

# **Relation entre prévisions saisonnières de pluie du modèle ARPEGE et volume de crue du fleuve Niger**

**Jean-Claude BADER<sup>1</sup>, Laurence CASENAVE<sup>2</sup> & Jean-Philippe PIEDELIÈVRE<sup>3</sup>**

*1 Institut de Recherche pour le Développement, BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5, France*

*[bader@mpl.ird.fr](mailto:bader@mpl.ird.fr)*

*2 Institut de Recherche pour le Développement, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France*

*laurence.casenave@alumni.enseiht.fr*

*3 Météo France, CNRM, 42 Avenue G. Coriolis, F-31057 Toulouse Cedex, France*

*jean-philippe.piedelievre@meteo.fr*

**Résumé** Le modèle ARPEGE.3 fournit fin juillet des prévisions saisonnières de pluie pour les mois de septembre et octobre sur 98 cellules de 300X300 km englobant l’Afrique de l’ouest. Ces prévisions sont soumises à une analyse en composantes principales sur 50 zones de forme, taille et position différentes. Sur chaque zone, des régressions multiples descendantes sont calculées sur la période 1979-1998 entre les huit premières composantes principales et le débit naturel de septembre-octobre du fleuve Niger à Koulikouro. Sur la majorité des zones, ces régressions sont significatives car leur coefficient de détermination a une probabilité faible d’être obtenu par hasard. Parmi les régressions à trois prévisionneurs, celle qui présente le meilleur calage ( $R^2=0.577$ ) permet de prévoir le débit à partir des prévisions pluviométriques d’une zone de 1200X1200 km centrée 1500 km au sud-est du bassin contrôlé par Koulikouro. Ce modèle à trois paramètres est validé assez correctement sur la période 1999-2006.

**Mots-clefs** Afrique de l'Ouest ; fleuve Niger ; prévision saisonnière ; modèle ARPEGE ; pluie ; débit ; mousson ; analyse en composantes principales

## **Relation between seasonal rain forecasts of the model ARPEGE and flood volume of the Niger river**

**Abstract** At the end of July, the model ARPEGE.3 gives seasonal rain forecasts for October and September on 98 cells of 300X300 km including West Africa. On 50 zones, which differ in form, size or position, we make a principal component analysis on these forecasts. On each zone, multiple regression with backward selection of predictors are calculated over the period 1979-1998 between the first eight principal components and the natural discharge of September-October of the Niger river at Koulikouro. On most zones, these regressions are significant because their coefficient of determination has a weak probability to be obtained by chance. Among the regressions with three predictors, the best ( $R^2 = 0.577$ ) permits to predict the discharge starting from the rain forecasts of a 1200X1200 km zone, centred approximately 1500 km in the south-east of the basin controlled by Koulikouro. This model with three parameters is validated rather correctly over the period 1999-2006.

**Keywords** West Africa ; Niger river ; seasonal forecasting ; model ARPEGE ; rain ; discharge ; monsoon ; principal components analysis

## **CONTEXTE ET OBJECTIF**

### **Prévisions saisonnières de pluie**

Influençant beaucoup l'évolution du temps à l'échelle du globe, la température de surface des océans est un paramètre important des modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) utilisés pour la prévision météorologique. Son évolution lente et relativement

prévisible permet à ces modèles de produire des prévisions saisonnières à l'échéance de plusieurs mois pour la température ou les précipitations. Ces prévisions demeurent très imprécises car, pour de multiples raisons, il est impossible aux MCGA de représenter parfaitement toute la complexité des phénomènes physiques mis en jeu (Räisänen, 2007).

A l'heure actuelle, c'est pour la zone intertropicale que sont obtenues les meilleures prévisions saisonnières de pluie (Déqué, 2003). Mais même sur cette zone, les valeurs prévues sont faiblement corrélées avec les valeurs observées et leur utilisation nécessite une adaptation statistique appropriée (Garric *et al.*, 2002 ; Doblas-Reyes *et al.*, 2006).

### **Remarques concernant l'« imprécision » des MCGA**

Certes, une part de la limitation des capacités de ces modèles à fournir des prévisions de qualité se trouve dans les approximations multiples (les équations, les valeurs numériques des données, etc) et on ne saurait dire que l'adaptation statistique peut pallier ce genre de défaut, sauf à postuler qu'elle agirait comme un filtre capable de capter le signal en nettoyant le bruit résultant des imprécisions de tous ordres.

Mais un autre aspect de la réalité de la prévision à longue échéance est celui des échelles spatiales et temporelles caractéristiques des phénomènes que ce type de modélisation souhaite représenter. La description du climat à l'échelle saisonnière correspond aux échelles dites supra-synoptiques, largement supérieures aux échelles des perturbations atmosphériques qui sont celles de la prévision à courte et à moyenne échéance (jusqu'à 10 jours). Dans le cadre de la prévision saisonnière on ne peut traiter directement que des phénomènes de grande échelle, dans l'espace mais aussi dans le temps. Les prévisions sont des caractéristiques moyennes pour un intervalle de temps de plusieurs mois de dispositions climatiques concernant, par exemple, la position de la zone de convergence intertropicale, la distribution des températures de la surface de l'océan Pacifique intertropical, ou de l'océan Indien, le régime de l'oscillation arctique, etc,

toutes sortes de situations dont les temps caractéristiques sont de l'ordre de grandeur des échéances à prévoir.

Les sorties des modèles, seraient-ils parfaits, ne pourraient donc être plus « précis » dans le détail et le rôle des adaptations statistiques sera de relier, par une référence au passé, les grandes échelles aux échelles locales, les seules qui sont pertinentes dans le traitement des activités socio-économiques. La démarche dite de « descente d'échelle » est un préalable indispensable à toute utilisation pratique des prévisions saisonnières. L'information brute produite en sortie de modèle ne peut être lue localement, la géographie des modèles et la géographie réelle sont très différentes et la lecture des résultats en points de grille n'a pas de sens sans un travail préalable d'adaptation en descente d'échelle. Cette tâche essentielle aura alors pour but de sélectionner dans les champs de quantités prévues les signatures des mécanismes de la grande échelle significatifs d'une situation climatique particulière à l'échelle de temps d'une saison (ici 3 mois en relation avec les saisons des régions tempérées)

## **Objectif de l'étude**

En adaptant les prévisions saisonnières de pluie établies par le MCGA ARPEGE de Météo-France, Bader *et al* (2006) parviennent à prévoir dès fin juillet le volume naturel de crue du fleuve Sénégal en septembre-octobre. Suite à ce résultat encourageant, qui a permis une prévision opérationnelle correcte de la faible crue de 2006 (1101 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> prévu ; 1239 observé), on vise ici à établir un modèle de prévision équivalent pour le fleuve Niger, dans l'optique d'une aide à la gestion pour les barrages de Sélingué (existant) et Fomi (en projet). Ce fleuve est le plus long cours d'eau d'Afrique de l'Ouest et son bassin amont, adjacent à celui du Sénégal, produit comme ce dernier une crue annuelle alimentée par les pluies de mousson et centrée sur le mois de septembre.

## **DONNÉES**

### **Index d'anomalie pluviométrique issus du modèle ARPEGE.3**

L'étude exploite des prévisions saisonnières de pluie produites à la fin du mois de juillet de 1979 à 2006 pour les mois de septembre et octobre, sur un ensemble de 98 cellules de 300X300 km couvrant l'Afrique de l'Ouest entre les latitudes  $-2.79$  à  $16.74^\circ$  et les longitudes  $-21.09$  à  $18.28^\circ$  (Fig. 1). Hormis l'ajout de l'année 2006, ces prévisions produites de façon opérationnelle sont identiques à celles qui avaient été utilisées pour le fleuve Sénégal et se présentent pour chaque cellule sous forme d'index mensuel de pluviométrie centrée réduite (période de référence : 1979-2000) . Elles correspondent à la moyenne de 9 prévisions produites à partir de conditions initiales décalées de 24 heures, par le modèle ARPEGE.3 fonctionnant en mode forcé (i.e. sans rétroaction de l'atmosphère vers la surface) par des températures de surface d'océan dont l'évolution est prévue par un schéma statistique autorégressif d'ordre 2.

### **Débit moyen naturel de septembre-octobre du Niger à Koulikouro**

Observée depuis 1907, Koulikouro est la station hydrométrique de référence du haut bassin du Niger. Depuis le début des années 80, son débit est influencé par le barrage hydroélectrique de Sélingué (fig. 1) et ne représente plus tout à fait le régime naturel.

Les données disponibles pour Sélingué (débit entrant dans le réservoir, débit lâché et niveau de plan d'eau), bien qu'incomplètes sur la période 1979-2006, permettent d'évaluer la relation hauteur-volume du réservoir et d'en déduire, pour 22 années, l'ordre de grandeur du volume stocké entre le 1<sup>er</sup> septembre et le 31 octobre. Il suffit d'ajouter ce volume à l'écoulement observé à Koulikouro en septembre et octobre pour estimer le volume naturel de crue du fleuve sur ces deux mois. On constate ainsi que le volume observé à Koulikouro représente, selon les années, entre 92 et 100 % du volume naturel (fig. 2). Ces deux volumes sont de plus très bien corrélés ( $R^2 = 0.995$ ). Le barrage de Sélingué a donc un impact assez

faible et régulier sur le volume de crue du fleuve à Koulikouro. En première approximation, nous considérerons donc le débit moyen  $Q_0$  observé à cette station en septembre-octobre comme représentatif du régime naturel. Il présente, sur la période 1979-1998, une moyenne de  $2990 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  et un écart type de  $881 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Malgré la proximité des bassins versants, le débit naturel de septembre-octobre du Niger à Koulikouro et celui du Sénégal à Bakel montrent (fig. 2) une évolution assez différente et faiblement corrélée ( $R^2 = 0.396$ ) sur la période 1979-2006.

## **MÉTHODE**

La méthode suivie est très proche de celle qui avait été utilisée pour le fleuve Sénégal.

### **Regroupement des index par zones**

Dans un premier temps, les index d'anomalies pluviométriques prévus par ARPEGE sont regroupés sur 50 zones réparties en six types différents (fig. 1):

- Zone 1: ensemble du cadre, soit 1 zone de 98 cellules (7 X 14)
- Zones 2: carrés de 4 X 4 centrés vers le haut du cadre, soit 11 zones de 16 cellules
- Zones 3: rectangles de 6 X 5 centrés vers le haut du cadre, soit 9 zones de 30 cellules
- Zones 4: rectangles de 5 X 6 centrés vers le haut du cadre, soit 10 zones de 30 cellules
- Zones 5: carrés de 4 X 4 centrés vers le bas du cadre, soit 11 zones de 16 cellules
- Zones 6: carrés de 7 X 7, soit 8 zones de 49 cellules

### **Analyse en composantes principales sur les index et régressions multiples avec le débit**

Sur chacune des 50 zones étudiées, une analyse en composantes principales (ACP) est effectuée pour la période 1979-1998 sur les index d'anomalie pluviométrique de septembre et d'octobre prévus fin juillet, dont l'effectif est donc le double de celui des cellules de la zone. L'ACP

permet de substituer aux variables de base centrées réduites (les index), de nouvelles variables indépendantes deux à deux (les composantes principales) obtenues par combinaisons linéaires des variables de base. Les huit premières composantes principales  $V_1$  à  $V_8$ , déterminées par l'ACP et classées par variance décroissante, sont utilisées comme prévisseurs pour la recherche d'une relation par corrélation linéaire multiple avec le débit moyen naturel  $Q_0$  sur la période 1979-1998. Il serait toutefois illusoire de conserver huit prévisseurs pour caler une relation sur un échantillon aussi réduit (20 années), car celle-ci risquerait de ne pas être stable. On applique donc la méthode de régression descendante (Saporta, 2006) qui consiste à éliminer à chaque étape le prévisseur le moins significatif pour  $Q_0$ , pour ne conserver au final que trois prévisseurs. Ces derniers, notés  $mV_1$ ,  $mV_2$  et  $mV_3$  sont, parmi les composantes principales  $V_1$  à  $V_8$  de la zone, celles qui s'avèrent les plus explicatives vis-à-vis de  $Q_0$  sur la période 1979-1998.

### **Evaluation du degré de signification des régressions établies**

Pour savoir si les régressions établies entre les index et le débit  $Q_0$  sont significatives, on évalue la probabilité pour que leurs coefficients de détermination  $R^2$  puisse être obtenu par hasard. Ainsi, trente séries aléatoires notées  $Q_1$  à  $Q_{30}$  sont d'abord générées en recombinaison au hasard les débits  $Q_0$  de la période 1979-1998. Ensuite, toutes les régressions descendantes précédemment calculées entre les composantes principales d'index  $V_1$  à  $V_8$  de chaque zone analysée et le débit  $Q_0$  sont recalculées à trente reprises, en remplaçant successivement la série  $Q_0$  par  $Q_1$  à  $Q_{30}$ . Pour chaque zone et chaque débit aléatoire, les meilleures composantes principales sélectionnées sont donc bien celles qui, parmi  $V_1$  à  $V_8$ , sont les plus prédictives pour la série aléatoire analysée. Pour chaque zone, on compare enfin les coefficients de détermination des modèles calés pour le débit  $Q_0$  avec ceux des modèles de même nombre de paramètres, calés pour les différentes séries aléatoires. Cette comparaison se base sur la proportion  $P$ , comprise entre 0 et 1, de modèles présentant pour des séries aléatoires un  $R^2$  inférieur à la valeur obtenue pour la série réelle  $Q_0$ . Cette proportion indique

approximativement la probabilité pour que le coefficient de détermination du modèle de prévision de  $Q_0$  ne soit pas le fruit du simple hasard.

### **Sélection du meilleur modèle et test sur une période de validation**

Sur chaque zone analysée, le modèle à trois paramètres déterminé par régression descendante permet de relier le débit  $Q_0$  aux index d'ARPEGE, en utilisant comme prévisseurs leurs trois composantes principales  $mV_1$  à  $mV_3$ , qui sont les plus prédictives parmi les huit premières  $V_1$  à  $V_8$  issues de l'ACP. Parmi les 50 modèles obtenus, on retient celui qui présente le plus fort coefficient de détermination. Ce modèle est ensuite testé sur la période 1999-2006, non utilisée pour le calage.

## **RÉSULTATS**

### **Existence d'une relation non fortuite entre index pluviométriques et débit**

Que les prévisseurs utilisés soient les huit premières composantes principales d'index  $V_1$  à  $V_8$  (fig. 3) ou les trois meilleures  $mV_1$  à  $mV_3$  (fig. 3 et fig. 4) sélectionnées parmi celles-ci par régression descendante, le coefficient de détermination  $R^2$  des modèles de prévision du débit réel  $Q_0$  a, sur la plupart des 50 zones analysées, une probabilité  $P$  élevée et égale en moyenne à 0.8 de ne pas être dépassée avec une série de débit aléatoire. Des résultats similaires sont obtenus avec les cinq premières composantes principales  $V_1$  à  $V_5$  ou les cinq meilleures  $mV_1$  à  $mV_5$  sélectionnées parmi  $V_1$  à  $V_8$ . Enfin, la moyenne des  $R^2$  obtenus sur les 50 zones entre les composantes principales  $V_1$  à  $V_8$  (resp.  $mV_1$  à  $mV_3$ ,  $V_1$  à  $V_5$  et  $mV_1$  à  $mV_5$ ) et le débit  $Q_0$  n'est dépassée que deux (resp. deux, une et deux) fois sur 30 avec une série de débit aléatoire. Il est donc assez probable pour la plupart des zones analysées, que les relations établies entre les index et le débit réel sur la période 1979-1998 ne soient pas dues au hasard.



## Modèle de prévision retenu et test sur période de validation

Le coefficient de détermination  $R^2$  de la régression établie entre les 3 meilleures composantes principales d'index  $mV_1$  à  $mV_3$  de la zone G5 et la série  $Q_0$  de débit réel s'élève à 0.577 sur la période de calage 1979-1998. Pour les modèles à trois paramètres, c'est le meilleur résultat obtenu avec les débits réels sur l'ensemble des 50 zones analysées. Parmi ceux qui sont calés sur des débits aléatoires, la proportion dépassant cette valeur s'élève à 1 sur 15 pour la zone G5 et 1 sur 26 pour l'ensemble des zones. Le calage du modèle retenu a donc peu de chances d'être dû au hasard. Il utilise les composantes principales  $V_4$ ,  $V_6$  et  $V_1$ , dont la variance s'élève respectivement à 8, 4 et 45 % de la variance totale des index prévus sur la zone G5, pour prévoir ainsi le débit  $Q_0$  :

$$f(V_4, V_6, V_1) = 324 V_4 - 297 V_6 - 52.3 V_1 + 2990$$

Cette régression entre  $V_4$ ,  $V_6$ ,  $V_1$  et  $Q_0$  a un écart type résiduel de  $624 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  et ses résidus sont approximativement répartis suivant la loi de Gauss correspondante (fig. 5). La relation moyenne entre  $f(V_4, V_1, V_6)$  et  $Q_0$  peut donc être encadrée d'intervalles de confiance à 80 et 90%, écartés respectivement de 1.282 et 1.645 fois l'écart type résiduel de part et d'autre de la première bissectrice (fig. 6).

La comparaison des débits prévus par  $f(V_4, V_6, V_1)$  avec les débits réels  $Q_0$  sur la période 1999-2006 montre une validation acceptable du modèle (fig. 6 et 7). Certes, les résultats des années 2001 et 2003 sont assez médiocres puisque leurs erreurs de  $-1016$  et  $-1240 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  les situent en dehors des intervalles de confiance à 89.6 et 95.4 %. Mais ils sont loin d'être improbables, compte tenu de la durée de période de validation. En effet, la probabilité  $Pr$  pour qu'un échantillon de 8 individus présente au moins deux points en dehors de l'intervalle de confiance à 89.6%, dont au moins un point en dehors de l'intervalle à 95.4%, peut être estimée à environ une chance sur six, de la façon suivante :

$$Pr = (1-(0.954)^8) (1-(0.896)^7) = 0.168$$

On peut donc considérer que le modèle à trois paramètres calé sur la zone G5 entre 1979 et 1998 est validé sur la période 1999-2006.

### **Coefficients des index d'ARPEGE de la zone G5 donnant le débit $Q_0$**

En utilisant les coordonnées des vecteurs propres associés aux composantes principales  $V_4$ ,  $V_6$  et  $V_1$ , le modèle permet d'exprimer directement le débit par une combinaison linéaire des index, dont les coefficients sont donnés dans le tableau 1. Dans cette relation, le facteur constant (3037) est différent de la moyenne des débits  $Q_0$  sur la période 1979-1998 (2990) du fait que les index produits par ARPEGE sont centrés sur la période 1979-2000. Les coefficients des index de septembre varient de façon assez homogène suivant la latitude, avec des valeurs très élevées sur les cellules les plus septentrionales de la zone G5 (fig. 8). Les variations sont moins importantes et assez hétérogènes suivant la direction est-ouest (fig. 9). Pour octobre, la décroissance des coefficients est assez générale du sud-ouest vers le nord-ouest (fig. 8 et 9). Très schématiquement, le débit de septembre-octobre du Niger à Koulikouro est donc d'autant plus fort que la pluviométrie prévue par ARPEGE sur la zone G5 est : forte au nord et faible au sud en septembre ; forte au sud-ouest et faible au nord-est en octobre.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Comme celui du fleuve Sénégal, le débit de septembre-octobre du fleuve Niger à Koulikouro semble lié aux index pluviométriques prévus dès fin juillet par le modèle ARPEGE.3 pour les mois de septembre et octobre sur l'Afrique de l'Ouest.. Là encore, la liaison est significative avec les index de la plupart des zones élémentaires analysées, avec en moyenne 80% de chances d'obtenir un coefficient de détermination plus faible lorsque la série réelle de débit est remplacée par une série aléatoire.

Ce sont les index de la zone G5, centrée environ 1500 km au sud-est du bassin du Niger à Koulikouro, qui s'avèrent les plus prédictifs pour le débit par un modèle à trois paramètres utilisant leurs composantes principales de rangs 4, 6 et 1, représentatives de plus de 56% de leur variance totale. Ce modèle est calé sur la période 1979-1998 ( $R^2 = 0.577$ ) et validé de façon acceptable sur la période 1999-2006. Le coefficient de Nash caractérisant son ajustement s'élève à 0,58 sur la période de calage et 0,51 sur la période totale 1979-2006. Ces valeurs traduisent une performance certes bien inférieure à celle d'un modèle parfait, (Nash = 1) mais quand même bien supérieure à celle du modèle trivial qui consiste à prévoir systématiquement une valeur moyenne (Nash=0).

Même quand ils utilisent, comme dans l'expérience PROVOST (Brankovic *et al.*, 2000), une prévision idéalement parfaite des températures de surface d'océan (SST), les modèles de prévision saisonnière ne sont pas encore précis aux longues échéances du fait d'une représentation probablement imparfaite des lois physiques régissant la circulation générale de l'atmosphère. Leurs performances sont encore dégradées quand, pour la prévision opérationnelle, ils doivent utiliser en entrée des SST dont l'évolution à venir n'est évidemment pas connue de façon parfaite (Déqué, 2003). Jusqu'à présent, cette évolution était prévue dans ARPEGE par un schéma statistique autorégressif qui sera remplacé, dès 2008, par les résultats d'un modèle d'océan couplé à ARPEGE. Certains tests ont déjà montré une amélioration des performances du modèle "couplé" par rapport au modèle "non couplé" (Guérémy *et al.*, 2005). L'utilisation des prévisions saisonnières de pluie de cette future version opérationnelle d'ARPEGE devrait donc améliorer la prévision du débit moyen de crue de grands fleuves ouest-africains tels que le Sénégal et le Niger, moyennant de nouvelles adaptations statistiques.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bader, J.-C., Piedelievre, J.-P., Lamagat, J.-P. (2006) Prévision saisonnière du volume de crue du fleuve Sénégal : utilisation des résultats du modèle Arpege Climat. *Hydrological Sciences Journal* **51**(3), 406-417
- Brankovic, C., Palmer, T.N. (2000) Seasonal skill and predictability of ECMWF PROVOST ensembles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **126**, 2035-2067
- Déqué, M. (2003) La prévision numérique à l'échelle saisonnière : que sait-on faire et que peut-on espérer ? *La Météorologie* **41**, 20-29
- Doblas-Reyes, F.J., Hagedorn, R., Palmer, T.N. (2006) Developments in dynamical seasonal forecasting relevant to agricultural management. *Climate-Research* **33**(1), 19-26
- Garric, G., Douville, H., Déqué, M.. (2002) Prospects for improved seasonal predictions of monsoon precipitation over Sahel. *International Journal of Climatology* **22**(3), 331-345
- Guérémy, J.-F., Déqué, M., Braun, A., Piedelièvre, J.-P. (2005) Actual and potential skill of seasonal predictions using the CNRM contribution to DEMETER : coupled versus uncoupled model. *Tellus* **57A**, 308-319
- Räisänen, J. (2007) How reliable are climate models ? *Tellus* **59A**, 2-29
- Saporta, G. (2006) *Probabilités, analyse des données et statistiques*. Technip ed., Paris, France  
ISBN 2-7108-0814-5

## TABLEAUX

Tableau 1 : coefficients reliant le débit Qo aux index d'ARPEGE de la zone G5

latitude	cellule	longitude	septembre	octobre	cellule	longitude	septembre	octobre
-1.40	98	-2.81	-110.1	131.7	86	2.81	-45.5	36.1
1.40	84	-2.81	-93.0	29.2	72	2.81	-20.7	0.2
4.19	70	-2.81	-53.3	23.8	58	2.81	-165.5	-93.2
6.98	56	-2.81	130.5	119.5	44	2.81	99.4	-70.5
-1.40	85	0.00	-81.5	46.7	87	5.63	-27.2	30.9
1.40	71	0.00	-58.7	38.7	73	5.63	-23.7	-40.3
4.19	57	0.00	-121.9	-45.0	59	5.63	-121.9	-69.2
6.98	43	0.00	120.8	8.1	45	5.63	69.3	-39.9
constante (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )		3037						

# FIGURES

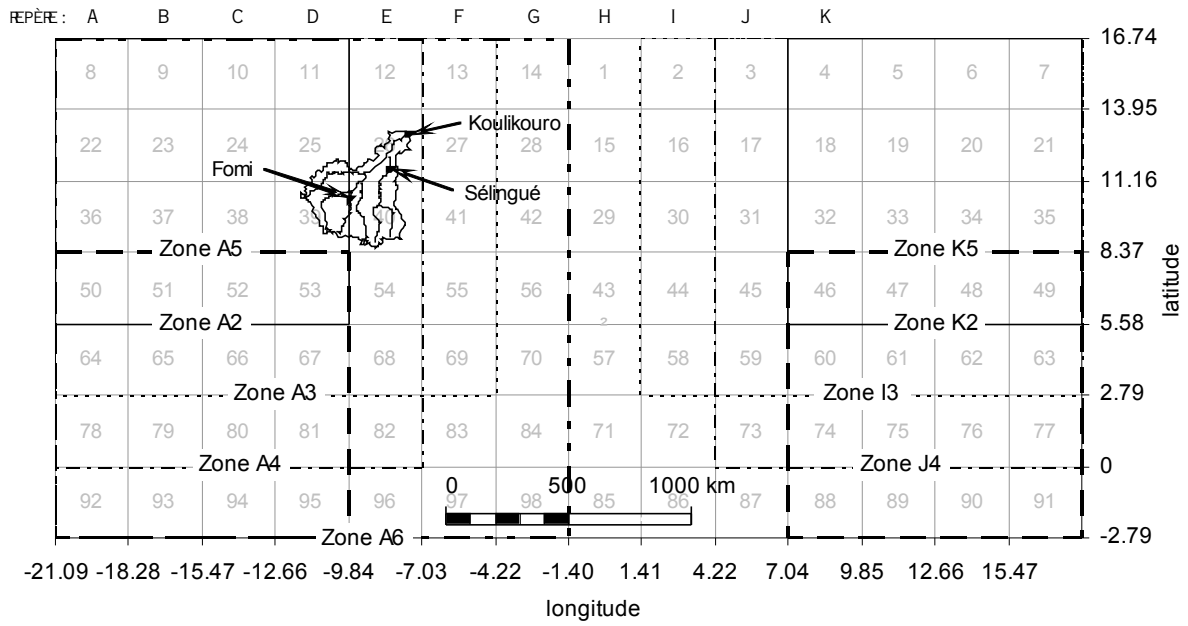
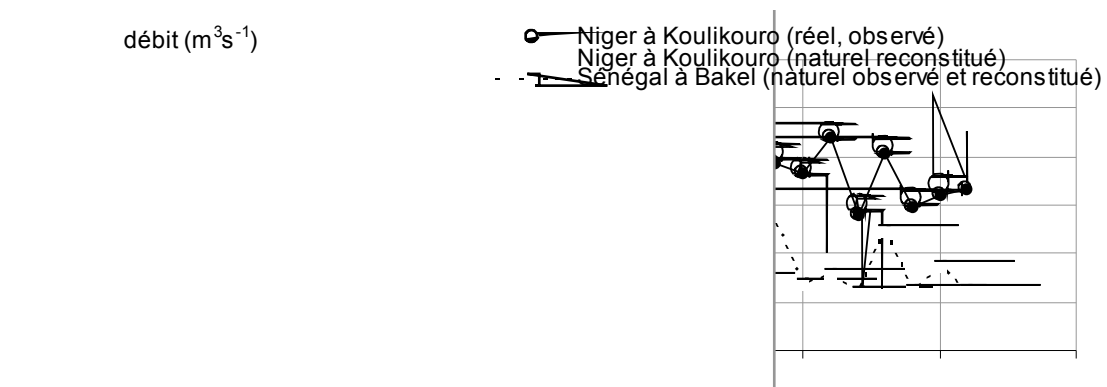


Figure 1 : carte du bassin du fleuve Niger à Koulikouro et maillage des résultats du modèle ARPEGE.3



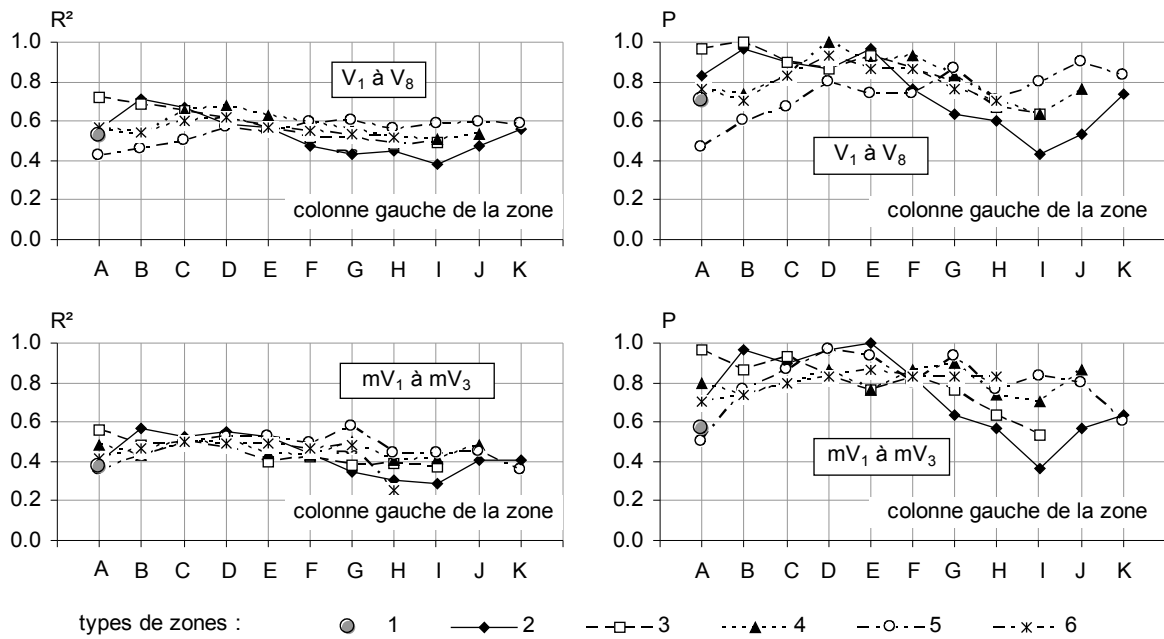


Figure 3 : coefficient de détermination  $R^2$  des régressions établies sur les 50 zones entre les composantes principales d'index  $V_1$  à  $V_8$  (ou  $mV_1$  à  $mV_3$ ) et le débit réel  $Q_0$  entre 1979 et 1998, et probabilité  $P$  pour que ce  $R^2$  ne soit pas dépassé avec une série aléatoire de débit

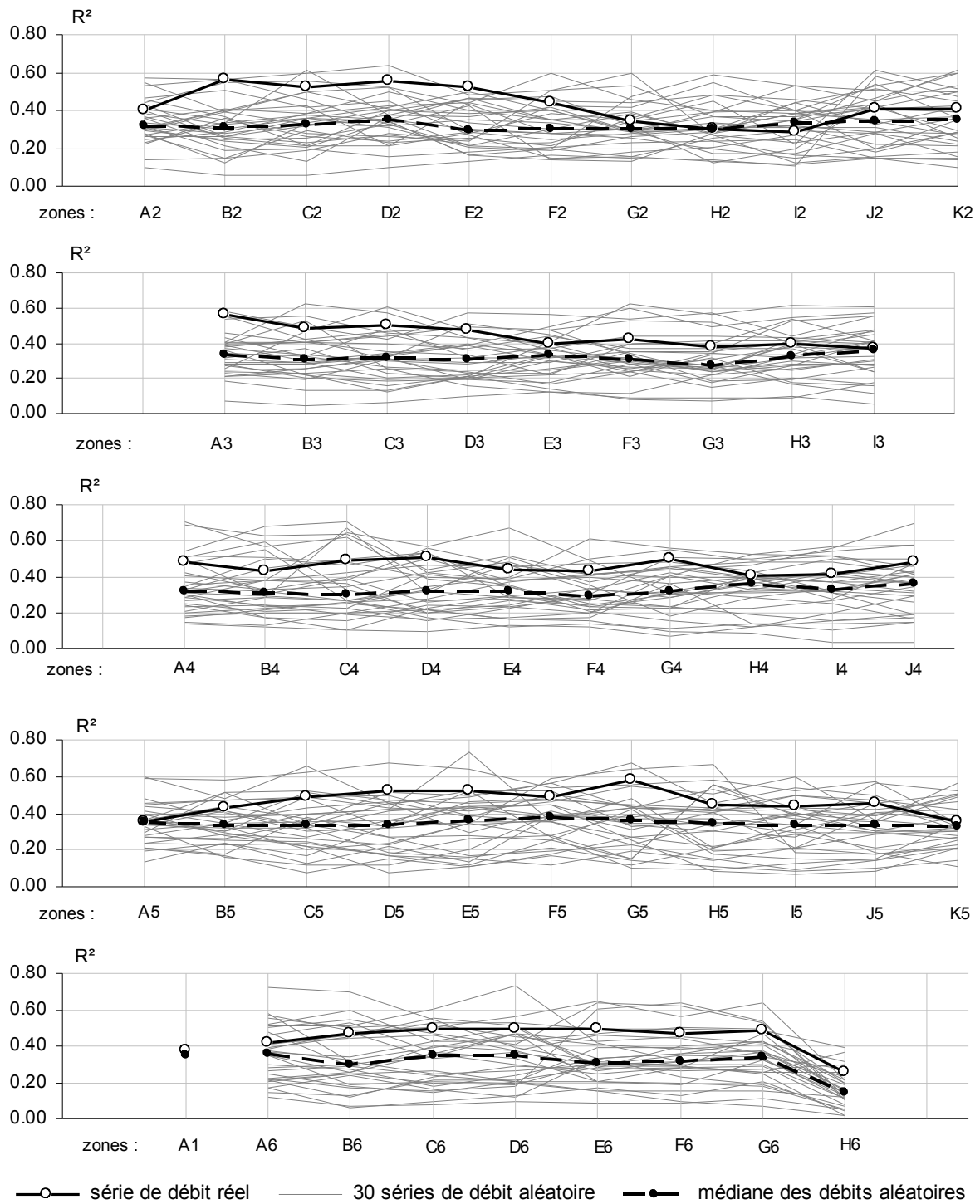


Figure 4 : coefficient de détermination  $R^2$  des régressions établies entre les meilleures composantes principales  $mV_1$  à  $mV_3$  sélectionnés parmi  $V_1$  à  $V_8$  et le débit, pour le débit réel  $Q_0$  et les débits aléatoires  $Q_1$  à  $Q_{30}$



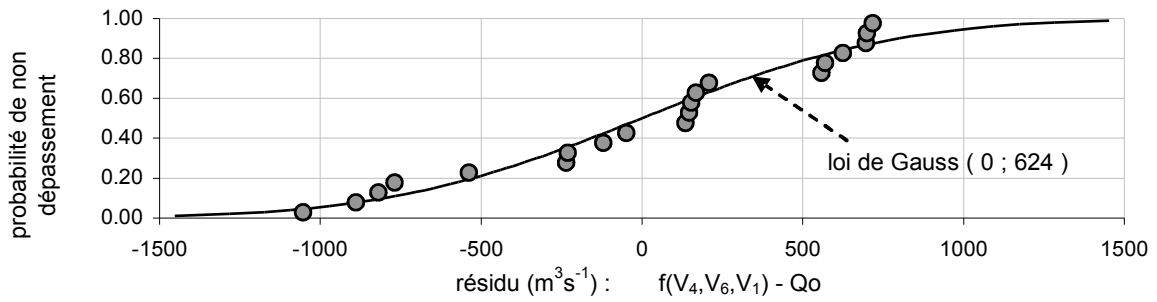


Figure 5 : Fonction de répartition des résidus de la régression entre les composantes principales  $V_4$ ,  $V_6$  et  $V_1$  d'index de la zone G5 et le débit observé  $Q_0$  sur la période 1979-1998

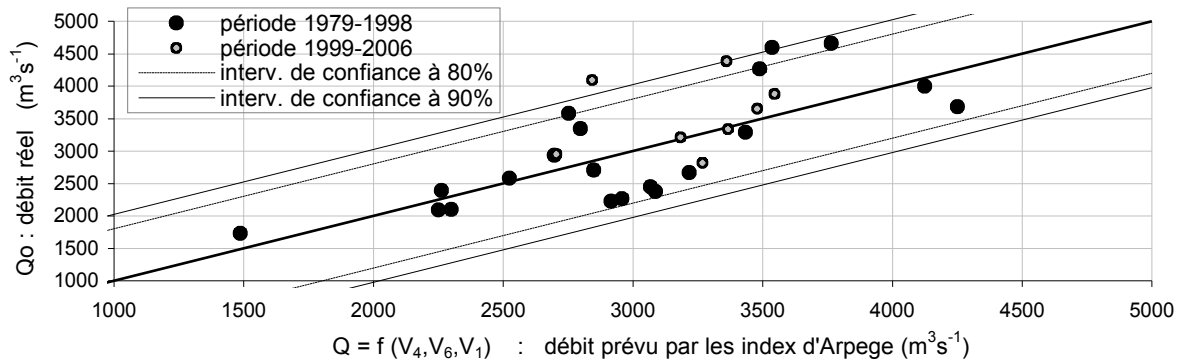


Figure 6 : comparaison du débit prévu à partir des index de la zone G5, avec le débit réel

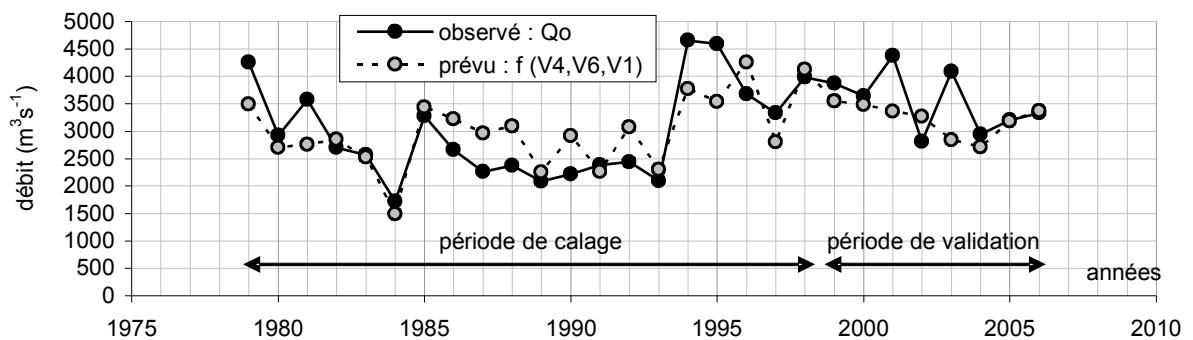


Figure 7 : variations du débit réel  $Q_0$  et du débit prévu à partir des index de la zone G5

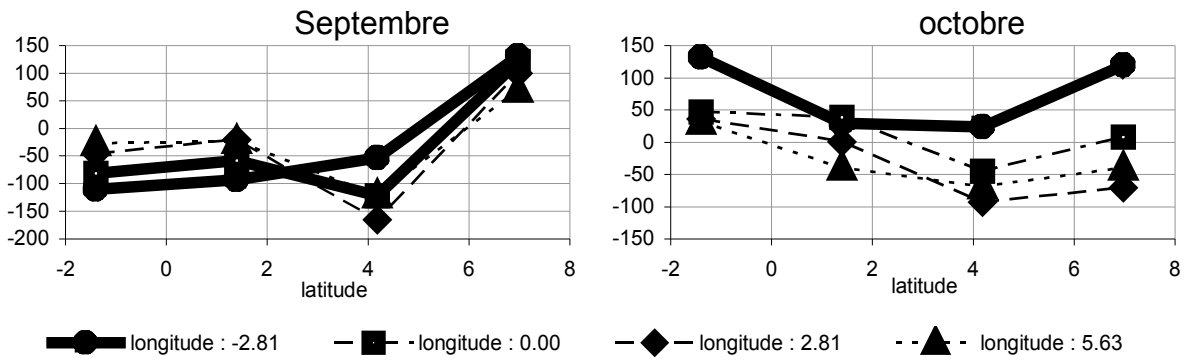


Figure 8 : variations nord-sud des coefficients reliant le débit  $Q_0$  du fleuve Niger aux index pluviométrique prévus par ARPEGE sur la zone G5

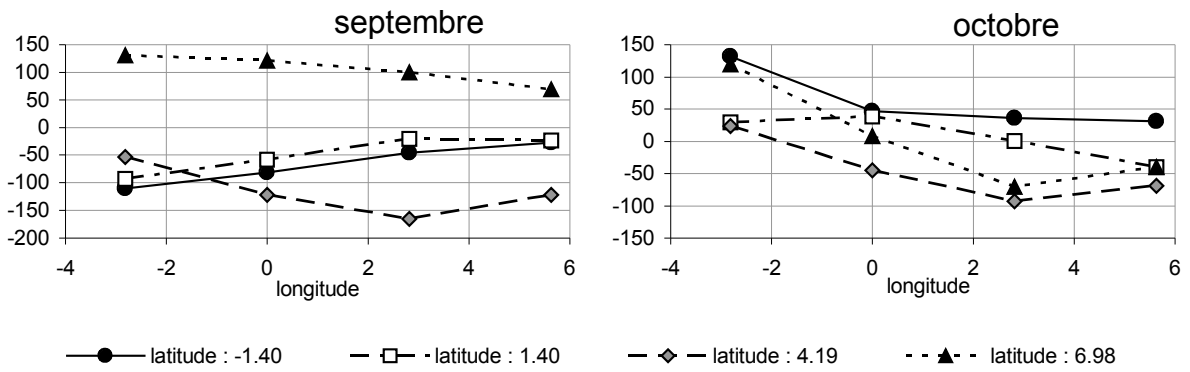


Figure 9 : variations est-ouest des coefficients reliant le débit  $Q_0$  du fleuve Niger aux index pluviométrique prévus par ARPEGE sur la zone G5