

Utilisation du système Argos par le programme de lutte contre l'onchocercose

Le réseau expérimental du Nord-Togo

Luc LE BARBE (1), Jean-Claude BADER (2)

RÉSUMÉ

En Afrique de l'Ouest, l'OMS-OCP mène une lutte à grande échelle contre l'onchocercose, en procédant à des épandages aériens d'insecticide sur les rivières où se développent les larves de la mouche vecteur de cette maladie.

Afin d'adapter au mieux les doses à injecter aux débits transitant dans les biefs à traiter, l'OCP (3) a envisagé l'utilisation de limnigraphes télétransmetteurs permettant de connaître les débits en temps réel.

Un réseau expérimental de huit de ces appareils a donc été installé au Nord-Togo, et l'ORSTOM a été chargé d'une étude pilote pour évaluer l'efficacité d'un tel système auquel on a superposé des modèles simples de prévision de débit.

On présente ici le réseau expérimental, son mode d'exploitation avec le détail des modèles de prévision utilisés (autorégression pour les stations isolées et propagation de débit si on dispose de données de l'amont), ainsi que les gains importants de précision obtenus sur les dosages.

MOTS-CLÉS: Télétransmission par satellites — Prévisions des débits — Onchocercose — Nord-Togo.

ABSTRACT

USE OF THE ARGOS SYSTEM IN THE ONCHOCERCIASIS CONTROL PROGRAMME — EXPERIMENTAL NETWORK IN NORTHERN TOGO

In West Africa, WHO-OCP is carrying out a drive against onchocerciasis, using aeral insecticide spraying on the rivers where the vector larvae develop.

To optimise the dosage in terms of local river flows, OCP (3) planned the use of transmitting level recorders to provide flows in real time.

An experimental network of eight stations was installed in Northern-Togo, and ORSTOM was responsible for a pilot study to evaluate the value of such a system in connection with simple flow forecasting models.

The paper discusses the experimental network, its exploitation with the details of the forecasting models used (autoregression for isolated streams and flow routing where upstream records were available), and the significant gains of precision obtained in terms of dosage.

KEY WORDS: Satellite teletransmission — Flow forecasting — Onchocerciasis — Northern Togo.

L'onchocercose est une maladie débilitante due à la prolifération dans le corps humain de microfilaires qui peuvent envahir le globe oculaire et provoquer la cécité. Le vecteur de cette maladie est une petite mouche, «*Simulium damnosum*» qui à l'état larvaire se développe dans les zones à courant relativement rapide des rivières. Des foyers très importants de cette maladie existent donc le long de certains cours d'eau d'où le nom qui lui est parfois donné de «cécité des rivières». L'onchocercose est très répandue en Afrique de l'Ouest et, outre son aspect dramatique sur le plan humain, elle est un frein au développement et à la mise en valeur des terres fertiles bordant les fleuves.

Aussi depuis plus de dix ans, un programme de l'OMS, «l'OCP (3)», a été mis en place pour neutraliser cette

(1) Hydrologue ORSTOM, représentant de l'ORSTOM au Niger, BP 11416 Niamey.

(2) Hydrologue ORSTOM, centre ORSTOM au Togo, BP 375 Lomé.

(3) Onchocerciasis Control Programme (Programme de lutte contre l'onchocercose).

maladie en s'attaquant au vecteur par des épandages aériens d'insecticides sur les gîtes larvaires qui sont souvent facilement repérables.

La réussite de ces traitements nécessite la connaissance des conditions d'écoulement au moment de l'épandage des insecticides. Jusqu'à présent, l'OCP utilise pour chaque insecticide une formule empirique valable pour toutes les rivières, liant la dose à épandre au débit par une fonction croissante. A partir des derniers débits connus, on fournit donc chaque matin aux pilotes chargés des traitements, des plans d'épandage indiquant les doses à injecter sur chacun des gîtes à traiter dans la journée.

Les débits utilisés étant habituellement estimés à partir de lectures d'échelle datant de deux à cinq jours, il y avait là une cause importante d'échec de traitement en cas de variation rapide de débit. Une première étude (Le BARBE, 1982) avait ainsi montré que 30 % seulement des dosages pouvaient être considérés comme satisfaisants. L'OCP a donc envisagé l'utilisation d'un système de télétransmission de données hydrologiques. Un système radio classique, nécessitant de nombreux relais dans les zones accidentées, n'était pas envisageable. La solution d'un système embarqué sur satellite a donc été retenue, avec une préférence pour le système Argos qui offrait les avantages de déjà équiper de nombreux limnigraphes du programme Hydroniger, de nécessiter peu d'énergie à l'émission et d'avoir un coût de revient bien moins élevé que le système Météosat.

L'OCP a alors chargé l'ORSTOM de réaliser une étude pilote pour :

- évaluer la fiabilité du matériel Argos;
- définir le meilleur mode d'exploitation, dans le cadre d'OCP, d'un réseau de balises.

Dans ce but un réseau expérimental a été exploité au Nord-Togo durant les années 1985 et 1986. Nous présentons ici les principaux résultats obtenus.

1. LE RÉSEAU EXPÉRIMENTAL (fig. 1)

Le réseau installé au Nord-Togo se composait de 8 balises implantées sur des stations hydrométriques drainant des bassins de tailles très diverses (tab. I) et d'une station de réception directe (SRD) implantée à la base aérienne de Kara.

TABLEAU I
Stations hydrométriques du réseau expérimental

Rivière	Station	Superficie du bassin versant (km ²)
KPELOU	KPESSIDE	417
RINAH	POUDA	690
KARA	KARA	1 560
KARA	KPESSIDE	2 700
KERAN	TITIRA	3 695
KERAN	NABOULGOU	5 470
KOUMANGOU	KOUMANGOU	6 730
OTI	MANGO	35 650

Ces stations hydrométriques étaient composées d'un limnigraphe OTT X sur lequel était fixé un codeur SIGTAY-COD (CALLEDE *et al.*, 1985) relié à une balise HYDRONIGER (CEIS ESPACE), le tout alimenté par des piles à grande autonomie. Les messages émis par ces balises ont une longueur de 128 bits et portent les valeurs, mesurées juste avant l'émission, de la hauteur d'eau, de la pluviométrie cumulée et de différents paramètres technologiques (tension de batteries, température de la balise etc.). Un code de contrôle (CRC) est également intégré au message pour détecter et éventuellement corriger les erreurs de transmission. La station de réception utilisée était une SRD 84 de CEIS Espace. Les hauteurs télétransmises étaient saisies au clavier sur un micro-ordinateur HP 85 où s'effectuaient tous les traitements de données.

L'ensemble permettait d'avoir pour chaque station 4 à 6 relevés quotidiens répartis sur les plages horaires suivantes: 1 h 30 - 8 h 30 et 13 h - 20 h 30.

Il y a eu peu de pannes sur le réseau — la plupart étaient dues à des problèmes d'alimentation — Les paramètres technologiques transmis ont toujours permis de les détecter et de les corriger très rapidement.

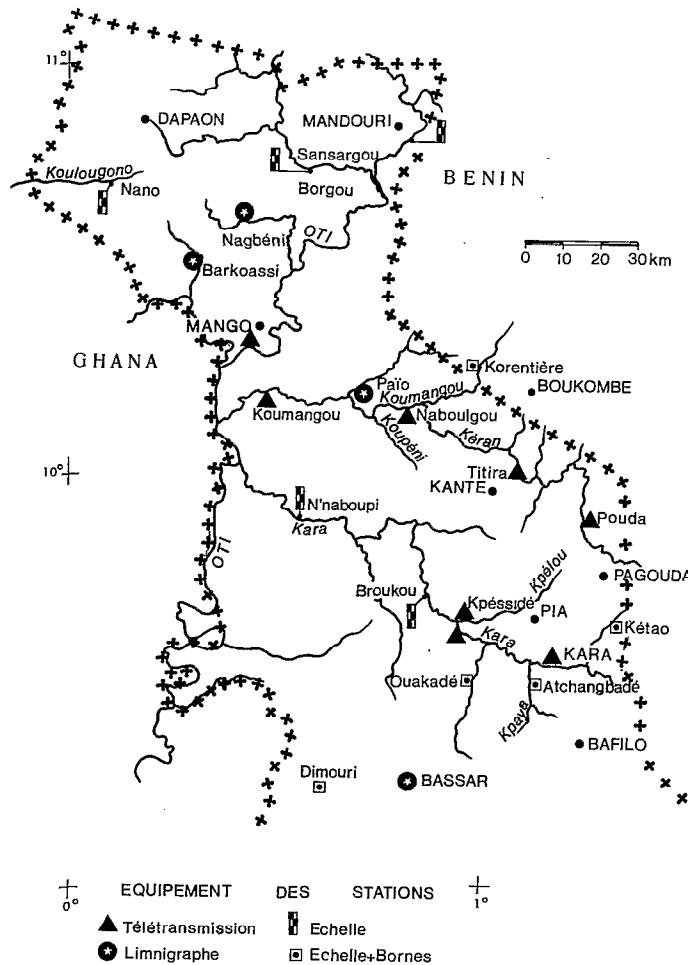


FIG. 1. — Plan de situation

2. LE MODE D'EXPLOITATION

2.1. LES CONTRAINTES

Pour définir quel mode d'exploitation adopter, nous devons obéir à un certain nombre de contraintes imposées par la nature et l'ampleur du travail réalisé par l'OCP :

— Les traitements aériens exigent de la part du pilote une attention soutenue — Il n'était donc pas envisageable de communiquer par radio la dose à épandre au moment même du survol du site à traiter — Par ailleurs les liaisons radio en vol ne sont pas toujours très aisées et le système Argos ne permet pas d'avoir à tout moment des renseignements sur les débits de biefs. Il n'y a notamment aucun passage de satellite donc aucune transmission de données entre 8 h 30 et 13 h. Il est donc apparu indispensable de pouvoir fournir aux pilotes, avant le décollage, pour chacun des biefs à traiter au cours de la journée, les doses à épandre. Ceci impliquait de faire chaque matin une prévision des débits à court terme (2,5 et 10 h).

— L'OCP traitant un nombre très important de biefs (10 à 15 000 km de rivière par semaine) (1) les modèles de prévision à utiliser ne devaient exiger qu'un nombre réduit de paramètres facilement accessibles. Malgré cette simplicité, ils devaient quand même apporter une amélioration par rapport au système qui aurait consisté à prendre comme valeur à prévoir, la valeur correspondant à la dernière hauteur télétransmise.

(1) 50 000 km à partir de 1990.

2.2. LES MODÈLES DE PRÉVISIONS

Vu l'importance de la zone traitée par l'OCP, il était hors de question de prendre en compte la pluie pour la prévision des débits, car il aurait alors fallu mettre en place un réseau de pluviographes dont le coût aurait été beaucoup trop élevé.

Nous avons retenu deux types de modèles, utilisant uniquement des données de débit:

- l'un autorégressif pour les stations isolées;
- l'autre basé sur la propagation d'une onde de crue diffusante applicable aux stations pour lesquelles on dispose de données en provenance de l'amont.

2.2.1. Le modèle autorégressif

2.2.1.1. Le principe

Deux schémas autorégressifs ont été envisagés: arithmétique et géométrique.

Si on note D l'horizon de prévision, P le débit prévu, Q le débit et t le temps, alors on calcule P de la façon suivante:

$$P(t + D) = C_0 \cdot Q(t) + C_1 \cdot Q(t - t_1) + C_2 \cdot Q(t - t_2): \text{arithmétique};$$

$$P(t + D) = [Q(t)]^{A_0} \cdot [Q(t - t_1)]^{A_1} \cdot [Q(t - t_2)]^{A_2}: \text{géométrique}.$$

Dans l'un et l'autre cas, t_1 et t_2 sont des constantes, ainsi que C_0, C_1, C_2 et A_0, A_1, A_2 qui sont déterminés pour chaque station à partir des chroniques de débit disponibles sur les années précédentes. On impose à ces derniers coefficients de vérifier les conditions suivantes:

$$\left. \begin{aligned} C_0 + C_1 + C_2 &= V \\ A_0 + A_1 + A_2 &= V \end{aligned} \right\} \text{avec } V \text{ proche de } 1$$

Ces conditions permettent de prévoir, en cas de débit constant, un débit pratiquement de même valeur.

2.2.1.2. Détermination des coefficients d'autorégression

(a) Schéma arithmétique

On a choisi de déterminer C_0, C_1, C_2 en utilisant le critère des moindres carrés sur un échantillon de débits connus de la station, soit:

$$\sum_{\text{échantillon}} [P(t) - Q(t)]^2 \text{ minimal}$$

On a donc à résoudre le système suivant:

$$\left\{ \begin{aligned} P(t + D) &= C_0 \cdot Q(t) + C_1 \cdot Q(t - t_1) + C_2 \cdot Q(t - t_2) \equiv Q(t + D) \\ C_0 + C_1 + C_2 &= V \end{aligned} \right.$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{aligned} &\frac{A_0(t)}{[Q(t + D) - V \cdot Q(t - t_2)]} \equiv C_0 \cdot \frac{A_1(t)}{[Q(t) - Q(t - t_2)]} + C_1 \cdot \frac{A_2(t)}{[Q(t - t_1) - Q(t - t_2)]} \\ C_2 &= V - C_0 - C_1 \end{aligned} \right.$$

$$[6] \left\{ \begin{aligned} C_0 &= \frac{(\sum A_1 \cdot A_2) \cdot (\sum A_0 \cdot A_2) - (\sum A_2^2) \cdot (\sum A_0 \cdot A_1)}{(\sum A_1 \cdot A_2)^2 - (\sum A_1^2) \cdot (\sum A_2^2)} \end{aligned} \right.$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{aligned} C_1 &= \frac{(\sum A_0 \cdot A_2) - C_2 \cdot (\sum A_1 \cdot A_2)}{(\sum A_2^2)} \end{aligned} \right.$$

$$C_2 = V - C_1 - C_0$$

(b) Schéma géométrique

On se ramène exactement au cas précédent en faisant un changement de variable par logarithme.

Les coefficients A_0 , A_1 et A_2 déterminés par le critère des moindres carrés sont alors ceux qui vérifient la condition suivante:

$$\sum_{\text{échantillon}} \left(\text{Log} \left[\frac{P(t)}{Q(t)} \right] \right)^2 \text{ minimal}$$

2.2.1.3. Calcul des coefficients à partir des échantillons de débits de 1985 et 1986

Afin de pouvoir comparer les deux schémas autorégressifs envisagés, de tester la stabilité des coefficients d'autorégression, de déterminer la valeur optimale de V , somme de ces coefficients, et d'examiner leurs variations en fonction de la taille des bassins versants, on a calculé C_0 , C_1 , C_2 et A_0 , A_1 , A_2 pour les huit stations du réseau OCP, successivement sur les échantillons de 1985 et 1986, et ce pour des valeurs de V de 0,9; 0,95; 1,00; 1,05 et 1,10.

Pour rendre les comparaisons possibles entre stations, les valeurs de t_1 et t_2 ont toujours été pour ce calcul fixées respectivement à 1 et 2 heures. Les calculs ont été faits pour des prévisions à deux heures et à cinq heures. Chacun des 16 échantillons utilisés était constitué de 3 500 débits successifs séparés d'une heure, débutant le premier juillet. Ceci couvre donc quasiment la période juillet-novembre (hautes eaux dans la région) pendant laquelle l'OCP effectue des traitements intensifs.

(a) Valeur optimale de V

Pour évaluer l'efficacité des différents schémas autorégressifs, on a utilisé les deux indices suivants (n étant la taille de l'échantillon):

— S écart type résiduel défini par:

$$S = \left[\frac{\sum (Q(t) - P(t))^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

— R moyenne géométrique du rapport entre débit réel et débit reconstitué, défini par:

$$R = e^{\left[\frac{1}{n} \sum \left(\left| \text{Log} \frac{P(t)}{Q(t)} \right| \right) \right]}$$

Un schéma de prévision est jugé d'autant meilleur que S est plus proche de zéro et que R est plus proche de 1. Selon ce critère, et tant pour le modèle géométrique que le modèle arithmétique, les résultats obtenus pour les huit stations sur 1985 et 1986 sont les suivants:

— Prévision à 2 heures :

$V = 1$ pour toutes les stations

— Prévision à 5 heures :

$V = 1$ pour les 3 stations de plus grands bassins

$V = 0,95$ pour les 3 stations de plus petits bassins

$V = 1$ ou $0,95$: équivalent pour les 2 stations intermédiaires.

On voit donc que, sauf pour les stations correspondant aux trois plus petits bassins pour lesquelles il vaut mieux prendre $V = 0,95$ pour la prévision à 5 heures, il convient de prendre dans tous les cas: $V = 1$. Les résultats qui suivent correspondent tous au cas: $V = 1$.

(b) Variation des coefficients en fonction de la taille des bassins versants

Dans l'optique de pouvoir étendre pour l'OCP, l'utilisation d'un modèle autorégressif de prévision à des stations ne disposant pas de chronique de débits permettant le calcul des coefficients, on a cherché si ceux-ci pouvaient être reliés aux superficies de bassins versants.

Les résultats sont indiqués sur les figures 2 et 3.

Plutôt que des droites de régression autour desquelles la dispersion des points aurait été très grande, on a préféré tracer de façon totalement empirique des courbes s'ajustant au mieux aux échantillons de points.

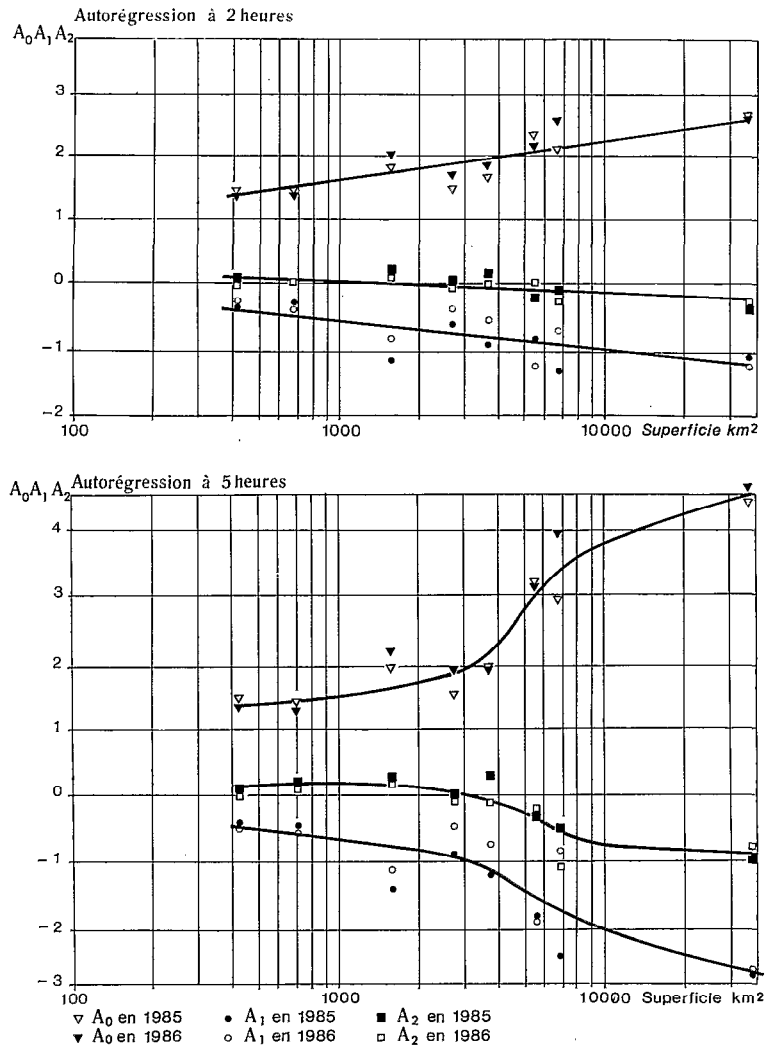


FIG. 2. — Schéma arithmétique

(c) Stabilité des coefficients d'autorégression

Pour estimer leur stabilité, on a comparé sur l'ensemble des stations les coefficients de 1985 avec ceux de 1986 en utilisant les indices suivants :

— A écart absolu moyen défini par : $A = \frac{1}{8} \sum_{8 \text{ stations}} (|C_{1986} - C_{1985}|)$;

— E écart relatif moyen défini par :

$$E = \frac{1}{8} \left[\sum_{8 \text{ stations}} \left[2 \left| \frac{C_{1986} - C_{1985}}{C_{1986} + C_{1985}} \right| \right] \right]$$

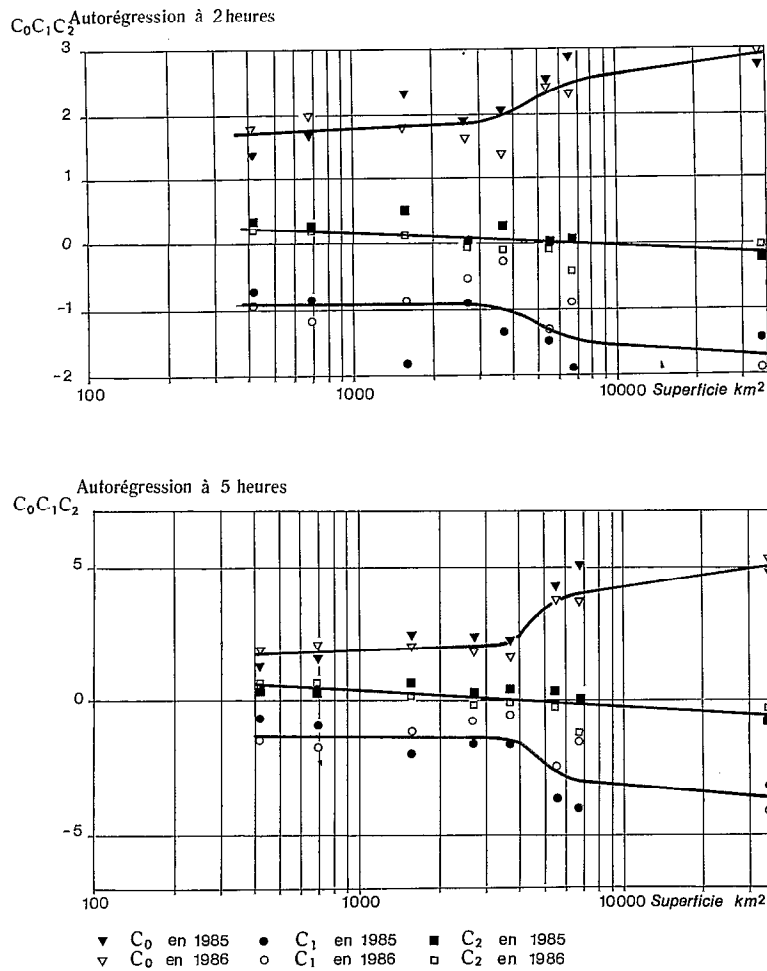


FIG. 3. — Schéma géométrique

Un coefficient est estimé d'autant plus stable que les valeurs de A et E correspondantes sont proches de zéro. Le tableau suivant donne les valeurs de A et de E obtenues :

	SCHEMA ARITHMETIQUE						SCHEMA GEOMETRIQUE					
	Prévision à 2 h			Prévision à 5 h			Prévision à 2 h			Prévision à 5 h		
	C ₀	C ₁	C ₂	C ₀	C ₁	C ₂	A ₀	A ₁	A ₂	A ₀	A ₁	A ₂
E	0,19	0,52	1,64	0,25	0,66	3,34	0,09	0,34	9,17	0,11	0,34	1,18
A	0,38	0,56	0,22	0,64	1,17	0,53	0,17	0,28	0,12	0,27	0,38	0,18

Les variations relatives des coefficients autour de leurs moyennes, dont E nous donne une idée, sont acceptables pour C₀, C₁, A₀, A₁ mais fortes pour C₂ et A₂. Cependant, ces deux coefficients dont les valeurs se répartissent de part et d'autre de zéro ont des variations absolues suffisamment faibles.

Cette relative stabilité des coefficients d'autorégression justifie donc l'emploi d'un modèle autorégressif pour faire de la prévision de débit aux huit stations du réseau.

Par ailleurs, on remarque que les coefficients sont plus stables pour le schéma géométrique que pour le schéma arithmétique.

(d) Comparaison des deux schémas

Pour comparer les schémas, on a utilisé les indices S et R définis plus haut. Selon ces critères, on trouve que sur l'ensemble des stations et pour des prévisions à 2 comme à 5 heures, le schéma arithmétique apparaît légèrement plus favorable que le schéma géométrique dans la plupart des cas.

2.2.1.4. Schéma autorégressif utilisé pour les travaux de l'OMS

Ce qui précède nous montre un léger avantage du schéma arithmétique pour ce qui concerne l'écart type résiduel et le rapport moyen de prévision, et un avantage du schéma géométrique du point de vue de la relative stabilité des coefficients. Le choix n'est donc pas évident.

Pour la valeur à imposer à la somme des coefficients d'autorégression, il convient de prendre toujours 1, sauf pour les stations ayant les 3 plus petits bassins, où 0,95 est plus favorable que 1 pour la prévision à 5 h.

Pour l'OMS en 1985 et 1986, on a utilisé le schéma arithmétique avec somme des coefficients égale à 1.

Pour les stations à variations rapides de débits t1 et t2 étaient fixés respectivement à 1 et 2 h, et la prévision était faite aux horizons 2 et 5 h.

Pour la station à variations lentes (OTI à MANGO), t1 et t2 étaient fixés à 2 et 4 h, et la prévision aux horizons 2, 5 et 10 h.

2.2.2. Le modèle d'onde de crue diffusante [3, 4, 5]

2.2.2.1. Principe

Le problème à résoudre est ici le suivant:

Connaissant l'hydrogramme à une station amont, comment prévoir le débit à une station aval pour un horizon donné? Il faut donc pouvoir d'une part prédire la propagation des débits de l'amont et d'autre part tenir compte des apports intermédiaires entre les deux stations.

(a) La propagation des débits de l'amont

Si l'on peut négliger dans les équations de Saint-Venant les termes d'inertie, la propagation d'une crue dans un bief obéit à l'équation différentielle suivante, analogue à celle de la diffusion (d'où le nom du modèle):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + V \frac{\partial Q}{\partial x} - D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

où Q est le débit ;

x et t les axes de l'écoulement et du temps ;

V est la célérité de l'onde de crue ;

D est le coefficient de diffusion de l'onde de crue ;

$$\text{avec } V = \frac{1}{L} \frac{\partial Q}{\partial H} \quad (1 \text{ a})$$

$$D \approx \alpha \frac{Q}{LJ} \text{ avec } \alpha = \frac{1}{2} \quad (1 \text{ b})$$

L étant la largeur du miroir ;

J étant la pente de la ligne de charge (\approx pente du fond) ;

H étant la cote de la surface libre.

Dans le cas général, la solution de l'équation (1) est excessivement complexe. En revanche, chaque fois que l'on peut considérer C et D comme invariants, elle est beaucoup plus simple et s'exprime par le produit de convolution suivant:

$$Q(x, t) = \int_0^t Q(0, u) l(t - u) du \quad (2)$$

où $l(t)$ est une réponse impulsionnelle d'expression :

$$l(t) = \frac{x}{t} \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\left[\frac{x - Vt}{2\sqrt{Dt}}\right]^2\right)$$

Vu la nature des rivières traitées par l'OCP, il n'était pas envisageable d'utiliser comme HAYAMI (ROCHE et *al.*, 1987) des valeurs constantes quel que soit le débit, pour D et V . Cela se serait traduit par des erreurs relatives très importantes sur les débits à prévoir, donc sur les dosages d'insecticide, compte tenu des vitesses de propagation des crues très différentes selon le remplissage du lit. Ainsi par exemple, on a représenté sur la figure 4 les réponses impulsionnelles calculées à l'aide des formules (1a) et (1b) pour des débits de 13.3 et 320 m³/s sur le bief Naboulgou-Koumangou. La date d'apparition de la crue passe de 2 à 12 heures et celle du maximum de 10 à 30 heures!

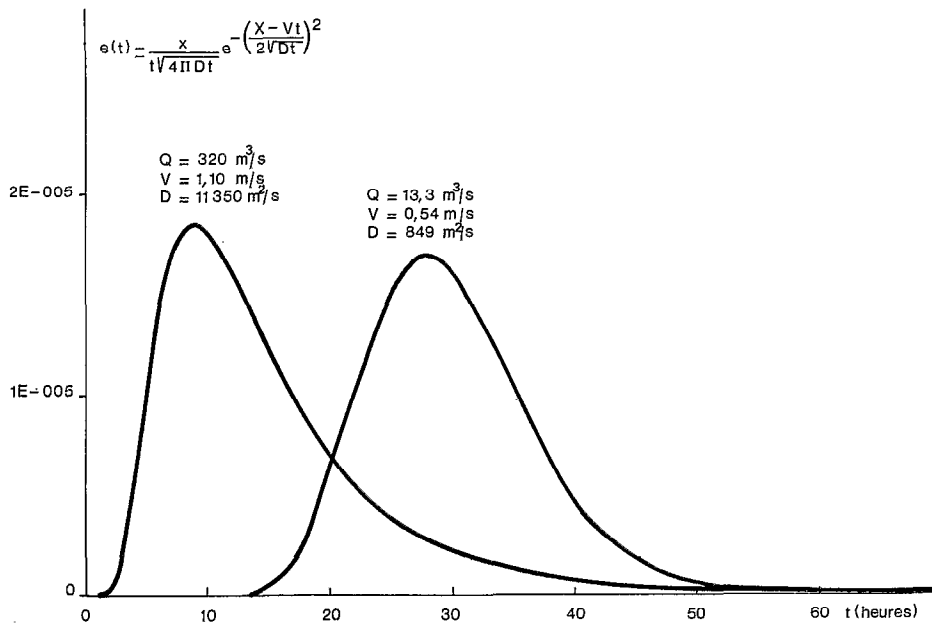


FIG. 4. — Réponses impulsionnelles sur le bief Naboulgou-Koumangou ($X = 58$ km)

L'allure en cloche des courbes de réponse impulsionnelle nous autorise à leur fixer des dates de début et de fin, T_1 et T_2 , à partir des solutions des équations suivantes :

$$\int_0^{T_1} l(t) dt = \int_{T_2}^{\infty} l(t) dt = \epsilon$$

avec ϵ fixé à 0,05 ou 0,1.

Les débits passant à l'amont entre les temps $t - T_1$ et $t - T_2$ contribuent alors presque exclusivement à eux seuls à la valeur de l'intégrale (2), et par conséquent expliquent la valeur du débit propagé à l'aval au temps t .

Nous avons donc admis que pour prédire le plus correctement possible le débit au temps t à l'aval, il fallait utiliser la réponse impulsionnelle correspondant (par l'intermédiaire de V et D) au débit moyen observé à l'amont entre les temps $t - T_1$ et $t - T_2$. Cela revient à résoudre le système d'équations suivant en T_1 et T_2 :

$$\int_0^{T_1} l(\tau, \bar{Q}) d\tau = \int_{T_2}^{\infty} l(\tau, \bar{Q}) d\tau = \epsilon \quad (3)$$

$$\bar{Q} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{t-T_1}^{t-T_2} Q(0, \tau) d\tau$$

Les relations entre les paramètres V et D et le débit étant définies par les formules (1a) et (1b) et des données de terrain (courbe d'étalonnage, largeur du miroir en fonction du débit, pente topographique du lit).

TABLEAU II
Présentation schématique du modèle utilisé

0. Extrapolation des débits amont jusqu'au temps T_p

$$Q_{am}(T_m + 1) = \dots = Q_{am}(T_p) = Q_{am}(T_m).$$

1. Recherche de la réponse impulsionnelle

Résolution par itération du système suivant pour trouver \bar{Q} , T_1 et T_2 :

$$\bar{Q} = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_p} Q_{am}(T_p - t) dt$$

$$\int_0^{T_1} l(t, \bar{Q}) dt = \int_{T_2}^{+\infty} l(t, \bar{Q}) dt = \epsilon$$

2. Calcul du débit propagé

Pour chaque valeur de T_p choisie : 3 cas :

2.1. $T_m < T_p - T_2$: la crue amont dont on dispose des données est déjà passée à l'aval — utilisation d'un modèle autorégressif.

2.2. $T_p - T_2 < T_m < T_p - T_1$: la chronologie des débits amont connus est insuffisante pour faire les prédictions : 2 cas :

2.2.1. $\int_{T_1}^{T_p - T_m} l(t) dt < 0,1$ La part des débits amont extrapolés est assez faible dans le calcul du débit aval par propagation : le calcul de propagation est effectué ;

2.2.2. $\int_{T_1}^{T_p - T_r} l(t) dt > 0,1$ La part des débits amont extrapolés est trop forte dans le calcul du débit aval par propagation et risque d'entraîner une erreur importante : calcul autorégressif.

2.3. $T_p - T_1 < T_m$: La chronologie des débits amont est suffisante (cas le plus fréquent) : le calcul de propagation est effectué.

3. Prise en compte des apports intermédiaires

Si le calcul de propagation a pu être effectué, le débit prévu est estimé par :

$$Q_{prev}(T_p) = Q_o(T_o) + Q_p(T_p) - Q_p(T_o)$$

4. Sorties

Edition des résultats et tracés graphiques.

Liste des symboles :

T_1, T_2 : dates de début et fin de réponse impulsionnelle.

H : horizon de la prévision.

$T_o = TV + \lambda$: date d'origine pour les prévisions.

T_r : date retenue pour la prévision = $\max(T_m, T_1) + H$.

T_m, TV : date des derniers débits connus aux stations amont et aval.

λ : temps en heure jusqu'où une extrapolation de l'hydrogramme est possible sans erreur ($\lambda = 1$ h dans la plupart des cas).

Q_{am}, Q_o, Q_p : débit observé à l'amont, observé à l'aval, propagé à l'aval.

(b) Prise en compte des débits intermédiaires

Pour tenir compte des apports intermédiaires et en l'absence de tout renseignement sur la pluviométrie du bassin complémentaire, nous avons admis que le débit réel à l'aval pouvait se déduire du débit résultant de la propagation des débits de l'amont par une simple translation. Par conséquent :

Si on note Q_p le débit aval résultant de la propagation des débits de l'amont, calculé par le modèle décrit ci-dessus ;
 Q_o le débit mesuré à l'aval ;
 Q_{prev} le débit prévu à l'aval
 T_o la date origine de la prévision ;
 H l'horizon de prévision,

alors nous prenons : $Q_{prev}(T_o + H) = Q_o(T_o) + Q_p(T_o + H) - Q_p(T_o)$.

2.2.2.2. Mise en œuvre

(a) Le modèle

Le modèle de prévision à court terme des débits est schématisé sur le tableau II. Il suit les principes décrits plus haut et tient compte en outre des positions relatives des dates des derniers débits connus à l'amont et à l'aval pour :

- vérifier que la crue en provenance de l'amont n'est pas déjà passée à l'aval. Si c'est le cas, on utilise alors un modèle autorégressif ;
- vérifier que pour chaque horizon la chronologie des débits amont est suffisante. Si ce n'est pas le cas, elle est éventuellement complétée par extrapolation. Si cela n'est pas possible, on utilise un modèle autorégressif.

(b) La phase de calage

L'utilisation du modèle nécessite de connaître la relation entre la largeur du miroir, la courbe de tarage et le débit, et d'autre part la pente topographique du bief. Vu les irrégularités des rivières, on conçoit qu'il est difficile de les appréhender à partir des données de terrain. A partir des chroniques de débits amont et aval disponibles, il était donc nécessaire de procéder à un calage du modèle en jouant sur les paramètres.

(b1) Relation largeur débit

A partir des différents jaugeages effectués sur le bief, nous faisons une première estimation de cette relation, que nous représentons par trois segments de droite. Les équations de ces segments étaient ensuite modifiées pour améliorer la coïncidence entre débit prédit et débit observé. Dans tous les cas, les modifications que nous avons apportées concernaient surtout les très basses eaux. Il était notamment nécessaire de ne pas imposer une largeur nulle pour les débits nuls, ceci étant tout à fait logique puisque dans ce cas les rivières se présentent souvent comme une série de mouilles séparées par les seuils (les jaugeages sont alors faits au niveau des seuils, non représentatifs de la largeur moyenne du miroir).

(b2) Pente de la rivière

On essayait également d'optimiser les résultats en jouant sur ce paramètre (ou, ce qui revient au même, sur le paramètre α de la formule (2a)). Dans tous les cas la valeur trouvée après optimisation était très voisine de la valeur déduite des cartes topographiques.

2.3. DESCRIPTION DU MODE D'EXPLOITATION

Chaque matin, juste avant le départ des hélicoptères pour les tournées de traitement, les prévisions en débit et en dose d'insecticide étaient faites pour les différentes stations (fig. 5). Le responsable des opérations aériennes prenait alors contact avec les pilotes pour leur communiquer le planning des traitements.

Pour les 2 stations de Naboulgou et Koumangou, le modèle utilisé était celui de l'onde de crue diffusante aux horizons 2, 5 et 10 heures, pour les autres celui autorégressif. Dans ce dernier cas sauf pour la station de Mango qui connaît des variations lentes des débits, l'horizon maximal de prévision était de 5 heures.

Une équipe d'hydrologues était en outre basée à Kara pour assurer la maintenance du réseau et effectuer des mesures de débits aux cotes non encore jaugées. La télétransmission des hauteurs et des paramètres technologiques, ainsi que les prévisions de débits, permettaient de programmer de façon judicieuse les interventions sur le terrain.

A la fin de chaque semaine, la qualité des dosages faits au cours du cycle de traitement, était évaluée a posteriori et était représentée sur des graphiques portant également le nombre de captures de simules faites à proximité et le limnigramme observé. Le document pouvait aider le responsable des traitements à établir le planning de la semaine suivante (fig. 6).

		DERNIERES DONNEES RECUES		PREVISIONS	

* 9580	*date	*02/09/86 5h 48mn	*02/09/86 8h	*02/09/86 11h	*
* NARA A PESSIDE	*cote	* 205	* 200	* 201	*
	*debit	* 91.1	* 86.6 2	* 87.7 2	*
	*abate	* 13.7	* 13.0	* 13.2	*

* 9581	*date	*02/09/86 5h 48mn	*02/09/86 8h	*02/09/86 11h	*02/09/86 16h
* DUMANGOU	*cote	* 530	* 545	* 589	* 635
	*debit	* 266.5	* 279.4 5	* 316.5 5	* 355.5 4
	*abate	* 40.0	* 41.9	* 47.5	* 53.3

* 9582	*date	*02/09/86 5h 48mn	*02/09/86 8h	*02/09/86 11h	*
* BINAH A FOUA	*cote	* 435	* 435	* 436	*
	*debit	* 286.5	* 286.7 2	* 287.7 2	*
	*abate	* 43.0	* 43.0	* 43.2	*

* 9583	*date	*02/09/86 5h 48mn	*02/09/86 8h	*02/09/86 11h	*02/09/86 16h
* OTI A MANGD	*cote	* 446	* 450	* 456	* 464
	*debit	* 201.6	* 204.5 2	* 208.5 2	* 214.5 2
	*abate	* 30.2	* 30.7	* 31.3	* 32.2

* 9584	*date	*02/09/86 5h 48mn	*02/09/86 8h	*02/09/86 11h	*02/09/86 16h
* NABOULGOU	*cote	* 649	* 643	* 620	* 649
	*debit	* 464.4	* 458.1 5	* 435.9 5	* 464.7 4
	*abate	* 69.7	* 68.7	* 65.4	* 69.7

* 9585	*date	*02/09/86 5h 48mn	*02/09/86 8h	*02/09/86 11h	*
* PELOU PPESSIDE	*cote	* 271	* 273	* 271	*
	*debit	* 111.3	* 113.5 2	* 111.3 2	*
	*abate	* 16.7	* 17.0	* 16.7	*

* 9587	*date	*02/09/86 5h 48mn	*02/09/86 8h	*02/09/86 11h	*
* IIRI	*cote	* 440	* 481	* 497	*
	*debit	* 221.7	* 255.9 2	* 270.0 2	*
	*abate	* 33.3	* 38.4	* 40.5	*

COTFS : CENTIMETRES ; DEBITS : METRES CUBES/SECONDE ; ABATE : LITRES

SIGNIFICATION DU CODE PLACE A DROITE DES DEBITS :
 5- PREVISION A HORIZON 10h , AVEC DONNEES AMONT ET AVAL
 4- PREVISION A HORIZON 10h , AVEC DONNEES AVAL , ET AMONT UN PEU MANQUANTES
 3- PREVISION A HORIZON 10h , AVEC DONNEES AMONT ET AVAL
 2- PREVISIONS AVEC DONNEES AVAL SEULES
 1- PREVISIONS AVEC DONNEES AMONT SEULES
 *-FLOTEUR A SEC

FIG. 5. — Exemples de prévision en débit et en dose d'insecticide

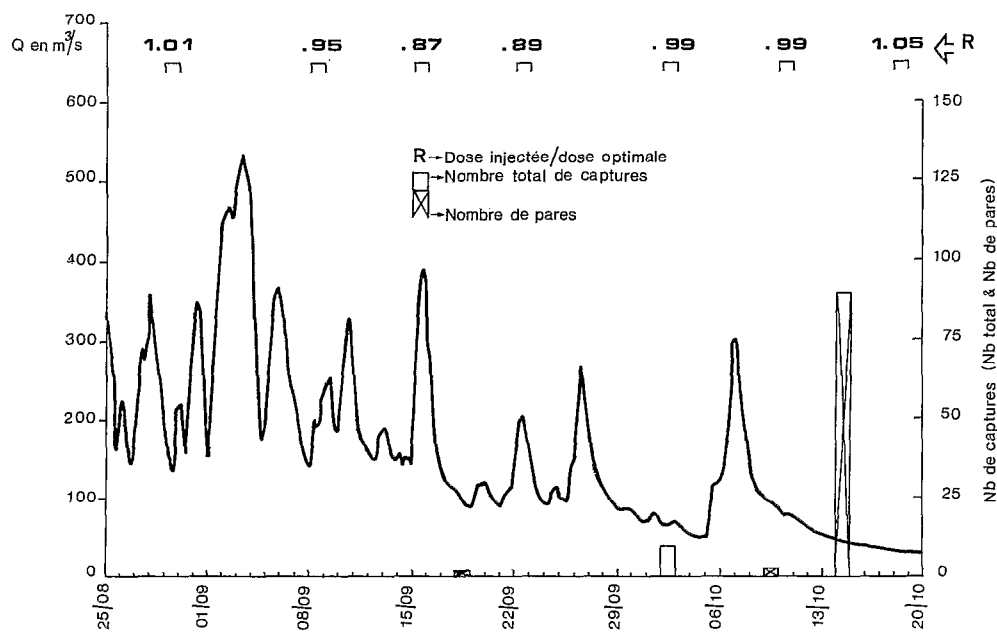


FIG. 6. — Keran à Naboulgou en 1986 (semaines 35 à 42)

3. LES RÉSULTATS

3.1. LES MODÈLES DE PRÉVISION

L'utilisation du système Argos, même sans faire de prévision, se traduit par une amélioration considérable des dosages. L'emploi des modèles de prévision permet d'améliorer encore de façon notable ce résultat, comme il est montré sur les figures 7 et 8 qu'on a obtenues de la façon suivante :

A la fin de l'étude pilote, on disposait pour chaque station du réseau expérimental d'un échantillon d'environ 150 groupes de prévisions, chaque groupe correspondant à 2 ou 3 horizons de prévision à partir d'une même date origine.

Pour chaque station et pour un horizon H de prévision donné, on a pu ainsi considérer l'ensemble des 150 quadruplets suivants :

- $Q(\tau)$ débit connu à l'instant τ ;
- $Q_1(\tau + H)$ débit prévu à l'instant $\tau + H$, calculé par modèle autorégressif ou de propagation à l'instant τ ;
- $V(\tau)$ débit du dernier vendredi précédant l'instant τ , à midi
- $Q(\tau + H)$ débit à l'instant $\tau + H$, connu a posteriori.

— Evaluer le débit pour l'instant $\tau + H$ à partir de $V(\tau)$ est à peu près représentatif du système utilisé par l'OMS sans la télétransmission.

— L'évaluer à partir de $Q(\tau)$ représente le système : télétransmission sans calcul de prévision.

— L'évaluer à partir de $Q_1(\tau + H)$ représente le système : télétransmission plus calcul de prévision.

Pour tester l'efficacité de chacun des trois systèmes, il a suffi de comparer l'échantillon des débits évalués pour l'instant $\tau + H$, à l'échantillon connu de $Q(\tau + H)$. Cette comparaison a été effectuée par classement des erreurs relatives obtenues, en tranches de 5 %.

Les figures 7 et 8 nous donnent pour chacune des stations, les histogrammes des différences relatives pour chacun des trois systèmes.

On voit que dans tous les cas, le système télétransmission plus prévision est le plus efficace puisqu'il donne un minimum d'erreurs relatives dans les tranches éloignées de zéro.

Le tableau III donne la répartition des erreurs relatives dans les classes 5 %, 10 % et 20 %, pour les systèmes télétransmission avec et sans prévision. Son examen nous montre encore l'efficacité des prévisions.

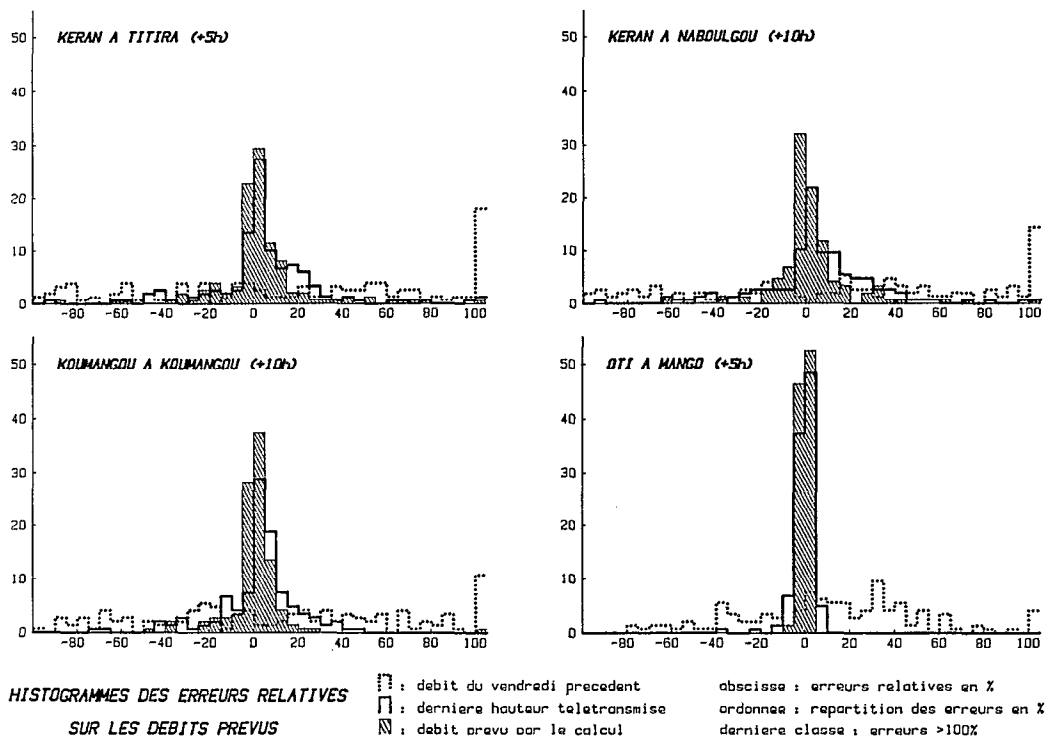
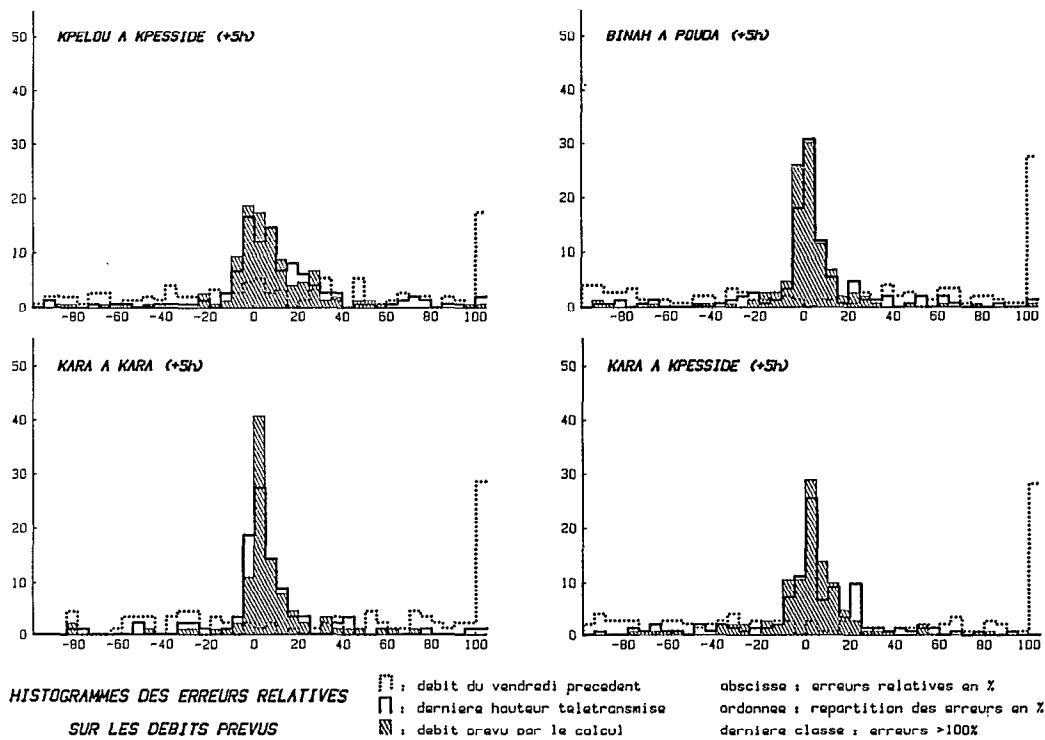


FIG. 7 et 8. — Histogrammes des différences relatives pour chacun des trois systèmes

TABLEAU III

Répartition, en pourcent, des erreurs relatives commises sur les prévisions de débits - Période du 1^{er} juillet au 30 novembre

Précision		± 5%						± 10%						± 20%					
Horizon de prévision		2h		5h		10h		2h		5h		10h		2h		5h		10h	
Mode de calcul *		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
STATIONS	Mango	92	100	85	98	70	92	97	100	97	99	90	98	98	100	98	99	97	100
	Kpessidé (Kpélou)	34	43	29	36			59	70	51	60			78	87	69	75		
	Kpessidé (Kara)	42	45	36	39			64	71	50	64			84	87	66	84		
	Kara	52	65	46	52			70	80	63	68			83	93	76	82		
	Pouda	50	56	48	56			70	76	63	72			81	89	71	86		
	Titira	54	61	40	51			73	79	54	66			86	93	73	82		
	Naboulgou **	61	73	40	62	31	54	72	88	58	84	44	73	87	98	80	93	64	89
	Koumangou **	70	91	57	79	36	66	92	97	76	92	58	82	96	99	93	99	79	92

* Mode de calcul 1 : La prévision consiste à prendre le dernier débit télétransmis.

2 : Le débit prévu est calculé par modèle autorégressif ou par modèle de propagation.

** Pour ces stations, les prévisions (par modèle de propagation) sont faites dans quelques cas, selon les données disponibles, à des horizons supérieurs à deux, cinq et dix heures.

Exemple : à Titira, la prévision à l'horizon 5 heures donnait un résultat avec moins de 10 % d'erreur, dans 66 % des cas avec le modèle autorégressif, et dans seulement 34 % des cas en prenant le dernier débit télétransmis.

3.2. LES RÉSULTATS SUR LES DOSAGES

L'utilisation du protocole que nous venons de décrire a permis sur l'ensemble des stations d'éviter tous surdosages et tous sousdosages importants. La proportion de bon dosages (dosage nominal ± 20%) obtenue est la suivante:

Stations connaissant des variations brutales des débits et où était utilisé un modèle autorégressif.	73 %
Stations connaissant des variations lentes de débit (MANGO) modèle autorégressif.	95 %
Stations où était utilisé un modèle de propagation de crue.	90 %

L'écart entre ces résultats et ceux obtenus pour les modèles de prévision s'explique par les différentes erreurs pouvant intervenir entre le moment où la prévision est faite et le moment où est traitée la rivière (mauvaise utilisation des prévisions, erreur de transmission des résultats, panne de différents appareils etc...).

4. CONCLUSION

Les résultats de l'étude menée au Nord-Togo ont été suffisamment probants pour que l'OCP décide d'installer sur les zones sensibles de son aire d'intervention un réseau de près de 80 balises et de 2 stations de réception.

Ce réseau est en cours d'installation. Le matériel choisi est également différent de celui utilisé au Nord-Togo: les SRD ont été modernisés et peuvent notamment être reliés de façon directe à un micro-ordinateur, les balises émettent sur 256 bits et intègrent dans leur message le limnigramme des 7 dernières heures précédant l'émission ce qui permet d'envisager une amélioration des performances des modèles de prévisions.

Les avantages d'un tel réseau sont multiples:

- Il permettra d'éviter tous les surdosages importants risquant de nuire à l'environnement.
- Il permettra d'éviter tous les sousdosages générateurs d'échecs ou inutilement coûteux et risquant s'ils sont trop fréquents d'isoler des souches de simules résistantes aux produits utilisés.
- En augmentant le taux de réussite, on peut envisager de ne plus traiter systématiquement chaque bief chaque semaine et d'adopter des stratégies moins coûteuses.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 15 avril 1988

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble du personnel OCP de la base de Kara pour le soutien apporté dans la réalisation de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- CALLEDE (J.), LE BARBE (L.), DELFIEU (G.), 1985. — Adaptation au système ARGOS des limnigraphes à flotteurs. Système Balise Type OMS (CEIS ESPASE)/Codeur SYGTAYCOD 15 SC 252 A (CSEE).
- DUBAND (D.), 1978. — Cours d'Hydrologie statistique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble.
- HUG (M.). — Mécanique des fluides appliquée. Cours de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Edition Eyrolles.
- LE BARBE (L.), 1982. — Analyse des problèmes hydrologiques posés par les opérations d'épandage d'insecticides effectuées dans le cadre du programme de lutte contre l'onchocercose. Rapport de mission, ORSTOM Lomé, décembre 1982, 53 p.
- QUIVEY (M.C.), KEEFER (J.), 1974. — Simple method for predicting dispersion in streams. J. Environmental Engineering Division, ASCE.
- ROCHE (P.A.) et al., 1987. — Guide de prévisions des crues — Société Hydrotechnique de France et Ministère chargé de l'Environnement. 2 tomes, Paris.