

Prévision des crues de l'Amazonie

**B. CAPPELAERE, H. LUBES NIEL, C. BERKHOFF,
H. THEPAUT**

Orstom, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France

J.-L. GUYOT, M. MOLINIER

Orstom, CP 09 747, 70001-970 Brasília, Brésil

E. DE OLIVEIRA & M. RODRIGUES

DNAEE-CGRH, Brasília, Brésil

Résumé Le logiciel Cheiamaz a été développé pour prévoir l'évolution de la crue à Manaus, sur la base d'une modélisation de type statistique des séries chronologiques de cotes observées aux principales stations brésiliennes du bassin de l'Amazonie. Des équations de prévision ont été établies pour des échéances variant de 10 à 60 jours, par une méthode de régression progressive ascendante, couplée à une procédure d'élimination graduelle descendante des variables à envisager compte-tenu des lacunes que comportent les séries de données. Les écarts quadratiques moyens, en calage et en validation, varient de moins de 10 cm pour le délai de 10 jours, à environ 40 cm pour celui de 60 jours. Une méthode neuronale a d'autre part été testée pour prévoir la cote maximale de la crue. Le logiciel Cheiamaz permet enfin de comparer *a posteriori* les prévisions émises antérieurement avec les données effectivement observées.

Amazon flood forecasting

Abstract The Cheiamaz software has been developed for flood forecasting in Manaus based on statistical-type modelling of the stage time series recorded at the main river gauges in the Brazilian Amazon basin. Forecast equations have been established for several lead times from 10 to 60 days, using a forward stepwise regression method, coupled with a procedure that gradually eliminates variables with missing data. The mean square errors, both for calibration and validation, vary from less than 10 cm to about 40 cm for the 10-day and 60-day lead times respectively. A neural method has also been tested to forecast the peak flood level. *A posteriori* comparisons of previous forecasts with actual stage observations, once available, are made possible with the Cheiamaz software.

INTRODUCTION

La ville de Manaus, riveraine du Rio Negro à proximité de sa confluence avec le Rio Solimoès (Fig. 1), est régulièrement affectée, ainsi que sa région, par les inondations causées par ces grands fleuves amazoniens. Ce système fluvial le plus puissant du monde produit des débits caractérisés par une périodicité annuelle, avec une crue « simple » à



Fig. 1 Plan de situation.

un maximum. Dans la région de Manaus, la crue atteint son niveau maximum entre mai et juillet, celui-ci pouvant varier dans une plage d'environ 8 m (entre les cotes métriques 21,77 et 29,69 sur la période 1903 à 1993 à l'échelle de Manaus). Le marnage total à Manaus atteint 16 m sur cette période.

Manaus se trouvant immédiatement dans le remous de la confluence Negro-Solimões, la ligne d'eau y dépend infiniment plus du débit du Rio Amazonas (nom pris par le fleuve à l'aval de cette confluence), donc de la somme des deux débits affluents, que de celui du Rio Negro seul. Elle peut également être influencée par le débit du Rio Madeira, dont la confluence est à moins de 200 km à l'aval. Suivant les conditions hydrauliques en cours, les remous se transmettent en effet sur plusieurs centaines de kilomètres dans ce réseau hydrographique à pentes infimes (de l'ordre de 10^{-5}).

C'est donc un bassin total de 4,3 millions de km^2 , soit 72% du bassin amazonien, qui contribue au niveau de la crue à Manaus, produisant un limnigramme fortement lissé par rapport à ceux traduisant respectivement les débits propres de chacun des formateurs (Fig. 2). On note un déphasage très important dans le temps entre les crues de ces derniers, correspondant aux régimes climatiques différents auxquels ils sont soumis (Molinier *et al.*, 1993). Il en résulte à Manaus un limnigramme particulièrement asymétrique, avec une longue montée et une décrue rapide.

NUISANCES CAUSEES PAR LES INONDATIONS

Le système fluvial constitué par l'Amazone et ses grands affluents représente l'axe essentiel de développement et de communication du bassin amazonien, immense région (56% du territoire brésilien) d'une très grande importance pour l'avenir du pays. C'est donc sur ses rives que se concentre la plus grande part des établissements humains de

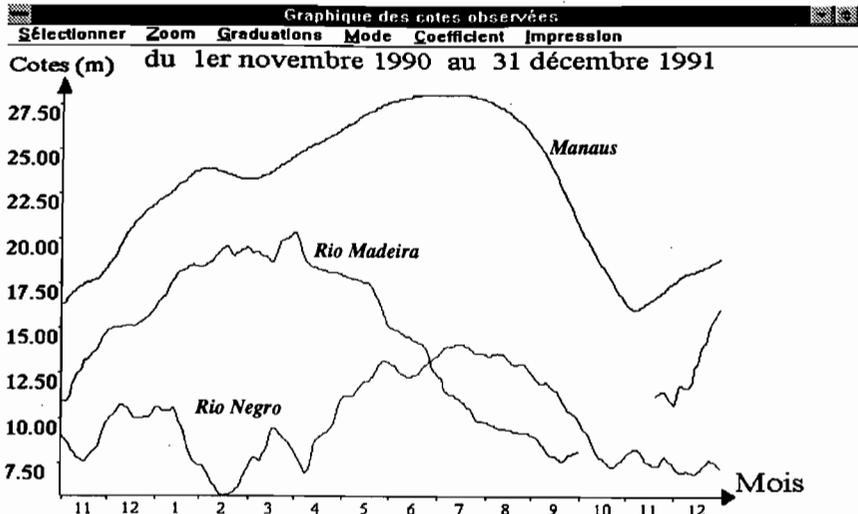


Fig. 2 Exemple de limnigrammes de crue sur les formateurs amazoniens (copie d'écran du logiciel Cheiamaz).

la région, qui se trouvent ainsi largement exposés aux crues en raison de l'ampleur de la zone inondable. Les populations et leurs activités, aussi bien rurales qu'urbaines ou semi-urbaines, subissent régulièrement des effets très importants et prolongés, dont la gravité varie en fonction de la sévérité de la crue: celle-ci détermine en effet les surfaces inondées, les hauteurs de submersion, ainsi que les durées au-dessus d'une hauteur donnée.

A Manaus même, capitale de l'Etat d'Amazonie et principale concentration urbaine de la région, ce sont 25 000 personnes qui sont régulièrement touchées pendant des périodes de 3 à 5 mois. L'urbanisation non-maîtrisée des *iguarapés*, thalwegs inondables où les hauteurs de submersion peuvent atteindre plusieurs étages d'habitation selon l'importance de la crue, fait courir des risques dramatiques à une population nombreuse et démunie, habitant des constructions sommaires sur pilotis. Les conséquences sur les plans de la santé et de la sécurité publique aggravent les conditions de mauvaise qualité de vie de la région.

Afin de minimiser les dommages sociaux et économiques, la prévision des crues est jugée indispensable par les autorités dans l'organisation des actions de protection civile. En zone rurale, le déplacement opportun des troupeaux est un élément essentiel dans la viabilité des exploitations agricoles.

OBJECTIFS DE LA PREVISION

L'objectif général du travail entrepris est de permettre la prévision à Manaus du niveau maximal attendu, mais également de la date à laquelle celui-ci sera atteint ainsi que du déroulement des phases de montée vers ce maximum et d'amorce de la décrue. Pour la prévention des risques associés à l'inondation, il est en effet nécessaire de savoir quand seront atteintes certaines cotes critiques, correspondant à différents seuils de mise en alerte et de prise de mesures de protection, et quand ces mesures pourront être levées.

C'est donc bien toute la partie ascendante du limnigramme, au-dessus d'un certain niveau correspondant à la mise en activité du système de prévision, que l'outil à développer doit permettre d'anticiper, jusqu'à ce que la phase de décrue soit nettement engagée.

Définir des objectifs de prévision, c'est également spécifier jusqu'à quels délais et -cibles, compte-tenu des enjeux associés aux mesures à prendre et à une éventuelle décision inappropriée (ex.: évacuation inutile ou, inversement, défaut dommageable de mesures de protection).

Délai et précision étant inévitablement liés par une règle de variation en sens opposé, c'est donc un compromis entre ces deux critères qu'il faut adopter, qui tienne compte des besoins opérationnels à satisfaire par la prévision, mais également de ce que permet effectivement le système hydrologique et son réseau d'observation.

Compte-tenu de l'importance et de la dispersion des populations concernées, ainsi que de la difficulté qu'il y a sur le terrain à prendre et à mettre en oeuvre des mesures de protection, il est jugé nécessaire de pouvoir émettre une prévision jusqu'à un délai très long, de l'ordre de deux mois, la précision acceptable pour ce délai pouvant aller jusqu'à quelques dizaines de centimètres. Les valeurs de 10, 15, 20, 30, 40, et 60 jours ont donc été retenues comme délais pour lesquels une prévision devrait être émise.

D'autre part, pour avoir aussi tôt que possible une idée de l'ampleur à attendre de la crue, il est souhaitable d'avoir dès la mise en activité de la prévision une estimation du niveau maximal susceptible d'être atteint.

On considère que le système de prévision doit être activé dès que la cote 22,5 m est atteinte à Manaus, ou au plus tard le 15 mars, et doit fonctionner au moins jusqu'à la fin-juillet.

DONNEES DISPONIBLES

Pour élaborer le modèle de prévision, l'on disposait des hauteurs journalières en 39 sites limnimétriques répartis sur les cours des trois grands formateurs (Rios Solimoès, Negro, et Madeira) et du Rio Amazonas de Manaus à Obidos (Fernandes, 1987). Quinze années de mesures (1978 à 1992), considérées comme suffisamment complètes, ont été retenues. De nombreuses lacunes existent néanmoins dans les séries ainsi constituées. A Manaus, la série est beaucoup plus longue, puisque l'on dispose des données depuis 1903, et est quasi-complète.

Très peu de ces stations sont effectivement étalonnées en débit, la relation hauteur-débit étant très rarement biunivoque sur ce réseau hydrographique à pentes très faibles. La variable-cible étant elle-même une cote, on a donc décidé ici de ne travailler qu'avec des variables cotes sans chercher à passer aux débits.

Un important programme d'équipement des stations en transmission satellitaire (système Argos) est en cours (Guimarães *et al.*, 1995), faisant suite à l'exploitation d'une vingtaine de stations depuis 1985 (Callède *et al.*, 1986). L'un des objectifs de ce programme est de réduire considérablement les délais d'obtention des données nécessaires à la prévision, en interfaçant dans une prochaine étape le logiciel Cheiamaz avec la chaîne de télétransmission.

METHODES

Pour réaliser la prévision du limnigramme à Manaus, il est nécessaire d'établir un modèle de propagation depuis les stations amont, basé sur les quinze années d'observations concomitantes aux stations concernées. L'impossibilité de passer par les variables débits excluant une modélisation de nature physique du processus de propagation, c'est donc vers une modélisation de type statistique que s'est orienté ce travail.

Par ailleurs, compte-tenu de la série beaucoup plus longue dont on dispose à Manaus, et des propriétés statistiques intéressantes qui la caractérisent, une modélisation basée sur les seules observations à cette échelle a été tentée, avec l'objectif plus limité de prévoir le niveau maximal de la crue, et non pas le limnigramme ou la date d'occurrence du maximum. Par opposition au modèle de propagation ci-dessus, on qualifiera d'« auto-régressif » ce modèle ne faisant intervenir que la variable hauteur à Manaus, bien qu'il ne fasse pas appel à la méthodologie des modèles de type AR de Box & Jenkins.

Cette partie du travail a été l'occasion de tester et comparer deux approches différentes pour établir un tel modèle, l'une de la statistique classique, à savoir la régression linéaire, l'autre issue des développements récents sur les réseaux neuronaux.

Modèle de propagation

Des équations de prévision de 10 à 60 jours ont été établies par une méthode de régression progressive ascendante (Draper & Smith, 1981). Cette méthode permet, pour chaque délai, de sélectionner, parmi un grand nombre de variables potentiellement explicatives de l'évolution à venir de la crue à Manaus, le sous-ensemble qui soit à la fois aussi réduit et aussi significatif que possible au regard de cette prévision.

Une variable étant constituée par l'association d'une station et d'un décalage temporel (antériorité du jour d'observation de la donnée par rapport au jour d'émission de la prévision) supérieur ou égal au délai de prévision, le nombre de variables envisageables est très élevé, car des antériorités de plusieurs dizaines de jours doivent être envisagées, suivant la localisation des stations. C'est donc au total plusieurs milliers de variables potentiellement pertinentes, pour beaucoup fortement corrélées, qu'il faut prendre en compte dans l'analyse! Même si cet ensemble considérable de variables ne peut être présenté d'un bloc au programme de régression progressive (une part de « pilotage manuel » par essai-erreur est nécessaire), on voit bien l'intérêt d'un algorithme qui soit capable de réaliser une sélection objective des variables les plus pertinentes parmi un grand nombre.

Un programme a été développé, couplant cette méthode de régression progressive à une procédure de mise à jour dynamique des échantillons de données, par élimination graduelle des variables soumises à la régression. En effet, le nombre relativement élevé de lacunes dans les séries de données est susceptible de réduire de manière importante l'échantillon sur lequel est calé et validé le modèle de propagation, puisque cet échantillon correspond à l'intersection des données effectivement disponibles pour chaque variable envisagée dans la constitution du modèle. Ainsi, plus le nombre de variables soumises à la régression progressive est élevé, plus l'échantillon sur lequel travaillera la régression sera réduit, ce qui peut altérer la qualité du modèle produit, et

notamment le choix des variables retenues. L'algorithme de mise à jour des échantillons consiste donc en une série d'allers-retours entre régression et choix de variables présentées à la régression: à chaque étape, parmi les variables non retenues par la régression qui vient d'être effectuée, une partie d'entre elles est définitivement éliminée, constituée par celles dont la présence contribue le plus à réduire la taille de l'échantillon.

Cette élimination graduelle évite de supprimer prématurément des variables qui pourraient s'avérer pertinentes, une fois l'échantillon devenu plus large. Elle converge en quelques itérations vers un modèle effectivement calé et validé sur le plus grand échantillon possible permis par les variables entrant dans sa constitution.

Pour que ce programme d'élaboration de modèles de prévision soit à la fois puissant et facile à utiliser, l'utilisateur définit les différents paramètres de mise en oeuvre de la méthode dans un fichier à format particulièrement souple, inspiré des fichiers de configuration (connus par leur suffixe .INI) des applications Windows. Ce fichier de pilotage permet par exemple de sélectionner les crues utilisées en calage ou en validation; ou encore d'appliquer et de combiner (par "et" et "ou" logiques) différents critères de constitution de ces échantillons, par exemple: période(s) de l'année, seuillage(s) sur une ou plusieurs variables explicatives.

Le programme permet également de prendre en compte comme variables explicatives les séries désaisonnalisées, représentant les écarts au limnigramme de « l'année moyenne » (courbe des moyennes journalières interannuelles) en chaque station.

Parmi les quinze crues observées de 1978 à 1992, dix ont été choisies pour constituer l'échantillon de calage, et cinq pour l'échantillon de validation. Ce choix a été effectué de telle sorte que ces deux échantillons soient aussi représentatifs que possible de l'ensemble des crues observées. La taille effective des échantillons ainsi disponibles varie suivant le modèle considéré, avec un minimum de l'ordre de 630 observations pour le calage, et de 340 pour la validation.

Modèle autorégressif de prévision du maximum

Une prévision du niveau maximum de la crue peut être réalisée au cours de la montée à partir de la simple connaissance de la hauteur observée à Manaus et de la date à laquelle cette observation est effectuée. L'incertitude sur cette prévision décroît bien sûr à mesure que l'on avance dans la phase de montée, mais, comme on le verra plus loin (section « Résultats »), elle devient acceptable suffisamment tôt au cours de cette montée pour faire de cette prévision une information intéressante. Etablir un modèle à partir des seules données à Manaus présente le grand avantage de permettre l'exploitation de la très longue série observée à cette station, à savoir les 90 années de 1903 à 1992. On a donc tiré parti de cet échantillon remarquable de données pour comparer des approches différentes de modélisation, issues d'une part des méthodes classiques de la statistique linéaire, d'autre part de celles plus récentes basées sur les réseaux neuronaux.

Trois modèles distincts ont ainsi été élaborés, qui tous ont la forme générale suivante:

$$H_{\max} = f[H(j), j] \quad (1)$$

où H représente la hauteur observée à Manaus, et j le jour julien de cette observation, pris dans la période 15 mars-30 mai.

Le premier modèle est constitué par une fonction f purement linéaire des deux variables j et $H(j)$:

$$H_{\max} = a.H(j) + b.j + c \quad (2)$$

appliquée à l'ensemble de la période de définition de j , c'est-à-dire du 15 mars au 31 mai. On l'appellera donc pour cette raison modèle « linéaire-global », symbolisé par la lettre L .

Le second fait intervenir j non pas comme variable directe du modèle, mais comme variable de contrôle des valeurs des paramètres de la fonction f , celle-ci devenant donc une fonction linéaire de $H(j)$, à paramètres variables $a(j)$ et $c(j)$:

$$H_{\max} = a(j).H(j) + c(j) \quad (3)$$

On appellera ce second modèle « polylinéaire »; soit P , puisque constitué d'une juxtaposition de petits sous-modèles linéaires partiels, définis pour une date j donnée de l'année, cet ensemble formant un modèle non-linéaire. Notons que l'outil de prévision proposé par Maia-Neto & Da Silva-Lopes (1994) s'apparente quelque peu à ce modèle polylinéaire, une des différences importantes étant leur pas de temps mensuel (H devenant alors la cote maximale sur l'intervalle) et non journalier.

Ces deux premiers modèles L et P sont établis par régression linéaire, le premier directement sur l'ensemble des données correspondant à l'intervalle de variation de j , c'est-à-dire de la mi-mars à la fin-mai, le second séparément pour chaque valeur de j , donc pour chaque jour de l'année.

Le troisième modèle, noté N , est lui un modèle véritablement non-linéaire, la fonction f étant ici constituée par un réseau de neurones, de type perceptron multicouche (voir par exemple Hecht-Nielsen, 1987), que l'on écrira:

$$H_{\max} = N[H(j), j] \quad (4)$$

Ces trois modèles ont été calés sur l'ensemble des données journalières relatives aux périodes 15 mars-31 mai des 57 années 1903 à 1959; les 33 années 1960 à 1992 sont utilisées en validation.

RESULTATS

Modèle de propagation

Les équations mises au point pour les différents délais de prévision font, au total, appel à dix stations parmi les 39 considérées.

Le modèle de base proposé met donc en jeu l'ensemble de ces dix stations. Pour permettre un mode de fonctionnement de secours lorsque certaines stations ne sont plus accessibles, un modèle « dégradé » a également été mis au point en se limitant à seulement quatre stations, jugées indispensables à la prévision. Les résultats et discussions qui suivent ne concernent que le modèle de base.

Un modèle est constitué par un ensemble d'équations correspondant d'une part aux différents délais de prévision, d'autre part à différentes phases de la crue. Une meilleure précision peut en effet être obtenue en « spécialisant » les équations par phase de crue.

L'objectif principal de la prévision à Manaus étant la montée vers le maximum et l'étalement de la crue jusqu'à l'amorce de la décrue, un jeu d'équations spécifiques a été établi pour cette période, définie par les deux critères suivants: hauteur à Manaus supérieure à 24 m, date antérieure à fin juillet. On a ainsi constitué un modèle dit « composite », contenant ces équations spécialisées pour la phase critique, et dans lequel le reste de la crue (début de la montée avant le seuil de 24 m, et décrue à partir d'août) est modélisé par un jeu d'équations établies sur l'ensemble de la période de crue (hauteur à Manaus au-dessus de 22,5 m). On dénomme d'autre part modèle « global » celui qui n'applique que ce dernier jeu d'équations à toute la crue.

La comparaison des modèles « global » et « composite » (Fig. 3) montre la supériorité de ce dernier dans la phase critique, mesurée par l'écart quadratique moyen de prévision (moyenne quadratique des écarts entre valeurs observée et prévue pour la même date). Ce gain est obtenu aussi bien pour les données de calage que pour celles de validation. Le modèle composite montre une concordance remarquable des erreurs de prévision entre les jeux de validation et de calage, pour tous les délais étudiés. Signalons que pour les délais longs, la prévision est améliorée par l'incorporation de variables désaisonnalisées.

Compte-tenu des objectifs, la conclusion que l'on peut tirer de la Fig. 3 est que la précision des prévisions, si elle décroît bien sûr avec le délai, reste tout à fait acceptable jusqu'à 60 jours (écart quadratique moyen d'une quarantaine de centimètres environ pour ce délai), et qu'il est donc possible de bâtir un outil opérationnel fiable autour de ce modèle.

A titre expérimental, une méthode basée sur les réseaux neuronaux a également été mise en oeuvre pour l'établissement d'un modèle de propagation. Si les résultats obtenus sont certes systématiquement meilleurs que ceux produits par l'approche de statistique linéaire classique, l'amélioration apportée est cependant faible. L'intérêt limité de la méthode neuronale pour ce problème-ci est vraisemblablement dû pour l'essentiel au fait que la propagation sur le système étudié est somme toute bien représentée par une

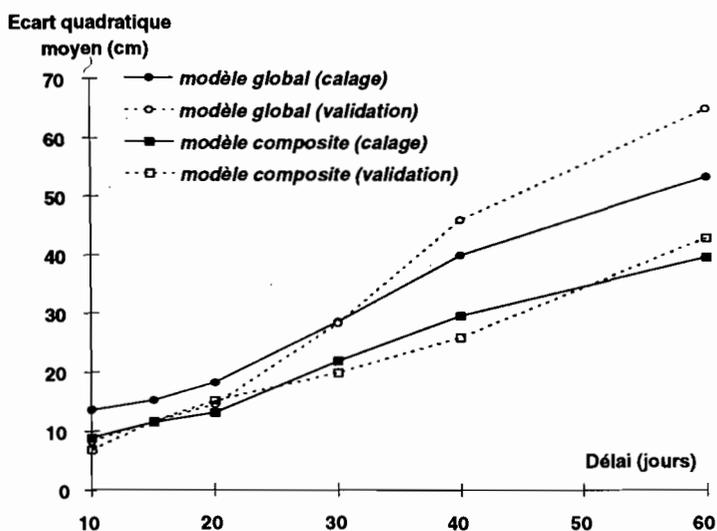


Fig. 3 Qualité de la prévision du limnigramme en montée de crue.

modélisation linéaire. L'apport de l'approche neuronale est illustré dans la section suivante, pour la prévision du maximum à partir des seules observations à Manaus.

Modèle autorégressif de prévision du maximum

La Fig. 4 compare les performances des trois différents modèles envisagés en termes d'écart quadratique moyen entre hauteurs maximales observée et prévue, pour les années de calage et celles de validation. Bien que le calage des modèles ait été effectué pour la période 15 mars-31 mai d'émission des prévisions, il est intéressant de comparer également leurs performances sur une partie seulement de cette période, la précision attendue sur la prévision du maximum augmentant à mesure que l'on se rapproche de l'étalement de la crue. La Fig. 4 distingue ainsi les écarts quadratiques moyens obtenus sur deux périodes d'émission des prévisions: d'une part la totalité de la période 15 mars-31 mai, d'autre part une période limitée à la deuxième quinzaine de mai où l'on se trouve en phase terminale de montée de la crue.

Sur ce graphique, l'axe des abscisses est gradué en nombre de paramètres, afin de classer sur cet axe chacun des trois modèles suivant leur degré de parcimonie.

Les conclusions principales que l'on peut en tirer sont les suivantes:

- s'il apparaît peu de différence entre les trois modèles pour l'écart quadratique mesuré sur l'ensemble de la période du 15 mars au 31 mai, les modèles *N* (neural) et *P* (polylinéaire) sont par contre significativement meilleurs (moindre écart quadratique) sur la période terminale (fin mai). Cette capacité à effectuer une prévision beaucoup plus précise en fin de montée provient de leur aptitude à représenter la non-linéarité du processus;
- le modèle neuronal est aussi performant que le modèle polylinéaire mais avec un nombre de paramètres beaucoup plus restreint. Ceci montre la capacité structurelle d'un réseau neuronal à capter les non-linéarités du processus modélisé.

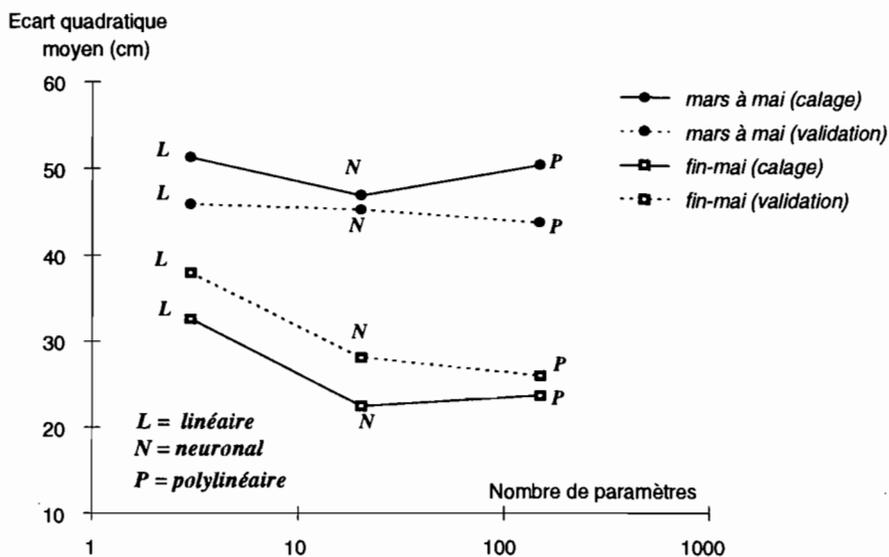


Fig. 4 Qualité comparée des modèles de prévision du maximum.

A noter que si un modèle de type autorégressif (c'est-à-dire basé sur les seules observations à Manaus) s'avère possible, avec une précision intéressante, pour la prévision du maximum de la crue, tel n'est pas le cas de la prévision du limnigramme ni de la date d'occurrence du maximum: l'erreur obtenue sur la prévision d'un niveau daté est en effet très élevée si l'on ne fait intervenir comme variables explicatives que les données de Manaus, et il faut alors avoir recours au modèle de propagation faisant intervenir les observations sur les autres stations du bassin.

Logiciel opérationnel de prévision

Le logiciel Cheiamaz a été développé pour permettre aux prévisionnistes d'effectuer leur tâche avec efficacité et fiabilité, en mettant à leur disposition les fonctions graphiques suivantes:

- (a) visualisation et superposition des limnigrammes observés aux stations du bassin;
- (b) émission de la prévision;
- (c) comparaison des prévisions antérieures avec les observations.

Par défaut la prévision est effectuée avec le modèle de propagation composite, mais l'utilisateur peut choisir le modèle global s'il le souhaite. Elle est accompagnée de son intervalle de confiance, pour une probabilité au choix de l'utilisateur (Fig. 5).

L'affichage des comparaisons se fait suivant deux méthodes: dans la première (comparaison « par délai », Fig. 6(a)), les prévisions sont effectuées pour un délai donné, une seule valeur prévue étant donc représentée pour chaque jour de la période visualisée; dans la seconde (appelée comparaison « en peigne » en raison de l'allure du graphe obtenu, Fig. 6(b)), sont affichées des prévisions complètes (tous délais), correspondant à certaines dates choisies d'émission, à intervalles réguliers.

Pour le moment, il n'a pas été développé dans le logiciel Cheiamaz de processus adaptatif permettant de mettre à jour les équations en temps réel en fonction des niveaux effectivement observés à Manaus.

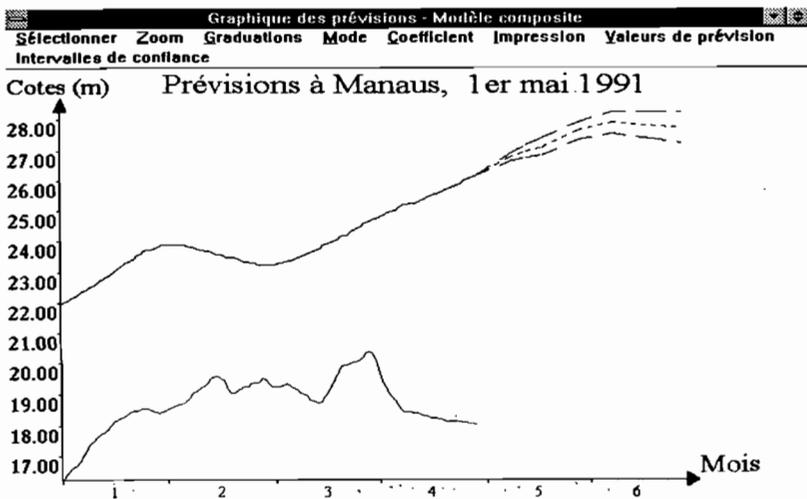


Fig. 5 Logiciel Cheiamaz, exemple de graphique des prévisions à Manaus.

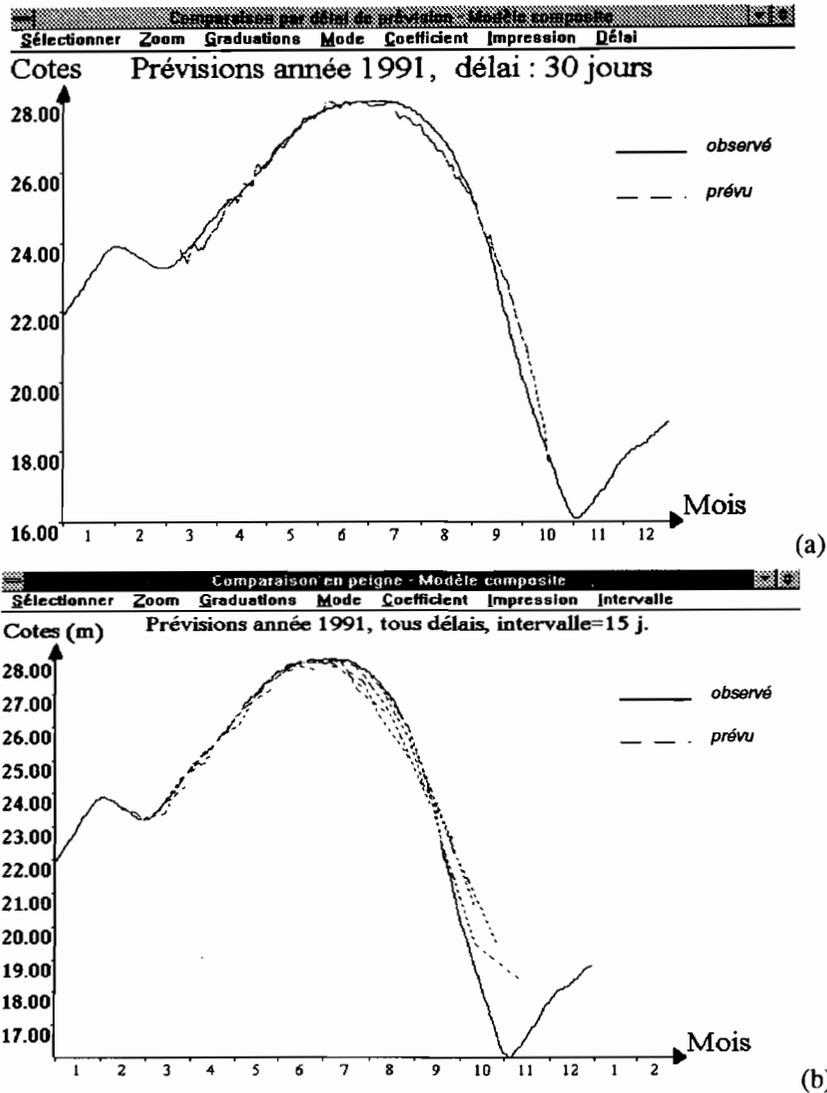


Fig. 6 Logiciel Cheiamaz, comparaison prévisions/observations: (a) par délai; (b) en peigne.

Dans l'état actuel du logiciel, l'introduction des données est manuelle (une donnée par jour par station), l'intention étant d'interfacer Cheiamaz avec le système de réception des données par satellite du DNAEE.

Deux modes d'exploitation sont possibles, soit en temps réel (la date courante est automatiquement prise comme date de fonctionnement) soit en simulation (la date de fonctionnement est alors choisie dans le passé par l'utilisateur).

Le logiciel Cheiamaz a été développé en programmation objet (langage C++) sous Windows. Une bibliothèque d'objets graphiques génériques a d'abord été élaborée, qui permet de construire tous les types de graphes nécessaires à l'application. Cette

bibliothèque peut être réutilisée pour construire d'autres applications faisant appel à des représentations graphiques analogues. Cheiamaz a été installé sur l'ordinateur du service de prévision des crues du DNAEE, pour être opérationnel dès la crue de 1995.

CONCLUSION

Le modèle de propagation établi par régression progressive ascendante sur les hauteurs observées aux stations des principaux formateurs brésiliens de l'Amazone, permet de réaliser une prévision satisfaisante des niveaux à Manaus, jusqu'à un délai de deux mois. Les écarts quadratiques sur ces prévisions varient de moins de 10 cm pour un délai de 10 jours, à environ 40 cm pour le délai de 60 jours. La prévision du maximum de la crue peut également être réalisée, avec une précision certes moindre mais encore intéressante, par un modèle neuronal utilisant les seules observations à Manaus.

Un logiciel opérationnel destiné à être exploité par les prévisionnistes a été développé sous Windows et installé à Brasília, permettant d'effectuer les prévisions en temps réel, et de comparer *a posteriori* les prévisions émises antérieurement avec les données effectivement observées.

Outre cet outil fonctionnel qui était l'objectif premier du projet, d'autres outils mis au point pour sa réalisation sont également disponibles et peuvent être réutilisés dans le cadre d'autres opérations:

- (a) Un logiciel d'élaboration de modèles régressifs et/ou neuronaux (une option du programme permet d'effectuer ce choix), pouvant travailler dans de très grands espaces de données entachés de lacunes. Cet outil a d'ores et déjà été utilisé dans le cadre d'un autre projet au Tchad, à savoir la prévision des crues du système fluvial Chari-Logone à N'Djamena (Paturel, 1995).
- (b) Une bibliothèque d'objets graphiques génériques utilisable pour le développement d'applications C++ sous Windows.

REFERENCES

- Callède, J., Claudino, L. & Fonseca, V. (1986) Transmission par satellite des hauteurs d'eau de l'Amazone et de ses affluents. *Hydrol. Continent.* 1(2).
- Draper, N. & Smith, H. (1981) *Applied Regression Analysis*. Wiley-Interscience.
- Fernandes, D. (1987) *Inventário das Estações Fluviométricas*. DNAEE, Ministério das Minas e Energia, Brasília.
- Guimarães, V., Cudo, K. & Callède, J. (1995) Os avanços da gestão da rede hidrométrica brasileira através da telemetria por satélite. *A Água em Revista* 3(4).
- Hecht-Nielsen, R. (1987) *Neurocomputing*. Addison-Wesley.
- Maia Neto, R. & Da Silva Lopes, E. (1994) As cheias de Manaus. *A Água em Revista* 2(2).
- Molinier, M., Guyot, J. L., De Oliveira, E., Guimarães, V. & Chaves, A. (1993) Hydrologie du bassin de l'Amazone. *Colloque PÉGI-GBF* (Paris, novembre 1993).
- Paturel, E. (1995) *Elaboration d'un modèle de prévision des crues à N'Djamena - Prévision sur le système Chari-Logone à hauteur de N'Djamena*. Antenne Hydrologique Orstom Abidjan.