apica mais des hauteurs de pluie de .19 po. au premier poste et de .24 po. au second. La station du lac Jacques Cartier avec des températures de 29 à 35°F rapportait 3.3 po. de neige. Il y a donc lieu de croire que sur le polygone du Mont Apica, d'une part la précipitation moyenne était inférieure à 1.52 po. de pluie et d'autre part que dans la partie sud de ce polygone, une fraction de la précipitation a pu tomber sous forme de neige.

Portons maintenant notre attention sur la période qui précède la crue des 10 et 11 mai. Alors que les hydrogrammes des trois autres stations dénotent une période de décrue plus ou moins rapide, l'hydrogramme provenant de la station du lac Jacques Cartier est en montée. Nous pouvons supposer puisqu'il n'y a aucune précipitation au cours de cette période, que cette montée est due à la fonte de la neige, alors qu'aux autres stations la fonte est pratiquement terminée. Cette supposition est confirmée par le fait qu'avec une pluie totale de 1.43 po. du 8 au 10 mai par rapport à 1.40 po. à Portage des Roches, 1.93 po. à Mésey et 2.37 po. au Mont Apica, l'hydrogramme de crue résultant des données du lac Jacques Cartier est beaucoup plus important que celui provenant des données des autres postes.

Ainsi, si nous nous reportons à la figure 3, le fait de supposer que tout le bassin est forestier retarde la fonte surtout aux autres postes, synchronisant davantage la fonte à tous les postes et provoquant une crue simulée, les 5 et 6 mai.

Il est donc essentiel de pouvoir compter sur un nombre suffisant de stations représentatives, avant de penser à la simulation de la réponse d'un bassin. D'autre part, il faut être conscient des limites imposées par les données et ne pas essayer illusoirement d'optimiser les paramètres d'un modèle dans le but d'atteindre une précision que même les données n'ont pas.

EFFET DE LA VARIATION DES PARAMETRES SUR LE CRITERE D'OPTIMISATION F^2 ET SUR LE VOLUME CALCULE.

Cette méthode nous permet une appréciation directe de l'influence des différents paramètres introduits dans le modèle. L'essai fut exécuté en utilisant les données des mois d'avril, mai et juin de l'année 1968. La figure 7-a indique que les paramètres P_5 et P_6 , respectivement taux de fonte en zone déboisée et taux

de fonte sous couvert forestier, influent fortement sur le critère d'optimisation. Cette caractéristique permet une plus grande précision d'optimisation.

Le critère d'optimisation F^2 n'est pas très sensible aux variations du taux maximum de percolation P_3 . Ce résultat secondé par l'analyse de la figure 8 qui indique des variations faibles du critère pour des valeurs élevées du paramètre. La courbe 3 de la figure 7-a aurait été très différente pour des variations autour d'une faible valeur du paramètre P_3 .

Avril Mai Juin 1968

P_3 est le taux de percolation maximum; P_3 initial = 0.6 po. ljr.
 P_4 est le paramètre de l'évapotranspiration; P_4 initial = 0.04 po./jr. °F
 P_5 est le taux de fonte en zone déboisée; P_5 initial = 0.06 po./jr. °F
 P_6 est le taux de fonte sous couvert forestier; P_6 initial = 0.06 po./jr. °F

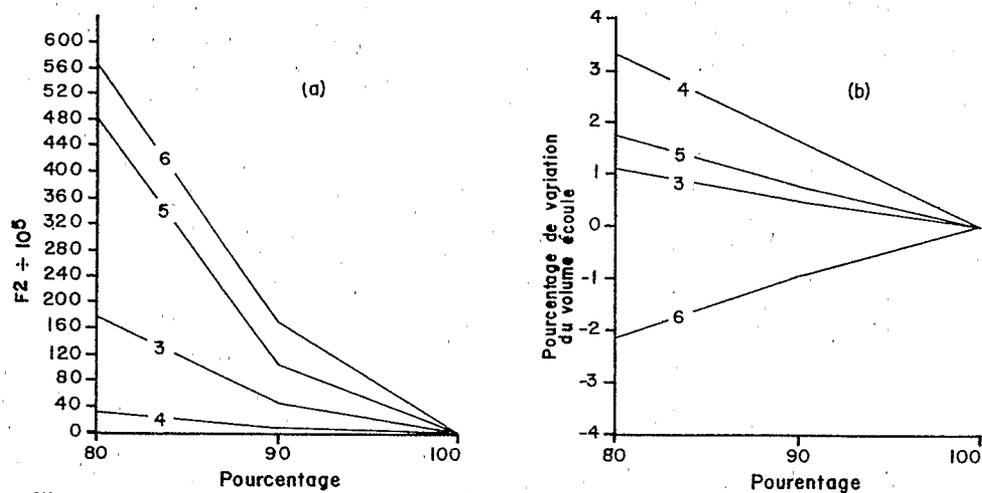


Fig: 7 Variations des valeurs calculées due à des diminutions de 10% puis 20% des paramètres P_3 à P_6 inclusivement.

Si la décision d'accepter ou de rejeter un facteur quelconque du modèle portait uniquement sur l'importance comparée de la variation que subit le critère d'optimisation pour une variation donnée de ce facteur, le paramètre P_4 serait exclu, figure 7-a. Il faut être très prudent avec ce type d'analyse, il se peut que le paramètre varie autour d'une valeur située sur un plateau du patron de réponse, comme on vient de la voir avec P_3 , ou encore que le choix du critère soit mauvais. Sur ce point, la figure 7-b indique que c'est précisément P_4 qui influence le plus le volume d'eau écoulé dans la période.

Les paramètres P_3 , P_5 et P_6 , figure 7-b, font varier le volume écoulé dans une proportion relativement équivalente à leur influence respective sur F . Il faut noter que ces trois paramètres modifient principalement la répartition de l'eau alors que P_4 est lié au volume d'une façon beaucoup plus étroite. Ainsi pour des périodes plus longues, les courbes 3, 5 et 6 se rapprocheraient davantage de l'horizontale alors que la courbe 4 accentuerait la divergence.

On constate que d'une diminution du taux de fonte en zone déboisée P_5 résulte une augmentation du volume alors que le taux de fonte sous couvert forestier P_6 agit en sens inverse. Cette anomalie apparente s'explique par le fait que la période étudiée expérimentalement la fin de la fonte en zone déboisée et le début de la fonte en forêt. Une diminution du paramètre P_5 implique donc un transfert d'un certain volume d'eau de la période précédente à la période étudiée alors qu'une diminution de P_6 agit en faveur de la période suivante.

INTERDEPENDANCE DES PARAMETRES

Si tous les paramètres étaient totalement indépendants, une variation d'un des paramètres n'entraînerait pas de variation d'un autre. Dans ce cas hypothétique, il serait facile de justifier ou de rejeter une partie quelconque d'un modèle par l'analyse des modifications apportées à l'extérieur de ce modèle, modifications dues à l'introduction du paramètre étudié.

Malheureusement, l'interdépendance des paramètres s'oppose à cette façon de procéder. En pratique, l'introduction d'un nouveau facteur entraîne une variation des valeurs optimisées des paramètres, ce qui oblige à reprendre la recherche des nouvelles valeurs optimales.

Nous avons évalué l'interdépendance de quelques paramètres en étudiant la surface de réponse obtenue par le calcul du critère d'optimisation, F^2 , en fonction des valeurs respectives de paramètre pris deux à deux (Mandeville, 1970; O'Connell, 1970). Ce critère est défini de la manière suivante:-

$$F^2 = (Q_{\text{cal}} - Q_{\text{obs}})^2 \quad (5)$$

Ainsi l'interdépendance entre les seuils de température applicables en zone déboisée et sous couvert forestier, a été étudiée en faisant varier les valeurs de ces paramètres, les autres valeurs des paramètres demeurant inchangées. La surface de réponse de F^2 ,

à la figure 8, présentant à la fois un minimum relativement bien défini et des isoplèthes de tendance circulaire implique une dépendance peu marquée entre ces deux paramètres. Le thalweg n'a pas de signification particulière puisqu'un seuil de température en zone déboisée qui serait plus élevé que le seuil correspondant sous couvert forestier, est inacceptable. Il se dégage de cette figure que le seuil de température sous couvert forestier est bien défini autour de 32°F alors que le seuil en zone déboisée est très mal défini bien que la figure suggère une valeur autour de 29.5°F .

Nous avons tenté de préciser cette valeur du seuil applicable en zone déboisée. Pour ce faire, le calcul de l'interdépendance entre ce paramètre et quelques autres, a été effectué. Les figures 9, 10 et 11 montrent toutes trois un minimum réel du seuil en zone déboisée, bien que mal défini dans chaque cas, autour de la valeur 29.5°F . A noter que ce résultat n'est pas fonction de la dépendance entre les paramètres étudiées puisqu'il est sensiblement identique pour les figures 8, 9 et 10 qui montrent une indépendance assez évidente des paramètres alors que la figure 11 nous fait voir deux paramètres étroitement liés. Toutefois, la figure 12 qui est la reprise de la figure 8 pour la période de fonte de l'année 1965, montre un patron de réponse tout à fait différent. La valeur du seuil en zone déboisée, considérée comme optimale est légèrement inférieure à 28°F et une coupe de la surface de réponse montrant la variation de P_2 pour une valeur de P_1 égale 29.5°F se fait le long d'une dorsale.

Il ressort de ces quelques essais que l'optimisation de ce paramètre de fonte conduit à des valeurs différentes selon la période étudiée. Ce genre d'approche peut nous permettre de juger du degré de stabilité d'un modèle, ayant préalablement établi la fiabilité des données. La stabilité du modèle est étroitement liée à la précision de son équivalence par rapport au bassin versant, dans les limites de la représentativité des données tant hydrométriques que météorologiques.

Reprenant le point de vue de l'interdépendance, l'allure des isohypses de la figure 9 montre que le taux maximum de percolation vers les nappes souterraines possède un minimum assez bien défini. En outre, le modèle est très sensible aux faibles valeurs de ce paramètre puisqu'il affecte directement la lame ruisselée. Nous pouvons conclure que la vitesse d'optimisation de P_3 est très rapide en partant d'une faible valeur et que pour des valeurs de P_3 plus grandes que 0.5 pouce par jour, le critère d'erreur varie très peu, suggérant ainsi que la précision de l'ajustement n'est pas très affectée par l'élimination du ruissellement.

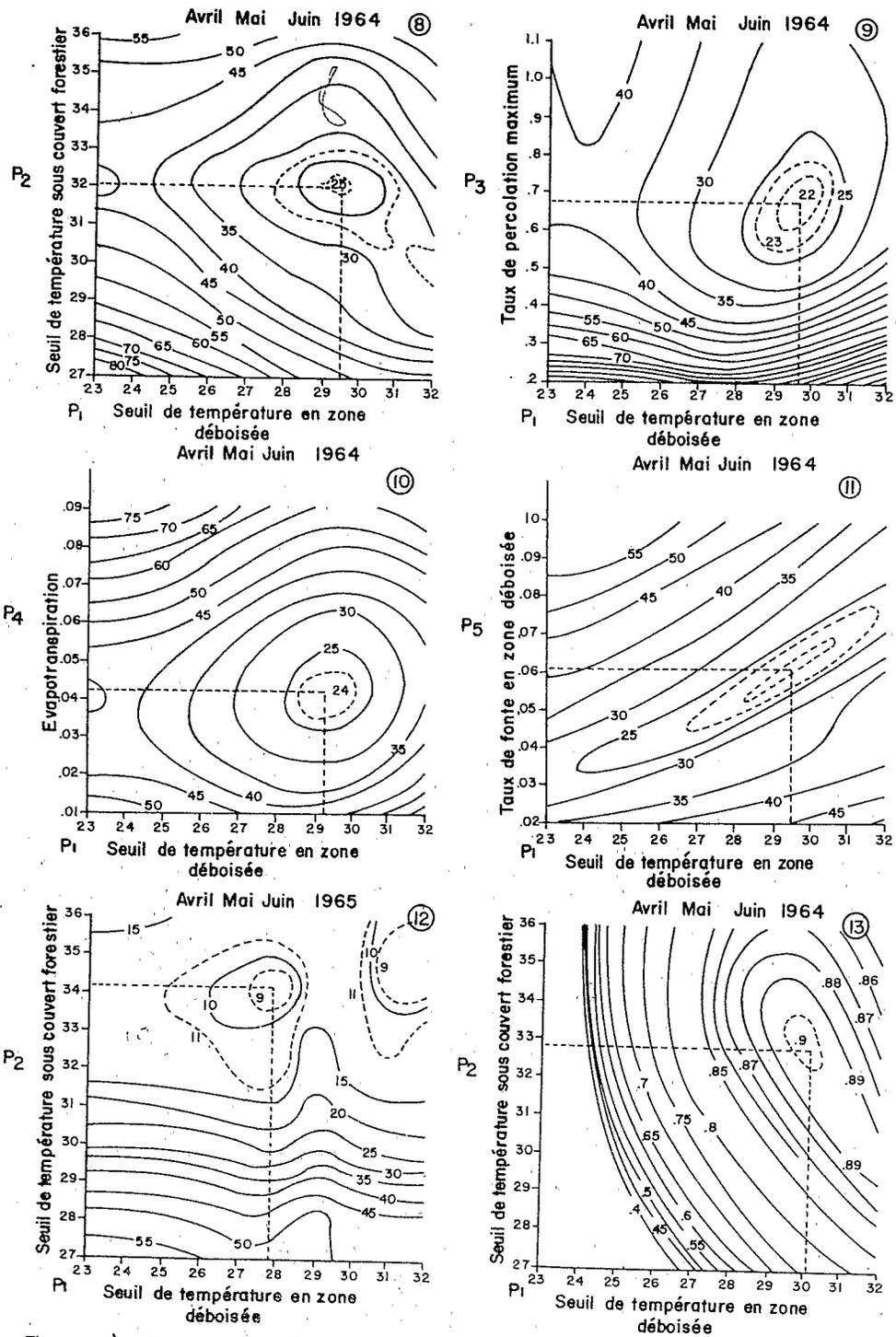


Figure. 8 à 13: Surface de réponse du critère d'optimisation en fonction de paramètres pris deux à deux.

L'intérêt de la figure 10 est de confirmer l'indépendance du seuil de température en zone déboisée de l'évapotranspiration potentielle. P_4 calculée suivant l'équation suivante:

$$ETP = C \times P_4 \quad (T \text{ moy.} - 32^{\circ}\text{F.}) \quad (6)$$

où: C est le rapport de la chaleur latente de fusion et de la chaleur latente d'évaporation.

Il faut aussi signaler que la valeur optimale de 0.042 po./ $^{\circ}\text{F}$ applicable à P_4 est assez près du 0.05 proposé par le U.S. Corps of Engineers comme taux de fonte sous couvert forestier. Le rapprochement entre les deux constantes est effectivement plus marqué puisque la vaporisation s'effectue, pour une bonne part, à partir de l'état solide, ce qui nécessite une énergie supplémentaire de 80 cal/gr, qui a pour effet d'élever P_4 à 0.048 pour la même valeur de ETP. Cette constatation est intéressante en ce qu'elle appuie l'idée d'évaluer l'évapotranspiration à partir d'une relation énergétique globale, du moins pour cette période de l'année.

Ce qui marque le plus la surface de réponse de la figure 11 c'est l'orientation diagonale du minimum où le critère d'optimisation F^2 varie peu pour différentes combinaisons des paramètres utilisés soit le seuil de température de fonte P_1 et le taux de fonte en zone déboisée P_5 . On peut conclure qu'il est difficile de déterminer les valeurs significatives des paramètres P_5 et P_1 puisqu'ils ont des effets similaires sur le modèle. Un de ces paramètres doit être fixé à une valeur physiquement justifiable alors que l'autre peut varier.

Assez fréquemment on détecte plus d'un minimum sur une même surface de réponse. Il est par conséquent à craindre que l'optimisation des paramètres par les processus habituellement employés, nous conduise à un minimum autre que le minimum absolu. Certains de ces minima sont à rejeter parce qu'ils sont physiquement impossibles; comme le montre la figure 12. Dans tous les cas, si on doute de l'optimisation d'un certain paramètre, l'étude de son indépendance avec un ou deux autres paramètres apporte un élément de plus vers la solution.

Terminons maintenant ce chapitre par une courte discussion sur le problème du choix des critères d'optimisation. La figure 13 représente un patron de réponse correspondant à la même période de fonte et aux mêmes limites des variations des deux mêmes paramètres qu'à la figure 8. Seul le coefficient d'ajustement CA, défini plus bas, remplace le F^2 de la figure 8.

$$CA = 1 - \frac{1}{N} \left[\frac{Q_{\text{cal}} - Q_{\text{obs}}}{Q_{\text{obs}}} \right]^2 \quad (7)$$

Non seulement la configuration est-elle différente mais la position du minimum est elle aussi déplacée. Toutefois, des coupes horizontale et verticale passant par les minimums respectifs des figures 8 et 12, montrent une plus grande précision de détermination à partir du critère F^2 . De plus, on ne doit pas perdre de vue que cette sensibilité peut également être fonction de la nature de la période étudiée, une période de crue pouvant nécessiter un critère autre que celui utilisé à l'étiage.

CONCLUSION

Les résultats obtenus à partir des différents essais effectués au cours de cette étude démontrent la facilité avec laquelle les modèles déterministiques se prêtent à une analyse de composantes. Cet avantage aide beaucoup à la détection et à la correction des points faibles d'un modèle et permet en même temps de mettre en évidence les facteurs importants du processus de reconstitution des débits.

Ainsi, au cours de cette étude, nous avons trouvé que, parmi les caractéristiques morphologiques d'un bassin, c'est le partage de la surface en zones forestière ou déboisée, qui a l'influence la plus déterminante sur les résultats.

Tournons-nous maintenant vers la représentativité des précipitations. Nous constatons que si, systématiquement ou pour une précipitation donnée une station n'est pas représentative de la hauteur moyenne accumulée au sol sur le polygone qu'elle représente dans le modèle, cette différence entre les précipitations réelles et les précipitations mesurées se traduira par une différence équivalente au niveau des débits simulés. De plus, des variations aléatoires imposées aux données de précipitation, ont conduit à la conclusion que, dans le cas étudié il était fort possible que la répartition spatiale de la précipitation sur le bassin ne soit pas connue avec une précision inférieure à 20%. Enfin, les hydrogrammes obtenus en supposant qu'un seul poste était disponible sur le bassin, permettent de croire qu'il serait illusoire de tenter d'ajuster les paramètres d'un modèle, si au départ, nous ne pouvons compter sur un nombre et une distribution géographique de postes adéquats.

Certaines précautions doivent être prises dans ce genre d'étude, en ce qui concerne le choix du critère d'optimisation. Avant de juger de l'importance réelle d'un paramètre, il serait prudent de bien distinguer les paramètres qui influencent surtout le volume des crues des paramètres qui agissent plutôt sur le synchronisme de la reconstitution.

D'autres points importants ressortent de l'étude de l'interdépendance des paramètres. Tout d'abord, cette méthode permet de vérifier que la valeur déterminée au cours de l'optimisation correspond bien à un minimum absolu du critère utilisé. De plus, elle met en évidence l'interdépendance de certains paramètres et permet de juger du degré de stabilité des paramètres d'une période de fonte à l'autre, ce qui peut amener indirectement à reconsidérer le schéma de simulation du modèle. Le résultat qui pourrait s'avérer le plus significatif est le peu de détérioration de l'ajustement, à la suite de l'élimination du ruissellement. Ce point fait présentement l'objet d'études particulières.

Enfin, l'évaluation de l'évapotranspiration à partir d'une relation purement énergétique est tout au moins aussi valable que l'évaluation de la fonte par une relation du même type. Des études plus approfondies seront poursuivies dans ce dernier domaine, de même que sur la sensibilité de différents critères d'optimisation.

REFERENCES

- Ayers, H.D., 1963. Analysis of low flow in streams, Annual Meeting of the North Atlantic Section American Society of Agricultural Engineers, Orono Maine, Paper No. NA 63-404, 18 p.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1956. Snow Hydrology. Pub. U.S. Department of Commerce Office of Technical Services No. PB 151660, 437 p.
- Charbonneau, R. 1969. Modèle Mathématique de crues dues à la fonte de la neige, Naturaliste Canadien, PB No. 96 683-710 p.
- Woodruff, J.F., 1970. Predicting and mapping the average hydrologic response for the eastern United States, Water Resources Research, Vol. 6, No. 5, 1312-1326 p.
- Mandeville, A.N., O'Connell, P.E., Sutcliffe, J.V. and Nash, J.E., 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part III The Ray Catchment at Grendon Underwood, Journal of Hydrology 11, 109-128 p.
- O'Connell, P.E., Nash, J.E. and Farrell, J.P., 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part II. The Brosna catchment at Ferbane, Journal of Hydrology 10, 317-329 p.
- Dawdy, D.R., and Bergmann, J.M., 1969. Effect of rainfall variability on streamflow simulation. Water Resources Research, Vol. 5, No. 5, 958 - 966 p.